Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

На правах рукописи

Julif

Орлова Юлия Николаевна

КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЛЬДА ПРИ УДАРНЫХ И ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗКАХ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

> Научный руководитель доктор физико-математических наук Глазырин Виктор Парфирьевич

Оглавление

Введе	ение	4
1	ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ЛЬДА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ УДАРНОГО И ВЗРЫВНОГО	
	НАГРУЖЕНИЯ ЛЬДА	33
1.1	Математическое описание сжимаемых пористых упру- гопластических сред	33
1.2	Уравнение состояния для пористого твердого тела	35
1.3	Уравнение состояния льда, воды, продуктов детонации	37
1.4	Критерии разрушения	38
1.5	Начальные и граничные условия	39
1.6	Формы записей основных уравнений для осесимметрич-	
	ного случая	40
1.7	Численный метод расчета процессов ударного и взрыв- ного нагружения пьла	41
	 1.7.1 Уравнения для случая осесимметричной постановки 1.7.2 Метод расчета контактных границ. Алгоритм 	42
	скольжения	47
	1.7.3 Алгоритм построения свободной поверхности	48
	1.7.4 Алгоритм создания упорядоченной контактной границы	49
	1.7.5 Алгоритм эрозии расчетных элементов1.7.6 Алгоритм сглаживания контактной границы при больших леформациях	51 53
	177 Блок-схема расчета	58
18	Выволы по разделу	65
2	ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ	66
2.1	Задача о распаде разрыва (соударении двух цилиндров)	67
2.2	Задача о соударении стального цилиндра с жесткой стенкой	70
2.3	Задача о взрывном нагружении льда	75
2.4	Задача об ударе ледяного цилиндра по тонкой алюминиевой пла- стине	79
2.5	Физико-механические характеристики льда и других материа-	
	лов	81
2.6	Выводы по разделу	82
3	ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕДРЕНИЯ КОМПАКТНЫХ УДАРНИКОВ В ЛЕДЯНУЮ ПРЕГРАДУ	85
3.1	Расчет процесса внедрения цилиндрического ударника в лед	85
3.2	Расчет процесса внедрения сферического ударника в лед	95
3.3	Обсуждение результатов расчетов	103

3.4	Выводы по разделу	108
4	ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕДРЕНИЯ УДЛИНЕННЫХ УДАРНИКОВ С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ ГОЛОВНЫХ ЧАСТЕЙ В ПЕЛЯНУЮ ПРЕГРАЛУ	110
4.1	Расчет процесса внедрения ударника с оживальной головной ча- стью в лед	110
4.2	Расчет процесса внедрения ударника с конической головной ча- стью в лел.	118
4.3	Расчет процесса внедрения ударника с плоской головной частью в лел	125
4.4	Обсуждение результатов расчетов	132
4.5	Выводы по разделу	135
5.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УДАРНОГО И ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ	
	ЛЬДА	137
5.1	Экспериментальное исследование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках	137
	5.1.1 Эксперименты по внедрению сферического стального ударника в лед	138
	5.1.2 Эксперимент по взрывному нагружению речного льда	142
5.2	Исследование процесса внедрения крупно-габаритного ударника в лед	145 146
	5.2.1 Расчет процесса внедрения крупно-габаритного ударника в лед при низких скоростях	148
5.3	Исследование процесса взрывного нагружения льда на во- де	160
5.4	5.3.1 Расчет взрывного нагружения льда на воде Выводы по разделу	161 172
	Заключение	173
	Список используемой литературы и источников	177

Введение

Известно, что более 30% земной поверхности покрыто льдами. Основные запасы льда на Земле составляют около 30 млн. км^3 , и сосредоточены в полярных шапках (главным образом, в Антарктиде, где толщина слоя льда достигает 4 км). Значительная часть территории нашей страны покрыта льдами, поэтому интерес к изучению этого древнейшего природного материала в ближайшее время вряд ли будет угасать [1]. Несмотря на процессы глобального потепления ледовый «пояс» вокруг Антарктиды увеличивается со скоростью 2% в десятилетие, а в Арктике сокращается примерно на 5,3%. К таким данным пришли ученые из Королевского метеорологического института Нидерландов (KNMI) под руководством Р. Бинтанджа (R. Bintanja), проанализировав данные полевых и спутниковых наблюдений за последние два десятилетия. При этом площадь морских льдов за тот же период выросла на 200 тысяч км^2 .

Российская Федерация входит в пятерку ледовых стран, ведущих борьбу за контроль над запасами углеводородов и драгоценных металлов, которые находятся на континентальном шельфе. Проблема ледяных заторов возникает каждую весну с началом речной навигации. Ежегодно на реках европейской части России, в Сибирском и Дальневосточном Федеральных округах образуются ледяные заторы, длина которых может достигать 150 км. Зимой там с помощью льда укрепляют полотно зимних автотранспортных магистралей («зимников»). Единственным способом доставки грузов зимой в некоторые отдаленные регионы нашей страны являются ледовые переправы рек и озер.

Увеличение добычи природных ископаемых в районах вечной мерзлоты предполагает развитие инфраструктуры на Крайней Севере и в Заполярье: дорог, промышленных и гражданских строений, грузовых портов в акваториях замерзающих морей и новых гидротехнических сооружений. Для этого применяют различные демпферы, армируют ледяные поверхности стальными тросами и ребрами жесткости, забиваются специальные сваи. Новые эффективные методы упрочнения и армирования льда для создания льдогрунтовых композитов позволяют их использовать для возведения противофильтрационных элементов грунтовых платин и полноценных заменителей традиционных строительных материалов в северной строительно-климатической зоне. Традиционным строительным материалом в Заполярье является «ледобетон» и «ледопласт», полученные путем добавления гальки и древесной пульпы [2].

При проектировании дорог и транспортных узлов на севере-западе и северевостоке, а также других северных регионах нашей страны важную роль играет борьба с наледью, которая может образовываться в результате выхода на поверхность грунтовых вод. Площадь этого ледяного образования может достигать гигантских размеров вплоть до 10^6 м^2 . Во время Великой Отечественной войны по льду Ладожского озера к осажденному Ленинграду проходила автомобильная дорога протяженностью в 27 км (известная в истории как «Дорога жизни»). Известно, что современные надледные мосты позволяют выдерживать продвижение десятитонного автомобиля при толщине льда 10 см.

Поисковые научно-исследовательские работы, связанные с деформированием и разрушением льда, имеют приложение в военно-технической области. Отработка ракетного вооружения в ледяных пустынях Арктики является важнейшим фактором для повышения обороноспособности нашей страны. Согласно официальной версии тяжелая ледовая ситуация в Белом море зимой 2010 года стала причиной неготовности ракетного подводного крейсера «Юрий Долгорукий» произвести запуск баллистической межконтинентальной ракеты «Булава». Примерно в это же время американские ученые совместно с военно-морскими силами возобновили программу «SCICEX» (Science Ice Exercise), в рамках которой проводится сбор научных данных в районах Северного Ледовитого океана. Технические специалисты подводного флота будут собирать научные данные, используя оборудование, уже установленное на подводных лодках, во время переходов в Арктическом бассейне из Атлантического в Тихий океан и обратно [3].

Известно, что большинство астероидов состоят из каменистых обломков и льда, при этом вероятность столкновения с Землей в наше время только увеличивается. С целью изучения водяного льда на поверхности Луны космическое

агентство НАСА разработало лунную программу, для реализации которой в 2009 году были выведены в космос два космических аппарата LRO и LCROSS. В последствие один из аппаратов «врезался» в кратер «Кабеус» у южного полюса Луны, успев передать на Землю все необходимые данные. В России запланированы два проекта «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс», объектом исследования которых являются разбросанные скопления водяного льда. Такой лед лишен кристаллической структуры, он несколько напоминает стекло, а его плотность выше обычного [4].

Отметим, что первое техническое устройство, разрушающее лед было изобретено в России в петровскую эпоху. Русская зима в некоторых районах длится более 9 месяцев, а Северный Ледовитый океан, является кратчайшей дорогой из европейской части страны к богатствам Восточной Сибири и Дальнего Востока. Может быть, именно поэтому, первый ледокол был изобретен в Кронштадте М. Бритневым. В 1864 году его ледокол «Пайлот» значительно раньше других судов прошел из Кронштадта в Ораниенбаум, принеся своему владельцу немалый дополнительный доход. Затем чертежи судна были проданы гамбургским промышленникам, которые создали первый заграничный ледокол Eisbreher I. Технические решения, заложенные М. Бритневым, впоследствии были реализованы русским флотоводцем и океанологом адмиралом Макаровым при строительстве первого линейного ледокола «Ермак», сыгравшего ключевую роль в освоении Арктики [5].

Для исследования ледяной поверхности спутника Юпитера Европы, британские ученые разработали Зонд Penetrator массой 20 кг и размерами с артиллерийский снаряд. Ученые предполагают, что под слоем льда находится океан жидкой воды. На специальном стенде при скорости 340 м/с зонд взаимодействовал с 10-ти тонным ледяным массивом. По словам инженеров, испытания прошли успешно, внутреннее оборудование зонда не было повреждено в результате экстремальных нагрузок. Специальное оборудование зонда необходимо для изучения глубинных образов льда, которые защищены от действия космического излучения и в неко-

торых случаях могут содержать жидкую воду. Зонд Penerator был разработан в ходе подготовки к британской лунной миссии MoonLITE [6].

Из вышесказанного следует, что для развития некоторых отечественных отраслей, необходимо подробно изучать свойства пресноводного и морского льда, который является поликристаллическим телом и не имеет стабильных физикомеханических характеристик. Современная наука объясняет данный факт особенностями его молекулярного строения, структурой, большим разнообразием размеров зерен, их хаотическим расположением, наличием различных включений и т.д. Физические свойства льда также зависят от температуры воздуха, возраста льда, давления.

В последние годы начинают развиваться новые важные области знаний – физика и механика льда. Известно, что лед обладает анизотропией физических свойств, является пористым и прочным, пластичным материалом, а его деформирование сопровождается фазовыми переходами. Причем с точки зрения разрушения, лед вообще может не иметь аналогов. Проблемы прочности и разрушения таких тел только начинают разрабатываться, поэтому картина разрушения льда в некоторых аспектах остается неясной [7].

Пионерами-исследователями льда, работы которых сейчас являются библиографической редкостью, считаются Рейд, Вяло, Блюмке, Тироле, Кох, Вегенер, Мальгрем, Нансен, Вейпрехт, В.В. Лавров др. Результаты их оригинальных исследований до сих пор создают поле деятельности для большинства последователей, речь о которых пойдет ниже.

В первой половине прошлого столетия ученые полагали, что свойства льда аналогичны свойствам жидкости с очень высокой, но постоянной вязкостью, а во второй половине, что лед твердое поликристаллическое тело и деформируется подобно некоторым металлам. Впервые полиморфизм льда был обнаружен Г. Тамманом в 1900 г. и подробно изучен П. Бриджеменом в 1912 г. Известно, что при температуре от -3 до -40 °C лед ведет себя как вполне упругое тело, которое

подчиняется закону Гука, если приложенное напряжение не превышает определенного значения и продолжительность его воздействия достаточно коротка.

По последним данным лёд классифицируется на 16 структурных модификаций. Среди них есть и кристаллические (их большинство) и аморфные модификации, они отличаются друг от друга взаимным расположением молекул воды и свойствами. Все модификации, кроме привычного нам льда, образуются при очень низких температурах и высоких давлениях, когда углы водородных связей в молекуле воды изменяются и образуются системы, отличные от гексагональной. Эти условия близки к космическим и практически не встречаются на Земле. Научным руководителем проекта Малколмом Гутри с помощью сложных экспериментов установлено, как ведет себя лед под сверхвысоким давлением (>10 ГПа). Работы были проведены в Окриджской национальной лаборатории в Теннесси в 2006 году. Были найдены признаки перехода льда в суперионную фазу промежуточное состояние между льдом и водой, при которой ионы кислорода образуют кристаллическую решетку, а ионы водорода подвижны. Это открывает новые горизонты в понимании того, что происходит с водой и льдом в условиях космоса [8].

Ежегодно по «ледовой» тематике выходит более 1400 статей (данные Всемирной сети Интернет), но количество научно-исследовательских работ, посвященных детальному изучению процессов его деформирования и разрушения при динамическом нагружении крайне невелико. В 2004 г. в Санкт-Петербурге проходил XVII Международный симпозиум по льду под эгидой Международной ассоциации по гидротехнике и гидравлическим исследованиям (МАГИ) и РАО «ЕЭС России». Наиболее насыщенными были заседания, рассматривавшие результаты исследований механических свойств льда, его силового воздействия на различные виды гидротехнических сооружений и нефтедобывающие платформы, где были представлены разработки специалистов из Финляндии, США, Норвегии, Китая, Японии и России. Активность российских исследователей была высоко оценена зарубежными специалистами, в частности представителями Ледового комитета МАГИ и научного комитета симпозиума.

В 1982 году в Германии организована международная лаборатория «Ice Research Laboratory» для исследования микроструктуры и механических свойств льда [9]. Сегодня IRL – это признанный уникальный мировой научный центр, цель которого заключается в углублении знаний в области физики и механики льда, а также воспитании нового поколения ученых-полярников. Директор центра - ученый с мировым именем профессор Е. Шульсон. Членами его группы являются исследователи, работы которых высоко котируются в нашей стране и за рубежом. Отметим, что «ледовые» исследования спонсируются в настоящее время Army Research Office, National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), National Science Foundation, Office of Naval Research, а также многими частными фирмами. Анализ исследовательской деятельности IRL определил два исследовательских проекта из тринадцати. Первый проект посвящен экспериментальному изучению физических свойств льда под нагрузкой, а второй - измерению механических свойств ледяных спутников. Текущих исследовательских проектов по изучению поведения льда при высокоскоростном деформировании обнаружено не было. Следует отметить, что аналогичных лабораторий в России в настоящее время нет.

Наиболее известной Международной научной конференцией по ледовым проблемам является конференция «ISOPE», организованная международным сообществом морских и полярных инженеров [11]. Председателем организационного комитета является профессор В.Чанг (США). Мероприятие привлекает ученыхисследователей со всего мира. Каждый раз в конференции принимает участие более 1000 исследователей. В программный комитет входят ученые из 50 стран, в том числе и нашей страны. Международным сообществом морских и полярных инженеров было проведено около 50 различных научных мероприятий. Работа конференции проходит по 155 секциям, две из которых очень близко относятся к теме диссертационной работы. В секциях обсуждаются проблемы механики льда и его разрушения, а также численное моделирование взаимодействия льда с другими арктическими материалами. В обзорной части диссертационной работы будут упомянуты наиболее интересные.

В отечественном научном сообществе одним из самых значимых мероприятий в области механики является Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, который проходит каждые четыре года. В работе Съезда традиционно принимают участие ведущие отечественные ученые-исследователи, освещающие наиболее актуальные и важные проблемы современной механики. Анализ исследовательских работ предпоследнего Съезда, позволил выделить всего лишь одну работу [11]. На Х Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики таких работ было заявлено не более десяти.

Активность отечественных ученых в области физики и механики льда была оценена на Всероссийской научной конференции «Полярная механика», которая прошла в 2012 году в ИГ им. М.А. Лаврентьева под эгидой СО РАН. В рамках четырех секций были 60 докладов, которые определили наиболее приоритетные научные и инженерные направления исследования современной физики и механики льда в нашей стране. Многие работы посвящены вопросам экологии, модификации корпусов ледоколов, созданию изо льда композиционных материалов повышенной прочности, мониторингу естественных динамических процессов в морских льдах и т.д. Интерес представляют экспериментальные данные о процессе внедрения металлических сфер большого диаметра, а также компактных и удлиненных ударников при различных начальных скоростях. Значительная часть работ поддержена различными фондами, имеются совместные научноисследовательские проекты с иностранцами.

В ближайшие несколько лет правительство РФ планирует вплотную заняться развитием Арктической зоны [12]. Речь идет о воссоздании новой транспортной инфраструктуры, реализации масштабных программ по добычи природных ископаемых, наращивания военного присутствия. Создается специальный госорган, курирующий все аспекты национальной безопасности нашей страны на Севере. Огромные запасы топливно-энергетических ресурсов, должны активизировать

развитие железнодорожной структуры, авиалиний, новых морских коридоров. Обеспечивать безопасность данных проектов будет Арктическая группировка войск, состоящая из 12 тысяч солдат и офицеров. Безусловно, это активизирует научные мероприятия по «ледовой» тематике во всем мире.

Анализ научно-технической литературы указывает на то, что на конец 2014 года исследованием свойств льда под нагрузкой занимаются различные коллективы как отечественных, так и зарубежных ученых в ведущих мировых научных центрах. В России следует отметить перспективные научные группы из НИИ Арктики и Антарктики, ЦНИИ им. А.Н. Крылова, (Санкт-Петербург), МГТУ им. Н.Э. Баумана, Институт проблем механики РАН, Институт географии РАН, Московский государственный открытый университет (Москва), НИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского (Н.Новгород), РФЯЦ ВНИИЭФ (Саров), РФЯЦ ВНИИТФ (Снежинск), ИТПМ СО РАН, ИГ им. М.А. Лаврентьева, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта (Новосибирск), ТГУ им. Г.Р. Державина (Тамбов), НИ ТПУ (Томск), КГТУ (Комсомольск-на-Амуре) и т.д.

Отечественные исследования свойств льда под нагрузкой были проведены следующими учеными, в том числе: В.П. Афанасьевым [14], Е.М. Беловицкий [15], В.В. Богородским [23], В.М. Браговым [28], В.П. Гаврило [23], А.В. Герасимовым [26], Р.В. Гольдштейном [25], В.П. Епифановым [15], А.Д. Дучковым [16], В.Е. Истоминым [17], В.М. Козиным [17], К.Н. Коржавиным [19], А.В. Кочетковым [22], Г.Н. Нигметовым [20], В.А. Могилевым [21], С.А. Новиковым [22], С.В. Ладовым, В.И. Селиверстовым [24], Н.М. Осипенко [25], В.Ф. Толкачевым [29], А.А. Шибковым [27] и др.

За рубежом поисковые научные исследования по изучению прочностных свойств льда при динамических нагрузках проводятся в следующих научных центрах: 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 Catalunia (Испания), Indian Institute of Science (Индия) и т.д.

Анализ зарубежной научно-технической литературы указывает на то, что исследованиями свойств льда сейчас проводятся следующими учеными: Т. Sain, R. Narasimhan [31], R. Duddu, H. Waisman [32], Wells I. Jordaan A. Derradji-Aouat [33], K. S. Carney [34], D. J. Benson, P. DuBois, R. Lee [34], J. A. Sherburn, M. F. Horstemeyer [35], R.G. Kraus, S.T. Stewart, A. Seifter, A.W. Obst [36], M. Matbou Riahi, D. Marceau, C. Laforte, J. Perron [37], M. Kermani, M. Farzaneh, R. Gagnon [50], Ada H.V. Repetto-Llamazares, Knut V. Høyland, E. Kim [39], M. L. Rudolph, M. Manga [39], J. Dong, Z. Li, P. Lu, Q. Jia, G. Wang, G. Li [40], M. Yasui, M. Arakawa [41], A. Combescure [43], Y. Chuzel-Marmot, J. Fabis [42], A.C. Palmer, J.P. Dempsey, D.M. Masterson [43], T. Theile, H. Loewe, T.C. Theile, M. Schneebeli [44], G. J. Appleby-Thomas, P. J. Hazell, G. Dahini [45], H. Park, H. Kim [46], R. Ritch, R. Frederking, M. Johnston, R. Browne, Freeman R. [47], Zhenhui Liu, J. Amdahl, S. Loset [48], L.E. Asp, R. Juntikka [51] и др.

Значительная часть отечественных научно-исследовательских и опытноконструкторских работ по изучению прочностных свойств льда ориентированы на создание эффективных транспортных систем для безопасного и бесперебойного вывоза углеводородов из районов Крайнего Севера и Дальнего Востока, а также транзитного плавания в Северном Ледовитом океане. Из чего следует, что проектирование ледоколов, ледокольных судов и инженерных сооружений различного класса и назначения в настоящее время является крайне важным. Процесс проектирования является деликатной сферой инженерной деятельности требующей всесторонних знаний, в том числе и прочностных свойств льда.

Первые исследования ледовой прочности судов проведены в ААНИИ в середине прошлого века. Также в нашей стране впервые были построены ледовые бассейны, подтолкнувшие другие страны к широкомасштабным ледовым исследованиям (сейчас в мире насчитывается 30 ледовых бассейнов, два из которых в РФ). В 1967 г. опубликована монография [52], в которой обобщен современный опыт теоретических и экспериментальных исследований ледовой прочности судов. Со временем исследования получили развитие в других странах, однако отмеченная монография так и осталась единственным крупным обобщением результатов исследований по этой проблеме [53].

ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» является в нашей стране основным разработчиком и проектантом ледовых движителей всех типов, как для отечественных, так и зарубежных заказчиков, обладателем патентов и многих инновационных решений. Разработки организации в этой области пользуются большим спросом, а перспективы отечественных разработок опасений не вызывают. Последняя разработка — это ледокол принципиально нового архитектурного типа, способный прорубать канал более 50-ти метров шириной. Предложенный ледокол представляет собой четыре ледокольных корпуса, установленный на единой платформе. Новое техническое решение было сформулировано на основании анализа экспериментальных данных модельных экспериментов в опытном ледовом бассейне и многочисленных теоретических расчетов [54].

Развитие отдельных территорий требует создания новых композиционных материалов изо льда, способных функционировать в северной строительноклиматической зоне. Некоторые работы посвящены данной научно-технической проблеме [55]. В данном случае лед может быть единственным строительным материалом. При помощи послойного намораживания получают «технический лед», который усиливается песком, гравием, стекловолокном И древесноволокнистыми материалами (песколед, ледобетон, пенолед, дереволед). Успешно применяют на практике ледяные мосты и причалы, ледяные дорогизимники и платформы острова для добычи на шельфах в северных акваториях, взлетно-посадочные полосы. В Томской области действуют более 100 ледовых переправ. Для увеличения прочности при помощи напыления был создан

малозернистый, пористый лед. Экспериментально доказано, что ледяной монолит будет особенно прочным, если его получить при температуре ниже –40С°, т.к. между кристалликами льда образуются тонкие аморфные прослойки. В Якутском госуниверситете добились успеха, вмораживая в лед 5–10-миллиметровые шарики из полиэтилена. Такой лед выдерживает большие нагрузки, но пока в лабораторных условиях.

Интересным представляются работы отечественных авторов [29], в которых изучено поведение пресноводного льда при действии компактных и удлиненных ударников. В процессе эксперимента было установлено, что процесс внедрения сопровождается значительным по объему отколом лицевой поверхности. Была определена работа вытеснения единицы объема при глубоком проникании в лед недеформируемого ударника. Экспериментально установлено, что при скоростях до 100 м/с площадь поперечного сечения ударника совпадает с площадью поперечного сечения цилиндрического кратера. Выявлено, что с понижением температуры работа вытеснения единицы объема уменьшается, что приводит к увеличению глубины проникания стрежня в лед.

Проблемам механики разрушения льда и некоторым ее приложениям посвящена следующая работа [56]. Рассмотрен процесс разрушения льда на большой площади контакта в рамках гипотезы о существовании квазирегулярной структуры разрушения области контакта в режиме, подобном движению трещины. Характер режима движения трещины определяется условиями эффективной перемещениями И выноса продуктов разрушения как вязкопластической среды из зоны контакта. Предложена модель инициирования тороса в результате формирования и развития трещиноподобного объекта с перехлестывающимися вследствие локального изгиба берегами. Введена характеристика сопротивляемости льда торошению «торосостойкость» как величина критического коэффициента интенсивности сжатия и приведена классификация крупномасштабных структур ледяного покрова. Практическое применение данной работы заключается в выборе оптимальных траекторий движения ледокола с учетом контроля полей напряжений в ледяном покрове.

Исследованы некоторые механизмы разрушения льда при воздействии когерентного электромагнитного излучения для экологически чистого способа бурения льда, размещения датчиков контроля и состояния льда на различных глубинах [57]. В физического процессе эксперимента синхронно регистрировались сигналы акустической эмиссии в определенном диапазоне частот. Кинетика протекания актов разрушения льда была зафиксирована фотовидео регистрацией процесса, а также исследована морфология процесса разрушения. Несколько ранее этими же авторами исследовалось влияние анизотропии на реологические свойства пресноводного льда с трансверсальноизотропной структурой в условиях сложного напряженного состояния и получение соответствующих деформационных кривых.

Интересной представляется работа, в которой исследуются физические процессы, протекающие в морском поликристаллическом льде при внедрении твердого тела [58]. В работе подтверждена ранее выдвинутая гипотеза о том, что минимальное необходимое количество упругой энергии, высвобождающейся вследствие хрупкого разрушения и приходящейся на единицу объема льда при постоянных параметрах его физического состояния, является постоянной величиной. Для этой цели рассчитывалась удельная энергия механического разрушения льда, которая была получена путем проведения натурных экспериментов по динамическому внедрению металлических сфер большого диаметра в ледяной массив. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных полностью подтвердило гипотезу о циклическом разрушении массива льда в зоне контакта «ударник – лед».

Большое количество отечественных работ посвящено расчету ледовых нагрузок на вертикальные опоры. Следует отметить, что в некоторых странах, например США и Канада, отечественные нормативные документы имеют рекомендательный характер. В нормативных документах (СНиП 2.06.04-82, API, 1995) нагрузка определяется по формулам, разработка которых произведена на основе метода предложенного К.Н. Коржавиным [59]. В соответствии с методом нагрузка на сооружение определяется путем умножения прочностной характери-

стики льда на параметры, характеризующие как сооружение, так и ледяное поле. Однако, метод не учитывает пространственные неоднородности ледяного покрова, т.к. в настоящее время выполнено небольшое количество исследований по данной теме. В ААНИИ разработана методика по определению прочности льда на сжатия с учетом масштабного эффекта, что является шагом вперед к решению задач о ледовых нагрузках.

В работе [60] для детального изучения процессов разрушения льда выделены три основных способа его разрушения, среди которых локальное разрушение, разрушение льда на участке, размеры которого много больше, чем его толщина и разрушение с целью создания ледового канала. Рассмотрен ударный способ разрушения льда – пробивание. Суть механического пробивания состоит в том, что разрушение производится ударом твердого тела (ударника) по поверхности ледяного покрова. Картина разрушения льда существенно зависит от формы ударника.

В работе [61] численно исследуется влияние сжимаемости и неоднородности льда на процесс разрушения ледяного покрова при помощи запатентованных способов разрушения. Напряженно-деформированное состояние в системе, состоящей из ледяного покрова, ледоразрушающего устройства и воды, рассчитывается апробированным численным методом. Результаты расчетов получены в виде эпюр напряжений в различные моменты времени в пресноводном, морском и однородном ледяном покрове, а также полей вектора скоростей и изолиний давлений в области ледоразрушающего устройства. Результаты расчетов показали, что учет неоднородности имеет существенное значение только для морского льда. Исследуемый процесс будет более полным при учете сжимаемости упругой среды, при этом это не повлияет на течение воды.

Экспериментальным изучением высокоскоростного деформирования льда посвящена работа [43]. В работе получены новые экспериментальные результаты о поведении льда при статическом и динамическом нагружении, которые могут использоваться для тестирования моделей и методов расчета высокоскоростного деформирования льда. В качестве объектов исследования рассмотрен монокристаллический и поликристаллический лед, получаемый в лабораторных условиях

в несколько этапов. Создана экспериментальная установка, позволяющая детально исследовать процесс высокоскоростного деформирования льда, включая современную высокоскоростную камеру Wienberg. Изучен процесс удара цилиндрических ударников с конической и плоской головными частями о жесткую стенку, а также о тонкую дюралюминиевую преграду. В некоторых случаях ледяные ударники заменялись водными. В процессе эксперимента исследованы картины разрушения льда, а также рассчитан остаточный прогиб пластин. Экспериментально установлено, что с ростом начальной скорости удара наблюдалось уменьшение фрагментации льда, а также рассчитана средняя скорость распространения трещины равная 500±125 м/с. Исследования поведения льда были проведены при невысоких начальных скоростях удара до 180 м/с.

Феноменологическая модель поведения льда предложена и апробирована в работе [34]. Модель разработана специально для космических приложений и содержит небольшое число констант, которые определяются экспериментально. Физико-механические свойства льда были рассмотрены ранее в работах Шульсона и Петровича, а объектом исследования является лед с гексагональной кристаллической структурой.

Модель позволяет учитывать такие явления как образование трещин, различие предела прочности при растяжении и сжатии, возможность возникновения в раздробленном льду гидростатического давления и ряд других. Модель содержит следующие принципиальные ограничения: предел текучести льда не зависит от скорости деформирования и давления, модуль упрочнения корректируется по баллистическим экспериментам, разрушающие напряжения (растяжение/сжатие) также не зависят от скорости деформации и давления. Последнее предположение, по мнению авторов, является одной из отличительных черт модели, необходимое для увеличения ее точности. В работе приведены экспериментальные данные процесса соударения сферического ледяного ударника о преграду, при этом отмечается недостаточность экспериментальных работ в этом направлении. Отмечено, что в некоторых случаях лед, как и бетон и керамика, проявляет остаточную прочность после разрушения, которое учитывается критерием Мора–Кулона. Проведены вычислительные эксперименты по удару ледяного цилиндра по жесткой стенке при помощи коммерческих пакетов прикладных программ в эйлеровой постановке. Однако, некоторые вопросы остались открытыми, например, скорость чувствительности коэффициента трения и т.д.

Следующая работа посвящена построению определяющей модели поведения льда при высоких скоростях деформации и ряда других факторов [31]. Ее авторы во многом отталкивались от предыдущих исследований. Данная изотропная упруго-пластическая модель с учетом прогрессирующих повреждений в виде хрупких трещин реализована при помощи метода конечных элементов. Для проверки адекватности модели были решены тестовые задачи, а также был специально поставлен лабораторный эксперимент. Упругий отклик рассчитывается с учетом разделения функции скоростей деформации в девиаторной и объемной частях. Уравнение состояния выбрано в форме Ми – Грюнайзена с учетом экспериментальных данных зависимости давления от объемной деформации.

Численные исследования кратерообразования во льду при скоростях удара до 7 км/с проведены в работе [35]. Используется уравнение состояния льда, основанное на уравнениях Ми–Грюнайзена. Изучен процесс соударения алюминиевого ударника с поликристаллическим льдом. Результаты расчетов получены в виде текущих конфигураций «ударник – ледяной массив», зависимостей диаметра кратеров и его объема от времени при помощи СТН-метода и среде "Ansys". Приведены кривые Гюгонио для льда в диапазоне до 50 ГПа. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными [31], которые, по мнению авторов, являются наиболее достоверными. В результате исследований были выделены четыре этапа кратерообразования, которые необходимы для более детального понимания процесса разрушения льда. Основным выводом являлось то, что объем поврежденного льда прямо пропорционален импульсу ударника.

Интересные результаты получены в работе [63]. Как и в предыдущем случае, исследуется ледяная оболочка спутника Сатурна Европы, под которой должна находиться вода. Толщина оболочки льда на этом небесном теле может составлять более 1000 метров. Лед моделировался однородной, изотропной, линейно упругой средой, физико-механические характеристики позаимствованы из работ других авторов. Поврежденность льда рассчитывается в рамках линейной механики разрушения. В качестве инструмента исследований использовался неявный модифицированный метод граничных элементов в двумерной постановке. Результаты расчетов получены в виде графических зависимостей глубины проникания трещины от толщины ледяной оболочки, которые имели гиперболический вид и карт напряжений. Рассчитаны критические напряжения, при котором могут быть разрушены ледяные оболочки небесных тел толщиной 2,5 и 25 км.

Экспериментальные исследования процесса взаимодействия сферических ледяных ударников с композитными пластинами при низких скоростях удара проведены в [64]. Композитные материалы на основе углеводородных волокон и эпоксидной смолы, используемые в качестве объектов исследования, широко применяются в авиапромышленности. Для оценки действия льда по композитным преградам использовалась инженерная модель Олсона, в которой заложен учет времени взаимодействия по полуэмпирической модели Кима. Выявлены основные особенности взаимодействия ледяных ударников, которые не наблюдались при действии ударников из камня. Результаты получены в виде хронограмм процесса соударения, а также графиков и таблиц. Установлено, что удар ледяного ударника по композитным преградам наносит меньший урон, чем удар каменного. Однако были установлены расхождения между данными, полученными по известным аналитическим методикам расчета.

Несколько похожие исследования опубликованы в [46]. Экспериментально изучено действие ледяных ударников по панелям из углепластика CFRP-1 и CFRP-2, толщиной 3 и 4 мм, соответственно. Отметим, что плотность композита практически в 1,5 раза больше, чем плотность льда. Лед был получен путем замораживания воды в специальной климатической камере при температуре –20°C. В процессе эксперимента отслеживались деформационные картины и области разрушения взаимодействующих тел согласно классификации повреждений, введенной [31] и было проведено ультразвуковое сканирование в режиме реального времени. Рассчитан баллистический предел для углепластиковых панелей и площадь

зоны их повреждений при действии ледяных ударников. Выявлено, что в исследуемом диапазоне скоростей из-за однонаправленной ориентации волокон панели CFRP-2 обладали меньшей ударной стойкостью, чем панели CFRP-1.

В работе [66] на основе критерия Друккера-Прагера разработана определяющая модель поведения льда при высоких скоростях деформирования. Авторы отмечают необходимость в проведении дополнительных экспериментов, т.к. энергия разрушения получилось малой по сравнению с общей кинетической энергией. При расчете разрушения льда использовались предположения из работы [34]. Полученные результаты расчетов сравнивались с доступными экспериментальными данными. Рассмотрена известная задача о соударении ледяного цилиндра о стальную пластину. Расчеты проведены при помощи различных численных методов расчета: лагранжев, лагранжево-эйлеров и SPH-метод. Установлено, что лагранжев метод показал наибольшую точность (менее 3%) при расчете силы удара. Расчеты представлены в виде текущих конфигураций «ударник – мишень», зависимости силы удара и импульса от времени,

В работе [72] разработан ледовый бассейн МОЕRI достаточных размеров для проведения испытаний. При помощи новейших технологий созданы несколько моделей льда, которые по механическим характеристикам близки к морскому льду. Для получения наиболее подходящего состава предложены специальные AD-компоненты, наличие которых снизило себестоимость льда и повысило его механические характеристики. Следует отметить, что данный бассейн является единственным в Корее и активно используется для научных работ, направленных на освоение природных богатств Арктики и Антарктики.

В работе [22] получено значение статического предела прочности на сжатие лабораторных образцов льда. В эксперименте варьировались размеры льда и температура. Одновременно были проведены испытания на динамическую прочность образцов льда. Получено, что динамическая прочность образцов льда при определенных скоростях деформации практически в 2 раза была больше, чем при статических испытаниях. При этом предел прочности на сжатие для крупногабаритных образцов также 2 раза превышал предел прочности на сжатие малогабаритных образцов.

В [73] приведены методика и результаты исследований механических свойств льда пресной воды на установке Instron. Призматические образцы льда подготавливались из двух плит льда, выращенных в громадном рефрижераторе размерами (21×7×1,2) м и испытывались в одних и тех же условиях. Размер кристаллов льда изменялся от 1 мм на наружной поверхности плит до 3 мм на их нижней погруженной в воду границе. В результате проведенного эксперимента получены прочностные характеристики льда. Не исключена возможность перенесения результатов лабораторных экспериментов на полевые условия.

В [74] приведены результаты лабораторных исследований образцов льда кубической формы при нагрузке вдоль трех ортогональных направлений (перпендикулярной приложенной и параллельно приложенной нагрузке). Выявлены критические деформации, при которых лед ведет себя как хрупкое тело и зафиксировано сечение поверхности разрушения. Установлено, что максимальные главные напряжения при разрушении в трехосном режиме, всегда больше чем в двухосном. Хрупкому разрушению льда при сжатии способствуют различные механизмы в пределах области главного напряжения.

Численному изучению зависимости напряженно-деформированного состояния ледяного покрова под действием движущегося амфибийного судна на воздушной подушке посвящена работа [75]. По мере роста скорости движения нагрузки от нуля прогибы и напряжения вначале уменьшаются по сравнению со статическими значениями. При дальнейшем увеличении скорости прогибы и напряжения увеличиваются и достигают максимальных значений при резонансной скорости нагрузки. Разрушение ледяного покрова происходит более эффектно, если судно движется не по кромке льда, а по чистой воде на определенном от него расстоянии.

В работе [76] на основе полученных термических уравнений состояний и термодинамических функций I, III, V, VI и воды в диапазоне изменения температуры 240 – 300 К и давления 0 – 10³ МПа построена модель нагружения льда с

учетом кинетики фазовых переходов. В работе пренебрегали сдвиговыми напряжениями, возникающими при деформации льда и возможными поверхностными явлениями. Кроме того, температура и давление было одинаково для всех фаз, образующих смесь, а процесс нагружения являлся адиабатическим.

В данных предположениях проведены численные расчеты p-V и p-T диаграммы стояния многофазной смеси для различных значений времени нагружений и при различных начальных температурах. Выявлено, что одна из кривых давления на p-V диаграмме согласуется с экспериментальными данными по ударному нагружению льда из работы [77]. Совпадение было обнаружено при начальной температуре $T_0 = 263$ К и времени $t = 3 \times 10^6$ с. При этом данные динамических экспериментов заметно отличались от статических. Установлено, что изменение длительности нагрузки и начальной температуры в рамках рассмотренной модели существенно влияет на фазовое состояние смеси.

Следует отметить, что хотя результаты работы являются основой для математического моделирования и распространения волн сжатия во льду с учетом кинетики фазовых переходов таких работ в открытых источниках литературы не обнаружено.

Интересная работа по изучению влияния подводного взрыва на движение надводного судна выполнена в работе [78]. Расчеты выполнены на лагранжевоэйлеровом численном методе при помощи ППП LS Dyna в трехмерной постановке. Рассмотрены два варианта расчетов, в одном скорость надводного судна составляла 40 узлов, а в другом – судно покоилось. При этом глубина и масса BB была одинаковой. Масса BB (THT) была равной 150 кг, а глубина – 10 метров. В результате подводного взрыва на поверхности образовывалась волна, высота которой достигала чуть более 2 м. и 1 м. соответственно. Результаты расчетов сравнивались с эмпирическими наблюдениями. Следует отметить, что данная работа может иметь логическое продолжение, например, путем добавлением слоя льда в расчетную область.

Актуальность диссертационного исследования обусловлена в первую очередь недостаточной изученностью поведения льда при динамических нагрузках. В

настоящее время российской наукой практически не исследованы основные особенности поведения льда при ударных и взрывных нагрузках для различных начальных условий. Поэтому востребованы новые физико-математические модели поведения льда, численные методы расчета его динамического нагружения, а также новые экспериментальные и теоретические знания о процессах деформирования и разрушения льда. Поставленные в работе задачи исследования приобретают важнейшее практическое значение при освоении Арктического региона, повышение конкурентной способности российской экономики и обороноспособности нашей страны.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в создание феноменологической модели льда внесла группа зарубежных ученых под руководством K.S. Carney [34] в NASA. Разработанная модель учитывает образование трещин во льду в процессе нагружения и ряд других явлений. Недостатками модели является то, что предел текучести и разрушающие напряжения не зависят от скорости деформации и давления, а модуль упрочнения корректируется по баллистическим экспериментам. В рамках данной модели в эйлеровой постановке решена задача соударения ледяного цилиндра с жесткой стенкой.

Процесс кратерообразования детально изучен в работе [35]. В эйлеровой двумерной постановке решена задача соударения алюминиевого шарика с ледяной преградой в диапазоне скоростей 1–7 км/с. Поведение льда под нагрузкой описано с использованием уравнения состояния в форме Ми–Грюнайзена. Модель согласуется с экспериментальной работой [80]. Одним из основных результатов работы является то, что полученный объем повреждений льда был прямо пропорционален импульсу ударника. На основании исследованных физических явлений авторы выделили четыре этапа процесса кратерообразования во льду. Недостатком работы является то, что не моделируются ударники более сложной геометрии.

Определенный вклад в решение проблемы ударного нагружения льда внесли отечественные ученые [29]. Изучен процесс проникания ударников в пресный лед. Получена зависимость динамической твердости льда от температуры. Уста-

новлено, что с понижением температуры увеличивается глубина проникания ударников в лед. Отметим, что авторами не указан тип льда, эксперименты проведены в ограниченном диапазоне, а ударники имели простую геометрию. Недостатком экспериментов является плохая визуализация их результатов для детализации процесса разрушения льда. Следует отметить, что значительная часть отечественных исследований имеет такой же недостаток.

В работе [43] экспериментально исследован процесс соударения ледяных ударников с алюминиевыми пластинами. Разработана новая экспериментальная установка с современной высокоскоростной цифровой камерой Wienberg, позволяющая детально изучать процесс соударения взаимодействующих тел. Это является одним из преимуществ. Объектом исследования были выбраны моно и поликристаллический лед. Недостатком следует считать низкий диапазон начальных скоростей удара.

Результаты полного аналитического обзора приведены выше. Однако, основные недостатки и достоинства уже перечислены. Ситуация по «ледовой» тематике за рубежом в настоящее время видится значительно лучше. Анализ публикационной активности указывает на то, что упомянутые работы являются наиболее известными мировой науке, поэтому им будет уделено особое внимание.

Цель работы заключается в разработке средств математического моделирования и проведение с их помощью численных исследований по выяснению основных механизмов процессов деформирования и разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках.

Исходя из цели, в работе были поставлены следующие задачи:

1. Анализ опубликованных научно-исследовательских работ по динамическому нагружению льда и выявление наиболее подходящих к теме диссертационного исследования.

2. Совершенствование физико-математической модели деформирования и разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках.

3. Модификация численного лагранжева метода расчета ударно-взрывного нагружения льда. Метод будет учитывать процессы взрывного нагружения льда при действии продуктов детонации.

4. Проведение натурных и лабораторных экспериментов по ударному и взрывному нагружению льда.

5. Решение прикладных задач, связанных с ударным и взрывным нагружением льда. Определение характера деформирования и разрушения льда при внедрении ударников различной геометрии и подрыве заряда взрывчатого вещества (BB) в воде подо льдом.

Теоретические исследования поведения льда при динамических нагрузках проведены с позиций феноменологической макроскопической теории сплошной среды на основе фундаментальных законов сохранения. Для реализации поставленных целей и задач был разработан пакет прикладных программ в интегрированной среде разработки Visual Studio 2008 для решения основной системы уравнений в двумерной осесимметричной постановке. Пакет прикладных программ, физико-математическая модель поведения льда при ударе и взрыве, а также оригинальный метод расчета взрывного нагружения льда в совокупности представляют **теоретическую значимость диссертационного исследования.**

Проведенные исследования по динамическому нагружению льда позволили сформулировать рекомендации по наиболее эффективному разрушению толстого речного льда. Данные рекомендации были реализованы весной 2014 года на р. Томи в Кемеровской области ОАО «КузбассСпецВзрыв» и оформлены заявкой на патент от 5.09.2013. Полученные результаты включены в научно-технические отчеты по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009-2013» (ГК 14.В37.21.0227) и (ГК № 14.740.11.0585).

Научная новизна работы заключается в следующем:

Усовершенствована физико-математическая модель деформирования и разрушения льда при ударно-взрывных нагрузках. Модель является изотропной, упруго-пластической, пористой, учитывающей свойства прочности, ударноволновые явления, а также совместное образование отрывных и сдвиговых разрушений. В расчетную часть модели добавлен алгоритм сглаживания контактных границ при больших деформациях, который позволяет описывать гладкую контактную границу между продуктами детонации и другими материалами, а значит и более точно моделировать процессы взрывного нагружения льда.

Выявлены основные механизмы и закономерности процесса деформирования и разрушения льда при внедрении однородных компактных и удлиненных ударников, а также крупно-габаритного ударника с инертным наполнителем. Новыми являются результаты расчетов взрывного нагружения толстого льда, расположенного на воде. Новыми являются экспериментальные результаты по взрывному нагружению заснеженного льда, а именно: подводный взрыв заряда ВВ в полиэтиленовой оболочке.

Положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математическая модель деформирования и разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках. Модель является упруго-пластической, пористой, учитывающей свойства прочности, ударно-волновые явления и совместное образование отрывных и сдвиговых разрушений. Допускается появление новых контактных и свободных поверхностей и использование разных критериев разрушения льда. Действие продуктов детонации описывается политропой Ландау – Станюковича в рамках модели мнгновенной детонации.

2. Модифицированный численный лагранжев метод расчета процессов динамического нагружения льда. Оригинальность метода заключается в новом алгоритме расчета контактных поверхностей, который позволяет более точно описывать контактные поверхности между продуктами детонации и льдом при взрыве.

3. Получены результаты натурных и лабораторных экспериментов по ударному и взрывному нагружению льда. Экспериментально исследован процесс взрывного нагружения пористого однолетнего речного льда средней толщины на реке Томи зарядом BB в полиэтиленовой оболочке;

4. Решены прикладные задачи, связанные с ударным и взрывным нагружением льда. Определен характер деформирования и разрушения льда при внедре-

нии ударников различной геометрии и подрыве заряда взрывчатого вещества (BB) в воде подо льдом.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность результатов численного моделирования установлена путем решения ряда тестовых задач. Решены тестовые задачи соударения двух одинаковых стальных цилиндров, соударение металлических и ледяного цилиндров с жесткой стенкой и ледяного ударника с тонкой дюралюминиевой пластиной. Решена тестовая задача о взрыве заряда ВВ в воде из подо льда. Полученные результаты сравнивались с аналитическим решением Ренкина – Гюгонио и экспериментальными данными. Расхождения между экспериментальными и расчетными данными были хорошими.

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на научных конференциях различного статуса: XIV, XV Scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientists: Modern technique and technologies MTT' (Tomsk, 2008, 2009); VI, VII Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2008, 2011); Всероссийская научная конференция «Современная баллистика и смежные вопросы механики», посвященная 100-летию со дня рождения профессора М.С. Горохова – основателя Томской школы баллистики (Томск, 2009); Х Международная конференция «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 2010); Всероссийская научно-практическая конференция "Фундаментальные основы баллистического проектирования" (Санкт-Петербург, 2010); IV Международной научная конференция «Математика ее приложения, и математическое образование-2011» (Улан-Удэ, 2011); International young scientific conference «Present problems of applied mathematics and Computer Science» within the framework of the All-Russia of Science Festival; XVIII Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, ВМСППС-2013, МАИ, Украина, Крым, Алушта, 22-31 мая 2013 г.; Международная научная конференция «Международный научно-образовательный форум Хэйлунзян-Приамурье», Россия, Биробиджан, 30 октября 2013 г.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в работах [80–97]. Опубликовано 17 работ, 4 – в журналах из перечня ВАК, остальные – в других научных изданиях.

Личный вклад автора заключается в разработке физико-математической модели деформирования льда, совместной разработке алгоритмов расчета, проведении аналитического обзора по теме диссертации и всех этапов исследования, формулировке основных результатов И выводов работе. Физикопо математическая модель разрабатывалась в соавторстве с научным руководителем, написание алгоритмов расчета совместно с сотрудниками лаборатории №21 НИИ прикладной математики И механики.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка используемых литературы и источников, содержит 69 рисунков, 6 таблиц, библиографический список литературы из 117 наименований – всего 189 страниц.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи работы, изложены положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и достоверность результатов численного исследования.

Первый раздел посвящен математической постановке задачи ударновзрывного нагружения льда. Для ее решения используется феноменологическая макроскопическая модель механики сплошных сред, в основе которой лежит упругопластическое поведение материала. Основная система уравнений базируется на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии. Лед описывается пористой, сжимаемой средой с учетом прочностных свойств, ударноволновых явлений, а также совместного образования отрывных и сдвиговых разрушений. Определяющие соотношения задаются уравнениями Прандтля – Райса при условии текучести Мизеса. Представлено уравнение состояния льда, воды и продуктов детонации. Поведение других материалов описывается уравнением состояния Уолша. Действие продуктов детонации описывается уравнениями Ландау – Станюковича. Систему уравнений замыкают граничные и начальные условия. Приведены уравнения для двумерного осесимметричного случая, а также их конечно-разностная аппроксимация. В качестве основного метода исследований использовался лагранжев метод, модифицированный для решения современных динамических многоконтактных задач МДТТ. Кратко приведен метод расчета контактных границ состоящий из алгоритмов построения свободной поверхности, создания упорядоченной контактной границы, а также эрозии расчетных элементов и расщепления расчетных элементов. Для сглаживания контактной границы при больших деформациях (например, при взрывном нагружении) разработан оригинальный алгоритм повышающий точность расчетов. Показана блок-схема нового алгоритма, а также блок-схема всего программного комплекса, при помощи которого проводились расчеты. Наличие данных механизмов и алгоритмов в расчетной части модели имеет принципиальное значение для решения задач ударно-взрывного нагружения льда.

Во втором разделе проведены тестовые расчеты, которые направлены как на проверку качества самого решения, так и заложенной в алгоритме модели среды. Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных является основанием для дальнейшего использования результатов численного моделирования в прогностических целях. В разделе последовательно решены внутренние, количественные и качественные тесты. Вначале сравнивались значения скорости и амплитуды ударной волны по аналитическим соотношениям Ренкина – Гюгонио и по разработанному методу численного моделирования. Также объектами исследования выбраны наиболее перспективные для ракетно-космической отрасли конструкционные материалы. Во всех случаях расхождение не превышало 0,2%. Решена классическая задача о фронтальном соударении двух стальных цилиндров, которая доказала выполнение универсального принципа симметрии как относительно контактной поверхности, так и относительно оси взаимодействующих тел. Осуществлялся контроль за сохранением системой энергии.

В качестве количественного теста решена задача о нормальном соударении ледяного цилиндра с тонкой дюралюминиевой пластиной. С целью сравнения расчетных и экспериментальных данных были воспроизведены французские экс-

перименты YMP-1 и YMPV-05 (начальная скорость ударников составляла 62,4 и 125,9 м/с). Результаты расчетов процесса соударения показали хорошее совпадение с экспериментальными данными. Построена графическая зависимость остаточного прогиба пластины от времени.

Для апробации разработанного алгоритма сглаживания контактных границ при взрывных нагрузках решена тестовая задача о взрыве ВВ в воде из подо льда. Эксперимент был выполнен совместно с сотрудниками НИИ прикладной математики и механики и ОАО «КузбассСпецВзрыв» на р. Томи. Сравнивался диаметр взрывной майны в вычислительном и натурном экспериментах. Кроме того сравнивались расчетные и экспериментальные интегральные характеристики процесса соударения в некоторых задачах (глубина и диаметр внедрения ударников, остаточный прогиб пластины) с соответствующими экспериментальными значениями. Расхождения между расчетными и экспериментальными результатами были хорошими.

В третьем разделе численно исследуется процесс внедрения компактных ударников в ледяной цилиндр в диапазоне начальных скоростей ниже скорости Основной целью исследований являлось выявление влияния звука в воздухе. формы ударников на процесс деформирования и разрушения льда. Проанализирована эволюция деформационных картин и областей разрушения льда, в том числе время и место зарождения первых очагов разрушения и дальнейшее распространение во льду. В некоторых вариантах процесс внедрения компактных ударников сопровождался образованиям тыльного и лицевого отколов и кольцевых трещин. Построены временные зависимости скорости ударника, глубины внедрения, поврежденности льда и скорости изменения поврежденности льда и получены их конкретные значения для 12 вариантов расчета. Вычислены также диаметры, глубины кратеров и время процесса внедрения ударников в лед. Возможность иметь наиболее полную информацию о напряженно-деформированном состоянии льда позволила построить зависимость гидростатического давления и девиаторных напряжений от времени. Установлено, что давления были на порядок больше, чем напряжения. Выявленные закономерности процесса внедрения соответствуют физике процесса. Получено, что в указанных условиях лед ведет себя подобно некоторым геологическим материалам.

В четвертом разделе численно исследуется процесс внедрения удлиненных ударников с различной формой головных частей в лед в диапазоне начальных скоростей до 300 м/с. По-сути, это следующий этап за исследованиями процесса внедрения компактных ударников в лед. Результаты расчетов представлены многочисленными конфигурациями «ударник – мишень», иллюстрирующих процесс внедрения на всех стадиях, а также в виде графиков и таблиц. Получено, что в большинстве случаев сценарий разрушений льда при действии удлиненных ударников, был аналогичен сценарию разрушения льда при действии компактных ударников. Наибольшие значения глубины внедрения отмечены при внедрении ударника с ОГЧ, а наименьшие при внедрении ударника с ПГЧ. Объем разрушений во льду был незначительным и формировался, в основном, за счет образования областей разрушений в зоне контакта «ударник – лед». Скорость изменения поврежденности достигала своего максимального значения вначале процесса внедрения. Время процесса не превысило миллисекунды, при этом минимальное значение было при внедрении ударника с ПГЧ, а максимальное – ударника с ОГЧ. При действии ударников с ОГЧ зафиксированы минимальные диаметры кратеров. Колебания на кривых гидростатического давления и девиаторных напряжений объясняются волновым характером деформационного процесса.

В пятом разделе представлены результаты экспериментальнотеоретических исследований процессов ударно-взрывного нагружения льда. Проведены лабораторные и натурные эксперименты, а объектами исследования являлись конжеляционный и речной однолетний лед. В лабораторном эксперименте воспроизведен процесс соударения сферического ударника с ледяными цилиндрами. Получено, что диаметр кратера был больше его глубину и не зависит от высоты цилиндра. В натурном эксперименте получен диаметр взрывной майны при подрыве заряда ВВ в воде из подо льда. Изучен процесс внедрения крупногабаритного ударника с инертным наполнителем в ледяную преграду. Получены конкретные значения некоторых параметров процесса соударения для четырех

вариантов расчета. Выявлено, что процесс внедрения сопровождался радиальной и осевой деформацией ударника и формированием во льду конического кратера. Установлено, что глубина кратера увеличивалась пропорционально начальной скорости удара. Объем разрушенного льда был незначительным. Скорость ударника в целом, а также скорость донной и носовой частей наполнителя ударника изменялись по гиперболическому закону. Давления, возникающие в наполнителе можно характеризовать как низкие. Численно изучен процесс взрывного нагружения толстого льда зарядом безоболочечного ВВ. Проведен детальный анализ напряженно-деформированного состояния, деформационных картин и областей разрушения системы «Лед – ВВ – Вода», построены временные зависимости скорости лицевой свободной поверхности льда, параметра поврежденности и скорости изменения поврежденности, а также гидростатического давления и девиаторных напряжений. Вычислены размеры взрывных майн во льду в результате подрыва BB на различных глубинах закладки. Проведенные исследования рекомендуют для более эффективного разрушения льда в данных условиях закладывать ВВ в середине ледяной преграды.

В заключение сформулированы основные результаты, полученные в дис-

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте прикладной математики и механики и кафедре механики деформируемого твердого тела Национального исследовательского Томского государственного университета. Физико-математическая модель поведения льда при динамических нагрузках.
 Численный метод расчета процессов ударного и взрывного нагружения льда

Известно, что всякий лед (морской, речной, озерный и т.д.) обладает упругостью и пластичностью [98, 99]. Экспериментально установлено, что предел упругости льда небольшой и с понижением температуры повышается. В большинстве случаев работа льда под нагрузкой происходит за пределами упругости. Ультразвуком показано, что предел упругости морского льда несколько меньше чем предел упругости пресноводного.

В механике деформируемого твердого тела поведение материалов под нагрузкой интерпретируется как упругопластическое. Математический аппарат такого подхода достаточно развит, а расчеты, полученные на его основе, хорошо совпадают с экспериментальными данными. Этот подход позволяет проследить во времени процесс деформирования и разрушения материалов, а также иметь наиболее полную информацию о напряженно-деформированном и термодинамическом состоянии элементов в необходимый момент времени.

В настоящей работе для описания поведения льда используется феноменологический подход, который требует знания динамических свойств материалов, получаемых в результате контрольных экспериментов. Такой подход разрабатывается уже более 25 лет в Научно-исследовательском институте прикладной математики и механики в лаборатории №21 под руководством д.ф.м.н. В.П. Глазырина. Данный подход позволяет решать определенный круг динамических многоконтактных задач механики деформируемого твердого тела. Для задач соударения представляется возможным получать во времени всю картину внедрения, пробития и образования осколков с учетом ударно-волнового характера деформирования и разрушения материала ударника и преграды [100].

1.1 Математическое описание сжимаемых упругопластических пористых сред

Рассматриваемая среда предполагается сжимаемой, пористой, изотропной, в отсутствие массовых сил, внутренних источников тепла и теплопроводности. Основная система уравнений, описывающая нестационарные пространственные

адиабатические движения сжимаемой, упругопластической, пористой среды, состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии и изменения удельного объема пор:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \, \overline{v} = 0 \; ; \qquad (1.1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \sigma_{ij,i}; \tag{1.2}$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}; \tag{1.3}$$

$$\frac{dV_p}{dt} = f\left(V_p, p\right); \tag{1.4}$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ε_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; V_i – компоненты вектора скорости; ρ – плотность; ε – удельная внутренняя энергия; V_p – удельный объем пор, значения индексов *i*, *j* «пробегают» от 1 до 3.

Для замыкания системы уравнений (1.1)-(1.4) задаются дополнительные соотношения между параметрами, учитывающими конкретные физические свойства исследуемой среды. Такими соотношениями являются определяющие уравнения.

В общем случае при нагружении твердого тела происходит как изменение объема, так и формы, причем по разным зависимостям. Поэтому тензор напряжения разбивается на девиаторную и шаровую составляющие:

$$\sigma_{ii} = S_{ii} - P\delta_{ii}, \tag{1.5}$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, P – гидростатическое давление.

Определяющие уравнения задаются в форме Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса. Компоненты девиатора тензора упруго-пластических напряжений *S*_{ii} определяются из соотношения:

$$2G(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij}) = \frac{d\widetilde{S}_{ij}}{dt} + \lambda S_{ij}, \qquad (1.6)$$

где
$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

а $\frac{d\widetilde{S}_{ij}}{dt}$ - производная по Яуману определяемая формулой

$$\frac{d\tilde{S}_{ij}}{dt} = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ij} \Omega_{jk} - S_{jk} \Omega_{ik} , \qquad (1.7)$$

где

$$2\Omega_{ij}=\frac{\partial v_i}{\partial x_j}-\frac{\partial v_j}{\partial x_i},$$

Параметр λ тождественно равен нулю при упругой деформации, а при пластической определяется с помощью условия текучести Мизеса

$$I_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{3} \sigma_T^2 \right), \quad (1.8)$$

где σ_T – динамический предел текучести

1.2 Уравнение состояния для пористого твердого тела

В ряде работ [101] развивается подход, согласно которому определяющие соотношения дополняются уравнениями, характеризующими усредненное поведение микроповреждений в виде микропор сферической формы, способных при определенных условиях развиваться в микротрещины.

Такой подход используется и в настоящей работе, т.к. он отражает физическую суть явления. С учетом этого неоднородную пористую среду будем рассматривать как двухкомпонентный композиционный материал, состоящий из твердой фазы – матрицы и включений – пор. Кроме этого, будем считать, что поры в материале матрицы распределены равномерно по всем направлениям.

Удельный объем пористой среды V представим в виде суммы удельного объема пор V и удельного объема матрицы $V_S: V = V_p + V_S$. Пористость материала можно охарактеризовать объемной долей пор ξ , либо параметром α ,

равным отношению удельного объема пористого материала к удельному объему матричного материала. Параметры *α* и *ξ* связаны следующими соотношениями:

$$\alpha = \frac{V}{V_s} = \frac{V_p + V_s}{V_s}; \quad \xi = \frac{V_p}{V}; \quad \alpha = \frac{1}{1 - \xi}; \quad \xi = 1 - \frac{1}{\alpha}.$$
 (1.9)

Кинетическое уравнение при ($\Delta P > 0$), полученное из приближенного решения задачи о деформации сферической полости под действием приложенного давления, выбрано в виде:

$$\dot{\alpha} = -\frac{(\alpha_0 - 1)^{\frac{2}{3}}}{\eta} \alpha(\alpha - 1)^{\frac{1}{3}} \Delta Psign(P), \qquad (1.10)$$
$$\Delta P = |P| - \frac{a_s}{\alpha} \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1},$$

где α_0, α_s, η – константы материала.

Прочностные характеристики пористого материала через *α* и *ξ* определяются следующим образом [102]:

$$\sigma_{T} = \frac{\sigma_{TS}}{\alpha}; G = G_{S}(1 - \xi) \left(1 - \frac{6K_{s} + 12G_{s}}{9K_{s} + 8G_{s}} \xi \right),$$
(1.11)

где K_{s} – объемный модуль сжатия матрицы, G_{s} – модуль сдвига матрицы.

Давление в пористой среде вычисляется по уравнению состояния для матрицы:

$$P = P_{s}(\alpha \rho, \varepsilon) / \alpha; \quad P_{s} = P_{s}(\rho_{s}, \varepsilon).$$

В настоящей работе выбрано уравнение состояния в форме Уолша. Помимо вышеперечисленных качеств данное уравнение удобно тем, что оно содержит небольшое число констант, которые для большинства конструкционных материалов приведены в доступных источниках [103]. В случае отсутствия их можно определить по ударной адиабате. Уравнение состояния для пористого твердого тела имеет следующий вид:
$$P_{s} = P_{A} \left(1 - \frac{\gamma}{2} x \right) + \gamma \rho_{0s} \varepsilon,$$

$$P_{A} = \sum_{i=1}^{3} k_{i} (x-1)^{i}, \quad x = \frac{\rho_{s}}{\rho_{0s}}, \quad \gamma = \gamma_{0} (1-x),$$
(1.12)

где k_i – константы уравнения; γ – коэффициент Грюнайзена.

1.3 Уравнение состояния льда, воды и продуктов детонации

Рассматривается поликристаллический лед без фазовых переходов С усредненными физико-механическими характеристиками, взятых ИЗ общедоступных источников. Действие гравитационных сил на лед и другие материалы не учитываются, т.к. они существенно сил ударного меньше взаимодействия.

На рисунке 1.1 показана ударная адиабата воды и льда. Ударная адиабата воды близка к графику степенной функции, причем после достижения плотностью значения 1,35 кривые становятся параллельными.



Рисунок 1.1 – Ударная адиабата воды и льда

Уравнение состояния льда принято в виде:

$$P(\rho) = B \left(\rho/\rho_0 - 1\right) \left(\rho/\rho_0\right)^2, \tag{1.13}$$

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

Уравнение состояние воды принято в виде полинома:

$$P(\rho) = 0.0225(\rho/\rho_0 - 1) + 0.085(\rho/\rho_0 - 1)^2$$
(1.14)

Уравнение состояния продуктов детонации (ПД) выбрано в виде политропы Ландау–Стаюковича [104]:

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

Данное уравнение не дает достаточной точности в определении скорости частиц при расчете разлета ПД в вакуум, однако хорошо описывает поведение ПД в случае высоких давлений для зарядов, расположенных внутри рассматриваемого материала.

При построении модели взрывного нагружения часто пользуются гипотезой «мгновенной детонации», которая предполагает, что взрывчатое вещество заряда мгновенно переходит в газообразные продукты с некоторым средним и равным по объему давлением. В соответствие с этим предположением, после преобразований выражение $P(\rho)$ имеет вид:

$$P = \rho_0 D^2 (\rho / \rho_0)^3 / 8,$$

где D – скорость детонации.

1.4 Критерии разрушения

Известно [105], что разрушение материалов при действии ударного нагружения может происходить по отрывному или сдвиговому механизмам. Это наблюдается в конструкционных, композиционных, геологических материалах. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что лед не является исключением. Модель разрушения предусматривает реализацию обоих механизмов разрушения.

Считается, что отрывные разрушения происходят при превышении главным растягивающим напряжением значения откольной прочности:

$$\sigma_1 > \sigma_k \tag{1.15}$$

либо при достижении пористостью предельного значения:

$$\boldsymbol{\xi} \ge \boldsymbol{\xi}^*. \tag{1.16}$$

При прогнозировании сдвиговых разрушений мерой повреждения материала считается удельная работа напряжений на сдвиговых пластических деформациях A_n .

При выполнении условия

$$A_p \ge A_p^*, \quad A_p = \int_0^{t_*} dA_p = \int_0^{t_*} \frac{\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p}{\rho}$$

материал считается разрушенным по типу сдвига. Здесь A_p^* – критическое значение работы.

Для конструкционных материалов:

$$\sigma_k = (0,02 \div 5,0)$$
 ГПа; $\xi^* = 0,30 \div 0,33$; $A_p^* = (25 \div 200)$ кДж / кг.

При выполнении в какой-либо точке среды одного из вышеперечисленных условий, в ее ближайшей окрестности образуется проходящая через эту точку трещина, т.е. свободная поверхность, которая в процессе деформирования может стать контактной. В дальнейшем небольшие трещины могут сливаться, образовывать магистральные трещины, вследствие чего приводить к разделению деформируемого тела на отдельные фрагменты.

1.5 Начальные и граничные условия

Начальные условия в задачах ударного взаимодействия твердых тел предполагают задание (возможно и равное нулю) компонентов напряжений, давления и внутренней энергии:

$$\sigma_{ii}(x,0); P(x,0); \varepsilon(x,0). \tag{1.17}$$

Плотность ρ_0 и скорость v_0 заданы:

$$v(\bar{x},0) = V_0, \quad \rho(\bar{x},0) = \rho_0, \quad \bar{x} = \bar{x}(x,y,z).$$
 (1.18)

Граничные условия на свободных поверхностях задают равенство нулю вектора напряжений $\vec{\sigma}_n$ на площадке с нормалью \vec{n}

$$\sigma_{nn} = \sigma_{n\tau} = 0, \tag{1.19}$$

где $\sigma_{nn}, \sigma_{n\tau}$ – проекции $\vec{\sigma}_n$ на нормальное и касательное направления к поверхности в рассматриваемой точке.

Граничные условия на контактных поверхностях допускают их скольжение без трения:

$$\sigma_{nn}^{+} = \sigma_{nn}^{-}, \quad \sigma_{n\tau}^{+} = \sigma_{n\tau}^{-} = 0, \quad v_{n}^{+} = v_{n}^{-},$$
 (1.20)

где v_n проекции вектора скорости $v(\bar{x}, t)$ на нормальное направление к поверхности в рассматриваемой точке.

Знаки «+» и «-» относятся к значениям параметров по разные стороны от контактной поверхности.

1.6 Формы записей основных уравнений для осесимметричного случая

Система уравнений (1.1)–(1.7) записана в общем виде для пространственного движения деформируемого тела. В дальнейшем потребуется система уравнений, описывающая двумерное движение среды. Для двумерного осесимметричного случая эта система уравнений принимает вид:

a...

 $\frac{d\varepsilon}{dt}$

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} = -\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r}\right),$$

$$\rho\frac{du}{dt} = \frac{\partial S_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial S_{rz}}{\partial r} + \frac{S_{rz}}{r} - \frac{\partial P}{\partial z},$$

$$\rho\frac{dv}{dt} = \frac{\partial S_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial S_{rz}}{\partial z} + \frac{S_{rr} - S_{\theta\theta}}{r} - \frac{\partial P}{\partial r},$$

$$(1.21)$$

$$= \frac{P}{\rho^2}\frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{\rho}\left[S_{zz}\frac{\partial u}{\partial z} + S_{rr}\frac{\partial v}{\partial r} + S_{\theta\theta}\frac{v}{r} + S_{rz}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r}\right)\right], \frac{DS_{zz}}{Dt} + \lambda S_{zz} = 2G\left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{3\rho}\frac{d\rho}{dt}\right)$$

$$\frac{DS_{rr}}{Dt} + \lambda S_{rr} = 2G\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{3\rho}\frac{d\rho}{dt}\right)$$

$$\frac{DS_{\theta\theta}}{Dt} + \lambda S_{\theta\theta} = 2G\left(\frac{v}{r} + \frac{1}{3\rho}\frac{d\rho}{dt}\right)\frac{DS_{rz}}{Dt} + \lambda S_{rz} = G\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{dv}{dz}\right)$$
$$S_{rr}^{2} + S_{zz}^{2} + S_{rz}^{2} + S_{rr}S_{zz} = \frac{1}{3}\sigma_{T}^{2}, P = P(\rho,\varepsilon),$$

где *r*, *z* – радиальная и осевая координаты; *u*, *v* – осевая и радиальная компоненты вектора скорости соответственно, *D/Dt* – производная Яумана.

1.7 Численный метод расчета процессов ударного и взрывного нагружения льда

В подразделе описан численный лагранжев метод расчета процессов ударного и взрывного нагружения льда.

В качестве основного инструмента исследований используется численный 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 динамических многоконтактных задач механики деформируемого твердого тела [106].

Для решения краевых задач с помощью сформулированной выше уравнений и конкретных начальных и граничных условий используется метод Джонсона, основанный на методе конечных элементов [107, 108]. В соответствии с этим методом строится дискретная модель тела, состоящая из конечного числа связанных соответствующим образом в узловых точках конечных элементов. Уравнение движения для типичного конечного элемента сплошной среды выводится с учетом принципа возможных скоростей. Конечно-разностная аппроксимация уравнений в многомерной постановке полностью приведена в [109]. 1.7.1 Уравнения для случая осесимметричной постановки

В случае осесимметричной постановки задачи положение материальных частиц тела полностью определяется двумя координатами, а поля перемещений и скоростей определяются радиальной и осевой компонентами r, z и V_r и V_z соответственно. Сам элемент представляет собой фигуру вращения треугольного сечения.

Также, как и в трехмерной постановке, дифференциальные операторы в основной системе уравнений заменяются разностными аналогами на всей расчетной области, представляющей собой дискретную модель тела, состоящую из конечного числа связанных соответствующим образом в угловых точках треугольных элементов, испытывающих деформации и перемещения в продольных и поперечных направлениях. Масса каждого элемента равномерно распределена между тремя узлами, т.е. масса, сосредоточенная в *i*-м узле равна одной трети массы всех элементов, содержащих этот узел.

Компоненты скорости элементов выражаются через узловые величины в рамках линейной аппроксимации

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 r + \alpha_3 z$$
$$v = \alpha_4 + \alpha_5 r + \alpha_6 z$$

 α_K – константы, зависящие от геометрии элементов и скорости узлов.

Подставляя в предыдущею систему уравнений скорости и координаты узлов элемента с вершинами *i, j, m*, можно определить α_{K} . В результате решения трех уравнений с тремя неизвестными получим для одной компоненты скорости

$$u = \frac{1}{2A} \left[(ai+bir+ciz)ui+(aj+bjr+cjz)uj+(am+bmr+cmz)um \right],$$

Где $\alpha_i = rjzm - rmzj; \quad b_i = zj - zm; \quad c_i = rm - rj;$

А – площадь элемента.

Для другой компоненты скорости – *v* получается циклической перестановкой индексов. Компоненты тензора скоростей деформаций имеют вид:

$$e_{rr} = u_{,r}, e_{zz} = v_{,z}, e_{rz} = (u_{,r} + v_{,z})/2, e_{\theta\theta} = \overline{u}/\overline{r},$$

где \overline{u} и \overline{r} – среднее значение скоростей и радиусов трех узлов элемента.

Поскольку скорости линейные функции, скорости деформаций являются постоянными внутри элемента. В свою очередь компоненты тензора деформаций могут быть получены путем интегрирования по времени выражений

$$\Delta \varepsilon_{rr}^{n+1/2} = e_{rr}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2},$$

остальные компоненты вычисляются аналогично.

Следующий этап вычислений сводится к определению компонент тензора напряжений.

Компоненты девиатора тензора напряжений:

$$S_{rr}^{n+1} = S_{rr}^{n} + 2\mu \left[e_{rr}^{n+1/2} - \frac{1}{3} \left(\frac{\dot{V}}{V} \right)^{n+1/2} \right] t^{n+1/2} + \delta_{rr}^{n},$$

$$S_{zz}^{n+1} = S_{zz}^{n} + 2\mu \left[e_{zz}^{n+1/2} - \frac{1}{3} \left(\frac{\dot{V}}{V} \right)^{n+1/2} \right] t^{n+1/2} + \delta_{zz}^{n},$$

$$S_{rz}^{n+1} = S_{rz}^{n} + 2\mu e_{rz}^{n+1/2} - t^{n+1/2} + \delta_{rz}^{n},$$

$$S_{\theta\theta}^{n+1} = S_{\theta\theta}^{n} + 2\mu \left[e_{\theta\theta}^{n+1/2} - \frac{1}{3} \left(\frac{\dot{V}}{V} \right)^{n+1/2} \right] t^{n+1/2},$$

$$\delta_{rr}^{n} = \left(\frac{S_{rr}^{n} - S_{zz}^{n}}{2} \right) (\cos 2\omega - 1) + S_{rz}^{n} \sin 2\omega,$$
(1.22)

$$\delta^{n}_{zz} = -\delta^{n}_{rr}$$
$$\delta^{n}_{rz} = S^{n}_{rz} (\cos 2\omega - 1) - \left(\frac{S^{n}_{rr} - S^{n}_{zz}}{2}\right) \sin 2\omega$$
$$\left(\frac{\partial \dot{z}}{\partial r}\right) = n + 1/2$$

$$\sin 2\omega = \left(\frac{\partial \dot{z}}{\partial r} - \frac{\partial \dot{r}}{\partial z}\right) \Delta t^{n+1/2}.$$

Для выполнения условия текучести Мизеса вычисляется разность

$$K^{n+1} = (S_{rr}^{n+1})^2 + (S_{zz}^{n+1})^2 + (S_{\theta\theta}^{n+1})^2 + 2(S_{rz}^{n+1})^2 - \frac{2}{3}\sigma_T^2, \qquad (1.23)$$

,

если *к*^{*n*+1}>0, то каждое из напряжений умножается на корректирующий множитель

$$\sqrt{\frac{2}{3}\sigma_T} / (S^2_{rr} + S^2_{zz} + S^2_{\theta\theta} + 2S^2_{rz})^{0.5}.$$
(1.24)

Если $K^{n+1} \le 0$, то используются напряжения в неизменной форме.

Для сглаживания разрывов и демпфирования колебаний параметров течения используется искусственная скалярная линейная вязкость

$$q^{n+1/2} = \frac{C_s C_L \rho_0 \sqrt{A^{n+1/2}}}{V^{n+1/2}} \left\| \left(\frac{\dot{V}}{V} \right)^{n+1/2} \right|,$$
(1.25)

где C_s – скорость звука, C_L – const, скалярная квадратичная вязкость

$$q^{n+1/2} = \left(\frac{C_0 \rho_0 A^{n+1/2}}{V^{n+1/2}}\right) \left[\left(\frac{\dot{V}}{V}\right)^{n+1/2}\right]^2,$$
(1.26)

где $C_0^2 = 4$,

а также тензорная вязкость

$$q_{rz}^{n+1/2} = 2aC_{s}\rho_{0}\left(\frac{\sqrt{A^{n+1/2}}}{V^{n+1/2}}\right)e_{rz}^{n+1/2}\Delta t^{n+1/2},$$
(1.27)

$$q_{rr}^{n+1/2} = 2aC_{s}\rho_{0}\frac{\sqrt{A^{n+1/2}}}{V^{n+1/2}} \left[e_{rr}^{n+1/2} - \frac{1}{3}\left(\frac{\dot{V}}{V}\right)^{n+1/2}\right] \Delta t^{n+1/2}, \qquad (1.28)$$

где a = const.

остальные компоненты вычисляются аналогично. Искусственная вязкость q вычисляется только для значений $\dot{V}_V < 0$.

Приращение энергии сдвиговых деформаций определяется по формуле:

$$\Delta Z^{n+1} = ((S_{rr} + q_{rr})\Delta\varepsilon_{rr} + (S_{zz} + q_{zz})\Delta\varepsilon_{zz} + (S_{\theta\theta} + q_{\theta\theta})\Delta\varepsilon_{\theta\theta} + (S_{rz} + q_{rz})\Delta\varepsilon_{rz})^{n+1/2}V^{n+1/2}.$$
(1.29)

Гидростатическое давление

$$P^{n+1} = A(V^{n+1}) + B(V^{n+1})E^{n+1}, \qquad (1.30)$$

где A(V), B(V) – заданные функции.

Приращение полной внутренней энергии равно

$$\Delta E^{n+1} = \Delta Z^{n+1} - \left(\frac{P^{n+1} + P^n}{2} + q^{n+1/2}\right) (V^{n+1} - V^n).$$
(1.31)

Полные напряжения с учетом (1.35)–(1.37):

$$\sigma_{rr}^{n+1} = S_{rr}^{n+1} + q_{rr}^{n+1/2} - \left(P^{n+1} + q^{n+1/2}\right), \tag{1.32}$$

остальные компоненты находятся аналогично.

Временной шаг интегрирования выбирается из условия устойчивости численного решения

$$\Delta t = h/(g + \sqrt{g^2 + c_s^2})/3,$$

$$g^2 = a2q/\rho.$$
(1.33)

Сосредоточенные узловые силы, статически эквивалентные распределенным напряжениям в элементах, определяются следующим образом:

$$F_r^i = -\pi \bar{r}[(zj - zm)\sigma rr + (rm - rj)\sigma rz] - 2\pi A\sigma\theta\theta/3$$
$$F_z^i = -\pi \bar{r}[(rm - rj)\sigma zz + (zj - zm)\sigma rz];$$

где r – среднее значение трех радиусов.

Ускорения *i*- го узла вычисляются из уравнения движения вида

$$\overline{M}^{i}\dot{u}^{i} = \overline{F_{r}^{i}}; \quad \overline{M}^{i}\dot{v}^{i} = \overline{F_{r}^{i}}; \quad (1.34)$$

где $\overline{F}_{r}^{i}, \overline{F}_{z}^{i}$ – результирующие векторы сил в *i*-м узле, действующие со стороны всех элементов, содержащих этот узел.

 $\overline{M^{i}}$ – масса, сосредоточенная в *i*-м глобальном узле.

Уравнения движения интегрируются в предположении, что ускорение постоянно на каждом временном шаге. Новое значение скорости на n + 1 временном шаге будет

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \dot{u}^{n+\frac{1}{2}} \Delta t$$
 (1.35)

и, соответственно, новое значение координат

$$r^{n+1} = r^n + u_r^n \Delta t + \dot{u}^n \Delta t / 2.$$
 (1.36)

Алгоритм расчета следующий: задаются начальные условия, включающие задание геометрии, величины сосредоточенных масс в узлах и их начальные скорости, начальное напряженно-деформируемое состояние.

Рассчитываются скорости и перемещения узлов на первом временном шаге. Затем рассчитываются полные напряжения. Определяются эквивалентные узловые силы, обусловленные внутренним напряжением. Определяются узловые силы, обусловленные поверхностными и распределенными силами, в случае их наличия. Интегрируются уравнения движения с учетом, при необходимости, соответствующих граничных условий с целью нахождения скоростей и перемещений узлов. Вычисляется напряженно-деформированное состояние на новом временном шаге. Переход к определению узловых сил завершает расчетный цикл, который повторяется до заранее заданного критерия окончания расчета. 1.7.2 Метод расчета контактных границ. Алгоритм скольжения

В подразделе описан алгоритм скольжения для расчета контактных границ. Основной смысл алгоритма скольжения заключается в следующем. Рассматриваются две свободные поверхности, узел одной из которых, в процессе движения, попал во внутреннюю область ограниченную другой поверхностью. Описанная ситуация изображена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Алгоритм скольжения

На этом рисунке буквами *i* и *j* обозначены узлы поверхности, относительно которой будет корректироваться узел s^{t+dt} другой свободной поверхности. Иногда поверхность (узлы), относительно которой корректируется узел, называют ведущей (ведущими) или «Master», а корректируемую поверхность (узел) – ведомой (ведомым) или «Slave». В целом, такой алгоритм корректировки узлов часто называют алгоритмом скольжения, т.к. корректируются нормальные составляющие скорости, или «Master-Slave» алгоритмом.

Вывод формул этого алгоритма базируется на требовании соблюдения скорректированными узлами законов сохранения импульса, момента импульса и требования равенства нормальных (относительно линии образованной узлами *i*, *j*) составляющих скорости ведомого узла и ведущей поверхности в точке их конечной дислокации, т.е. в точке *c*.

Окончательно выражения для приращений нормальных составляющих скоростей узлов *s*, *i* и *j* после корректировки выглядят следующим образом:

$$\Delta v_s^N = \frac{v_c^N - v_s^N}{1 + \frac{r_s^M s}{rm_i}R_i + \frac{r_i^M s}{rm_j}R_j}, \quad \Delta v_i^N = \Delta v_s^N R_i m_s / m_i, \quad \Delta v_j^N = \Delta v_s^N R_j m_s / m_j,$$

где $\Delta v_s^N, \Delta v_i^N, \Delta v_j^N$ - приращения нормальных составляющих скоростей узлов *s*, *i*, *j*

соответственно,

$$v_c^N, v_s^N$$
 - нормальные составляющие скорости поверхности в т. *с* и узла s^{t+dt} ,
 $r = r_i + r_i$, $R_i = 1 - r_i/r$, $R_i = r_i/r$;

 m_s, m_i, m_j – массы узлов s, i, j соответственно.

• •

Корректировка тангенциальных составляющих скоростей узлов также можно проводить в предположении, например, вязкого взаимодействия или сухого трения.

1.7.3 Алгоритм построения свободной поверхности

В подразделе представлен алгоритм построения свободной поверхности. При моделировании контактных задач, необходимо определение контактной границы (контактной поверхности). Очевидно, что контактная поверхность является частью свободной поверхности взаимодействующих тел. Известно, что в точках, лежащих на свободной поверхности, в отличие от внутренних точек, сумма нормалей ко всем возможным плоскостям, проходящим через эту точку не равна нулю. Этот факт положен в основу выбора граничных узлов расчетной сетки. Схема, иллюстрирующая правило определения таких узлов для плоской формулировки изображена на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Определение узлов лежащих на границе области «**Ω**»

В узле «А» сумма единичных векторов восстановленных к сторонам элементов, сходящимся в этом узле 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 = 0. В узле «В» сумма таких векторов $7 + 8 + 9 + 10 \neq 0$. Согласно этому, узел «А» является внутренним в области « Ω », а узел «В» лежит на поверхности этой области, т.е. является граничным. Узлы «С» и «D» в соответствие с аналогичным вычислении также являются граничными.

1.7.4 Алгоритм создания упорядоченной контактной границ

В подразделе представлен алгоритм создания упорядоченной контактной границ, введенного в расчетную часть с целью экономии времени счета. Для решения контактной задачи, определенной алгоритмом скольжения, в общем случае требуется для каждой граничной стороны треугольного элемента разбиения перебрать все узлы, лежащие на граничных сторонах других элементов. Такая процедура может занять много времени, поэтому есть смысл из всего множества вариантов взаимодействия для каждой граничной стороны выделить некоторое подмножество узлов, которое в течение определенного временного интервала гарантированно обеспечивало бы соблюдение условий на контактной границе.

Условием принадлежности граничного узла такому подмножеству может быть его попадание в ограниченную область радиуса «R». На рисунке 1.4 приведена схема, позволяющая реализовать такую возможность.



a) – «верхняя» контактная поверхность содержащая, в том числе элементы «1», «2», «3», б) – «нижняя» контактная поверхность содержащая, в том числе элементы «4», «5». «C1», «C2», «C3» – окружности радиуса «R», проведенные из центра треугольных элементов «1», «2», «3», соответственно. Вовнутрь окружности «C3» не попадают граничные узлы какихлибо элементов, поэтому граничная поверхность этого элемента не обрабатывается алгоритмом скольжения. Внутри окружностей «C1», «C2» находятся граничные узлы элементов «4» и «5», следовательно они обрабатываются алгоритмом скольжения. Прочие элементы и узлы в контактной задаче не рассматриваются.

Рисунок 1.4 – Схема упорядочивания контактной границы

Радиус определяется формулой $R = nV_{max}\Delta t$,

где Δt – шаг по времени, V_{max} – максимальная скорость узлов,

n – число циклов после которого происходит перестройка подмножества.

Экономия времени счета будет тем больше, чем больше и сложнее контактная граница и больше параметр *n*. 1.7.5 Алгоритм эрозии расчетных элементов

В подразделе описан алгоритм эрозии расчетных элементов, введенного в расчетную часть метода с целью избежание нефизических деформаций в процессе разрушения.

В вычислительных программах, основанных на лагранжевых методах, часто возникают трудности, вызванные большими дисторсиями расчетных элементов (ячеек). В этом случае шаг по времени уменьшается, что приводит к резкому уменьшению производительности программы, а при дальнейшем уменьшении площади элемента, счет становится и вовсе невозможен.

С целью преодоления этого недостатка иногда используют перестройку расчетной сетки. Однако, при перестройки сетки необходимо совершается усреднение расчетных параметров элементов, как правило, лежащих на контактных поверхностях, что приводит к значительным ошибкам. Причем, чем чаще перестраивается сетка, тем больше усредняются параметры в элементах и тем больше ошибка.

Другой способ преодоления этого недостатка, по аналогии с гидродинамической эрозией, назван алгоритмом эрозии. Вводится критерий эрозии, как правило, это эквивалентная пластическая деформация элемента $\varepsilon_i^p = 0.5 \sqrt{\varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p}$, при достижении которой заданного значения элемент удаляется из счета, но так, что масса его сохраняется в ассоциированных с ним узлах, обеспечивая закон сохранения импульса. Если образуются свободные узлы (узлы, не имеющие ассоциированных с ним элементов), то они также консервативны по импульсу и, подобно другим граничным узлам, находящимся в контактной области, обрабатываются алгоритмом скольжения. Поскольку расчетная область после акта эрозии уменьшается на некоторое число элементов, свободная и контактная поверхности перестраиваются специальным алгоритмом.

Полученная после этого контактная поверхность иногда получается сильно изломанной, что ухудшает сходимость итерационного процесса в алгоритме скольжения. В некоторых работах предполагается в дополнение к эквивалентной

пластической деформации критерий жесткости элемента (отношение минимальной высоты треугольника к максимальной длине его стороны) и критерий величины угла, лежащего напротив стороны элемента образующей свободную поверхность. После проведения серии расчетов автором из этих трех критериев оставлены эквивалентная пластическая деформация и жесткость элемента, которые, на его взгляд, хорошо дополняют процесс корректировки контактной поверхности, приводя её к достаточно гладкому виду. На рисунке 1.4 приведены некоторые варианты контактных поверхностей и пояснения к работе алгоритма эрозии.



а) – эрозия выполняется в элементе Ω, который лежит на свободной поверхности A-B-C-D;
б) – после удаления элемента Ω образуется свободная поверхность A-A⁺-B-C-D;
в) – эрозия выполняется в элементах Ω1 и Ω2 лежащих на свободной поверхности A-B-C-D;
г) – после удаления элементов Ω1 и Ω2 образуется свободная поверхность A⁺-C-D и свободные узлы A и B.

Рисунок 1.5 – Примеры образования новой свободной поверхности при эрозии элементов

1.7.6 Алгоритм сглаживания контактной границы при больших деформациях

В подразделе представлен оригинальный алгоритм сглаживания контактной границы при больших деформациях. При помощи данного алгоритма становится возможным решать задачи взрывного нагружения льда.

При моделировании взрыва расчетные ячейки, содержащие продукты детонации (ПД), во много раз увеличивают свой объём по сравнению с ячейками их не содержащими. Вследствие этого между ними значительно нарушаются первоначальные пропорции на контактной поверхности, понижая тем самым точность расчета. Схожая проблема возникает при динамическом взаимодействии тел с сильно отличающимися пределами текучести, когда одно из тел деформируется в значительно большей степени, чем другое.

С целью преодоления этого недостатка, для ячеек (элементов) сетки, содержащих ПД и лежащих на контактной поверхности, в данной работе используется их автоматическая перестройка в виде деления.

В качестве примера, поясняющего проблему, возникающую при увеличении объёма ячеек содержащих ПД, и способа её разрешения приведён расчет детонации ВВ расположенного на стальной плите (рисунок 1.7). На рисунке 1.7а изображена начальная конфигурация «ВВ–Стальная плита», на которой триангуляционная сетка одинакова и для ВВ, и для плиты. Через 9 мкс после детонации на стороне треугольного элемента сетки ПД укладывается от 2 до 4 элементов стальной плиты (рисунок 1.6б). Увеличенные звенья ломаной кривой не позволяют гладко описывать контактную поверхность, ухудшая точность расчета параметров материалов по обе стороны от неё. Применение же алгоритма деления элементов позволяет получить более гладкую контактную поверхность (рисунок 1.7в). Изображения на рисунке 1.8 иллюстрируют частный вариант применения алгоритма, но в общем случае деление элементов осуществляется не только вдоль контактной границы, но и по глубине расположения от нее.

53



а) – конфигурация «ВВ-Стальная плита» в начальный момент времени;

б) – расчетная сетка «ПД-Стальная плита» без деления элементов на контактной границе через 9 мкс после детонации;

в) – то же самое с делением элементов содержащих ПД на контактной границе.





Рисунок 1.8 – Взрыв шаровидного заряда ВВ (а, б), взрыв накладки из ВВ (в) на стальной пластине с отверстием

Элементы триангуляционной сетки, аппроксимирующей некоторую расчетную область, двух типов: расположенные внутри области и на ее границе. В соответствие с этим делятся они по-разному. Деление внутренних элементов изображено на рисунке 1.9а, а деление граничных элементов на рисунке 1.9б.



а) – деление внутренних элементов;
 б) – деление граничных элементов.

Рисунок 1.9 – Схема деления элементов

На первом шаге алгоритма деления проверяется выполнение критерия деления, в данном случае это площадь элемента. Если площадь превысила заданную величину, то определяется сторона элемента наибольшей длины. Затем эта сторона делится пополам. Точка деления стороны становится новым узлом для сопряженных элементов. После этого перестраивается массив, связывающий локальные и глобальные номера элементов в окрестности вновь образованных элементов. Затем вычисляются новые параметры элементов и узлов, лежащих в этой окрестности, в соответствии с законами сохранения. На последнем шаге, если делился граничный элемент, переопределяется контактная граница.

Необходимо отметить, что поскольку деление элементов осуществляется с целью выравнивания звеньев ломаных кривых аппроксимирующих противолежащие стороны именно контактной границы, то задается параметр, ограничивающий применение алгоритма деления в зависимости от глубины расположения элемента от контактной границы.

В соответствии с вышеизложенным алгоритмом деления элементов на рисунке 1.10 изображены результаты численного расчета детонации ВВ в стальном стакане, помещённом в воду. Через 53 мкс после инициирования детонации видны разрушения, возникшие в стакане под действием ПД, которые вытесняют воду, образую в ней завихрение (обозначено цифрой 1).



Рисунок 1.10 – Взрыв ТНТ в стальном стакане, помещенном в воду



Рисунок 1.11 – Стальной стакан с ВВ, помещённый в воду в t = 0 мкс, стальной стакан с ВВ, помещенный в воду подо льдом в момент времени 150 мкс

Получение такой контактной границы в подобных лагранжевых задачах, без применения алгоритма деления элементов, практически невозможно.

На рисунке 1.11 приведена конфигурация ледяной плиты при детонации ВВ в стальном стакане, помещенном в воду подо льдом. В этом случае контактная граница также обработана алгоритмом деления элементов.

В заключение отметим, что применение алгоритма автоматического деления расчетных элементов позволяет более точно моделировать гладкую контактную границу между продуктами детонации и другими материалами, а значит и более точно моделировать процессы взрывного нагружения тел.

1.7.7 Блок-схема расчета

Полностью весь процесс вычислений, можно представить в виде следующей последовательности:

- 1. Задание триангулированного аналога соударяющихся тел, их физикомеханических параметров, начальных и граничных условий.
- Определение параметров задающих узлы (координаты, скорости, ...) и элементы (площадь, напряжения, ...).
- 3. Вычисление шага интегрирования по условию Куранта.
- 4. Вычисление скоростей деформаций.
- 5. Построение и обработка контактных поверхностей.
- 6. Вычисление новых параметров элементов: площадь, плотность, напряжения, энергия,
- 7. Вычисление сосредоточенных сил в узлах элементах.
- 8. Вычисление новых значений скоростей узлов и координат.
- Проверка выполнения критериев разрушения. В случае выполнения введение дополнительных узлов и удаление элементов.
- 10. Корректировка граничных условий для новой конфигурации рассчитываемых областей.
- 11. Проверка выполнения условия сохранения замкнутой системой ее полной энергии и массы.
- 12. Проверка критерия окончания счета.

В блок-схеме можно визуально отобразить последовательность выполнения программы. Краткая блок-схема программы «Ударно-взрывное нагружение конструкций» приведена ниже. Стандартизованные символы, прописаны и утверждены Американским Национальным Институтом Стандартов (ANSI).



Блок-схема главной программы











1.8 Выводы по разделу

Поведение льда при ударных и взрывных нагрузках описывается сжимаемой, пористой, упруго-пластической средой с учетом свойств прочности и ударно-волновых явлений. Модель разрушения льда предусматривает совместное образование отрывных и сдвиговых разрушений и его фрагментарное разрушение. Продукты детонации описываются политропой Ландау–Станкюковича. Модифицирован численный лагранжев метод, оригинальность которого заключается в новом способе выделения поверхностей разрыва применительно к решению современных динамических задач механики деформированного тела. Нововведения заключаются в алгоритме сглаживания контактной границы при больших деформациях для моделирования гладкой контактной границы между продуктами детонации и другими материалами. Кратко приведены алгоритмы скольжения, построения свободной поверхности, создания упорядоченной контактной границы и эрозии расчетных элементов.

Для случая плоской и осевой симметрии в двумерной постановке создан программный комплекс, позволяющий в интерактивном режиме осуществлять подготовку начальных данных, осуществлять расчет в консольном режиме, а также графическую и табличную обработку полученных результатов. В процессе счета можно проводить мониторинг параметров среды в любые интересующие оператора моменты времени и месте. В любой выбранный момент времени можно визуализировать процесс соударения на мониторе в виде рассчитанных конфигураций, полей скоростей, изолиний параметров и их карт, площадки к главным напряжениям в заданном масштабе и цвете.

65

2 Тестовые расчеты

В разделе представлены результаты тестовых расчетов, выполненных с применением предложенной модели и разработанных алгоритмов расчета. Тестирование является важнейшим инструментом проверки степени соответствия построенных математической модели и ее численного аналога реальному физическому процессу. Поэтому вначале всегда проводят внутренние, качественные и количественные тесты. Только после решения тестовых задач становится полной мере возможным интерпретировать результаты В вычислительных экспериментов в прогностических целях.

В основного качестве инструмента исследований используется многофункциональный пользовательский программный комплекс расчета многоконтактных динамических задач МДТТ. Программный продукт разработан в лаборатории №21 (Прочности) в обособленном структурном подразделении Научно-исследовательском институте прикладной математики И механики Томского государственного университета. Программная реализация метода ударновзрывного нагружения льда с алгоритмом сглаживания контактной границы осуществлена в программе для ЭВМ «Взрывное нагружение конструкций. Осесимметричная задача». Программа-решатель позволяет в консольном режиме производить расчет процесса динамического нагружения льда при различных начальных условиях [111]. Исходный код программы написан на языке объектноориентированного программирования в интегрированной среде разработке Visual Studio 2008.

Ниже представлены результаты следующих тестовых задач:

1. Задача о соударении стальных цилиндров (внутренний тест).

2. Задача об ударе металлических и ледяного цилиндров по жесткой стенке (количественный тест).

3. Задача о взрывном нагружении льда безоболочечным зарядом ВВ (количественный тест).

4. Задача об ударе ледяного цилиндра по тонкой алюминиевой пластине

66

2.1 Задача о распаде разрыва (соударении двух цилиндров)

В данном подразделе численно решены тестовые задачи о фронтальном соударении двух стальных цилиндров и ударе тонкого стального цилиндра по плите.

Решение первой задачи доказывает выполнение универсального принципа симметрии относительной контактной поверхности и относительно оси взаимодействующих тел. В настоящее время эта задача широко известна. В данной постановке задача впервые решена в докторской диссертации Глазырина В.П., посредством предыдущей программы-решателя в рамках разработанного программного комплекса [110]. Расчеты проведены для осесимметричного случая при помощи разработанной программы для ЭВМ [111]. Цель расчетов – проверка выполнения универсального принципа симметрии и сравнение численных результатов с аналитическим решением Ренкина – Гюгонио.

Вначале рассмотрим соударение двух стальных цилиндров, размерами в продольном сечении (15×15) мм. Начальная скорость одного цилиндра $V_0 = 400$ м/с, второй – покоится (рисунок 2.1).

На этом примере проверяется выполнение соотношений в задаче распада разрыва, а в общем случае выполнение универсального принципа симметрии. На рисунке 2.1а изображена конфигурация соударяющихся цилиндров в момент времени t = 5 мкс. Видно, что на протяжении всего процесса соударения наблюдается симметрия формы цилиндров относительно контактной поверхности. На рисунке 2.1б изображены изолинии эквивалентной пластической деформации, иллюстрирующие пластическое течение материала от первой до третьей микросекунды взаимодействия. На рисунке 2.1в изображены изолинии давления, иллюстрирующие трансформацию этой величины от первой до четвертой микросекунды удара. Видно, что изолинии давления и эквивалентной пластической деформации, так же, как и конфигурации в целом, симметричны относительно контактной поверхности.



в)

Рисунок 2.1 – Осевое соударение стальных идентичных цилиндров

На рисунке 2.2 приведены результаты расчета удара стальной пластины по плите. Толщина пластины – 4 мм, а толщина плиты – 40 мм. Начальная скорость –400 м/с. Предел текучести обеих пластин равен 1ГПа. Соотношение между осевыми и радиальными размерами тел позволяют считать процесс соударения вблизи оси плоским. На рисунке 2.2б изображена волна напряжения $(-P+S_z)$, распространяющаяся по оси взаимодействия в моменты времени 1, 3, 5 мкс.

68



a)





а) – конфигурации взаимодействующих тел в 0, 5 мкс;
б) – сумма компоненты девиатора тензора напряжений S_z и гидростатического давления P;
в) – компонента девиатора тензора напряжений S_z; гидростатическое давление P.

Рисунок 2.2 – Результаты расчетов задачи о соударении ударников

69

На рисунке хорошо видна эволюция фронта ударной волны и волны, в полном соответствии с теорией Ренкино – Гюгонио. В данной задаче рассчитывались параметры течения по обе стороны контактной поверхности. Для одинаковых материалов взаимодействующих тел за фронтом ударной волны массовая скорость равна $V_0/2$, а давление $P=\rho_0DU$ (ρ_0 – начальная плотность, D – скорость ударной волны, U – массовая скорость). В данном случае эти расчетные величины равны 200 м/с, и 7,2 ГПа соответственно, что и наблюдалось в расчетах (аналитическое решение на графике выделено пунктиром). На рисунке 2.2в приведен график гидростатического давления и осевой компоненты девиатора напряжений для момента времени 4 мкс отдельно для каждой из этих величин.

Сравнение результатов расчетов данных задач по предыдущей программерешателю и программе, содержащий алгоритм сглаживания контактной границы при больших деформациях, показал полное совпадение результатов. Кривые давления и напряжений были одинаковыми. Из чего следует, что наличие указанного алгоритма в расчетной части модели не приводит к увеличению погрешности.

Проверка численного решения на каждом временном шаге осуществлялось путем контроля за сохранением замкнутой системой полной энергией. Дисбаланс энергии в отдельных случаях достигал 20%.

Таким образом, решение данных задач показало выполнение универсального принципа симметрии и соответствие с теорией Ренкина – Гюгонио.

2.2 Задача о соударении стального цилиндра с жесткой стенкой

В подразделе проведены тестовые задачи о соударении алюминиевого, стального и ледяного цилиндров с жесткой стенкой. Такая задача широко известна в научной литературе как тест Тейлора. Выбор алюминия как объекта исследований объясняется широким его использованием в ракетно-космической отрасли. Сталь является наиболее распространённым конструкционным материалом и моделируется в диссертационной работе.

В лабораторном эксперименте динамика процесса регистрировалась с помощью рентгено-импульсных аппаратов, а жесткой стенкой служило высокопрочное основание из твердого сплава ВК-8. Экспериментальные данные были получены в НИИ прикладной математики и механики А.В. Брагиным и В.М. Захаровым. Схема эксперимента подробно описана в [112]. Физико-механические характеристики металлов взяты тамже.

Вначале были решены задачи соударения алюминиевого и стального цилиндров с жесткой стенкой. Численные расчеты проведены при исходных данных, соответствующим условиям эксперимента: начальная длина цилиндра l_0 = 20,6 мм, диаметр $d_0 = 6,88$ мм, скорость удара варьировалась от 161 до 367 м/с. Триангуляционная область разбивалась «конвертом» на 928 расчетных элемента. Временной шаг интегрирования был равен 0,07 мкс. В расчетах фиксировалось относительное укорочение цилиндра, равное отношению его конечной длины l_k к первоначальной l_0 . Время счета составляло не более 100 мкс, т.к. после деформационные картины и области разрушения практически не менялись.



а) – Зависимость укорочения алюминиевого цилиндра от времени;
 б) – Зависимость укорочения стального цилиндра от времени;

Рисунок 2.3 – Результаты расчетов процесса соударения цилиндров с жесткой стенкой

Установлено, что процессу разрушения ударников предшествовала пластическая деформация в радиальном направлении. Разрушения носовой части ударников были незначительными. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных представлены на рисунке 2.3. Видно, что с ростом начальной скорости удара величина l_k/l_0 уменьшается в диапазоне от 0,9 до 0,706. Зависимости укорочения цилиндра от начальной скорости удара могут аппроксимироваться линейной функцией. Расхождение между расчетом и экспериментом составило не более 2%.

Интерес представляют результаты моделирования процесса соударения ледяного цилиндра с жесткой стенкой. Процесс соударения исследован в диапазоне от 50 до 150 м/с. Серия вычислительных экспериментов состояла из 5 вариантов, в каждом последующем начальная скорость увеличивалась на 25 м/с. Последний вариант не рассматривался из-за полного разрушения ударника. Процесс счета в данном случае увеличился до 200 мкс. На рисунке 2.4 показаны исходные и конечные конфигурации ледяного цилиндра для четырех вариантов расчетов.

Выявлено, что очаги разрушения зарождаются в носовой части цилиндра на первых микросекундах процесса. Формированию зоны разрушений во льду предшествует его незначительная пластическая деформация в радиальном направлении. В дальнейшем область разрушения распространяется по всему цилиндру. В процессе соударения наблюдается фрагментарное разрушение льда и разлет его осколков.



a)


Рисунок 2.4 – Результаты расчетов соударения ледяного цилиндра с жесткой стенкой

Установлено, что только в первых двух вариантах в донной части цилиндра можно выделить область неразрушенного льда. Скорее всего, в лабораторных условиях они будут разрушены при отскоке от жесткой стенки. В варианте 3 видно, что донная часть цилиндра еще способна сохранять свою форму, при этом носовая часть цилиндра уже полностью разрушена. В варианте 4 в момент времени окончания счета ледяной цилиндр полностью разрушен и представляет груду осколков небольших размеров. В процессе счета можно наблюдать формирование во льду магистральных трещин, которые распространяются внутри цилиндра параллельно, перпендикулярно и под углом к оси симметрии. Вполне очевидно, что разрушения во льду можно контролировать, увеличивая размеры цилиндра и уменьшая начальную скорость. Однако, сценарий разрушения льда, скорее всего, будет тем же самым.

Получено, что с ростом начальной скорости высота цилиндра уменьшается, причем после начальной скорости 125 м/с, вычислить конечную высоту цилиндра представляет определенную трудность. Относительное укорочение цилиндра составило 0,737, 0,582, 0, 432 и 0,301 соответственно. Сопоставляя расчетные данные процесса соударения ледяного и металлического цилиндров заключаем, что относительное укорочение в первом случае значительно меньше, чем во втором. Данный факт является очевидным и не комментируется.

Результаты теоретико-экспериментальных исследований по соударению ледяных цилиндров с жесткой стенкой упомянуты в [34]. На рисунке 2.5 изображены фотографии высокоскоростной съемки соударения ледяного цилиндра в различные моменты времени. По фотографиям можно проследить процесс разрушения льда во времени. Начальная скорость ударника составила 165 м/с. Отчетливо видны осколки льда, которые образовались в результате разрушения носовой части цилиндра. Наблюдается их разлет в радиальном и осевом направлении отмеченный в расчетах. После процесса соударения ледяной цилиндр был полностью разрушен.



Рисунок 2.5 – Соударение ледяного цилиндра с жесткой стенкой (эксперимент)

Сравнивая рисунки 2.4г и 2.5, заключаем, что в обоих случаях ледяной цилиндр полностью разрушен. Процесс разрушения цилиндра в результате удара по жесткой стенке сопровождался фрагментацией льда. После процесса соударения невозможно рассчитать укорочение цилиндра. Скорее всего, укорочение цилиндра можно вычислить, понижая начальную скорость удара до 100 м/с.

В качестве полученных результатов отметим следующее. Сравнение расчетных и экспериментальных данных процесса соударения цилиндров с жесткой стенкой указал на их хорошее совпадение. Расхождение между экспериментом и расчетами составляет не более 2%. Визуальное сопоставление картин разрушения льда также свидетельствует в пользу численного метода расчетов.

2.3 Задача о взрывном нагружении льда

В подразделе сравнивались результаты расчетов, полученных при помощи разработанного метода численного моделирования с данными натурных экспериментов.

Для проверки достоверности результатов расчета взрывного нагружения льда, было проведено сравнение натурного и численного экспериментов. Натурный эксперимент проведен сотрудниками НИИ прикладной математики и механики совместно с ООО «КузбассСпецВзрыв» на реке Томь в апреле 2013 года в рамках ежегодных противопаводковых мероприятий. Предметом исследования был размер взрывной майны, образованной в процессе подрыва BB.

В англоязычной литературе аналогичная задача называется «UNDEX – Under explosive». Подрыв 80-ти сантиметрового льда осуществлялся зарядом промышленного взрывчатого вещества марки Эмуласт AC-30-ФП-90 в полиэтиленовой упаковке и массой 4 кг. Начальная плотность BB равнялась 1,35 г/см³, скорость детонации 4,7 км/с. Тротиловый эквивалент по теплоте взрыва 0,82. Ударно-волновое сжатие воды интерполируется в соответствии с экспериментальными данными из [113].



Рисунок 2.6 – Эксперимент по подрыву речного льда

На рисунке 2.6 изображен результат подрыва однолетнего речного льда. Было проведено 10 взрывов. При проведении эксперимента ледяной покров был заснеженным. По результатам измерений нескольких диаметров усредненный размер образовавшейся майны равняется примерно 2 метрам.

Рассмотренный выше натурный эксперимент был численно смоделирован компьютерной программой с вышеописанным алгоритмом. Расчетная область разбивалась конвертом на 14500 элементов. Ледяная пластина толщиной 80 см располагалась на водной подложке, а ВВ помещалось непосредственно подо льдом (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Численное моделирование подрыва льда расположенного, на водной подложке

На рисунке 2.7 изображены расчетные конфигурации пластины после подрыва льда в моменты времени 0, 5 и 10.7 миллисекунды. Видно, что наиболее обширные разрушения при взрывном нагружение происходят на свободной поверхности льда. Эти разрушения вызваны растягивающими напряжениями, возникающими при выходе волны сжатия на поверхность льда. Образовавшиеся 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 составляло (10×10) см. На рисунке 2.8а приведен график распределения скорости свободной поверхности льда в радиальном направлении для двух моментов времени. В момент времени 1 мс кривая на графике гладкая, а 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 лёд в процессе деформации отламывается кусками, по мере того как возникают разрушающие напряжения. Каждый кусок теряет связь с соседней областью, но сохраняет приобретённую им до этого скорость. В свою очередь, оставшийся лёд до момента разрушения продолжает тормозиться соседними областями. В итоге получается именно такое распределение скоростей.



 а) – 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.

Рисунок 2.8 – Распределение скорости поверхности льда

На рисунок 2.86 приведен график скорости осевой точки свободной поверхности льда, т.е. точки на вершине купола образованного взрывом (рисунок 2.7). В момент времени 250 мкс эта точка приобретает скорость равную примерно 105 м/с и впоследствии практически не изменяется вплоть до 5 мс.

В подразделе решена тестовая задача о взрыве заряда ВВ в воде из подо льда. Сравнивались размеры расчетной и реальной взрывной майны, полученной в результате действия продуктов детонации на ледяной покров. Установлено, что

расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превысило 5%, что свидетельствует о хорошем совпадении. Автор выражает благодарность главному инженеру ОАО «КузбассСпецВзрыв» к.т.н. А.Н. Садохину за помощь в проведении экспериментов.

2.4 Задача об ударе ледяного цилиндра по тонкой алюминиевой пластине

В подразделе решена тестовая задача о соударении ледяных ударников с тонкой дюралюминиевой пластиной при начальных скоростях удара до 126 м/с.

Впервые в качестве количественного теста была решена задача о нормальном ударе ледяного цилиндра по тонкой дюралюминиевой пластине [43]. 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.









На рисунке 2.9а,б показаны экспериментальная и расчетные хронограммы 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 соударения сопровождается растеканием ударника в радиальном направлении и формированием прогиба пластины в осевом направлении вплоть до 160 мкс. Компьютерная визуализация вычислительного эксперимента доказывает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Рисунок 2.9в иллюстрирует остаточный прогиб пластины в результате пластической деформации 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». Пластическая деформация алюминия не сопровождалась его разрушением. Рисунок 2.9г изображает графическую зависимость остаточного прогиба пластины от времени. Видно, что формирование прогиба в пластине происходило почти весь процесс взаимодействия. Следует отметить, что в течение первых 200 мкс этот процесс проходил более заметно.

В разделе проведен заключительный проверочный этап на предмет сравнения величины остаточного прогиба пластины при ударе ледяного цилиндра. 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. Таким образом, расхождение составило 30,5 и 11,2%. Анализ результатов показал, что такое расхождение объясняется различием алюминиевых сплавов AU4G и Д16 в физическом и вычислительном экспериментах.

2.5 Физико-механические характеристики льда и других материалов

В подразделе приведены основные физико-механические характеристики льда, алюминиевого сплава Д16, конструкционной стали Ст.3 и штатного взрывчатого вещества Эмуласт АС-30-ФП-90.

Решение тестовых задач позволили получить конкретные значения прочностных характеристик льда. Такими характеристиками являлись предел текучести σ_r , откольная прочность σ_k , удельная работа сдвиговых пластических деформаций A_p^* и эквивалентная пластическая деформация ε_{eqp} . Корректировка данных величин в определенном диапазоне позволила получить численные результаты наиболее приближенные к реальным. Полученные величины будут использоваться при решении других задач ударно-взрывного нагружения льда. Остальные характеристики взяты из общедоступных источников [103,104, 112].

В таблице 2.1 представлены основные физико-механические характеристики алюминия (Д16), стали (Ст.3), льда и взрывчатого вещества Эмуласт АС-30-ФП-90.

	Алюминий	Сталь	Лёд	Эмуласт	
K_{I} , ГПа	76,5	153,0	8,4	10,0	
<i>К</i> ₂ , ГПа	165,9	176,0	16,8	23,0	
<i>К</i> ₃ , ГПа	42,8	53,23	8,4	15,0	
$ ho_{0},$ г/ c^{3}	2,78	7,87	0,92	1,34	
C_o , M/C	5240	4417	3020	2540	
G, ГПа	25,8	81,4	3,2	26,9	
$σ_{T}$, ΓΠα	0,274	0,42	0,0022	0,025	
$σ_k$, ΓΠα	$ σ_k, \Gamma\Pi a = 0,8 $		0,003	0,3	
A_p^* , кДж/кг	А _p [*] , кДж/кг 35		5	100	
$\varepsilon_{_{eqp}}$, бзрм	<i>є_{едр}</i> , бзрм 1,2		1	2	

Таблица 2.1 – Основные физико-механические характеристики материалов

Отметим, что значение начальной плотности льда выбрано 0,92 г/см³, что практически совпадает с плотностью чистого льда, теоретически вычисленного по размерам элементарной ячейки кристалла при температуре 0°С и давлением 1 атм.

Модуль сдвига G совпадает с экспериментальными данными, полученными импульсным ультразвуковым методом при частоте 500 Гц. Экспериментальные результаты получены еще советскими учеными еще в середине прошлого века на Ладожском озере [23]. Предел прочности льда σ_k близок к значению прочности речного льда на сжатие при отрицательных температурах.

2.6 Выводы по разделу

Тестирование разработанных средств математического моделирование проведено в несколько этапов путем решения наиболее известных внутренних, качественных и количественных тестов. Полное соответствие с теорией Ренкина – Гюгонио достигнуто путем решения двух внутренних тестов. На решении задачи о фронтальном соударении одинаковых цилиндров показана симметрия как относительно контактной границы, так и оси взаимодействующих тел. Расчетные значения массовой скорости и гидростатического давления практически совпадали с аналитическим решением. Вычислены компоненты девиатора тензора напряжений в различные моменты времени.

Решение теста Тейлора позволило сравнить относительное укорочение цилиндров из конструкционных материалов и льда в эксперименте и расчетах. Получено, что зависимость относительного укорочение цилиндров от начальной скорости может аппроксимироваться линейной функцией. Выявлено, что процесс соударения стального и алюминиевого цилиндров сопровождалось только пластической деформацией и небольшими разрушениями их носовой части. Процесс соударения ледяного цилиндра, наоборот, протекал с сильными разрушениями льда. Данный факт подтвержден экспериментальными результатами.

Впервые решена тестовая задача о взрыве заряда ВВ в воде из подо льда. Предметом исследования являлось формирования под действием продуктов детонации в однолетнем речном льду взрывной майны. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превысило 5%, что свидетельствует в пользу разработанного численного метода.

Решена задача о соударение ледяных цилиндров с тонкой дюралюминиевой пластиной при низких начальных скоростях удара. Предметом исследования являлся остаточный прогиб алюминиевой пластины под действием льда. Расхождение достигало 30%, что объясняется различием алюминиевых сплавов Д16 и AU4G используемых в расчетах и эксперименте. Картины разрушения льда в расчетах и эксперименте имели много общего.

83

Таким образом, проведенные тестовые расчеты показали, что результаты численного моделирования достаточно адекватно передают основные закономерности высокоскоростных деформирования поликристаллического льда и хорошо согласуются с экспериментальными данными в рассмотренном диапазоне начальных условий.

3 Исследование процесса внедрения компактных ударников в ледяную преграду

Соударение различных твердых тел со льдом представляет определенный научный интерес. Анализ открытых литературных источников выявил тот факт, что первые исследовательские работы по данной теме были посвящены процессу соударения ледяной сферы с жесткой стенкой или алюминиевой преградой конечной толщины [114]. В ряде работ объектами исследования выступают ударники и преграды из монокристаллического, поликристаллического, конжеляционного и пресноводного льдов [43].

В данном разделе изучен процесс внедрения компактных ударников в лед в диапазоне начальных скоростей ниже скорости звука в воздухе. В процессе вычислительного эксперимента анализировались деформационные картины и области разрушения льда, построены графики временных зависимостей скорости ударника и глубины его внедрения в лед, а также поврежденности льда, гидростатического давления и девиаторных напряжений.

3.1 Расчет процесса внедрения цилиндрического ударника в лед

В настоящем подразделе рассмотрен процесс внедрения цилиндрического ударника в лед при низких начальных скоростях удара.

Физическая постановка задачи формулируется как контактное взаимодействие однородного ударника с ледяным цилиндром. Ударник – прямой круговой цилиндр размерами в сечении 5×5 мм и массой 0,787 г. Материал ударника – сталь ШХ-15. Преграда – ледяной цилиндр диаметром 60 мм и высотой 45 мм. Серия вычислительных экспериментов состояла из 12 вариантов, в каждом последующем начальная скорость удараV₀ увеличивалась на 25 м/с. Диапазон изменения начальной скорости варьировался от 50 до 325 м/с. Таким образом в варианте 1 скорость была равной 50 м/с, а в варианте $12\div325$ м/с. Расчеты проведены для 2D осесимметричного случая. Критерием остановки счета являлось полное торможение ударника, т.е. момент времени, при котором скорость ударника становилась равной нулю или отрицательной. На контактной границе ударника и преграды задано условие скольжения. Для расчета гидростатического давления и девиаторных напряжений была выбрана контрольная точка, расположенная на оси симметрии в середине ледяного цилиндра.

На рисунке 3.1 представленная исходная конфигурация ударника-цилиндра и конечно-элементная модель, полученная при помощи компьютерной программы с алгоритмом автоматического разбиения расчетной области. В качестве расчетного элемента использовался равнобедренный треугольник. Расчетная область «ударник – мишень» состояла из 5384 элементов.



a) – 3D исходная конфигурация цилиндра;

б) – 2D конечно-элементная модель: количество элементов 100.
 Рисунок 3.1 – Конфигурация цилиндрического ударника

На рисунке 3.2 изображены расчетные конфигурации «ударник – мишень» в меридиональной плоскости для вариантов 1–5. В данных вариантах скорость ударника составляла 50, 75, 100, 125 и 150 м/с, соответственно.

Детально проанализируем процесс внедрения стального цилиндра для первых трех вариантов. Расчетным путем установлено, что первые очаги разрушения образуются во льду на 2-ой мкс в зоне контакта «ударник – лед». Далее, с 3 до 10-ой мкс происходит развитие зоны разрушений в области «ударник – лед», которая распространяется вглубь преграды в направлении движения ударника. Рост очагов разрушения отмечен вплоть до 10-й мкс, а после ударник внедряется в ослабленный растягивающими напряжениями материал. Это сопровождается выплеском приповерхностных слоев льда с последующей фрагментацией. Зона разрушения в области контакта «ударник – лед» напоминала форму конуса, вершина которого направлена вниз.

В вариантах 4, 5 на начальных стадиях процесса формировались области разрушения как в зоне контакта «ударник – мишень», так и вблизи тыльной поверхности ледяного цилиндра. Развитие разрушений здесь происходило путем слияния очагов разрушения в магистральные трещины, расположенных под различными углами к оси симметрии. В дальнейшем через некоторые из них будет проходить формирование откольной тарелки с тыльной стороны. В варианте 4 на 165 мкс кратер в сечении напоминает форму овала. Заметны магистральные трещины вблизи зоны контакта «ударник – лед». В дальнейшем, при увеличении начальной скорости удара здесь будет сформирована кольцевая трещина отрыва, через которую произойдет отделение лицевой откольной тарелки. На рисунке 3.2 буквой «А» отмечено данное место. В ближайшей окрестности произойдет откалывание льда.

На рисунке 3.3 показаны рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для вариантов расчетов 6–10. Видно, что в трех вариантах (варианты 8, 9, 10) процесс внедрения сопровождался лицевым отколом. Имело место образование очагов разрушения возле боковых поверхностей ударного кратера. В конце процесса внедрения значительных изменений в областях разрушения льда выявлено не было. Кроме того образовывались трещины, расположенные под различным углом к оси симметрии (на рисунке 3.3 буквы «В» и «С»). На основании результатов расчетов было выявлено, что основной объем разрушений льда формировался в области контакта «ударник – мишень».



Рисунок 3.2 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для вариантов 1–5



Рисунок 3.3 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для вариантов 6–10



 а) – конечно-элементное разбиение для варианта 11;
 б) – рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» при *t*= 275 мкс. Рисунок 3.4– Результаты расчетов для варианта 11



а) – конечно-элементное разбиение для варианта 12;
б) – рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» при *t*= 305 мкс. Рисунок 3.5 – Результаты расчета для варианта 12



Рисунок 3.6 – Зависимость скорости ударника от времени



Рисунок 3.7 – Зависимости глубины внедрения ударника в лед от времени



Рисунок 3.8 – Зависимости поврежденности льда от времени



Рисунок 3.9 – Зависимость поврежденности и скорости изменения поврежденности льда от времени для варианта 12

Анализ деформационных картин и областей разрушения льда в двух последних вариантах показал, что процесс внедрения сопровождался отделением откольных тарелок с лицевой и тыльной стороны цилиндра (рисунок 3.4). На рисунке 3.4а правая часть рисунка показывает триангуляционную сетку до процесса соударения, а левая часть показывает состояние сетки в момент времени 275 мкс. Откольная тарелка, отделившаяся с тыльной стороны, имела форму усеченного конуса. Расчетная глубина внедрения была близка к радиусу ледяного цилиндра. В процессе внедрения во льду образовывались магистральные трещины, которые распространялись от боковых поверхностей к оси симметрии, разделяя исследуемый образец на две части (буква "D" на рисунке 3.4). Рассчитанное время их зарождения в 11 и 12 вариантах составило 14 и 30 мкс соответственно. Объем поврежденности льда увеличивался за счет вновь образованных зон разрушений вблизи боковых поверхностей.

На рисунке 3.6 представлен график зависимости скорости цилиндрического ударника от времени для предпоследнего варианта расчета. Скорость ударника рассчитывалась как скорость его центра масс [112]. Видно, что процесс внедрения длился 275 мкс. Временные зависимости скорости легко могут быть аппроксимированы линейной функцией, а кривая на графике образует тупой угол с осью абсцисс. В остальных вариантах профили скорости имели аналогичный вид. Выявлено, что с ростом начальной скорости наблюдалось увеличение времени внедрения цилиндра. Данный факт является очевидным и в дальнейшем не комментируется.

Семейство кривых на рисунке 3.7 иллюстрирует зависимость глубины внедрения ударника от времени. Временные зависимости глубины внедрения ударника могут быть аппроксимированы степенной функцией. На первых микросекундах процесса кривые располагаются достаточно близко друг к другу. Глубина внедрения ударника увеличивается прямо пропорционально увеличению его начальной скорости в рассматриваемом диапазоне. В первых двух вариантах после 75 мкс скорость становится нулевой. После 100 мкс большинство кривых параллельны друг другу.

На рисунке 3.8 приведены графические зависимости поврежденности льда от времени для 12 вариантов расчетов. Параметр поврежденности материала впервые введен в работе [109]. На кривых имеет место «ступенька», которая возникает в результате интенсивных напряжений с последующей разгрузкой, что

92

приводит к формированию объема разрушений на начальных стадиях процесса. Отмечено, что в вариантах 1–8 высота ступеньки увеличивается с ростом начальной скорости. В последних трех вариантах развитие поврежденности льда происходило вплоть до 150 мкс.

Минимальное время накопления повреждений во льду отмечено в первых трех вариантах. Графики для этих вариантов имеют много общего. В следующих трех вариантах кривые поврежденности отличались: сразу же после резкого скачка поврежденности наблюдался пологий участок, наличие которого можно объяснить образованием разрушений в окрестности кратера. В остальных вариантах высота «ступеньки» уменьшалась, а длина пологого участка, наоборот, увеличивалась.

На рисунке 3.9 показана графическая зависимость поврежденности и скорости изменения поврежденности льда от времени для варианта 12.

Видно, что скорость изменения поврежденности достигает своего максимума на 55-й мкс. В интервале от 55 до 160 мкс наблюдаются несколько локальных максимумов, а после 160 мкс скорость изменения поврежденности стремится к нулю. Наличие локальных максимумов можно объяснить эволюцией зон разрушений вблизи тыльной и боковой поверхностей. В остальных вариантах установлено, что скорость изменения поврежденности льда принимала максимальное значение в интервале от 7 до 55 мкс, т.е. вначале процесса внедрения ударника. В варианте 1, 2 максимум скорости был на 7 мкс, а в остальных варьировался от 25 до 50 мкс.

На рисунке 3.10 приведены графические зависимости гидростатического давления и девиаторных напряжений от времени в контрольной точке. Видно, что в вариантах 1–4 во льду зафиксированы отрицательные и положительные давления. Положительные давления возникают при сжатии материала, отрицательные возникают вследствие разгрузки материала через свободные поверхности, вначале через лицевую, а впоследствии через стенки кратера и боковую поверхность. На кривых для вариантов 1, 2, 3, 4 и 9 имеются колебания, которые можно объяснить волновым характером процесса внедрения. Выявлено, что в первых четырех вари-

антах вычисленное давление было меньше, чем предел прочности льда. В варианте 5 давление во льду было равным пределу текучести льда. В вариантах 5–12 давление во льду было больше, чем предел текучести и откольная прочность льда. Максимальное давление получено в варианте 12 и составило 0,014 ГПа. Установлено, что в первом варианте давление было в пять раз меньше, чем откольная прочность льда, а в последнем, наоборот, в пять раз больше.

Развитие девиаторных напряжений во льду для четырех вариантов показано на рисунке 3.10б. Отмечено, что с ростом начальной скорости растут напряжения, при этом максимальное значение зафиксировано в варианте 12 и составило 0,0012 ГПа.



a) – зависимости гидростатического давления от времени;
 б) – зависимости компоненты девиатора тензора напряжений от времени.

Рисунок 3.10 – Результаты расчетов процесса внедрения цилиндрического ударника в лед

В результате моделирования процесса внедрения цилиндрического ударника при низких скоростях было получено следующее.

Процесс внедрения цилиндрического ударника в лед длился не более 0,3 мс. Глубина внедрения ударника достигала радиуса ледяного цилиндра. Характер падения скорости проходил по закону близкому к линейному. Под действием ударника во льду образовывался конический кратер, кольцевые трещины отрыва, а также лицевые и тыльные отколы. Развитие процесса разрушения льда наиболее заметно в течение 150 мкс. Скорость изменения поврежденности льда достигает своего максимума в интервале от 0 до 55 мкс. Рассчитанные значения гидростатического давления и девиаторного напряжения являются низкими (< 1ГПа). Максимальное давление, которое фиксировалось в центре цилиндра, составило 0,014 ГПа. Напряжения, которые генерировались во льду, были на порядок ниже уровня давления.

3.2 Расчет процесса внедрения сферического ударника в лед

В большинстве приложений ударник может иметь различную форму, что делает целесообразным расширение рамок исследований, проведенных в подразделе 3.1. Ниже проведены исследования процесса внедрения сферического ударника в лед. Диаметр сферического ударника d = 5,74 мм, а масса 0,78 г. Материал ударника моделировался конструкционной подшипниковой сталью ШХ-15. Количество расчетных элементов составило 13470. В качестве расчетного элемента использовался конечный элемент типа «конверт». На контактной границе задан алгоритм скольжения. На рисунке 3.11 представлены исходные конфигурации ударника и его конечно-элементное разбиение. Схема вычислительного эксперимента и объект исследования не менялись. Физико-механические характеристики льда приведены в подразделе 2.1.



а) – начальная конфигурация ударника;
 б) – конечно-элементное разбиение.

Рисунок 3.11 – Сферический ударник

На рисунке 3.12 представлены конечные конфигурации «ударник – мишень» для первых пяти вариантов расчетов.

Детальный анализ процесса внедрения сферического ударника в лед позволил выявить следующие закономерности. Как и в предыдущем случае, процесс внедрения сферического ударника проходил без разрушения его материала. Первые очаги разрушения начинают формироваться в зоне контакта «ударник – лед» уже на первой микросекунде процесса. Зафиксировано уплотнение льда в этой области. В процессе внедрения зона разрушений распространяется в направлении движения ударника. Некоторые 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 и более. Таким образом, сферический ударник большую часть процесса внедрялся в ослабленный растягивающими напряжениями лед.

На рисунке 3.13 приведены рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для вариантов 6–10. Внедрение ударника в варианте 6 происходило аналогично первым пяти вариантам. В варианте 7 на расстоянии 7 мм от поверхности «ударник – лед» происходит формирование магистральной трещины. В варианте 10 образуются две магистральные трещины. Первая трещина (обозначение «А») расположена на расстоянии 7 мм от контактной поверхности, а вторая – в средней части исследуемого образца (обозначение «В»). Видно, что объем разрушений льда при внедрении сферического ударника был несколько меньше, чем при внедрении цилиндрического.

На рисунке 3.14 представлены конечные конфигурации «ударник – мишень» для двух последних вариантов расчетов. В варианте 11 в средней части цилиндра сформировалась магистральная трещина, разделяющая исследуемый образец на две почти равные части. Направление распространения трещины было перпендикулярно вектору скорости ударника. Вблизи тыльной поверхности ледяного цилиндра образуется «пробка» конической формы. В варианте 12 картина разрушения несколько меняется, но во льду также образуется «пробка» и две магистральные трещины. Согласно расчетным данным вторая трещина образуется во льду на 45 мкс раньше, чем первая (рисунок 3.14б, обозначение«С», «D»). Формирование «пробки» в последнем варианте сопровождалось распространением косых трещин от поверхности «ударник – лед» к тыльной поверхности. Наибольшие разрушения льда расположены ближе к лицевой поверхности.

Семейство кривых на рисунке 3.15 соответствует изменению глубины внедрения сферического ударника от времени. Анализируя график, можно заключить, что процесс внедрения сферического ударника проходил по сценарию, отмеченному ранее при действии цилиндрического ударника. В данном случае, рассчитанные значения глубин внедрения были несколько больше, а время внедрения меньше. Выявлено, что с ростом начальной скорости удара увеличивается время внедрения ударника, причем в двух последних вариантах оно было примерно одинаковое. Также установлено, что с ростом начальной скорости удара увеличивается угол наклона между осью абсцисс и касательной к кривым в точке начала координат.

На рисунке 3.16 показаны графические зависимости поврежденности льда от времени. Сопоставляя формы кривых при действии цилиндрического и сферического ударников можно заключить следующее. В первом случае накопление поврежденности во льду происходило на 10 % дольше. Выявлено, что при действии сферического ударника в первых трех вариантах развитие разрушений во льду протекало вплоть до 60 мкс, что почти в 6 раз больше чем при действии цилиндрического. Почти на всех кривых поврежденности обнаружена «ступенька», наибольшая высота которой была зафиксирована в последних двух вариантах. Установлено, что при действии сферического ударника ее высота была практически в 2 раза меньше, чем при действии цилиндрического.

На рисунке 3.17 приведена графическая зависимость скорости изменения поврежденности льда от времени для варианта 4. На кривых видны пилообразные колебания. Максимум скорость изменения поврежденности достигает на 20 мкс.

97

В указанный момент времени ударник еще не полностью погружен в лед. После 150 мкс скорость изменения поврежденности приближается к нулю. В этот момент времени ударник погружен в лед на глубину почти в 2 раза превышающую его высоту. Установлено, что в других вариантах профиль скорости имел аналогичный вид.



Рисунок 3.12 – Рассчитанные конфигурации





Рисунок 3.13 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень»





Рисунок 3.15 – Зависимости глубины внедрения ударника от времени



Рисунок 3.16 – Зависимости поврежденности льда от времени



Рисунок 3.17 – Зависимость поврежденности и скорости изменения поврежденности льда от времени

На рисунке 3.18 приведены графические зависимости гидростатического давления и девиаторных напряжений от времени во льду в контрольной точке. Координаты контрольной точки указаны в подразделе 3.1.

Видно, что кривая давления для варианта 1 практически полностью находится в отрицательной области (рисунок 3.18а). Данный факт объясняется невысокой начальной скоростью ударника, вследствие чего разгрузка в материале происходит быстрее его сжатия ударником.

Расчетные профили давления имели качественные различия после 50-й мкс. В варианте 4 были зафиксированы давление практически равное пределу текучести льда. В варианте 11, 12 давление уже в 3 раза больше, чем откольная прочность льда. С ростом начальной скорости удара давление во льду возрастает и в варианте 12 достигает максимума равного 0,009 ГПа. Как и в предыдущем случае, величина давления является не высокой, однако была в 1,5 раза меньше. После 150 мкс давление приближается к нулю. На кривой для варианта 12 отмечены характерные пилообразные осцилляции. Девитаторные напряжения также возрастают во льду с ростом начальной скорости удара, по своей величине практически в 9 раз меньше давления. В отличие от кривых давления кривые напряжения на более низких скоростях являются положительными большую часть процесса. На кривых присутствуют осцилляции, которые объясняются волновым характером процесса внедрения. Получено, что девиаторные напряжения во льду не превысили его откольной прочности, но были близки к пределу текучести льда.



 а) – зависимости гидростатического давления от времени;
 б) – зависимости компоненты девиатора тензора напряжения от времени. Рисунок 3.18 – Напряженно-деформированное состояние льда

В результате моделирования процесса внедрения сферического ударника при скоростях удара до 325 м/с получено следующее. В процессе внедрения материал ударника не разрушался. Характер падения скорости проходил по закону близкому к линейному. В процессе внедрения сферического ударника во льду фиксировалось наличие лицевых и тыльных отколов. Время процесса внедрения сферического ударника несколько больше, чем время процесса внедрения цилиндрического ударника и в последнем варианте достигало 313 мкс.

Глубина внедрения ударника увеличивалась, и в трех последних вариантах превысила радиус ледяного цилиндра. Процесс развития разрушений во льду отмечен, в основном, на начальных стадиях внедрения. Скорость изменения поврежденности льда достигает своего максимума также вначале процесса внедрения, а после 150 мкс, стремится к нулю. Максимальное зафиксированное давление составляет 0,009 ГПа, т.е. вполовину меньше, чем при внедрении цилиндрического ударника. Девиаторные напряжения во льду также растут и при более высоких скоростях по величине приближаются к пределу текучести льда.

3.3 Обсуждение результатов расчетов

В настоящем подразделе обсуждаются результаты расчетов процесса нормального внедрения компактных ударников, одинаковых по массе в лед в диапазоне начальных скоростей от 50 до 325 м/с. В таблице 3.1 приведены расчетные значения времени внедрения ударников t_k , глубины их внедрения в преграду L_k и объем поврежденности льда D_{mg} . В исследуемых образцах фиксировались наличие лицевого и тыльного отколов.

Анализируя длительность процесса внедрения компактных ударников, можно заключить, что время внедрения цилиндрического ударника в лед было несколько меньше. Наиболее близки по значению времени оказались вариант 4 и 3, а также варианты 6 и 5 для цилиндрического и сферического ударников соответственно. Причем на низких скоростях расхождение между рассчитанным временем составляло почти 40% (варианты 1–3). С ростом начальной скорости удара разница между временем внедрения цилиндрического и сферического ударников сокращается почти до 10%. Минимальное время внедрения для обоих типов ударников зафиксировано в первом варианте, а максимальное (~0,3 мс) – в последнем.

Получено, что глубина внедрения компактных ударников увеличивается прямо пропорционально увеличению его начальной скорости. Сферический ударник внедрялся глубже, чем цилиндрический. Данный факт объясняется более обтекаемой формой ударника. Причем на низких скоростях расхождение между полученными значениями достигало 64% (вариант 1). Максимальное расхождение между глубинами внедрения цилиндрического и сферического ударников равное 80% зафиксировано в варианте 2. С ростом начальной скорости удара разница между полученными глубинами внедрения сокращается до 20%. Минимальные глубины внедрения были в первом варианте расчетов, а максимальные - в последнем. В варианте 1 ударники внедрились на глубину менее половины своего диаметра. В варианте 3 глубина внедрения цилиндрического ударника была равной его диаметру, а для сферического была больше на 37%. Установлено, что цилиндр только в последнем варианте (вариант 12) внедрился на глубину равную радиусу преграды. Внедрение сферического ударника на аналогичную глубину было отмечено в трех последних вариантах (варианты 10, 11, 12). В последних вариантах ударники внедрились на глубину равную 6 их диаметрам. Причем глубина внедрения сферического ударника была больше глубины внедрения цилиндрического ударника на 17%.

Развитие разрушений во льду наиболее заметно до 150 мкс. Поврежденность льда при действии цилиндрического ударника всегда была больше, чем при действии сферического. В первом варианте объем поврежденности был в 2,4 раза больше. Данный факт обусловлен более интенсивным накоплением разрушений в

104

зоне контакта «ударник – мишень». В вариантах 6, 7, а также 9, 10 значение поврежденности льда при действии цилиндрического и сферического ударников были наиболее близки друг к другу. С ростом начальной скорости удара разница в рассчитанных значениях параметра поврежденности уменьшается и на более высоких скоростях не превышает 15%. Скорость изменения поврежденности, как правило, достигало своего максимума на начальной стадии процесса внедрения. Присутствие в некоторых вариантах на профилях скорости локальных максимумов объясняется формированием новых зон разрушений. Скорость изменения поврежденности достигает максимального значения на начальных стадиях процесса внедрения, а после 150 мкс стремится к нулю.

Установлено, что при действии цилиндрического ударника в первых шести вариантах лицевого и тыльного отколов не было, за исключением незначительного выброса осколков льда с лицевой поверхности преграды. В 7–10 вариантах на начальных стадиях процесса внедрения зафиксировано только формирование лицевой откольной тарелки с последующим отделением от основного образца. В двух последних вариантах имело место образование лицевого и тыльного отколов. При действии сферического ударника формирование лицевых и тыльных откольных тарелок зафиксировано только в двух последних вариантах. Данный процесс сопровождался формированием обширных областей разрушений льда и потерей первоначальной массы исследуемого образца. В процессе внедрения компактных ударников в лед материал ударника не разрушался, т.к. прочность стали значительно больше прочности льда.

Получено, что гидростатическое давление и девиаторное напряжение во льду при внедрении цилиндрического ударника были больше почти в 1,5 раза, чем при внедрении сферического ударника. В обоих случаях значения давления во льду было больше, чем напряжения. Максимальное давление зафиксировано при внедрении цилиндрического ударника и было в пять раз больше откольной прочности льда. На кривых имелись пилообразные колебания. Давления, которые возникали во льду, были низкими (< 1 ГПа).

Выявленный факт роста девиаторных напряжений одновременно с ростом давления отмечен при ударно-волновом нагружении керамических и геологических материалов в работе [115]. Исследуемые образцы были подвержены растрескиванию в процессе нагружения. Напряжения, которые генерировались во льду, были несколько меньше предела текучести льда. Временные зависимости гидростатического давления позволяют проследить фазы сжатия и растяжения льда. В большинстве вариантов после 150 мкс давления и напряжения приближались к нулю.

		Тип	Начальная	Время	Глубина	Поврежденность					
	Номер варианта	ударника	скорость	внедрения	внедрения	льда	Откол				
			\mathbf{V}_0	t _k	L_k	D_{mg}					
			[м/с]	[мкс]	[MM]	[%]					
1	Вариант №1	Ударник 1 – Цилиндр (5×5) мм	50	85/118	1,7/2,8	7,76/3,20	Лицевой	Тыльный			
2	Вариант №2		75	101/139	3,0/5,4	8,4/4,91	_/_	_/_			
3	Вариант №3		100	140/185	5,0/8,0	8,9/6,55	_/_	_/_			
4	Вариант №4		125	184/200	8,33/10,4	12,6/8,0	—/—	_/_			
5	Вариант №5		150	199/216	11,5/12,9	13,7/8,35	_/_	_/_			
6	Вариант №6		175	215/241	14,2/16,6	16,7/12,47	_/_	_/_			
7	Вариант №7	Ударник 2 – Сфера d = 5,78 мм	200	225/255	16,2/20,3	18,6/16,98	+/-	_/_			
8	Вариант №8		225	230/272	18,3/23,8	20,3/19,15	+/-	_/_			
9	Вариант №9		250	235/281	20,5/26,7	23,5/21,37	+/-	_/_			
10	Вариант №10		275	265/295	23,9/30,5	25,2/23,67	+/-	_/_			
11	Вариант №11		300	275/301	27,8/32,7	30,6/26,86	+/+	+/+			
12	Вариант №12		325	285/313	29,8/35,9	32,7/28,10	+/+	+/+			
Примечания: в числителе указаны значения для цилиндрического ударника, а в знаменателе – значения для сферического ударников											

Таблица 3.1 – Результаты расчетов процесса внедрения компактных ударников в лед

3.4 Выводы по разделу

В настоящем разделе изложены основные выводы, полученные при исследовании процессов внедрения компактных ударников в лед при низких начальных скоростях удара.

Установлено, что в рассмотренном диапазоне начальных скоростей, общая длительность процесса внедрения составила ~ 0,3 мс. Компактные ударники внедрялись на глубину равную 6 их диаметрам, причем глубина внедрения сферического ударника во всех вариантах была больше. Глубина внедрения ударников увеличивается прямо пропорционально увеличению его начальной скорости. Временные зависимости скорости ударника и глубины его внедрения, а также поврежденности льда могут быть аппроксимированы элементарными функциями. Объем поврежденного льда достигал более 30 %. Развитие разрушений во льду происходило вначале процесса внедрения до 150 мкс. При внедрении цилиндра объем поврежденного льда был несколько больше. Скорость изменения поврежденности льда достигала своего максимума после погружения ударников в лед на глубину, превышающую их высоту. Гидростатические давления, возникающие во льду при внедрении цилиндра, были больше, чем при внедрении сферы. Девиаторные напряжения, которые генерировались во льду, были в несколько раз меньше давления. После 150 мкс они приближались к нулю. На кривых давления и напряжения присутствуют пилообразные осцилляции.

Особенности процесса внедрения проиллюстрированы текущими конфигурациями ледяной преграды и компактных ударников. Проанализировано время зарождения первых очагов разрушения и их местоположения во льду. Выявлено направление распространения магистральных трещин. Зафиксировано наличие откольных тарелок с лицевой и тыльной сторон исследуемого образца. Разрушение стальных ударников в расчетах выявлено не было, т.к. прочностные характеристики стали в несколько раз превышали прочностные характеристики льда. При внедрении сферического ударника в двух последних вариантах, объект исследования был подвержен растрескиванию по мно-
гочисленным магистральным трещинам. Выявленные различия можно объяснить геометрией ударников.

Получены новые научные данные, которые расширяют теоретические знания о процессах разрушения льда в области низких давлений в рамках современной физики и механики льда. Настоящие исследования могут быть продолжены, например, изучением процессов внедрения удлиненных ударников в толстые ледяные преграды на водной подложке. Результаты исследований впервые опубликованы в [88]. В качестве развития данных исследований может выступить сравнение результатов расчетов полученных по данному методу с результатами, которые могут быть получены в [116]. 4 Исследование процесса внедрения удлиненных ударников с различной формой головных частей в ледяную преграду

Исследования процесса внедрения ударников с различной формой головных частей в толстую ледяную преграду имеют особое значение, как для изучения самой динамики внедрения, так и для изучения характера разрушения льда. Моделирование данного процесса проводилось на основе общего подхода в МДТТ путем численного решения основной системы уравнений. Целью исследований являлось выявление влияния головной формы ударника на процесс его внедрения в лед. В качестве ударников были выбраны одинаковые по массе и диаметрам удлиненные стальные цилиндры с оживальной, конической и плоской головными частями. Процесс внедрения моделировался по нормали в диапазоне начальных скоростей до 300 м/с.

В процессе счета исследованы деформационные картины и области разрушения льда, рассчитано время процесса внедрения, глубина и диаметр образовавшегося во льду кратера, объем поврежденности льда, а также гидростатическое давление и девиаторные напряжения в контрольных точках. Контрольная точка выбрана на оси симметрии во льду на глубине 10 см, т.е. в центре цилиндра. Полученные результаты направлены на углубление теоретических знаний в области современной механики льда и получены впервые.

4.1 Расчет процесса внедрения ударника с оживальной головной частью в лед

В данном подразделе рассмотрим процесс внедрения ударника с оживальной головной частью (ОГЧ) в ледяной цилиндр. Физическая постановка задачи формулируется как контактное взаимодействие ударника с ОГЧ со льдом. Ударник – сердечник пули 6,1Smk (Германия) массой 2,55 г, длиной 16 мм и диаметром 6,1 мм. Материал ударника – высокопрочная сталь ШХ-15. На контактной границе «ударник – лед» задавалось условие скольжения. Диапазон начальных скоростей удара изменялся от 150 до 300 м/с. Серия вычислительных экспериментов состояла из 4 вариантов расчетов, в каждом последующем начальная скорость увеличивалась на 50 м/с. Расчеты проведены в 2D осесимметричной постановке при помощи численного лагранжева метода [5]. Расчетная область разбивалась «конвертом» на 13926 триангуляционных элемента.

Объект исследования – ледяная преграда размерами в сечении 20×20 см. Физико-механические характеристики льда приведены в предыдущем разделе. Предметом исследования являлось напряженно-деформированное состояние льда с учетом эволюции деформационных картин и областей его разрушения. Счет продолжался до полного торможения ударников.

В процессе вычислительного эксперимента отслеживалось время и место зарождение первых очагов разрушения во льду и их дальнейшее распространение. Расчетным путем получены скорости центров масс ударников, объем поврежденности льда, глубина внедрения и диаметры кратеров во льду. Возможность иметь полную информацию о напряженнодеформированном и термодинамическом состоянии взаимодействующих тел позволила вычислить гидростатическое давление, а также девиаторные напряжения в контрольной точке.



Рисунок 4.1 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень»

На рисунке 4.1 приведены конфигурации взаимодействующих тел для первых двух вариантов расчетов. Левая часть рисунка соответствует варианту 1, а правая – варианту 2. Рисунок дает представление об областях разрушения льда на конечных стадиях процесса. Конечная стадия процесса внедрения соответствовала моменту времени окончания счета.

Детальный анализ процесса внедрения выявил, что первые очаги разрушения появляются после 2-й мкс в зоне контакта «ударник – лед». Это сопровождается уплотнением льда в данной области и распространением зоны разрушения в направлении движения ударника. Выявлено, что в варианте 1 ударник полностью вошел в лед на 30 мкс позже, чем в варианте 2. Отмечен выплеск приповерхностых слоев льда навстречу движения ударника. После 120 мкс появляется вторая зона разрушения льда на расстоянии 3 см от лицевой контактной поверхности. За счет радиальных трещин во втором варианте она несколько больше, чем в первом. По мере продвижения ударника вглубь преграды обе зоны разрушений сливаются в одну.



Рисунок 4.2 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для вариантов 3,4

Отличительной особенностью является то, что в варианте 2 во льду сформировались слабые очаги разрушения вблизи тыльной поверхности, а также «Т-образная» трещина на расстоянии 3,7 см от оси симметрии. Во втором варианте ударник внедрился на глубину 5,69 см.

На рисунке 4.2 представлены рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для вариантов 3, 4 на конечных стадиях процесса внедрения.

Процесс внедрения сопровождался формированием очагов разрушения как в зоне контакта «ударник – лед», так и вблизи тыльной поверхности. Установлено, что очаги разрушения вблизи тыльной границы были слабыми и едва заметными. Выявлено, что в конце процесса внедрения деформационные картины и области разрушения льда мало отличаются. Отличительной особенностью следует считать формирование в варианте 3 вертикальной магистральной трещины вблизи боковых поверхностей. Зафиксировано отделение небольших фрагментов льда с лицевой поверхности цилиндра. В последнем варианте ударник внедрился практически на 17 мм глубже, чем в предпоследнем варианте.



Рисунок 4.3 – Зависимости скорости ударника от времени

На рисунке 4.3 показаны профили скорости с ОГЧ для четырех вариантов расчета. Видно, что увеличение начальной скорости ударника приводило к увеличению времени процесса внедрения. Характер падения скорости проходил по закону близкому к линейному. В течение всего процесса внедрения кривые скорости не пересекаются. Проведенные расчеты позволили вычислить время процесса внедрения ударника с ОГЧ в лед, которое составило 565, 640, 715 и 840 мкс соответственно. Процесс внедрения не сопровождался разрушением ударника.



Рисунок 4.4 – Зависимости глубины внедрения ударника от времени

Семейство кривых на рисунке 4.4 представляет зависимость глубины внедрения ударника с ОГЧ от времени в лед. Данная зависимость может быть аппроксимирована степенной функцией. Установлено, что как и при действии компактных ударников, глубина внедрения ударника с ОГЧ увеличивается прямо пропорционально увеличению его начальной скорости. Получено, что глубина внедрения изменялась от 4 до 9,19 см, т.е. более чем в 5 раз превышала исходную длину ударника.



Рисунок 4.5 – Зависимости поврежденности льда от времени

На рисунке 4.5 приведена графическая зависимость параметра поврежденности льда от времени. Видно, что кривые поврежденности для вариантов 3, 4 близки друг к другу до 80 мкс процесса. Получено, что с ростом начальной скорости ударника поврежденность льда увеличивается, основные очаги разрушения были расположены в зоне контакта «ударник – лед» и вдоль боковой поверхности кратера. При действии ударника с ОГЧ объем поврежденного льда был небольшим и изменялся в диапазоне от 2,7 до 6%. Основной объем разрушений сформировался вначале процесса внедрения (до 200 мкс), а после 400 мкс практически не менялся.



Рисунок 4.6 – Зависимость поврежденности льда и скорости изменения поврежденности от времени для варианта 2

На рисунке 4.6 показана зависимость поврежденности (верхняя кривая) и скорости изменения поврежденности льда (нижняя кривая) от времени для варианта 2. Видно, что максимального значения скорость изменения поврежденности достигала на 100 мкс. Далее скорость убывала, а ближе к концу процесса приближалась к нулю.

На кривой скорости в интервале от 100 до 350 мкс зафиксировано несколько локальных максимумов. Их присутствие на графике связано с зарождением новых областей разрушения. Установлено, что в остальных вариантах поведение кривых было аналогичным. В вариантах 1 и 4 максимум скорости зафиксирован на 150 и 140 мкс, а в варианте 3 – на 224 мкс.

На рисунке 4.7 приведены временные зависимости гидростатического давления и девиаторных напряжений во льду в центре ледяной преграды.

Максимальное давление зафиксировано в варианте 4 в конце процесса внедрения и составило 0,013 ГПа (рисунок 4.7а). Почти в два раза меньшее давление отмечено в варианте 3. В вариантах 1, 2 давление достигало величины 0,004 ГПа. Следует отметить, что в вариантах 3, 4 максимальные значения давления зафиксированы после 600 мкс, а в вариантах 1,2 после 500 мкс. На всех кривых имели место осцилляции. Рост давления в контрольной точке начинался после 100 мкс процесса.





 а) – зависимость гидростатического давления от времени;
 б) – зависимость компоненты девиатора тензора напряжений от времени.

б)

Рисунок 4.7 – Результаты расчетов

Зависимость девиаторных напряжений от времени во льду приведена на рисунке 4.76. После 600 мкс скорость в варианте 3 стремится к нулю. Максимальное напряжение, равное 0,0011ГПа зафиксировано в варианте 4, а минимальное в варианте 1 и составило – 0.00028 ГПа.

При внедрении ударника с оживальной головной частью в лед в указанном диапазоне получены следующие результаты.

Процесс внедрения ударника с ОГЧ в ледяной цилиндр длился не более 850 мкс. Характер падения скорости проходил по закону близкому к линейному. Ударник внедрился в лед полностью, причем в последнем варианте глубина внедрения в 5 раз превысила его высоту. Накопление поврежденности льда происходит в течение всего процесса внедрения, но в основном до 200 мкс. Однако, полученный в результате объем поврежденного льда незначительный по сравнению с неповрежденным. Скорости изменения поврежденности принимали свои максимальные значения в интервале от 100 по 224 мкс.

Максимальное давление, которое возникает во льду при внедрении ударника, составило 0,013 ГПа. Девиаторные напряжения во льду растут с

увеличением начальной скорости, но их величина почти на порядок ниже давлений.

4.2 Расчет процесса внедрения ударника с конической головной частью в лед

В настоящем подразделе рассмотрен процесс внедрения ударника с конической головной частью (КГЧ) в лед. Серия вычислительных экспериментов проведена по схеме, описанной в предыдущем подразделе. Ударник – стальной цилиндр с КГЧ: высота 13,1 мм диаметр 6,1 мм, угол при вершине конуса – прямой. Масса ударника с КГЧ равна 2,55 г. Преграда – ледяной цилиндр с размерами в сечении 20×20 см.

На рисунке 4.8–4.9 приведены конечные конфигурации системы «ударник – мишень» для четырех вариантов расчетов. Установлено, что уже на первых микросекундах взаимодействия происходит расщепление расчетных узлов и разрушение расчетных элементов, что в рамках используемой модели соответствует зарождению очагов разрушения в зоне контакта ударника и мишени.



Рисунок 4.8 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень»

Установлено, что время процесса внедрения ударника с КГЧ было меньше, чем время внедрения ударника с ОГЧ. В первом варианте ударник с КГЧ внедрялся на 95 мкс меньше, чем ударник с ОГЧ. В варианте 1 ударник полностью внедрился в лед уже на 100-й мкс. В варианте 2 это произошло на 25 мкс раньше. Процесс внедрения сопровождался отделением небольшого фрагмента льда с лицевой поверхности преграды. По мере продвижения ударника вглубь преграды после 140 мкс идет формирование небольшой зоны разрушения на глубине 8 см от контактной поверхности.

Получено, что во втором варианте очаги разрушений зародились вблизи тыльной поверхности. По аналогичному сценарию происходило развитие разрушений в варианте 3, но объем разрушений был больше. В последнем варианте на оси симметрии зарождались очаги разрушения, которые в дальнейшем развились в магистральную трещину. Отмечено, что глубина внедрения ударника увеличивается с ростом начальной скорости. Разница в полученных значениях глубины внедрения сопоставима с исходной высотой ударника. Такая закономерность была обнаружена в предыдущем подразделе при анализе глубины внедрения в лед ударника с ОГЧ.



Рисунок 4.9 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень»

На рисунке 4.10 приведены зависимости скорости ударника от времени. Кривая на графике для варианта 3 близка к графику линейной функции. Профили скорости для вариантов 4, 3 соприкасаются в точке на 300 мкс, а для вариантов 2, 3 пересекаются на 440 мкс. Расчетное время внедрения ударника с КГЧ составило 465, 520, 555 и 565 мкс соответственно. Получено, что время внедрения ударника с КГЧ было меньше, чем ударника с ОГЧ. Это можно объяснить большей силой сопротивления внедрению из-за исходной геометрии носовых частей ударников.



Рисунок 4.10 – Зависимости скорости ударника с КГЧ от времени



Рисунок 4.11 – Зависимости глубины внедрения от времени

На рисунке 4.11 приведена зависимость глубины внедрения ударника с КГЧ от времени.

Установлено, что глубина внедрения ударника с КГЧ увеличивается прямо пропорционально увеличению его начальной скорости. Аналогичная закономерность была зафиксирована при действии ударника с ОГЧ. Диапазон рассчитанных глубин внедрения изменялся от 2,6 до 6,4 см. Таким образом, глубина внедрения в последнем варианте почти в 5 раз превысила высоту ударника с КГЧ. Сравнение с результатами из подраздела 4.1 показало, что глубина внедрения в среднем была почти на 40% меньше.



Рисунок 4.12 – Зависимости поврежденности льда от времени

График поврежденности льда при внедрении ударника с КГЧ приведен на рисунке 4.12. Видно, что кривые для вариантов 2, 3, 4 практически сливаются на первых 20 микросекундах. Основной объем повреждений формировался во льду вначале процесса внедрения в зоне контакта «ударник – лед». Как и в предыдущем случае, накопление основного объема повреждений во льду происходит до 200 мкс. В варианте 1, 2 после 300 мкс поврежденность практически не увеличивалась. Объем поврежденного льда был незначительный и практически равнялся объему, вычисленному в процессе внедрения ударника с ОГЧ.

На рисунке 4.13 приведена зависимость поврежденности льда (верхняя кривая) и скорости изменения поврежденности льда (нижняя кривая) от времени при действии ударника с КГЧ. Кривая скорости имеет два локальных максимума в интервале от 70 до 150 мкс, а после 300-й мкс, стремится к нулю. В остальных вариантах скорость поврежденности льда достигала своего максимума в интервале от 70 до 125 мкс. Сравнительный анализ показал, что при внедрении ударника с КГЧ максимум скорости фиксировался несколько ранее, чем при внедрении ударника с ОГЧ. Это объясняется длительностью процесса внедрения.



Рисунок 4.13 – Зависимость поврежденности льда и скорости изменения поврежденности от времени

На рисунке 4.14 приведены временные зависимости гидростатического давления и девиаторных напряжений во льду.

На кривых давления имеются колебания, которые объясняются волновым характером процесса внедрения (рисунок 4.14а). Отмечен очевидный факт увеличения давления с ростом скорости ударника. Максимальное давление, равное 0,005 ГПа, зафиксировано в варианте 4. По сравнению с подразделом 4.1 давление снизилось практически в 2,6 раза. Минимальное давление, равное 0,0028 ГПа, зафиксировано в варианте 1.

На рисунке 4.14б приведены графические зависимости девиаторных напряжений во льду от времени. Видно, что их величина практически на порядок меньше, чем величина давления. В варианте 1 напряжения минимальные и приближаются к нулю. На кривых имеются пилообразные колебания. Максимальное напряжение зафиксировано в варианте 4 (0,0003 ГПа), а минимальное (- 0,0003 ГПа) – в варианте 2. Отметим, что величина напряжений снизилась по сравнению с подразделом 4.1.





 а) – зависимость гидростатического давления от времени;
 б) – зависимость девиаторного напряжения от времени. Рисунок 4.14 – Результаты расчетов

На основании проведенных расчетов процесса внедрения ударника с КГЧ в лед были получены следующие результаты.

В указанном диапазоне скоростей процесс внедрения ударника с КГЧ в лед длился около 600 мкс. Разрушения материала ударника не происходило. В некоторых случаях (варианты 1, 3) кривые скорости были близки к графику линейной функции. Некоторые особенности процесса разрушения льда при внедрении ударника с КГЧ отмечены ранее при внедрении ударника с ОГЧ в подразделе 4.1. Отмечено увеличение глубины внедрения ударника с ростом его начальной скорости. В последнем варианте ударник внедрился на глубину почти в 5 раз превышающую свою высоту. Объем поврежденного льда незначительный, при этом скорость изменения поврежденности достигает своего максимума вначале процесса в интервале от 70 до 125 мкс. Гидростатическое давление и девиаторное напряжение, которое генерируются во льду, являются низкими и меньше, чем в подразделе 4.1

4.3 Расчет процесса внедрения ударника с плоской головной частью в лед

В данном подразделе проведена серия вычислительных экспериментов по внедрению ударника с плоской головной частью (ПГЧ) в лед. Длина ударника с ПГЧ равнялась 11,1 мм, диаметр 6,1 мм. Материал ударника – высокопрочная сталь ШХ-15. Количество расчетных элементов составило 17112. Схема вычислительного эксперимента не описана в подразделе 4.1.

На рисунке 4.15–4.16 приведены рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для четырех вариантов расчетов.

Первые очаги разрушений зарождались на 2 мкс во льду зоне контакта «ударник – мишень». Установлено, что зона разрушений в данной области при внедрении ударника с ПГЧ была несколько больше, чем при действии ударника с КГЧ и ОГЧ. Данный факт объясняется наибольшей площадью контакта носовой части ударника со льдом. Процесс внедрения сопровождался уплотнением льда в приконтактной области и отделением его осколков от лицевой поверхности. Установлено, что время процесса внедрения ударника с ПГЧ в лед заметно уменьшилось, по сравнению с предыдущими типами ударников.

Установлено, что процесс внедрения ударника с ПГЧ сопровождался формированием областей разрушения как в зоне контакта «ударник – лед», так и на оси симметрии. Отличительной особенностью процесса внедрения являлось то, что во льду всегда присутствовали очаги разрушений на оси симметрии, которые по мере продвижения ударника сливались в вертикальную магистральную трещину. Видно, что сформировавшаяся во льду трещина, как бы разделяет исследуемый образец на две одинаковые части.



Рисунок 4.15 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для вариантов 1, 2



Рисунок 4.16 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для вариантов 3, 4

На рисунке 4.17 показан график зависимостей скорости ударника от времени. Во всех вариантах характер снижения скорости был близок к линейному. В варианте 1 ударник полностью внедрился в лед на 100 мкс, а в варианте 2 это произошло на 25 мкс раньше. Время внедрения ударника с ПГЧ меньше, чем время внедрения ударника с КГЧ. В данном случае расхождение составило 140 мкс.

До 20 мкс на кривых имеет место участок быстрого снижения скорости. В течение этого времени в области контакта «ударник – лед» формируется зона разрушений в форме прямоугольника (на рисунке не показана). Кривые для вариантов 3 и 4 близки друг к другу с 350 по 400-ю мкс. Рассчитано время процесса внедрения ударника с ПГЧ, получилось 330, 419, 505 и 530 мкс соответственно. Таким образом, вычисленное время внедрения ударника с ПГЧ меньше, чем время внедрения ударников с КГЧ и ОГЧ. Разница в полученных значениях наиболее заметна при низких скоростях.



Рисунок 4.17 – Зависимости скорости ударника с ПГЧ от времени



Рисунок 4.18 – Зависимости глубины внедрения ударника с ПГЧ от времени

На рисунке 4.18 приведен график зависимости глубины внедрения ударника с ПГЧ в лед. Видно, что процесс внедрения ударника с ПГЧ качественно воспроизводит особенности процесса внедрения ударников с ОГЧ и КГЧ. Обнаружено, что с ростом начальной скорости глубина внедрения ударника с ПГЧ растет от 2,1 до 5,4 см. Выявлено, что глубина внедрения ударника с ПГЧ была меньше, чем глубина внедрения ударников с ОГЧ и КГЧ. В последнем варианте ударник внедрился на глубину почти в 5 раз превышающую свою высоту. Аналогичные закономерности были получены в подразделах 4.1 и 4.2.

На рисунке 4.19 приведены зависимости параметра поврежденности льда от времени. Видно, что с ростом начальной скорости удара объем разрушенного льда увеличивается. Отметим, что на кривых поврежденности имеется «ступенька», наличие которой объясняется формированием областей разрушений в приконтактной зоне и центре преграды. Выявлено, что кривые 3, 4 сливаются в интервале от 0 до 25 мкс и от 300 до 500 мкс. В варианте 1, 2 развитие разрушений во льду происходит до 200 мкс, а в вариантах 3, 4 – до 400 мкс. Максимальный объем повреждений получен в варианте 4 и равен

4,05%. Это на 1,95 и 2,07% меньше, чем при действии ударников с ОГЧ и КГЧ, соответственно.



Рисунок 4.19 – Зависимость поврежденности льда от времени при действии ударника с ПГЧ



Рисунок 4.20 – Зависимость поврежденности льда и скорости изменения поврежденности льда от времени

На рисунке 4.20 приведена зависимость поврежденности льда и скорости изменения поврежденности для варианта 4. На кривой скорости изменения поврежденности наблюдается только один максимум на 95 мкс. В дальнейшем отмечено убывание скорости до 235 мкс. Постоянная скорость была с 235 по 250 мкс, затем она возрастала, а после 300 мкс скорость стремилась к нулю.

В вариантах 1, 2, 3 на кривых скорости имелись колебания, в основном, на начальных и последующих стадиях процесса внедрения. Установлено, что раньше всех скорость изменения поврежденности достигала своего максимума в варианте 3 (65 мкс), затем в варианте 1 (77 мкс) и 2 (125 мкс). Таким образом, при внедрении ударника с ПГЧ скорость изменения поврежденности достигала своего максимума в интервале от 65 до 125 мкс, т.е. практически так же, как и при внедрении ударника с КГЧ.



а) – зависимость гидростатического давления от времени;
 б) – зависимости девиаторных напряжений от времени.

Рисунок 4.21 – Результаты расчетов

На рисунке 4.21а,б приведены графики временных зависимостей давления и компоненты девиатора тензора напряжений в контрольной точке.

На кривых давления можно выделить пилообразные колебания. Видно, что до 40 мкс кривые совпадают, а давление возрастает до 0,001 ГПа. На кривой для варианта 3 отмечен участок нулевого давления от 150 до 300 мкс. Максимальное давление зафиксировано в варианте 1 и было равным 0,0031 ГПа, а минимальное в варианте 4 и равнялось – 0,0023 ГПа. При внедрении ударника с КГЧ рассчитанные давления были немного больше.

В качестве полученных результатов отметим следующее.

Процесс внедрения ударника протекал без разрушения его материала. Характер падения скорости ударника проходил по закону близкому к линейному. Отличительной особенностью процесса внедрения ударника с ПГЧ являлось формирование областей разрушения в приконтактной зоне и вблизи тыльной границы преграды. После процесса внедрения объекты исследования теряли свою первоначальную массу в результате образования во льду кратера и выплеска приповерхностных слоев льда наружу.

С увеличением начальной скорости время процесса внедрения и глубина внедрения увеличивалась до 530 мкс и 5,43 см соответственно. Объем поврежденного льда был незначительным по сравнению с неповрежденным. Скорость изменения поврежденности достигает максимума в интервале от 65 до 125 мкс. Отмечено уменьшение давления с ростом начальной скорости удара и увеличение девиаторных напряжений во льду в контрольной точке. Последний факт объясняется сложной волновой картиной, которая сформировалась во льду в результате внедрения ударника. А именно, образованием очагов разрушений льда и взаимодействием волн с контактными и свободными поверхностями и друг с другом. 4.4 Обсуждение результатов расчетов

В подразделе обсуждены результаты исследований процесса нормального внедрения стальных удлиненных ударников с различной формой головных частей в ледяную преграду в диапазоне начальных скоростей до 300 м/с.

В таблице 4.1 приведены результаты расчетов процесса нормального внедрения ударников с различной формой головной частью (ОГЧ, КГЧ, ПГЧ) в лед. В диапазоне начальных скоростей до 300 м/с рассчитаны следующие характеристики процесса внедрения: глубина внедрения ударника L_k, объем поврежденности льда D_{ice}, время процесса внедрения t_k и диаметр кратера D_k.

Нарушение сплошности в материале ударников не обнаружено независимо от начальной скорости и формы их головных частей. Данный факт объясняется высокими прочностными характеристиками стали ШХ-15. В большинстве вариантов характер снижения скорости проходил закону близкому к линейному. Глубина внедрения ударника увеличивается прямо пропорционально увеличению его начальной скорости. Наибольшие значения глубины внедрения выявлены при внедрении ударника с ОГЧ, а наименьшие – при внедрении ударника с ПГЧ. Данный факт связан с различной геометрией головных частей ударников. Площадь контакта носовой части ударника с ОГЧ со льдом была минимальной, а ударника с ПГЧ – максимальной. При этом максимальная глубина внедрения зафиксирована при внедрении ударника с ОГЧ в варианте 4, а минимальная – при внедрении ударника с ПГЧ в варианте 1. В рассмотренном диапазоне начальных скоростей ударники внедрялись на глубину в 5 раз и более превышающую свою высоту. Результаты соответствуют физике процесса.

Объем поврежденного льда был незначительным по сравнению с неповрежденным. Объем повреждений формировался, как правило, за счет областей разрушения льда в зоне контакта «ударник – лед» вначале процесса. При внедрении ударников с ОГЧ и КГЧ кривые поврежденности льда имели много общего. При внедрении ударника с ПГЧ на кривых имелись отличия, которые объясняются развитием областей разрушений вне зоны контакта ударника и льда. Скорость изменения поврежденности достигала своего максимума на начальных стадиях процесса (после полного погружения ударника в лед). Самый поздний максимум скорости изменения поврежденности фиксировался при внедрении ударника с ОГЧ, а самый ранний – при внедрении ударника с ПГЧ. Данный факт объясняется более длительным временем взаимодействия оживальной части ударника с ОГЧ со льдом.

Получено, что время процесса внедрения увеличивалось с ростом их начальной скорости, но не превысило миллисекундного диапазона. Максимальное время процесса зафиксировано при внедрении ударника с ОГЧ в варианте 4. Минимальное время внедрения получено при внедрении ударника с ПГЧ в варианте 1. Расчетное время внедрения ударника с ОГЧ в лед при начальной скорости 150 м/с совпало со временем внедрения ударника с КГЧ при скорости 300 м/с. Также имело место одинаковое время внедрения ударника с КГЧ (вариант 1) и ударника с ПГЧ (вариант 3). Разница между временем внедрения ударника с ОГЧ и ударников с КГЧ и ПГЧ в варианте 4 составляла 32 и 40,5% соответственно.

Установлено, что наименьшие диаметры кратеров во льду зафиксированы при внедрении ударников с ОГЧ. Максимальный диаметр кратера получился в варианте 2 при внедрении ударника с ПГЧ, а минимальный – в варианте 1 при внедрении ударника с ОГЧ. В процессе внедрения ударников с ОГЧ в лед диаметр кратера увеличивался с ростом начальной скорости. В варианте 3, 4 получены их одинаковые значения. В процессе внедрения ударников с КГЧ в первых двух вариантах рассчитанные диаметры кратеров совпадали. При внедрении ударника с ПГЧ обнаружено, что с ростом начальной скорости до 200 м/с диаметр кратера увеличивался. Дальнейшее увеличение скорости приводило к уменьшению диаметра кратера.

Наибольшие гидростатические давления и девиаторные напряжения в центре ледяного цилиндра зафиксированы при внедрении ударника с ОГЧ, а наименьшие при внедрении ударника с ПГЧ. Этот факт объясняется различ-

133

ной глубиной внедрения ударников в лед. В первом случае носовая часть ударника практически достигла контрольной точки. Величина давления классифицируется как низкая (< 1 ГПа). На кривых давления имелись пилообразные колебания. Максимальное давление в 6 раз больше предела текучести льда, и в 4,3 раза откольной прочности льда. Минимальное давление сопоставимо с пределом текучести льда. Девиаторные напряжения, которые генерировались во льду, были на порядок меньше.

	V ₀ , [м/с]	L _k , [см]	D _{ice} , [%]	t _к , [мкс]	D _k , [см]			
Ударник с ОГЧ								
Вариант 1	150	3,92	2,73	565	0,64			
Вариант 2	200	5,69	3,68	640	0,66			
Вариант 3	250	7,42	5,44	715	0,75			
Вариант 4	300	9,19	6,00	840	0,75			
Ударник с КГЧ								
Вариант 1	150	2,58	2,3	470	0,81			
Вариант 2	200	3,96	3,7	520	0,81			
Вариант 3	250	5,12	4,49	555	0,79			
Вариант 4	300	6,32	6,12	565	0,84			
Ударник с ПГЧ								
Вариант 1	150	2,09	1,82	330	0,82			
Вариант 2	200	3,29	2,48	419	0,84			
Вариант 3	250	4,71	4,03	470	0,83			
Вариант 4	300	5,43	4,05	500	0,82			

Таблица 4.1– Результаты расчетов процесса внедрения ударников с различной формой головных частей в лед

4.5 Выводы по разделу

Таким образом, впервые был численно исследован процесс внедрения ударников с различными формами головных частей в лед в дозвуковом диапазоне начальных скоростей удара. Ударники имели одинаковую массу и диаметр, но разную форму головных частей. В процессе внедрения разрушение материала ударников не было. Получено, что ударники внедрялись в лед на глубину в 5 раз и более превышающую свою высоту. Временные зависимости скорости ударника и глубины его внедрения, а также поврежденности льда могут быть аппроксимированы элементарными функциями. Объем поврежденного льда был незначительным, по сравнению с неповрежденным. В результате внедрения ударников во льду формировались зоны разрушений в различных частях ледяной преграды.

Во льду образовывались магистральные трещины путем развития очагов разрушения в различных местах преграды. Скорость изменения поврежденности достигала своего максимума после полного погружения ударника в лед. Время процесса внедрения не превысило миллисекундного диапазона. Наименьшие диаметры кратеров во льду зафиксированы при внедрении ударников с ОГЧ. Гидростатическое давление в контрольной точке на порядок больше девиаторных напряжений. Полученные результаты позволили количественно описать процесс деформирования и разрушения льда на всех стадиях процесса внедрения.

По-видимому, процесс разрушения льда под действием удлиненных ударников имеет много общего с разрушением некоторых керамических и геологических материалов. Первые очаги разрушения появляются во льду уже в фазе сжатия. В процессе внедрения под влиянием низких напряжений выявлено «хрупкое» разрушение льда. Обнаружены общие закономерности с процессом разрушения льда в статических условиях [57]. Результаты расчетов коррелируют с экспериментальными данными из работы [29]. Развитием данных исследований вполне может послужить использование других крите-

135

риев разрушения, а также наличие во льду областей с градиентным распределением прочностных свойств от лицевой поверхности к тыльной [117].

Результаты расчетов направлены на углубление теоретических знаний в области механики разрушения льда и показывают перспективность разработанных средств математического моделирования. 5 Экспериментально-теоретическое исследование процессов ударного и взрывного нагружения льда

В разделе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов ударно-взрывного нагружения пресноводного льда. Были проведены лабораторные и натурные эксперименты по динамическому нагружению пресноводного льда. Эксперименты проведены совместно с сотрудниками лаборатории 21 НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета. Основной целью являлось выявление закономерностей процесса деформирования и разрушения льда при различных начальных условиях. Вычислены некоторые параметры процесса нагружения льда (диаметр и глубина кратера во льду, диаметр взрывной майны в ледяном покрове). Полученные результаты также можно использовать при апробации физико-математической модели деформирования и разрушения льда и методов его расчета.

Теоретические исследования состояли из двух частей. В подразделе 5.2.1 был исследован и количественно описан процесс соударения крупногабаритного ударника с инертным наполнителем со льдом. В подразделе 5.2.2 исследован процесс взрывного нагружения льда безоболочечным зарядом ВВ с целью выявления влияния глубины его закладки на процесс разрушения. Результаты представлены многочисленными конфигурациями ледяной преграды, а также в виде графиков и таблиц. Были сформулированы рекомендации по наиболее эффективному разрушению льда в данных условиях. Рекомендации реализованы ОАО «КузбассСпецВзрыв» при проведении взрывных работ на р. Томь весной 2014 г. в Кемеровской области.

5.1 Экспериментальные исследования поведения льда при ударных и взрывных нагрузках

В настоящем подразделе представлены результаты экспериментов по ударному и взрывному нагружению конжеляционного (лед, который получен

137

заморораживанием воды в естественных условиях) и пресноводного льдов. Современные экспериментальные исследования соударения ледяных цилиндров с металлическими пластинами приведены в [43]. Французскими исследователями представлены многочисленные экспериментальные данные по низкоскоростному взаимодействию моно и поликристаллов льда с дюралюминиевыми пластинами. В разделе 2 проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных на предмет остаточного прогиба пластин. Оригинальные отечественные эксперименты по соударению удлиненных ударников с ледяными преградами приведены в [29]. Основным недостатком является то, что авторами не указан тип исследуемого льда.

Экспериментальных работ по взрывному нагружению льда в открытых источниках обнаружено не было. По-видимому, они являются библиографической редкостью. В России существуют две научных организации, в которых проводят данные исследования. Обе организации находятся в г. Санкт-Петербурге: ФГУП Крыловский государственный научный центр и ГНЦ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт. За рубежом проведены исследовательские работы, в которых смоделирован подводный взрыв для изучения его влияния на движение надводных судов. Учитывая уровень работ, можно полагать, что их логическим продолжением будет исследование взрыва морского льда на различных глубинах.

5.1.1 Эксперименты по внедрению сферического стального ударника в лед

В настоящем подразделе приведены результаты лабораторных экспериментов по взаимодействию сферических ударников с ледяными цилиндрами.

Объектами исследования являлись ледяные цилиндры различной высотой и диаметром (рисунок 5.1). Для проведения физического эксперимента были подготовлены шесть цилиндров льда, которые изготавливались путем

138

заморозки пресной воды в естественных условиях при температуре –14 С°. Лед замораживался в специальных полиэтиленовых контейнерах в течение 72 часов на открытом воздухе. Ударник – стальной шарик диаметром 4,5 мм. Начальная скорость ударника составляла 155±5 м/с, а масса – 3,55 г. Процесс взаимодействия проходил по нормали. Начальная скорость ударника варьировалась пневоматической пружинно-поршневой установкой на базе пистолета Иж. Подробно экспериментальная установка описана в работе [92, 96]. Экспериментальная установка является мобильной и может функционировать на открытом воздухе до температуры – 25°C. Время проведения эксперимента: последняя декада марта 2013 года.

На рисунке 5.1 показаны шесть цилиндров льда, расположенные в порядке уменьшения их высоты. Фотография сделана сотрудником НИИ прикладной математики и механики Г.Н. Богомоловым на цифровую фотокамеру Cannon EOS 1100D Kit (тип матрицы CMOS, разрешение 12.2 МПикс, размер (22 × 14.7 мм).



Рисунок 5.1 – Цилиндры льда до удара

Фотокамера имела следующие оптические характеристики: оптика Canon Zoom Lens EF-S, фокусное расстояние 18–55 мм. Фотография получена в дневное время суток.

На рисунке 5.2 показан образец льда №3 до и после удара. В процессе эксперимента фиксировалась глубина внедрения ударника и диаметр кратера. Отметим, что в процессе взаимодействия ударник не разрушался. Выявлено, что кратер имел форму усеченного конуса, вершина которого располагалась

в направлении к тыльной поверхности. В процессе соударения наблюдался лицевой откол. Процесс отделения лицевой откольной тарелки не фиксировался на фотокамеру. При проведении экспериментов один образец был разрушен в результате неточного попадания. После удара во льду присутствовали кольцевые трещины отрыва. Объем разрушенного льда был незначительным. Основные зоны разрушения льда расположены в приконтактной области. Растрескивание образцов льда не выявлено. Дно кратера сфотографировать не удалось. Однако, его детальное изучение будет являться предметом будущих исследований.



a)



а) – образец №3 до процесса соударения;
б) – образец №3 после процесса соударения; Рисунок 5.2 – Объект исследования

Результаты экспериментов представлены в таблице 5.1. Видно, что глубина и диаметр кратера были больше диаметра ударника. Максимальная глубина кратера и его диаметр зафиксированы в эксперименте №2. Измерения проведены немецким штангенциркулем Helios Preisser с прямоугольным глубиномером.

N⁰	Диаметр	Высота	Глубина	Диаметр
Образца/эксперимента	цилиндра	цилиндра	кратера	кратера
	[MM]	[MM]	[мм]	[MM]
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

Таблица 5.1 – Результаты лабораторных экспериментов

Таким образом, проведенные эксперименты по соударению сферического ударника со льдом выявили следующую закономерность. Диаметр кратера практически в 2 раза превышает его глубину. Высота ледяного цилиндра на диаметр кратера при данной начальной скорости не влияет.

5.1.2 Эксперимент по взрывному нагружению речного льда

В следующем подразделе впервые представлены оригинальные результаты натурного эксперимента по взрывному нагружению речного льда взрывчатым веществом (ВВ).

Эксперимент был проведен совместно с ОАО «КузбассСпецВзрыв» в апреле 2013 на реке Томь в рамках ежегодных противопаводковых мероприятий МЧС. Экспериментальная площадка выбрана практически на фарватере реки в районе коммунального моста. Ледяной покров был заснеженным, толщина снега не менее 10 см. Первичный осмотр показал, что в радиусе 10 метров дефектов льда не обнаружено. При выборе места проведения эксперимента были исключены участки льда с трещинами и разводьем. В указанном радиусе также отсутствовали стационарные полыньи. Глубина реки в данном месте более 7 метров. Температура воды и воздуха в день проведения эксперимента +4 °C. Отметим, что в течение трех дней предшествующих эксперименту стояла теплая погода и температура колебалась от 0 до + 4 °C, поэтому лед был более пористый. Скорость ветра и течения воды не измерялась. Объект исследования – речной однолетний лед средней толщины.



a)

а) – Лунка до подрыва ВВ;

б) Заряд ВВ в политэтиленовой оболочке на заснеженном покрове.

Рисунок 5.3 – Натурный эксперимент

На рисунке 5.3 показан процесс закладки ВВ в лунку диаметром 16 см. В качестве ВВ использовался заряд Эмуласта АС-30-ФП-90 в полиэтиленовой оболочке (рисунок 5.3б). Заглубление в воду составило 0±2 см. Масса ВВ была 4 кг, длина 70 см. Подрыв ВВ осуществлялся в воде при помощи детонирующего шнура ДШЭ-12 ГОСТ 6196-78) по классической схеме. Толщина льда была равной 80 см. Измерения проведены измерительной металлической линейкой Vogel точностью 1,3 мм.

На рисунке 5.4 показана взрывная майна, образованная после подрыва ВВ на расстоянии 6 и 1 метров. Фотографии сделаны со спасательного катера. Получить данные стало возможным не более чем через 5 минут после подрыва ВВ. Отметим, что в радиусе нескольких метров были замечены крупные фракции льда размерами в поперечном сечении 65-75 см. В майне присутствовал мокрый снег и лед, а вода была видна невооруженным взглядом. На поверхности ледяного покрова возле майны образовалась горка из мокрого снега и льда высотой 35 см. Трещин, которые распространяются от центра закладки ВВ в радиальном направлении, визуально не наблюдалось. Качественно был оценен радиус выброса осколков льда, который составил 5 метров. Под действием продуктов детонации небольшие осколки льда были выброшены дальше.





а) – ледяной покров до взрыва ВВ;
б) – диаметр майны после взрыва ВВ.
Рисунок 5.4 – Эксперимент по взрыву речного льда

б)

Получено, что после взрыва ВВ диаметр майны был приблизительно равным 200 см. Отметим, что серия натурных экспериментов состояла из 10 вариантов, а полученный размер являлся усредненным. На фото показана
первая взрывная майна из десяти, которая располагалась дальше всех от фарватера.

В результате проведенных экспериментов была получена одна из основных интегральных характеристик процесса ударно-взрывного нагружения необходимая для проведения численных расчетов.

5.2 Исследование процесса внедрения крупно-габаритного ударника в лед

В данном подразделе проведены теоретические исследования процесса соударения крупно-габаритного ударника с инертным наполнителем с толстым льдом. В настоящее время практически значимой задачей можно считать задачу внедрения крупно-габаритных ударников в лед. Результаты исследований представляют интерес при подготовке работ по взрывному разрушению ледовых переправ. Хотя количество ледовых переправ снизилось, в некоторых регионах они являются единственным способом доставки грузов.

Цель исследования заключалась в изучении основных закономерностей и механизмов процесса нормального внедрения ударника в лед при низких начальных скоростях.

Рассматривается задача о внедрении крупно-габаритного ударника с инертным наполнителем в лед при начальных скоростях до 300 м/с. Замена ВВ имитирующем его физико-механические свойства наполнителем вызвана необходимостью описания и прогнозирования той части стендовых испытаний, в которой исследуется не только вероятность самодетонации, но и параметры процесса соударения ударника и преграды до момента детонации. К таким параметрам относится укорочение ударника, его пробивная способность, а также давление и массовая скорость в наполнителе.

5.2.1 Физическая постановка задачи

В подразделе приведена физическая постановка задачи. Физическая постановка задачи формулируется как контактное взаимодействие крупногабаритного ударника с толстой ледяной преградой. На контактной границе ударника и ледяной преграды задано условие скольжения. Процесс взаимодействия проходил по нормали. Количество элементов расчетной области составляло 10056, из которых 1028 относятся к ударнику. В качестве расчетного элемента использовался элемент типа «конверт». Диапазон начальных скоростей удара варьировался от 150 до 300 м/с. На рисунке 5.5 в разрезе показана исходная конфигурация ударника.

Ударник – цилиндр со стальной оболочкой и слабопрочным инертным наполнителем. Масса ударника – 235,3 кг. Оболочка ударника изготовлена из высокопрочной стали ШХ-15. Размеры ударника (оболочки и наполнителя) следующие:

Диаметр ударника – 34 см	Толщина задней стенки – 1,4 см
Высота ударника – 87,7 см	Высота наполнителя – 83,1 см
Толщина передней стенки – 3,2 см	Диаметр наполнителя – 31,2 см
Толщина боковой стенки – 1,4 см	Масса наполнителя – 108,6 кг

Объект исследования – преграда изо льда размерами в сечении (400×250) см. Физико-механические характеристики льда были приведены ранее. Предмет исследования – 2D напряженно-деформированное состояние с учетом эволюции деформационных картин и областей разрушения льда.



Рисунок 5.5 – Исходная конфигурация ударника

На рисунке 5.6 показаны компоненты наполнителя ударника в отдельности. Рисунки 5.6 а, б, в, г, д позаимствованы из открытых интернет ресурсов. Физико-механические характеристики наполнителя, необходимые для численных расчетов, следующие: константы уравнения состояния K₁=10 ГПа, K₂=23 ГПа, K₃=15 ГПа, ρ_0 =1,71 г/см³, модуль сдвига G=26,9 ГПа, объемная скорость звука C_s=2540 м/с, предел текучести σ_T =0,025 ГПа, откольная прочность σ_k =0,3 ГПа, удельная работа сдвиговых пластических деформаций A_p=10 кДж/кг, эквивалентная пластическая деформация ε_p = 2. Таким образом, пределы текучести льда и наполнителя довольно близкие.





B)



г) Д)

Рисунок 5.6 – Компоненты наполнителя ударника (слева на право): a) – цемент; б) – песок; в) – опилки древесные; г) – вода; д) – стекло жидкое (по данным Интернета).

5.2.2 Расчет процесса внедрения крупно-габаритного ударника в лед при низких скоростях

В подразделе проведены численные исследования процесса внедрения крупно-габаритного ударника с инертным наполнителем в лед. Серия вычислительных экспериментов состояла из 4 вариантов, в каждом последующем начальная скорость увеличивалась на 50 м/с. Таким образом, в первом варианте начальная скорость равнялась 150 м/с, а в последнем – 300 м/с. Расчеты

б)

a)

проведены в 2D осесимметричном случае на персональном компьютере DNS Prestige Core I5-3450 (3,1 GHz).



а) – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для варианта 1;
 б) – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для варианта 2.

Рисунок 5.7 – Результаты расчетов

В варианте 1 было выявлено, что первые очаги разрушения формировались в зоне контакта «ударник – лед» после 100-й мкс (рисунок 5.7а). В начале процесса внедрения область разрушений в приконтактной зоне состояла всего из нескольких трещин. В процессе внедрения отмечено уплотнение льда и пластическая деформация ударника в радиальном направлении. В интервале времени от 200 до 1000 мкс во льду начинают зарождаться очаги разрушения на расстоянии 20 см от оси симметрии. Под действием растягивающих напряжений очаги разрушения развиваются, увеличиваясь в размерах и образуя магистральную трещину. Выявлено, что процесс внедрения ударника сопровождается формированием во льду конического кратера глубиной чуть более полуметра. Длительность процесса внедрения составила ~ 13 мс. Анализ деформационных картин и областей разрушения льда в варианте 2 выявил то, что сценарий его разрушения имел много общего с предыдущим вариантом (рисунок 5.7б). Зарождение первых очагов разрушения и формирование магистральных трещин во льду происходило после 75-й мкс. После 150-й мкс во льду появилась вертикальная магистральная трещина на расстоянии 16 см от лицевой поверхности преграды. Отмечена небольшая пластическая деформация ударника в осевом направлении. При данной начальной скорости начинает образовываться зазор между наполнителем и оболочкой ударника. Однако, величина зазора небольшая, поэтому он незаметен на рисунке. На 10-й мс ударник полностью внедрился в лед. Окончательная глубина внедрения ударника практически равна его исходной высоте. Основной объем разрушений также сосредоточен в зоне контакта «ударник – лед». Длительность процесса внедрения по сравнению с предыдущим вариантам увеличилась на 1,5 мс и составила 14,5 мс.

На рисунке 5.8 а, б показаны рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» на конечных стадиях процесса внедрения для вариантов 3, 4. Рисунок 5.9 в, г иллюстрирует состояние расчетных сеток в различные моменты времени. В левой части рисунка 5.9в изображена конфигурация взаимодействующих тел для варианта 3 в момент времени t = 10 мс, а в правой части для t = 6 мс. На рисунке 5.9г для варианта 4 представлены конфигурации взаимодействующих тел в t=15 мс (левая часть рисунка) и t=10 мс (правая часть рисунка).

Видно, что с ростом начальной скорости удара, увеличивается зазор между наполнителем и оболочкой ударника. Зазор образуется в донной части ударника. Если на рисунке 5.8а зазор едва виден, то на рисунке 5.8б он более заметен. В процессе внедрения ударника в вариантах 3 и 4 происходит выпучивание льда с тыльной стороны преграды. Это не сопровождается формированием зоны разрушения вблизи тыльной поверхности. Отличительной особенностью можно считать формирование в зоне контакта «ударник – лед» магистральной трещины после 1 мс. В последнем варианте во льду на глу-

бине 123 см начинает формироваться кольцевая трещина отрыва, которая расположена почти в середине исследуемого образца. Расчетное время процесса внедрения в вариантах 3, 4 составило 17,2 и 20,1 мс соответственно.



На рисунке 5.9 показаны графики зависимости скорости и глубины внедрения ударника от времени.

Видно, что временные зависимости скорости ударника могут аппроксимироваться гиперболической функцией (рисунок 5.9а). На кривых скорости можно выделить интервалы быстрого и медленного снижения. Установлено, что с ростом начальной скорости ударника интервал «быстрого снижения» увеличивается, и в последнем варианте достигает своего наибольшего значения, равного почти 10 мс. Отмечено увеличение времени процесса внедрения ударника. На графике кривые скорости не пересекались. Согласно расчетным данным процесс внедрения длился от 12 до 20 мс. Дальнейшие расчеты показали, что скорость была постоянной, а деформационные картины и области разрушения во льду практически не менялись, поэтому счет прекращался.



а) – Зависимости скорости ударника от времени;
 б) – Зависимости глубины внедрения ударника от времени.

Рисунок 5.9 – Результаты расчетов

Семейство кривых на рисунке 5.96 иллюстрирует динамику внедрения ударников в лед. На первых микросекундах кривые сливаются. Установлено, что глубина внедрения ударника увеличивается прямо пропорционально

начальной скорости. Данная закономерность была обнаружена при внедрении компактных и удлиненных ударников в разделе 2,3 соответственно. Получено, что только в первом варианте глубина внедрения ударника не превысила его высоты. Расчетные значения глубины внедрения были от 56 до 162 см. Имела место пластическая деформация оболочки ударника в радиальном и осевом направлениях. Таким образом, в рассмотренном диапазоне начальных скоростей ударник внедрялся на глубину практически равную своей удвоенной высоте.

На рисунке 5.10 представлены графические зависимости поврежденности льда от времени. Анализируя поведение кривых, установлено, что до 100й мкс лед практически не разрушался. В течение этого времени было отмечено его уплотнение. Вначале процесса имело место его уплотнение в приконтактной области. После 100 мкс на кривых отмечен скачок, который объясняется формированием областей разрушения. Видно, что объем поврежденности возрастал от 0,2 до 0,4%. В течение процесса внедрения объем поврежденного льда увеличивался до 12 мс. После 12 мс кривые на графике становились параллельные оси абсцисс.



Рисунок 5.10 – Зависимости поврежденности льда от времени



Рисунок 5.11 – Временная зависимость поврежденности льда и скорости изменения поврежденности для варианта 4

На рисунке 5.11 показаны временные зависимости поврежденности (верхняя кривая) и скорости изменения поврежденности льда (нижняя кривая) для варианта 4. Как и было установлено ранее, поврежденность льда не меняется после 12 мс. На кривой скорости изменения поврежденности в интервале от 3 до 12 мс зафиксированы многочисленные локальные максимумы. По-видимому, их наличие связано с формированием новых зон разрушения во льду. Аналогичная закономерность была отмечена и в предыдущих вариантах. Причем в варианте 1 количество локальных максимумов в указанном интервале времени было наибольшим. Таким образом, наибольшее количество локальных максимумов скорости изменения поврежденности льда наблюдалось при не полном внедрении в него ударника.



Рисунок 5.12 – Зависимость гидростатического давления от времени в наполнителе ударника

На рисунке 5.12 показаны графические зависимости гидростатического давления от времени в носовой и донной частях наполнителя ударника для вариантов 3, 4. Для вычисления давления были выбраны две контрольные точки на оси симметрии на расстоянии 4,88 и 81,5 см от начала координат. Получено, что в носовой части давления достигали значения 0,3 и 0,25 ГПа вначале процесса внедрения, при этом величина давления в наполнителе была невысокой. После 60 мкс расчетные профили давления для вариантов 3, 4 имели только качественные отличия. Видно, что после 2 мс идет затухание давления в носовой части наполнителя ударника. Величина давления в донной части наполнителя составила около 0,027 ГПа, причем ее пик зафиксирован на 240 мкс (кривая 2). После 500-й мкс давление в донной части ударника было практически нулевым.

На рисунке 5.13*а*, б представлены временные зависимости относительных скоростей донной и носовой частей оболочки и наполнителя ударника. Расчеты проведены в четырех контрольных точках, расположенных на оси симметрии. Для расчета осевой компоненты скорости оболочки ударника были выбраны точки на расстоянии 1,5 и 87 см от начала координат. Для расчета осевой компоненты скорости наполнителя ударника фиксировались точки на расстоянии 5 и 86,3 см от начала координат. Получено, что носовая часть оболочки ударника резко теряет скорость в течение 0,25 мс, затем наблюдается возрастание до 1 мс (кривая 1, рисунок 5.13а). Этот факт объясняется формированием зазора между оболочкой и наполнителем в донной части ударника. Установлено, что практически в течение всего процесса профили скорости носовой части оболочки и донной части наполнителя были близки друг к другу. На профили скорости донной части наполнителя после 5 мс имеют место мелкомасштабные осцилляции. После 11 мс обе компоненты скорости становились равными нулю.

Видно, что профиль скорости носовой части оболочки практически совпадает с профилем скорости носовой части наполнителя ударника (кривые 1 на рисунках 5.13а,б). Профиль скорости донной части оболочки качественно воспроизводит особенности профиля скорости донной части наполнителя ударника (кривые 2 на рисунках 5.14а, б). Однако, на кривой 2 рисунка 5.136 имеют место пилообразные колебания после 5 мс. В остальных вариантах профили скорости имели аналогичный вид. Полученные временные зависимости можно аппроксимировать гиперболической функцией.



а) – Осевые компоненты скорости оболочки и наполнителя ударника;



 б) – Осевые компоненты скорости оболочки и наполнителя ударника.
 Рисунок 5.13 – Временные зависимости скорости наполнителя и оболочки ударника

Результаты расчетов процесса внедрения ударника с инертным наполнителем в ледяную преграду приведены в таблице 5.2. В таблице приведены: объем поврежденности льда D_{ice} , глубина проникания ударника L_k и его диаметр после процесса взаимодействия d_b время процесса внедрения t_k , диаметр кратера d_d , зазор между наполнителем и оболочкой l_z и относительное укорочение наполнителя и оболочки ΔL_{Shell} и ΔL_{Filler} .

Таблица 5.2 – Результаты расчетов процесса внедрения ударника в ледяную преграду

Расчетные параметры	Обозна-	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
	чение				
Начальная скорость ударни-	<i>V</i> ₀ , [м/с]	150	200	250	300
ка					
Объем поврежденности льда	D _{ice} , [%]	1,120	1,946	3,285	4,254
Глубина внедрения ударника	<i>L</i> _{<i>k</i>} , [см]	56,11	94,14	128,7	162,5
Диаметр кратера	<i>d_d</i> , [см]	55,52	57,08	58,32	61,9
Время процесса внедрения	<i>t</i> _k , [мс]	13,042	14,510	17,270	20,150
Диаметр ударника после	<i>d</i> _{<i>l</i>} , [см]	34,40	36,00	38,00	40,50
взаимодействия					
Зазор между наполнителем и	<i>l_{z,}</i> [см]	0,25	0,25	1,15	1,50
оболочкой					
Относительное укорочение	ΔL_{Shell} /	0,99/0,99	0,97/0,97	0,96/0,95	0,93/0,92
наполнителя/оболочки	ΔL_{Filler}				

Из таблицы видно, что с ростом начальной скорости отмечено увеличение всех расчетных параметров процесса, кроме величины зазора между наполнителем и оболочкой в 1 и 2 вариантах. Объем поврежденного льда был незначительный. В вариантах 3, 4 поврежденность льда получена в диапазоне от 3,28 до 4,25%. Расчетные значения сопоставимы со значениями поврежденности льда при действии удлиненного ударника с ПГЧ (подраздел 4.3). В процессе внедрения зоны разрушения льда формировались, как правило, в приконтактной области. Вблизи тыльной поверхности очагов разрушений не наблюдалось, что объясняется толщиной ледяной преграды. На более высоких скоростях имело место выпучивание льда с тыльной стороны. На кривых скорости изменения поврежденности имелись многочисленные локальные максимумы, которые связанные с формированием новых зон разрушения льда.

Получено, что глубина внедрения ударника варьировалась в диапазоне от 56,1 до 162,5 см и увеличивалась пропорционально его начальной скорости. Такая закономерность обнаружена при внедрении компактных и удлиненных ударников. На низких скоростях ударник не смог полностью погрузиться в лед. На более высоких скоростях глубина внедрения была практически равна его удвоенной высоте. Процесс внедрения сопровождался формированием во льду кольцевой трещины отрыва, расположенной в середине преграды. Длительность процесса внедрения превысила микросекундный диапазон и достигала ~ 20 мс.

Процесс внедрения сопровождался деформированием материала ударника (оболочки и наполнителя) в осевом и радиальном направлениях. В первом варианте пластическая деформация ударника была незначительной. В последнем варианте диаметр ударника в носовой части увеличился на 17%. При этом диаметр кратера d_d изменялся в диапазоне от 55,52 до 61,9 см. Выявлено, что при низких скоростях диаметр кратера во льду был в 1,6 раз больше диаметра ударника, а при более высоких скоростях в 1,8 раз.

В процессе внедрения ударника образуется зазор между оболочкой и наполнителем. Получено, что в вариантах 1 и 2 он не менялся и составил 0,25

см, а в вариантах 3,4 увеличивался от 1,15 до 1,50 см. Согласно расчетным данным зазор формировался в начале процесса до 1 мс.

Таким образом, количественно описан процесс внедрения крупногабаритного ударника в лед в диапазоне начальных скоростей ниже скорости звука в воздухе. Рассчитаны значения некоторых параметров процесса соударения для четырех вариантов расчета. Выявлено, что процесс внедрения сопровождался радиальной и осевой деформацией ударника и формированием во льду конического кратера. Установлено, что глубина кратера увеличивалась прямо пропорционально скорости удара. Объем разрушенного льда был незначительным. Скорость ударника в целом, а также скорость донной и носовой частей наполнителя ударника изменялась по гиперболическому закону. Давления, возникающие в наполнителе, можно характеризовать как невысокие.

5.3 Исследование процесса взрывного нагружения льда на воде

В настоящем подразделе представлены результаты численных исследований взрывного нагружения массивной льда на воде. Практическая значимость работы заключается в необходимости более эффективного разрушения толстого (2 м и больше) 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 деформирования и разрушения льда на водной подложке. Давление в продуктах детонации, которая предполагается мгновенной, выбрано в виде политропы Ландау–Станюковича.

Проведен детальный анализ напряженно-деформированного состояния, деформационных картин и областей разрушения льда, построены временные зависимости скорости свободной поверхности льда, параметра поврежденности и скорости изменения поврежденности льда, а также гидростатического давления и девиаторных напряжений. Вычислены размеры взрывных майн во льду. Получены рекомендации по наиболее эффективному разрушению льда при указанных начальных условиях.

5.3.1 Расчет взрывного нагружения льда на воде

В подразделе рассматривается задача о взрывном нагружении льда, расположенного на воде. Толщина льда и глубина водной подложки были равными 250 см. Глубина закладки ВВ варьировалась в диапазоне от 22 до 221 см. В качестве ВВ использован безоболочечный заряд ТНТ: начальная плотность BB $\rho_0 = 1.6$ г/см³, скорость детонации 6900 м/с. Масса заряда BB была 4,8 кг, размеры в сечении (21×23) см. Заряд ВВ располагался на оси симметрии, а схема его расположения проиллюстрирована на рисунке 5.15. Рассмотрено 8 вариантов закладки ВВ, в каждом последующем глубина закладки увеличивалась. На контактной границе «Лед – BB», «Лед – Вода», а также кромках льда задано условие скольжения. Расчетная область автоматически разбивалась «конвертом» на 17248 триангуляционных элемента. Серия вычислительных экспериментов состояла из 8 вариантов и проведена в 2D осеммметричном случае. В процессе вычислительного эксперимента использовался новый алгоритм расчета, описанный ранее. Физикомеханические характеристики льда приведены в разделе 2.

Результаты расчетов для всех указанных вариантов приведены на рисунке 5.16. Рисунки дают детальную информацию о картинах разрушения льда через 3 мс после «подрыва» BB.

Расчетным путем установлено, что независимо от глубины закладки ВВ, очаги разрушения формируется 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. В нем формируются многочисленные магистральные трещины, которые ориентированы под различным углом к оси симметрии. Фрагментарное разрушение льда сопровождалось выплеском отдельных его кусков наружу через взрывную майну. Видно, что концу процесса расчета зоны разрушения распространяются по всей области, занятой льдом. Сопоставление конечных конфигураций льда в различных вариантах показало, что после 2 мс картины разрушения практически не менялись. Детальный анализ эволюции разрушения льда в варианте 4 показал, что магистральная трещина разделяла лед в середине преграды (на рисунке 5.16 выделено буквой А). В варианте 3 она сформировалась несколько ниже, а в варианте 5 – выше середины преграды.

С течением времени область, занятая ПД, постепенно увеличивается, приобретая в сечении овальную форму и достигая диаметра 110 см и более. Вследствие действия растягивающих напряжений в области, прилегающей к свободной поверхности льда, иногда формируется множественный откол. Практически всегда это сопровождалось обильным разрушением приповерхностного слоя. В последнем варианте окончательная область разрушений вблизи границы «Лед – Вода» сформировалась после 0,7 мс. Данный факт объясняется максимальной глубиной закладки ВВ и временем прихода ударной волны.



Рисунок 5.14 – Исходная конфигурация системы «Лед – ВВ – Вода»



a)



б)



B)





д)











Рисунок 5.15 - Рассчитанные конфигурации «Лед - ВВ - Вода»



Рисунок 5.16 – Профили скорости свободной поверхности льда

На рисунке 5.16 приведена зависимость скорости свободной поверхности льда от времени. На графиках имеет место затянутое торможение откольной тарелки в течение довольно длительного времени после выхода на поверхность откольного импульса. Время прихода ударной волны на свободную поверхность зафиксировано в интервале от 100 до 700 мкс. Очевидно, что с ростом глубины закладки ВВ время прихода увеличивается. Соответственно максимальная скорость свободной поверхности была в первом варианте, а минимальная – в последнем. В вариантах 5–8 после 700 мкс амплитуды скорости мало отличаются. Во всех вариантах ближе к концу процесса кривые скорости становятся параллельным оси абсцисс. Отсутствие мелкомасштабных осцилляций на рисунке 5.17 объясняется развитой поверхностью разрушения между преградой и отколовшимся слоем льда.



Рисунок 5.17 – Зависимость поврежденности льда от времени

На рисунок 5.17 приведены графические зависимости поврежденности льда от времени. Видно, что основной процесс накопления повреждений во льду проходит в течение первой миллисекунды. Кривые поврежденности от 0 до 300 мкс довольно 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 отдельным формированием зон разрушения в зоне контакта «Лед – ВВ» 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%.



Рисунок 5.18 — Зависимость поврежденности и скорости изменения поврежденности от времени

Графики зависимости поврежденности льда и скорости изменения поврежденности льда от времени для варианта 1 приведены на рисунке 5.18 Видно, что после 1150 мкс кривая на верхнем графике вырождается в прямую с постоянным значением. Детальный анализ показал, что в остальных вариантах поведение кривых поврежденности было аналогичным. Похожие кривые наблюдались при внедрении компактных и удлиненных ударников в лед (раздел 3 и 4).

Получено, что скорость изменения поврежденности льда достигает своего максимума на 680 мкс. В конце первой миллисекунды на кривой имеется пологий участок, после которого скорость начинает приближаться к нулю. Аналогичная закономерность наблюдалась в варианте 7. В остальных шести вариантах максимум скорости фиксируется в интервале от 450 до 900 мкс. Причем самый поздний и ранний максимумы зафиксированы на 900-й и 450-й мкс в вариантах 4 и 3 соответственно. В варианте 2 с 580 по 700 мкс скорость была постоянной.

На рисунке 5.19 показаны графики гидростатического давления от времени во льду. Расчет давления производился в середине ледяной преграды (контрольная точка 1). Контрольная точка была расположена на расстоянии 88 см от боковой поверхности (рисунок 5.15).



Рисунок 5.19 – Зависимости гидростатического давления от времени

Видно, что характер кривых гидростатического давления во льду при взрывном и ударном нагружении отличаются. На кривых не наблюдаются осцилляции. Максимальное давление, равное 0,042 ГПа, зафиксировано в варианте 6. Минимальное давление отмечено в варианте 8 и составило 0,0215 ГПа. В обоих случаях своего максимума давление достигало на 700 мкс, а после 1000 мкс величина давления была практически нулевой. Выявлено, что в воде давления были незначительными.

Проанализировать напряженно-деформированное состояние льда можно по графикам временной зависимости тангенциальной компоненты девиатора тензора напряжений S_{гz} (рисунок 5.20). Видно, что до 600 мкс на кривых наблюдается минимум, а с 600 до 800 мкс – максимум. На всех кривых присутствуют пилообразные колебания. В варианте 3, 4 после 4000 мкс отмечены дополнительные локальные максимумы. Получено, что при взрыве во льду генерируются невысокие напряжения.



Рисунок 5.20 – Временные зависимости компонента девиатора тензора напряжений

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 варианте 5. Результаты расчетов суммированы в таблице 5.3

	Вариант №	Глубина за-	Поврежденность	Диаметр	Скорость				
		кладкиВВ	льда	майны во	свободной				
		[CM]	[%]	льду	поверхности				
				[см]	[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	36,86/41,70	140/156	77/89				
6	Вариант 6	153	37,25	135	53				
7	Вариант 7	193	30,94	128	41				
8	Вариант 8	221	26,96	150	32				
Примечания									

Таблица 5.3 – Результаты расчетов процесса взрывного нагружения льда

1 Данные получены в момент времени 4 мс.

2 В знаменателе приведены значения для варианта расчетов с массой BB m=7,2 кг.

Из таблицы видно, что объем разрушений льда не превышал 40%. С увеличением глубины закладки ВВ до 153 см (вариант 6) отмечен рост объема поврежденности льда, а варианте 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). Увеличение диаметра майны зафиксировано до глубины 130 см (вариант 5). В вариантах 6, 7 отмечено уменьшение диаметра, а в варианте 8 – 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 преграды.

5.4 Выводы по разделу

Таким образом, проведены экспериментальные и теоретические исследования поведения льда при ударных и взрывных нагрузках. Объектами исследования были выбраны конжеляционный и речной однолетний лед средней толщины. Проведены лабораторные эксперименты по низкоскоростному соударению сферического ударника с ледяными цилиндрами различной высоты и диаметров. Установлено, что диаметр кратера практически в 2 раза превышал его глубину. Экспериментально изучен процесс взрывного нагружения речного льда средней толщины зарядом ВВ в воде из подо льда. Ледяной покров был заснеженный, а лед под снегом более пористый. Получено, что взрывная майна была близка к форме окружности, а ее диаметр был в 12,5 раз больше, чем диаметр лунки для закладки ВВ.

Численно исследован процесс низкоскоростного внедрения ударника с наполнителем в толстую ледяную преграду. Рассчитаны интегральные характеристики процесса внедрения: объем поврежденности льда, глубина проникания ударника и его диаметр после процесса взаимодействия, время процесса внедрения, диаметр кратера, зазор между наполнителем и оболочкой и относительное укорочение наполнителя и оболочки. Детально исследовано влияние глубины закладки ВВ на процесс разрушения льда на воде. Получены рекомендации по наиболее эффективному разрушению льда зарядом ВВ фиксированной массы в полиэтиленовой оболочке.

Автор выражает благодарность главному инженеру ОАО «Кузбасс-СпецВзрыв» А.Н. Садохину за помощь в проведении экспериментов. Заключение

1. Предложена физико-математическая модель деформирования и разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках. Модель являлется упруго-пластической, пористой, сжимаемой и учитывает свойства прочности и ударно-волновые явления. Модель разрушения льда предусматривает совместное образование отрывных и сдвиговых разрушений. Могут использоваться различные критерии разрушения (силовой, объемный и т.д.). Действие продуктов детонации описывается политропой Ландау – Станюковича. Процесс нагружения и разгрузки соответствует экспериментальной ударной адиабате льда. В процессе счета допускается появление новых контактных и свободных поверхностей.

2. Проведена модификация численного лагранжева метода расчета динамического нагружения льда. Метод позволяет на качественно высоком уровне воспроизводить процессы ударного и взрывного нагружения льда в широком диапазоне начальных условий. Оригинальность метода заключается в новом алгоритме расчета свободных и контактных поверхностей, который позволяет получать более точные результаты при моделировании взрывного нагружения льда.

3. Тестирование разработанных средств математического моделирования проведено в несколько этапов. Решены тестовые задачи о соударении двух одинаковых цилиндров и об ударе пластины по плите. Решены задачи о соударении цилиндров из стали, алюминия и льда с жесткой стенкой. Впервые решена тестовая задача о взрыве заряда ВВ в полиэтиленовой оболочке в воде из подо льда. Решена задача об ударе ледяного цилиндра по дюралюминиевой пластине. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными было удовлетворительным.

4. Проведенный аналитический обзор на глубину 10 лет позволил сделать следующие выводы. Количество публикаций по указанной теме зарубежом в десятки раз больше, чем в нашей стране. Теоретических работ

значительно больше, чем экспериментальных. Наиболее распространенной моделью поведения льда при динамических нагрузках следует считать модель, разработанну группой ученых под руководстовом К.S. Carney. Исследований, посвященных взрывному нагружению льда в открытых источниках литературы не обнаружено. Скорее всего, они являются библиографической редкостью или оформлены в тематических отчетах под грифом секретно. Для апробации новых физико-математических моделей необходимы надежные экспериментальные данные по динамическому нагружению льда. Некоторые экспериментальные данные не согласуются между собой, в следствии сложной внутренней структуры льда. Есть основания полагать, что в ближайшее время ожидается новая волна публикаций по данной теме из-за ее актуальности. В нашей стране возобновились ряд мероприятий по «ледовой» тематике, однако единой государственной поддержки все еще нет.

5. Детально изучено поведение льда при внедрении компактных ударников в диапазоне до 325 м/с. Установлено, что для более эффективного разрушения льда следует использовать цилиндрический ударник, а для получения в нем более глубокого кратера – сферический. Компактные ударники смогли внедриться в лед на глубину равную 6 их диаметрам. Глубина внедрения ударников увеличивается прямо пропорционально увеличению их начальной скорости. При внедрении цилиндрического ударника откольные тарелки с лицевой стороны формировались чаще. Получено, что длительность процесса внедрения составляла ~0,3 мс. Временные зависимости скорости ударника, глубины его внедрения и поврежденности льда могут аппроксимироваться элементарными функциями. Основной объем разрушений во льду формировался вначале процесса. Скорость изменения поврежденности достигала своего максимума после полного погружения ударников в лед. Выявлено, что поведение льда и некоторых керамических и геологических материалов при ударных нагрузках имеют общие закономерности.

6. Выполненные численные исследования процесса внедрения удлиненных ударников в лед позволили выявить влияние их головных частей на процесс внедрения и разрушения льда в диапазоне до 300 м/с. Установлено, что для более эффективного разрушения льда следует использовать ударник с КГЧ. При внедрении ударника с ПГЧ зафиксирован максимальный диаметр кратера. Для получения во льду самого глубокого кратера необходим ударник с ОГЧ. Некоторые закономерности процесса разрушения льда наблюдались ранее при внедрении компактных ударников. По сравнению с предыдущим случаем, длительность процесса внедрения увеличивается до 0,8 мс, а объем поврежденного льда уменьшается до 6%.

7. Экспериментально исследован процесс соударения стальной сферы со льдом. Установлено, что диаметр кратера в 2 и более раз превышает его глубину. Во многом это объясняется формированием лицевой откольной тарелки в процессе соударения. Изменение высоты ледяного цилиндра в выбранном диапазоне на процесс кратерообразования во льду не влияло. Экспериментально исследован процесс взрывного нагружения речного льда средней толщины зарядом ВВ в полиэтиленовой оболочке (масса ВВ равна 4 кг). При проведении эксперимента ледяной покров был заснеженным, а лед более пористый, чем обычно. В результате взрывного нагружения во льду формировалась взрывная майна в форме окружности диаметром около 200 см.

Численно исследован процесс низкоскоростного внедрения крупногабаритного ударника с инертным наполнителем в толстый (2 и более метра) лед. Выявлено, что процесс внедрения сопровождался радиальной и осевой деформацией ударника и формированием во льду конического кратера. Глубина кратера увеличивается прямо пропорционально росту начальной скорости ударника. Скорость ударника в целом, а также скорость донной и носовой частей наполнителя ударника изменялась по гиперболическому закону. Численно исследован процесс взрывного нагружения толстого льда на воде безоболочечным зарядом ВВ. Заряд ВВ фиксированной массы помещался

непосредственно подо льдом. Наиболее эффективное разрушение льда достигнуто при расположении заряда ВВ в середине ледяной преграды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1 Достовалов Б. Н. Общее мерзлотоведение: учебное пособие для студентов геологических специальностей вузов / Б. Н. Достовалов, В. А. Кудрявцев. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1967.– 403 с.

2 Вялов С. С. Подземные льды и сильнольдистые грунты как основания сооружений: производственно-практическое издание / С.С. Вялов, В.В. Докучаев, Д.Р. Шейнкман. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отд-ние, 1976. – 166 с.

3 Русское географическое общество [Электронный ресурс] // Электрон. Дан. – [Б. м.], 2010–2013. – URL: <u>http://www.rgo.ru/2010/07/arkticheskie-ldy-</u> budut-izuchat-s-amerikanskix-podvodnyx-lodok/ (дата обращения: 10.07.2013).

4 Федеральное космическое агентство http://www.federalspace.ru/ [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энциклопедия. – Электрон. дан. – [Б. м.], 2014. URL: <u>https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4</u> (дата обращения: 05.05.2012).

5 Левинский А.А. Пахари льда как работают ледоколы [Электронный ресурс] // Популярная механика. Электрон. Дан. – [Б. м.], 2010–2013. – URL: <u>http://www.popmech.ru/article/4075-pahari-lda</u> (дата обращения: 05.05.2012).

6. Инженеры испытали зонд пенетратор для Европы [Электронный реcypc] // Наука и техника. – Электронные данные, 2013. – URL: <u>http://lenta.ru/news/2013/07/15/penetratortest</u> (дата обращения: 15.07.2014).

7 Physics and mechanics of ice Symposium.Cophenhagen, Technical University of Denmark, Editor P. Tryde, 1983, p. 352.

8 Открыты новые свойства льда [Электронный ресурс] [Электронный ресурс] // Детали мира. Наука и технологии. – Электронные данные, 2013. – URL: <u>http://detalimira.com/news/1644/</u> (дата обращения: 15.08.2013).

9 Ice Research laboratory [Электронный ресурс] // Tayer school engineering at Dartmouth – Электронные данные, 2013. – URL: <u>http://engineering.dartmouth.edu/icelab/index.html</u> (дата обращения: 15.08.2013). 10 International Symposium of polar engineering [Электронный ресурс] Электрон. дан. – [Б. м.], 2010–2014. – URL: http://wa-com.com/isope2014.org (дата обращения: 04.07.2014).

11 Зуев В.А. Способы и средства разрушения ледяного покрова / В. А. Зуев, Е. М. Грамузов, М. А. Балакшина // 18 Международная конференция по портовому и океаническому машиностроению в арктических условиях. – Потсдам (шт.Нью-Йорк, США), 24 июня – 2 июля 2005.

12 Чернов М. Арктические амбиции В.В. Путина. Что даст России обустройства Арктики [Электронный ресурс] // Наука и техника. – Электронные данные, 2014. – URL: http://lenta.ru/articles/2014/04/24/arktika/ (дата обращения: 24.04.2014).

13 Афанасьев В.П. Методика расчета полномасштабной прочности льда / В. П. Афанасьев, В.Н. Смирнов // Актуальные проблемы современной науки. – 2010.– №6. – С. 245–248.

14 Беловицкий Е.М. Исследование прочности льда Амурского залива // Вопросы экологии. Вестник ТГЭУ. – 2008. – №2. – С.54–59.

15 Глазовский А.Ф. Реологические характеристики льда и их влияние на динамику Арктического ледникового покрова / А.Ф. Глазовский, В. П. Епифанов, Р. В. Юрьев // Материалы Гляциологических исследований. – 2008. – Вып. 105. – С. 17–28.

16 Дучков И.Д. Температурные напряжения и энергия упругого деформирования в ледовом покрове оз. Байкал / И. Д. Дучков, В. Е. Истомин // Физическая мезомеханика. – 2010. – Вып. 1, №13. – С. 91–94.

17 Козин В.М. Резонансный метод разрушения ледового покрова: дис. д-ра. техн. наук в форме научного доклада: ИМиМ ДВО РАН / В. М. Козин. – Владивосток, 1993. – 215 с.

19 Коржавин К.Н. Влияние скорости деформирования на оценку прочности льда в расчетах ледовых нагрузок // Труды НИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат. – 1955. – С.15–29.

20 Нигметов Г.М. Ледовые заторы на реках Российской Федерации. Пути и способы борьбы с ними / Г.М. Нигметов, В.И. Пчелкин, Ю.А. Филатов // Технологии гражданской безопасности. – 2003. – Вып. № 1. – С. 74–80.

21 Могилев В. А. Движение ударника в ледовых средах разной солености / В. А. Могилев, В. М. Подорожный // Сборник материалов III Научной конференции Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». – Саров, 2004. – Т.2. – С.638–642.

22 Исследование влияния скорости деформирования при испытаниях пресноводного льда на прочность при раскалывании, сжатии и трещиностой-кости / С.А. Новиков [и др.] // Сборник материалов III Научной конференции Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». – Саров, 2004. – Т.2. – С.882–896.

23 Богородский В.В. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии / В.В. Богородский, В.П. Гаврило. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 383 с.

24 Селиверстов В.И. Экспериментальные исследование неоднородности прочностных свойств льда / В.И. Селиверстов, А.Э. Фарафонов // Материалы научной конференции «Вологдинские чтения». – Владивосток: Изд-во ДВГТУ. – Владивосток, 2000. – С. 48.

25 Гольдштейн Р.В. Механика разрушения и некоторые вопросы разрушения / Механика и физика льда / Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко. – М.: Наука, 1983. – 62 с.

26 Герасимов А.В. Численное исследование 3D процесса проникания ударников в лед / А.В. Герасимов, С. В. Пашков // Труды V Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи», Самара , 29–31 мая, 2008. – Самара, 2008. – С. 96–98.

27 Шибков А.А. Научно-исследовательская лаборатория «Физика льда» // Вестник ТГУ. – 2009. – Т.14, Вып. 6. – С. 1161–1164.

28 Experimental and numerical study of impact interaction of hard projectile with target composed of three layers / A. Bragov [et. al.] // Proceedings of 10th International armament conference., Poland. – Ryn, 15–18.09.2014 – 2014. – P. 205.

29 Горельский В.А. Моделирование глубины проникания ударников в пресный лед при температуре до –25 °С / В. А. Горельский, А. А. Коняев, В. Ф. Толкачев // Полярная механика. – 2012. – С. 21–22.

30 Кочетков А.В. Численное моделирование взрывных процессов в мерзлом грунте / А.В. Кочетков, Е.Г. Глазова, С.В. Крылов // Известия Российской академии наук. Механика деформируемого твердого тела. – 2007. – №6. – С. 128-136.

31 Sain T. Constitutive modeling of ice in the high strain rate regime / T.
Sain, R. Narasimhan // International Journal of Solids and Structures. – 2011. – №
48. – P. 817–827

32 Ravindra D. A temperature dependent creep damage model for polycrystalline ice / D. Ravindra, H. Waisman // Mechanics of Materials. – 2012. – № 46. – P. 23–41.

33 Wells J. Small-scale laboratory experiments on the indentation failure of polycrystalline ice incompression: Main results and pressure distribution R. Taylor / J.Wells, I. Jordaan, A. Derradji-Aouat // Cold Regions Science and Technology. – 2011. – N_{2} 65. – P. 314–325.

34 A phenomenological high strain rate model with failure for ice / K.S. Carney [et. al.] // International Journal of Solids and Structures. $-2006. - N \ge 43. - P. 7820-7839.$

35 Sherburn J. A. Hydrodynamic modeling of impact craters in ice / J.A. Sherburn, M.F. Horstemeyer // International Journal of Impact Engineering. – 2010. – № 37. – P. 27–36.
36 Shock and post-shock temperatures in an ice–quartz mixture: implications for melting during planetary impact events / R.G. Kraus [et. al.] // Earth and Planetary Science Letters. – $2010. - N_{2} 289. - P. 162-170.$

37 The experimental/numerical study to predict mechanical behaviour at the ice/aluminium interface / M. Matbou Riahi [et. al.] // Cold Regions Science and Technology. -2011. $- N_{\odot} 65$. - P. 191–202.

38 Kermani M. Bending strength and effective modulus of atmospheric ice /
M. Kermani, M. Farzaneh, R. Gagnon // Cold Regions Science and Technology. –
2008. – № 53. – P. 162–169.

39 Ada H.V. Experimental studies on shear failure of freeze-bonds in saline ice: Part II: Ice–ice friction after failure and failure energy / H.V. Ada, Repetto-Llamazares, V.H. Knut // Cold Regions Science and Technology. – 2011. – N° 65. – P. 298–307.

40 Maxwell L.R. Fracture penetration in planetary ice shells / L.R. Maxwell, M. Manga // Icarus. – 2009. – № 199. – P. 536–541.

41 Design ice load for piles subjected to ice impact / J. Dong [et. al.] // Cold Regions Science and Technology. – 2012. – № 71. – P. 34–43.

42 Minami Y. Rate-dependent strength of porous ice–silica mixtures and its implications for the shape of small to middle-sized icy satellites /Y.Minami, M. Arakawa // Icarus. – 2010. – N_{2} 210. – P. 956–967.

43 Combescure A. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice / A. Combescure, Y. Chuzel-Marmot, J. Fabis // International Journal of Solids and Structures. $-2011. - N_{\odot} 48. - P. 2779-2790.$

44 Palmer A.C. A revised ice pressure-area curve and a fracture mechanics explanation / A.C. Palmer, J.P. Dempsey, D.M. Masterson // Cold Regions Science and Technology. $-2009. - N_{\odot} 56. - P. 73-76.$

45 Theile T. Simulating creep of snow based on microstructure and the anisotropic deformation of ice / T. Theile, H. Loewe, M. Schneebeli // ActaMaterialia. - 2011. - № 59. - P. 7104-7113.

181

46 On the response of two commercially-important CFRP structures to multiple ice impacts/ J. Gareth [et. al.] // Composite Structures. –2011. – № 93. – P. 2619–2627

47 Park H. Damage resistance of single lap adhesive composite joints by transverse ice impact / H. Park, H. Kim // International Journal of Impact Engineering. $-2010. - N_{2} 37. - P. 177-184.$

48 Local ice pressures measured on a strain gauge panel during the CCGS Terry Fox bergy bit impact study / R. Ritch [et. al.] // Cold Regions Science and Technology. $-2008. - N_{2} 52. - P. 29-49.$

49 Liu Z. Plasticity based material modelling of ice and its application to ship-iceberg impacts / Z. Liu, J. Amdahl, S. Loset // Cold Regions Science and Technology. -2011. $- N_{2} 65$. - P. 326-334.

50 Gagnon R.E. A numerical model of ice crushing using a foam analogue // Cold Regions Science and Technology. – 2011. – № 65. – P. 335–350.

51 Leif E. High velocity impact on NCF reinforced composites / E. Leif, R. Juntikka //Composites Science and Technology. – 2009. – № 69. – P. 1478–1482.

52 Прочность судов, плавающих во льдах / Ю. Н. Попов [и др.]. – Л.: Судостроение, 1967. – 224 с

53 Ионов Б. П. Авансы и долги российского ледоколостроения / Б. П. Ионов // Судостроение. – 2009. – № 5. – С. 18–20.

54 Апполонов Е. М. Некоторые результаты экспериментальных исследовний новых технических средств для создания в ледяном покрове широкого канала для безопасного прохода крупнотоннажных судов / Е. М. Апполонов, А.А. Добродеев, Н. Ю. Клементьева // Материалы I Всероссийской конференции Полярная механика. – Санкт-Петербург, 2012. – С. 9–10.

55 Васильев Н. К. Методы упрочнения и армирования льда для конструкций гидротехнических сооружений из ледяных и льдогрунтовых композитов / Н. К. Васильев, А. А. Иванов, И. Н. Шаталина // Вестник НГУ. Сер. матем., мех., информ. – 2013.– Т.13. № 3. – С. 31–37. 56 Гольдштейн Р.В. Механика разрушения льда и некотрые ее приложения / Р.В. Гольдштейн, Н. М. Осипенко // Вестн. НГУ. Сер. Математика, Механика, Информатика. – 2012. – Т.12. –С. 41–47.

57 Епифанов В.П. Механизмы разрушения льда при воздействии лазерного разрушения / В.П. Епифанов, Н.Г. Соловьев // Материалы I Всероссийской конференции Полярная механика. – Санкт-Петербурге, 2012. – С. 23– 24.

58 Цуприк В.Г. Теоретические и экспериментальные исследования внутренней энергии механического разрушения морского льда // Материалы І Всероссийской конференции Полярная механика. – Санкт-Петербурге, 2012. – С. 62–63.

59 Коржавин К.Н. Воздействие льда на инженерные сооружения / К.Н. Коржавин.: Изд-во СО АН СССР, 1962. – 203 с.

60 Прогнозирование влияния мелководья на сопротивление льда при проектировании корпуса речного ледокола: диссертация кандидата технических наук: 05.08.01. / Шканов И.Н. – Нижний Новгород, 2003. – 269 с.

61 Прокудин А.Н. Численное исследование процесса разрушения ледяного покрова с учетом сжимаемости и неоднородности / А.Н. Прокудин, В.И. Одиноков // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 110–118.

62 Stewart S.T. Collisional processes involving icy bodies in the solar system / Stewart S.T. – Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA; 2002. – 342 p.

63 Rudolph M. L. Fracture penetration in planetary ice shells / M. L. Rudolph, M. Manga // Icarus. – 2009. – № 199. – P. 536–541.

64 Asp L. E. High velocity impact on NCF reinforced composites / L. E. Asp, R. Juntikka // Composites Science and Technology. – 2009. – № 69. – P. 1478–1482.

65 Kim H. Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composites panels. / H. Kim, D. A. Welch, K. T. Kedward // Composites Part A. -2003. $- N_{2}$ 16. - P. 14–21.

66 Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts / J. Pernas-Sanchez [et. al.] // International Journal of Solids and Structures . -2012. $-N_{2}$ 23. -P. 32–45.

72 An Efficient EG/AD Model Ice for the MOERI Ice Tank / Seong-Rak Cho [et. al.] // Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference Beijing, China, June 20-25. – 2010. – P. 1183–1187.

73 Timco G.W. Comparative strengths of fresh water ice / G.W. Timco, R.M. Frederking // Cold Regions Science and Technology. – 1982. – Vol. 6, №I. – P. 21–27.

74 Grats E.T. Preliminary observations of brittle compressive failure of columnar saline ice under triaxial loading / E. T. Grats, E. M. Schulson // Annals of Glaciology. – 1994. – Vol.19 – P. 33–38.

75 Жесткая В.Д. Исследование напряженно-деформированного состояния ледяного покрова, находящегося под действием движущейся нагрузки :диссертация доктора технических наук: 01.02.04. / В. Д. Жесткая. – Комсомольск-на-Амуре, 2003. – 309 с.

76 Чижов В.Е. К исследованию динамического нагружения льда / В.Е. Чижов // Прикладная механика и техническая физика. – 1995. – Т.36. №3. – С.158–164.

77 Bridgman P.W. Water, in the liquid and five solids, under pressure / P.W. Bridgman // Proc. Amer. Acad. Arts. Sciences. –1911. – V.47, № 13. – P. 441-558.

78 Simulation of Dynamic Behavior of High Speed Catamaran Craft Subjected to Underwater Explosion / Jaeho Chung [et. al.] // Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece, June 17–22. – 2012. – P. 731-738. 79 Stewart S.T. Shock Hugoniot of H2O ice / S.T. Stewart, T. J. Ahrens // Geophys Res Letter. -2003. - V.37, No6 - P. 1332-1335.

80 Glazyrin V.P. Influence of arrangement of additional layer in three-layer barrier on shock resistence / V.P. Glazyrin, M. Yu. Orlov, Yu.N. Orlova // Proceedings of 14th International Scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists: Modern technique and technologies MTT' 2008 (March 24-28, 2008, Russia, Tomsk) Tomsk, –Tomsk polytechnic university: TPU-Press. – Tomsk, 2008. – P. 82–85.

81 Глазырин В.П. Исследования процесса нормального внедрения в лед цилиндра с дозвуковыми скоростями / В.П. Глазырин, Ю.Н. Орлова, М.Ю. Орлов // XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых «Современная техника и технологии». – Томск, 2009. – Т.2. – С. 88–90.

82 Глазырин В.П. Исследования ударно-взрывного нагружения ледовой пластины / В. П. Глазырин, Ю. Н. Орлов, Ю. Н. Орлова // Изв. высш. учеб. зав. – 2009 – Т. 52. №7/2. – С. 77–80.

83 Глазырин В.П. Моделирование контактной границы при взрыве /
В.П. Глазырин, Ю.Н. Орлов, Ю.Н. Орлова // Изв. высш. учеб. зав. – 2009 –
Т.52, №7/2. – С. 74–77.

84 Орлов М.Ю. Моделирование процесса внедрения компактного цилиндрического ударника в лед / М. Ю. Орлов, Ю. Н. Орлова // Материалы конференции «Современная баллистика и смежные вопросы механики», посвященная 100-летию со дня рождения профессора М.С. Горохова – основателя Томской школы баллистики. – Томск: Томский госуниверситет. – Томск, 2009. – С.235–237.

85 Глазырин В.П. Деформирование и разрушение льда при ударе и взрыве / В. П. Глазырин, Ю. Н. Орлов, Ю. Н. Орлова // Материалы конференции «Современная баллистика и смежные вопросы механики», посвященная 100-летию со дня рождения профессора М.С. Горохова – основателя

Томской школы баллистики. – Томск: Томский госуниверситет. – Томск, 2009. – С.203–205.

86 Глазырин В.П. Численное исследование поведения пресноводного льда при действии компактных ударников в дозвуковом диапазоне скоростей / В. П. Глазырин, Ю. Н. Орлова // Труды Томского госуниверситета. Серия общенаучная. Изд-во Том-го ун-та. – 2009. –Том 273, Вып. 2. –С. 209–212.

87 Глазырин В.П. Анализ деформации льда при ударе и взрыве / В. П. Глазырин, Ю. Н. Орлов, Ю. Н. Орлова // Забабахинские научные чтения – 2010: Сб. материалов X Международной конференции, 15-19 марта 2010 г., Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. – Снежинск, 2010. – С. 184–186.

88 Глазырин В.П. Численное моделирование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках / В. П. Глазырин, Ю. Н. Орлов, Ю. Н. Орлова // Всероссийская конференция "Фундаментальные основы баллистического проектирования". Санкт-Петербург, 28.06-02.07.2010 г. Сб. материалов Т. 2 / под ред. д.т.н. проф. Б.Э. Кэрта – СПб. Балт. гос. техн. ун-т. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 78–80.

89 Глазырин В.П. Расчет процесса пробития компактным ударником тонкого льда / В. П. Глазырин, Ю. Н. Орлова // Труды Томского госуниверситета. Серия физико-математическая. Изд-во ТГУ, Томск.– 2010. – Т.276. – С. 56–60.

90 Глазырин В. П. Динамика деформирования наполненных ударников при взаимодействии со льдом / В. П. Глазырин, Ю. Н. Орлов, Ю.Н. Орлова // Материалы VII научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики-2011», посвященной 50-летию полета Ю.А. Гагарина в космос, 2011, Изд-во ТГУ. – Томск, 2011. – С. 231–233.

91 Математическое моделирование процессов высокоскоростного деформирования поликристаллического льда / В. П. Глазырин [и др.] // Материалы IV Международной конференции «Математика ее приложения, и математическое образование-2011», Изд-во БГТУ. – Улан-Удэ, 2011. – С. 284–291. 92 Глазырин В.П. Компьютерное моделирование процесса внедрения крупно-габаритного ударника в ледово-водные среды / В. П. Глазырин, М. Ю. Орлов, Ю. Н. Орлова // Труды Томского госуниверситета. Серия Физикоматематическая. 2012. Томск, Изд-во Томского госуниверситета. – 2012. – Т. 282. – С. 329–335.

93 Глазырин В.П. Исследование процессов ударно-взрывного нагружения поликристаллического льда / В. П. Глазырин, М. Ю. Орлов, Ю. Н. Орлова // Материалы Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, ВМСППС-2013, Крым, Аушта, 22-31.05.2013 г., – Аушта, Изд-во МАИ. – 2013. – С. 307-309.

94 Орлов М.Ю. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения поликристаллического льда при ударных и взрывных нагрузках / М. Ю. Орлов, Ю. Н. Орлова // Международный научнообразовательный форум Хэйлунцзян — Приамурье: сб. материалов I Международной научной конференции, Россия, Биробиджан, ФГБОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема», 30 октября 2013 г., Ч. 1. — Биробиджан: Изд-во ФГБОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема». – Биробиджан , 2013. – С.276–277.

95 Орлова Ю.Н. Расчет процесса внедрения удлиненных ударников в поликристаллический лед в упругопластической постановке // Труды Томского государственного университета. Серия физико-математическая: Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики. – Томск. – 2013. – Т. 292. – С.134–138.

96 Экспериментально-теоретическое исследование ударно-взрывного нагружения льда / Ю. Н. Орлова [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т.56, № 7.3.– С. 38-41.

97 Глазырин В.П. Анализ пробития преград ледяными ударниками /В. П. Глазырин, М. Ю. Орлов, Ю. Н. Орлова // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т.56, № 7.3. – С. 41–44.

98 Кан С.И. Морские льды. / Кан С.И. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1974. – 136 с.

99 Тарасов Л.В. Физика природных льдов земли. / Л.В. Тарасов. – Долгопрудный: Изд. дом «Интелект», 2013. – 272 с.

100 Глазырин В.П., Орлов М.Ю. Динамика деформирования и разрушения неоднородных материалов при ударе // Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел. – Изд-во Томского государственного ун-та, 2007, С.572.

101 Люкшин Б.А. Моделирование физико-механических процессов в неоднородных конструкциях. / Б.А. Люкшин [и др.]. – Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2001. –272 с.

102 Johnson J.N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids / J.N. Johnson // J. Application Physics. – 1981. –V.52. is. 4. P. 1626-1635.

103 Высокоскоростные ударные явления: сб. ст. : пер. с англ. / под ред. В.Н. Николаевского. – М.: Мир, 1973. – 533 с.

104 Физика взрыва: монография: в 2 т. / науч. ред. Л.П. Орленко. – 3-е изд. перераб. – М.: Физматлит. 2002. – Т.1. –832 с.

105 Толкачев В.Ф. Математическое моделирование сдвиговых и откольных разрушений при ударном взаимодействии упругопластических тел / В.Ф. Толкачев, В.Г. Трушков // Химическая физика. – 1993. –Т.12. - С.170-175.

106 Глазырин В.П. Разрушение льда при ударном и взрывном нагружении / В.П. Глазырин, Ю.Н. Орлов, М.Ю. Орлов // Вычислительные технологии. – 2008. – Т.13, №.1. Спец.выпуск. – С. 425-432.

107 Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике /О. Зенкевич // – М.: Мир, 1975. – 325 с.

108 Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган // – М.: Мир, 1986. – 428 с.

109 Деформирование и разрушение неоднородных материалов при ударе и взрыве: дис. ... доктора физико-математических наук / В.П. Глазырин. – Томск, 2008, 250 с.

110 Орлов Ю.Н. [и др.] Удар-ОС1. Ударно-волновое нагружение конструкций. Осесимметричная задача. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010610911, 28.01.2010 г.

111 Орлова Ю.Н. [и др.] Взрывное нагружение конструкций. Осесимметричная задача. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010615392 от 20.08.2010 г.

112 Создание методов прогнозирования стойкости бронепреград различного состава: отчет о НИР / Глазырин В.П. – Томск: НИИ прикладной механики и математики при ТГУ, 2001. – 221 с.

113 Трунин Р.Ф. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Р.Ф. Трунин. – Саров: Изд-во РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2001. – 446 с.

114 Dutta P.K. Compressive failure of polycrystalline ice under impact / P.K. Dutta Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference. Singapore. – 1993. – P. 573–580.

115 Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г.И. Канель [и др.]. – М.: Янус-К, 1996. – 408 с.

116 Kraus E.I. Impact loading of a space nuclear powerplant / E.I. Kraus,I.I. Shabalin // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2013. – Vol. 24. – P. 138–150.

117 Krivosheina M.N. Influence of the account for the anisotropy of the elastic and plastic properties of a material on the results of calculations of the shock loading of an aluminum barrier / M.N., Krivosheina, M.A. Kozlova // Composites: Mechanics, Computations, Applications. – 2010. – V. 1. N_{2} 3. – P. 267–285.