

КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

М.Ю. Орлов¹, Ю.Н. Орлова²

1 – *Национальный исследовательский Томский государственный университет*

2 – *Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

orloff_m@mail.ru

Аннотация. В работе проведены комплексные теоретико-экспериментальные исследования поведения ледяного покрова при взрывном нагружении. Экспериментально исследован процесс подрыва эмульсионного взрывчатого вещества (ВВ) под заснеженным ледяным покровом. Вычислен диаметр взрывной майны, исследовано состояние кромки льда. Установлено, что форма майны близка к окружности. При помощи разработанного численного метода в осесимметричной постановке был смоделирован данный эксперимент. Количественно описан процесс динамического разрушения льда при действии продуктов детонации. Результаты были получены в виде графиков, таблиц и конечных конфигураций «Лед – ВВ – Вода». Расхождение между расчетом и экспериментом не превысило 5%.

В настоящее время исследование поведения природных материалов (известняк, гранит, камень, сланец, лед и т. д.) при динамическом нагружении является актуальной и сложнейшей научно-технической проблемой. Актуальность объясняется необходимостью развития транспортных связей в северных регионах нашей страны, увеличением добычи природных ископаемых в Заполярье, борьбой с ледовыми заторами на сибирских реках, отработкой ракетного вооружения в ледяных пустынях Арктики и в районах Антарктики и др.

Из всего разнообразия природных материалов, весьма перспективным объектом исследования следует считать лед (речной, морской, поликристаллический, монокристаллический и т.д.). Это объясняется тем, что в ближайшие несколько лет правительство РФ планирует вплотную заняться развитием Арктической зоны, причем безопасность проектов будет обеспечивать специальная группировка войск. Основная сложность «ледовых» исследований определена в прошлом веке Мальгредом, Канном, Маэно, Богородским, Гаврило и др. и заключается в том, что такой древнейший природный материал как лед (сегодня известно более 15 его разновидностей) мало изучен в условиях динамического нагружения. Это объясняется сложной внутренней структурой, особенностями кристаллической решетки, аномальными пластическими свойствами, многократными фазовыми переходами в процессе деформирования и т.д. С точки зрения разрушения, любой лед, вообще может не иметь аналогов. Проблемы прочности и разрушения таких тел только начинают разрабатываться, поэтому картина разрушения льда при динамических нагрузках остается мало изученной.

В НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета (НИИ ПММ ТГУ) более 25 лет ведутся поисковые научно-исследовательские работы, объектом исследования которых был лед различных типов, в том числе поликристаллический. Была разработана физико-математическая модель поведения льда при динамических нагрузках и модифицирован численный метод расчета его ударного и взрывного нагружения, способный на качественно высоком уровне воспроизводить основные особенности и механизмы процессов деформирования и разрушения. Нововведения заключались в новом алгоритме расчета контактных поверхностей, который позволяет более точно описывать контактную поверхность между продуктами детонации и льдом при подрыве взрывчатого вещества в толстом (более 2 м) льде [1,2].

На базе лаборатории 21 (Прочности) организована мобильная лаборатория «Исследования поведения природных материалов при взрывном нагружении». Основная цель заключается в экспресс-анализе поведения природных материалов при взрывном нагружении. При проведении натурных экспериментов объектами исследования выступали заснеженный и бесснежный ледяные покровы, а также природный известняк. В ближайшем будущем запланировано экспериментальное исследование каменного угля и сланцевого известняка. Экспедиции проведены в Сибирском федеральном округе на территории Томской и Кемеровской областей. Партнерами исследований являются МЧС России и ООО «КузбассСпецВзрыв».

На сегодняшний день основными результатами, которые могут быть получены при проведении экспериментальных работ являются: диаметры и глубины взрывных майн и кратеров, радиус разлета осколков от эпицентра взрыва, температура окружающего воздуха и объектов исследования, фиксируется состояние кромки с различных углов. В дальнейшем эти данные будут использоваться при проведении качественных и количественных тестов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

Ниже представлены оригинальные экспериментальные результаты по взрыву речного льда эмульсионным взрывчатым веществом (ВВ). Место для проведения экспериментальных работ выбиралось путем тщательного осмотра обширных участков ледяного покрова. В данном случае экспериментальная площадка

выбрана вблизи фарватера. 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 с трещинами, разводами и промоинами. В указанном радиусе также отсутствовали стационарные полыньи. Глубина реки в данном месте более 7 метров. Температура воды и воздуха в день проведения эксперимента +4 °С. Отметим, что в течение трех дней предшествующих эксперименту стояла теплая погода и температура колебалась от 0 до + 4 °С, поэтому лед был более пористый. Скорость ветра и течения воды не измерялись. Объект исследования – речной однолетний лед средней толщины.

В качестве эмульсионного ВВ использовался заряд Эмуласт АС-30-ФП-90 в полиэтиленовой оболочке. Масса ВВ была 4 кг, длина заряда – 70 см, а диаметр – 90 см. Подрыв ВВ осуществлялся в воде при помощи детонирующего шнура ДШЭ-12 ГОСТ 6196-78 по «классической схеме». В англоязычной литературе такой взрыв принято называть “UNDEX – Under Explosive”. Толщина льда – 80 см. На рис. 1а показана лунка для закладки ВВ.



Рис. 1. Лунка в заснеженном ледяном покрове (а), майна после подрыва ВВ массой 4 кг (б)

Отметим, что первые фотографии сделаны со спасательного катера уже через 10 минут после взрыва. Фото на рис. 1б иллюстрирует первую из десяти майн. Установлено, что в радиусе нескольких метров были замечены крупные фракции льда размерами в поперечном сечении 65–75 см. В майне присутствовали мокрый снег, лед и вода. На поверхности ледяного покрова возле майны образовалась горка из мокрого снега и льда высотой 35 см. Качественно был оценен радиус выброса осколков льда ~ 15 метров. Не исключено, что под действием продуктов детонации небольшие осколки льда могли быть выброшены дальше. Однако их размеры были незначительные (осколки льда в поперечном сечении не более 5-10 см). Получено, что после подрыва ВВ диаметр взрывной майны был равным 200 см. Серия натуральных экспериментов состояла из 10 взрывов, при этом полученный размер являлся усредненным.

Данный эксперимент был смоделирован при помощи разработанного метода [3]. Серия вычислительных экспериментов проведена на равномерных и квазиравномерных сетках (количество элементов 14500). Установлено, что наиболее обширные разрушения происходили на свободной поверхности в результате действия растягивающих напряжений. Проанализированы графики распределения скорости свободной поверхности в радиальном направлении. После 10 мс он имел кусочно-непрерывный вид. Также получено, что скорость свободной поверхности достигала 105 м/с, а после 4 мс около 90 м/с. Вычислено время процесса взрывного разрушения льда ~ 11 мс. Расчетный диаметр майны составил 210 см.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 13-08-00509а, 13-08-00296а.

Литература

1. Орлов М.Ю., Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Садохин А.Н., Богомолов Г.Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения поликристаллического льда при динамических нагрузках. Часть 1. Эксперименты по ударно-взрывному нагружению пресноводного льда. Расчет процесса взрывного нагружения системы «Лед – ВВ – Вода» // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. Т. 2 (13). С. 98-112.
2. Tolkachev V.F., Konyayev A.A., Zheikov V.V. Experimental study of impact resistance of ceramics and composites // Composites: Mechanics, Computations, Applications. 2012. V. 3 (3). P. 253-262.
3. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н. Исследование процессов ударно-взрывного нагружения поликристаллического льда // Материалы Межд. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, ВМСППС-2013, Крым, Алушта, 22–31 мая 2013 г. Алушта: Изд-во МАИ, 2013. С. 307-309.