

УДК 539.3

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА СО ЛЬДОМ\*

© 2017 г.

**Баландин Вл.Вл.<sup>1</sup>, Крылов С.В.<sup>1</sup>,  
Повереннов Е.Ю.<sup>2</sup>, Садовский В.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Научно-исследовательский институт механики  
Национального исследовательского Нижегородского государственного  
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*  
<sup>2</sup>*АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Российская Федерация*

krylov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 10.11.2016*

Методами численного моделирования исследуются процессы ударного взаимодействия упругого цилиндра со льдом. Приводятся результаты серии лабораторных обращенных экспериментов по нормальному соударению цилиндрических тел со льдом, полученным замораживанием дистиллированной воды. Эксперименты по изучению основных закономерностей ударного взаимодействия упругого цилиндра с ледяной преградой проводятся на установке ПГ-57, реализующей метод мерного стержня в обращенном эксперименте. Экспериментальные данные сопоставляются с данными расчетов, основанных на применении модифицированного разностного метода С.К. Годунова и пакета программ LS-DYNA. Анализируются динамика развития волновых процессов в толще ледяной преграды и поведение сил сопротивления прониканию при различных скоростях соударения. Построена приближенная кривая объемной сжимаемости используемого льда. Отмечается удовлетворительное соответствие полученных с помощью различных программных средств результатов и опытных данных.

*Ключевые слова:* лед, численное моделирование, ударное взаимодействие, сравнение с экспериментом.

### **Введение**

Применение компьютерных методов решения начально-краевых задач динамического деформирования и разрушения льда требует формулировки и обоснования достаточно сложных математических моделей его поведения при наличии соответствующих наборов материальных функций и физико-механических констант. В известных программных комплексах типа ANSYS, LS-DYNA, AUTODYN реализовано несколько групп уравнений состояния льда – как простых, так и более сложных.

---

\* Выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект №16-19-10237, в части математического моделирования) и РФФИ (гранты 15-08-07977, 16-08-00458 в части эксперимента).

Использование их при решении прикладных задач затрудняется необходимостью задания адекватных уравнениям модели и среды параметров, констант и функций. Следует отметить, что использование упрощенных моделей поведения льда в компьютерных вычислительных комплексах может привести к значительному искажению параметров решения задачи вследствие неучета существенных аспектов деформирования и повреждения материала.

Процессы ударного взаимодействия деформируемых тел и конструкций со льдом вызывают повышенный интерес в связи постановкой и решением ряда прикладных задач технического характера. Основным интерес в таких приложениях представляют закономерности изменения контактных усилий сопротивления внедрению, финальная глубина внедрения и определение параметров разрушений в ледяной преграде. Учитывая большую трудоемкость и затратность натурных динамических испытаний, при решении подобных задач целесообразно совместное использование натурных модельных экспериментов с вычислительными экспериментами, основанными на применении современных численных методов. При этом успех в проведении анализа процессов динамического контактного взаимодействия тел с ледяной преградой определяется реалистичностью используемой в расчете математической модели деформирования и разрушения среды и оснащенностью ее опытными данными о реальных физико-механических свойствах.

К настоящему времени накоплен определенный объем теоретического, методического и экспериментального материала, позволяющий во многих прикладных задачах получать удовлетворительные прогнозные оценки прочности [1–7]. Рассмотрим некоторые из немногих теоретических моделей динамического деформирования льда, которые реализованы в пакетах программ и которые можно использовать, оснастив их соответствующими диаграммами и параметрами разрушения льда в условиях сжатия и растяжения.

Одной из простейших является модель материала с билинейным изотропным упрочнением с учетом разрушения. В этой модели материал ведет себя как упругий до достижения предела текучести. Для такой модели необходимо ввести следующий набор параметров: плотность, модуль сдвига, предел текучести, модуль пластического упрочнения, модуль объемного сжатия, пластическую деформацию до разрушения, разрушающее давление ( $\leq 0$ ). До разрушения модель допускает пластическое упрочнение, что адекватно воспроизводит эффект распространения микротрещин внутри льда перед его разрушением и достижением состояния, сходного с поведением жидкости. После разрушения, когда давление достигает разрушающего значения, среда теряет возможность сопротивления растяжению и девиатор тензора напряжений становится равным нулю.

В статье [2] представлены результаты моделирования удара сферического ледяного ударника (рассматривались ударники с различными диаметрами: 25,4; 42,7 и 50,8 мм) о жесткую преграду со скоростями 73,5; 95,4 и 126 м/с и приведены параметры модели материала для льда. Другая модель предназначена для моделирования разрушения пеноматериалов и льда. В ней разгрузка предполагается полностью упругой, а растяжение рассматривается как идеально пластическое до достижения предельного значения напряжения. Для такой модели необходимо ввести следующий набор параметров: плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, кривую зависимости предела текучести от объемной деформации, предельное напряжение растяжения ( $\geq 0$ ). В [3] представлены результаты моделирования удара

ледяного ударника диаметром 10 см с конической головной частью о стальную плиту с малыми скоростями (1 и 100 мм/с). Для моделирования разрушения льда в расчете был также использован критерий разрушения по максимальному главному напряжению. Приведены параметры модели ударника материала для льда. Феноменологическая модель поведения льда предложена и апробирована в [4]. Модель разработана специально для космических приложений и содержит небольшое число констант, которые определяются экспериментально. Используемые физико-механические свойства льда рассмотрены ранее в работах [5, 6], где объектом исследования был лед с гексагональной кристаллической структурой. Модель, описанная в [4], позволяет учитывать такие явления, как образование трещин, различие пределов прочности при растяжении и сжатии, возможность возникновения в раздробленном льду гидростатического давления и ряд других явлений. 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 [4], является одной из отличительных особенностей модели, необходимой для увеличения ее точности. В [4] приведены экспериментальные данные процесса соударения сферического ледяного ударника с преградой, при этом указывается на недостаточность экспериментальных работ в этом направлении. Отмечено, что в некоторых случаях лед, как и бетон и керамика, проявляет остаточную прочность после разрушения, которое определяется критерием Мора – Кулона. При помощи пакетов прикладных программ в эйлеровой постановке проведены вычислительные эксперименты по удару ледяного цилиндра диаметром 17,46 мм о жесткую преграду со скоростями 91,4; 152,4 и 213,3 м/с и приведены параметры указанной модели материала для льда [4]. Однако некоторые вопросы остались открытыми, например влияние трения. Статья [7] посвящена построению определяющей модели поведения льда при высоких скоростях деформации и ряде других факторов. Ее авторы во многом отталкивались от предыдущих исследований. Изотропная упругопластическая модель льда 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. В [8] на основе критерия Друккера – Прагера разработана определяющая модель поведения льда при высоких скоростях деформирования. Авторы отмечают необходимость в проведении дополнительных экспериментов, так как энергия разрушения получилась малой по сравнению с общей кинетической энергией. При расчете разрушения льда использовались предположения из работы [4]. Полученные результаты расчетов сравнивались с доступными экспериментальными данными. Рассмотрена известная задача о соударении ледяного цилиндра со стальной пластиной. Расчеты проведены при помощи различных численных методов расчета: лагранжева, лагранжево-эйлерова и SPH-метода. Установлено, что лагранжев метод показал наибольшую точность (погрешность менее 3%) при расчете силы удара. Расчеты представлены в виде текущих конфигураций «ударник – мишень» и зависимостей силы удара и импуль-

са от времени. Модель упругопластического разнородного материала, у которого задаются различные зависимости предела текучести от пластической деформации при растяжении и сжатии (номер модели 155), является наиболее общей из реализованных в пакете программ LS-DYNA. Разрушение, согласно этой модели, возникает при достижении пластической деформацией критического значения. Зависимость предела текучести от скорости деформирования задается либо с помощью модели Купера – Саймондса, либо заданием двух кривых (для растяжения и сжатия), которые масштабируют значение предела текучести. Давление в модели определяется с помощью таблично заданного уравнения состояния, соответствующего экспериментально полученным данным. Для указанной модели необходимо ввести следующий набор параметров: плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, параметры модели Купера – Саймондса для учета скорости деформирования, предельную пластическую деформацию до разрушения, табличные зависимости предела текучести от пластической деформации для растяжения и сжатия, табличные зависимости масштабирования предела текучести от скорости деформации для растяжения и сжатия, номинальные напряжения растяжения и сжатия, при которых предел текучести следует кривым зависимостей предела текучести от пластической деформации. Преимуществом такой модели является учет зависимости скорости деформации, уравнения состояния и различных законов пластического деформирования при растяжении и сжатии. Динамические характеристики льда в зависимости от скорости деформирования изучались авторами статьи [9] при помощи методики разрезного стержня Гопкинсона. Отмечается, что в исследованном диапазоне чувствительность льда к скорости деформирования незначительна.

Экспериментально-теоретическому изучению процессов ударного взаимодействия льда с преградами посвящены публикации [10–14]. Удар ледяных сферических шариков о жесткую преграду моделировался авторами [10–12], о деформируемую преграду – авторами [13]. Взаимодействие цилиндрического ледяного ударника с преградой рассматривалось в [14]. В работе [15] изучались процессы проникновения алюминиевых ударников в лед. Численное моделирование процессов динамического деформирования льда в рассмотренных работах проводилось, как правило, с использованием программных средств. Процессы сверхзвукового (со скоростью 1 км/с) проникновения стального цилиндра в ледяную преграду моделировались в [16] при помощи оригинальных авторских методик и программ. Полученные численные результаты позволили проанализировать динамику развития процессов разрушения и фрагментации материала преграды. С помощью различных модификаций данных программ В.П. Глазыриным вместе с учениками решен широкий круг прикладных задач о динамическом деформировании льда [17–19].

Целью настоящей статьи является численное моделирование процессов нормального ударного взаимодействия цилиндрического упругого стержня с ледяной преградой с использованием упрощенного варианта модели льда как разнородной среды, предложенной в [20]. Модель деформирования и разрушения сплошной среды [20] включает в себя три предельные поверхности, зависящие от трех инвариантов тензора напряжений: поверхность пластичности (пластический потенциал) среды с частичными повреждениями структуры, поверхность разрушения и поверхность пластичности среды с полностью нарушенной структурной прочностью. Выбор этих поверхностей и определяющих их функций осуществляется на основе анализа имеющихся экспериментальных данных. Верификация модели про-

водилась путем сопоставления полученных численных данных с результатами лабораторных экспериментов и с расчетами с помощью LS-DYNA.

### Описание постановки задачи

Эксперименты по изучению основных закономерностей ударного взаимодействия упругого цилиндра с ледяной преградой проводились на установке ПГ-57, реализующей метод мерного стержня в обращенном эксперименте [21]. В такой постановке в стволе газовой пушки калибра 57 мм разгонялся контейнер со льдом, а упругий цилиндрический стержень с плоским торцом диаметром 20,5 мм и длиной 2 м оставался неподвижным. Соударение осуществлялось по нормали к свободной поверхности ледяной преграды, начальная скорость соударения варьировалась в серии экспериментов в пределах 118–550 м/с. Лед изготавливался путем замораживания дистиллированной воды при температуре  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Контейнеры для льда были выполнены из сплава Д16Т и имели следующие размеры: длина 32 мм, внешний диаметр 56,8 мм, внутренний диаметр 54 мм, толщина дна 2 мм. Глубина заполнения контейнеров льдом составляла 30 мм. Основные механические характеристики льда, задаваемые в расчетах: плотность  $0,93\text{ г/см}^3$ , модуль объемного сжатия 8,35 ГПа, модуль сдвига 3,2 ГПа, разрушающее давление при сжатии 49 МПа, разрушающее давление при растяжении 4,9 МПа, предел текучести при сжатии 174,2 МПа, предел текучести при растяжении 17,4 МПа. Материалы упругого стержня и контейнера характеризовались следующими физико-механическими свойствами: упругий стержень имел плотность  $8,7\text{ г/см}^3$ , модуль Юнга 214 ГПа, коэффициент Пуассона 0,3, материал контейнера плотностью  $2,7\text{ г/см}^3$ , модуль Юнга 74 ГПа, коэффициент Пуассона 0,3, предел текучести 350 МПа, модуль упрочнения 450 МПа. При проведении вычислений с помощью программного кода LS-DYNA в качестве модели динамического поведения льда использовалась модель 155 (MAT\_PLASTICITY\_COMPRESSION\_TENSION\_EOS) с вышеприведенными основными механическими характеристиками. Недостающие данные, в частности кривые масштабирования предела текучести при сжатии и растяжении от скорости деформации, были заимствованы из [4].

Для анализа волновых процессов, развивающихся в ледяной преграде при ударном взаимодействии с упругим цилиндром, были проведены численные расчеты в постановке, соответствующей обращенному эксперименту. Для описания поведения льда в условиях динамического нагружения в рамках пакета программ UPSGOD был реализован двумерный вариант модели А.И. Садырина [20]. Реализованная в UPSGOD разностная методика, основанная на модифицированной схеме С.К. Годунова, подробно изложена в [22], а тестирование ее программной реализации – в [21, 23]. Особенностью указанной модификации является повышенный порядок аппроксимации и эйлерово-лагранжев подход к описанию движения сред с использованием произвольных подвижных разностных сеток. При численном решении поставленной задачи выполнялись следующие условия на контактных границах: на свободной поверхности нормальная и касательная компоненты напряжений равны нулю; на поверхностях контакта контейнер–лед и упругий цилиндр–лед ставились условия непроникания по нормали и свободного проскальзывания в направлении касательной. При постановке начальных условий принималось, что мерный цилиндрический стержень находится в ненапряженном состоянии, скорость движения контейнера со льдом заранее задана. Отметим, что в ходе проведенных вы-

числений контактные силы сопротивления подсчитывались двумя способами. В первом случае силы определялись путем интегрирования упругого импульса продольных напряжений в сечении, расположенном на расстоянии четырех диаметров от торца стержня (аналогично экспериментам, в которых данный импульс снимался с установленных на стержне тензодатчиков [21]). Во втором случае силы определялись путем интегрирования избыточных контактных усилий вдоль поверхности контакта цилиндра со льдом.

### Экспериментальные и расчетные результаты

Геометрию и волновую конфигурацию при ударном взаимодействии упругого цилиндра с контейнером со льдом иллюстрирует рис. 1, на котором изображен фрагмент расчетной области и поля давления в преграде в характерные моменты времени 0,01; 0,05; 0,065; 0,11 мс после удара со скоростью 118 м/с. Здесь красным цветом выделены области максимального уровня давления в каждом из рассмотренных моментов времени. Видно, что лишь к моментам времени 0,05–0,065 мс головная волна сжатия начинает отражаться от боковой стенки контейнера и взаимодействовать с волной разрежения, исходящей от свободной поверхности. Максимальные значения силы сопротивления к этому времени оказываются уже пройденными без существенного влияния на них отраженных от боковых стенок волновых возмущений. Отражение головной волны сжатия от дна контейнера происходит в этот же промежуток времени и также не оказывает влияния на максимум силы сопротивления. В дальнейшем, при временах более 0,1 мс, контейнер деформируется, образуются зоны фрагментированного льда у дна и свободной поверхности ледяной преграды.

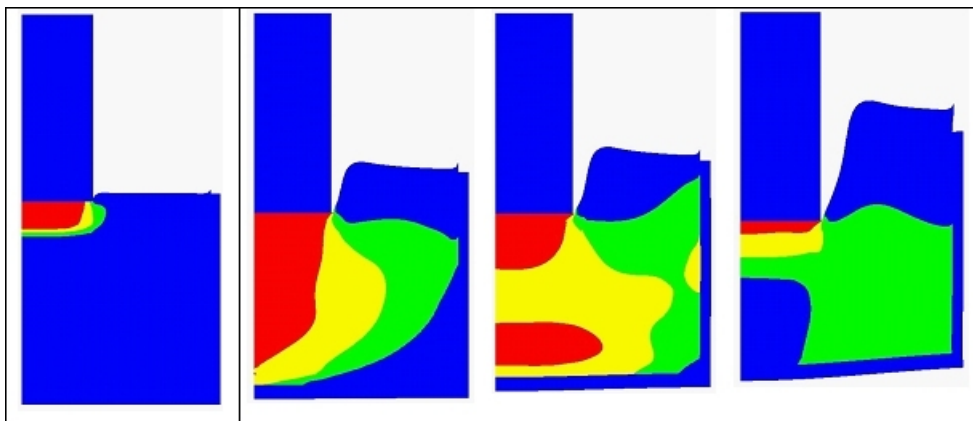


Рис.1. Эволюция поля давления (слева направо) в ледяной преграде

На рис. 2 приведены экспериментальная и расчетные временные зависимости силы сопротивления в случае соударения мерного стержня со льдом с начальной скоростью 118 м/с.

Очевидно, что расчетные максимальные значения силы сопротивления достаточно хорошо описывают экспериментальные данные. Совпадение сил, полученных разными способами при расчете по программе UPSGOD, свидетельствует о достоверности проведенных в эксперименте измерений.

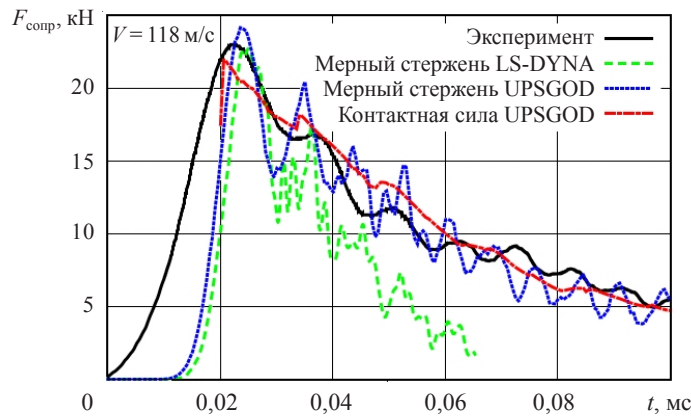


Рис. 2. Сила сопротивления при ударе о цилиндрический мерный стержень

На рис. 3 представлены расчетные (отмечены линиями) и экспериментальные (точки) зависимости максимальной силы сопротивления от начальной скорости соударения цилиндрического стержня со льдом в контейнере. Зависимости имеют нелинейный характер. При расчетах при помощи LS-DYNA максимумы сил при больших скоростях соударения превышают экспериментальные данные. По всей видимости, использованная в данном случае масштабирующая кривая зависимости предела текучести при сжатии от скорости деформации для исследуемого льда оказалась несколько завышенной.

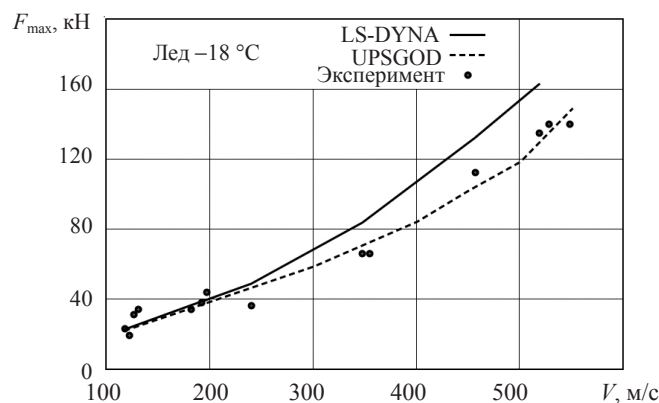


Рис. 3. Максимальные значения сил сопротивления

В статье А.М. Брагова и др. [24] был предложен простой метод определения нелинейной кривой объемной сжимаемости по результатам соударения мерного стержня с заполненным грунтом контейнером в обращенных экспериментах. Пользуясь этим методом, можно обработать экспериментальные данные, представленные на рис. 3, и получить кривую объемной сжимаемости используемого льда.

На рис. 4 изображена эта нелинейная зависимость. Точками показаны экспериментальные данные, сплошной линией – аппроксимирующая их зависимость давления от объемной деформации, определяемая по формуле

$$P(x) = 8202,7x^3 - 5980,5x^2 + 1366,8x,$$

где  $P(x)$  – давление,  $x$  – объемная деформация. Разумеется, указанная кривая имеет

приближенный характер и справедлива лишь при высоких давлениях, превышающих, как минимум, 50 МПа.

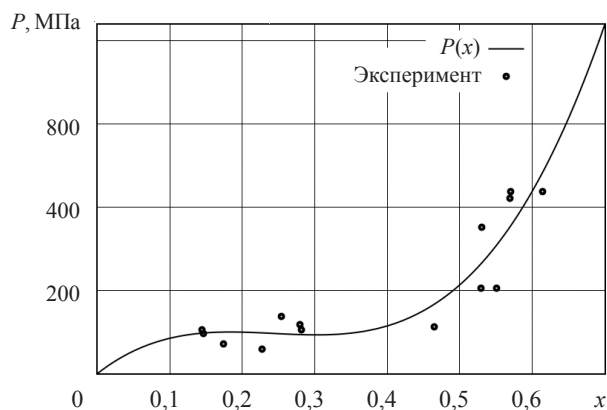


Рис. 4. Объемная сжимаемость льда

### Заключение

С использованием методики мерного стержня в обращенном эксперименте определены силы сопротивления прониканию при ударном взаимодействии упругого цилиндрического стержня с ледяной преградой. Проведено численное моделирование процессов соударения упругого цилиндра со льдом. Удовлетворительное соответствие полученных с помощью различных программных средств численных и опытных данных свидетельствует о применимости рассмотренных подходов для моделирования процессов высокоскоростного ударного взаимодействия тел со льдом. Построена приближенная ветвь кривой объемной сжимаемости исследуемого льда.

### Список литературы

1. Лобанов В.А. Моделирование льда в задачах с конечноэлементной постановкой. *Дифференциальные уравнения и процессы управления. Электронный журнал*. 2008. №4. С. 11. [www.neva.ru/journal](http://www.neva.ru/journal), <http://www.math.spbu.ru/user/diffjournal>.
2. Kim H., Kedward K.T. Modeling hail ice impacts and predicting impact damage initiation in composite structures. *AIAA Journal*. 2006. Vol. 38. No 7. P. 1278–1288.
3. Kim H. Simulation of compressive “cone-shaped” ice specimen experiments using LS-DYNA. *13<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference. Session: Constitutive Modelling*. 2015. P. 1–9.
4. Carney K.S., Benson D.J., DuBois P., Lee R. A phenomenological high strain rate model with failure for ice. *International Journal of Solids and Structures*. 2006. Vol. 43. No 25. P. 7820–7839.
5. Schulson E.M. Brittle failure of ice. *Engineering Fracture Mechanics*. 2001. **68**. P. 1839–1887. DOI: 10.2138/gsrng.51.1.201.
6. Petrovic J.J. Review. Mechanical properties of ice and snow. *Journal of Materials Science*. 2003. **38**. P. 1–6.
7. Sain T., Narasimhan R. Constitutive modeling of ice in the high strain rate regime. *International Journal of Solids and Structures*. 2011. No 48. P. 817–827.
8. Pernas-Sanchez J., Pedroche D.A., Varas D., López-Puente J., Zaera R. Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts. *International Journal of Solids and Structures*. 2012. No 49. P. 1919–1927.



9. Shazly M., Prakash V., Lerch B. High strain-rate behavior of ice under uniaxial compression. *International Journal of Solids and Structures*. 2009. No 46. P. 1499–1155.
10. Tippmann J., Kim H., Rhymer J. Experimentally validated strain rate dependent material model for spherical ice impact simulation. *International Journal of Impact Engineering*. 2013. No 57. P. 43–54.
11. Sun J., Lam N., Zhang L., Ruan D., Gad E. Contact forces generated by hailstone impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. No 84. P. 145–158.
12. Rhymer J., Kim H., Roach D. The damage resistance of quasi-isotropic carbon/epoxy composite tape laminates impacted by high velocity ice. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012. Vol. 43. Iss. 7. P. 1017–1168.
13. Anghileri M., Gastelletti L.-M.L., Invernizzi F., Mascheroni M. A survey of numerical models for hail impact analysis using explicit finite element codes. *International Journal of Impact Engineering*. 2005. No 31. P. 929–944.
14. Fasanella E., Boitnott R. Test and analysis correlation of high speed impacts of ice cylinders. *6<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference. Session: Impact Analysis*. 2006. P. 31–42.
15. Sherburn A., Horstemeyer M. Hydrodynamic modelling of impact craters in ice. *International Journal of Impact Engineering*. 2010. No 37. P. 27–36.
16. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел. Под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2007. 572 с.
17. Глазырин В.П., Орлова Ю.Н. Численное исследование поведения пресноводного льда при действии компактных ударников в дозвуковом диапазоне скоростей. *Труды Томского государственного университета. Серия общенаучная*. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2009. Т. 273. Вып. 2. С. 209–212.
18. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н. Компьютерное моделирование процесса внедрения крупногабаритного ударника в ледово-водные среды. *Труды Томского государственного университета. Серия физико-математическая*. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2012. Т. 292. С. 329–335.
19. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н. Анализ пробития преград ледяными ударниками. *Изв. вузов. Физика*. 2013. Т. 56. №7.3. С. 41–44.
20. Садырин А.И. Модель динамического деформирования и разрушения бетона. *Проблемы прочности и пластичности*. 2003. Вып. 65. С. 5–14.
21. Баженов В.Г., Котов В.Л., Крылов С.В., Баландин В.В., Брагов А.М., Цветкова Е.В. Экспериментально-теоретический анализ нестационарных процессов взаимодействия деформируемых ударников с грунтовой средой. *ПМТФ*. 2001. Т. 42. №6. С. 190–198.
22. Абузяров М.Х., Баженов В.Г., Котов В.Л., Кочетков А.В., Фельдгун В.Р. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред. *ЖВМиМФ*. 2000. Т. 40. №6. С. 940–953.
23. Абузяров М.Х., Крылов С.В., Цветкова Е.В. Моделирование гидроупругопластического взаимодействия с помощью программного комплекса UPSGOD. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. Вып. 75. Ч. 1. С. 25–32.
24. Брагов А.М., Баландин В.В., Ломунов А.К., Филиппов А.Р. Методика определения ударной сжимаемости мягких грунтов по результатам обращенных экспериментов. *Письма в ЖТФ*. 2006. Т. 32. Вып. 11. С. 52–54.

#### References

1. Lobanov V.A. Modelirovanie l'da v zadachakh s konechnoelementnoy postanovkoy [Modeling ice in problems with the finite element formulation]. *Differentsial'nye uravneniya i protsessy upravleniya [Differential Equations and Control Processes]*. 2008. No 4. P. 11. Elektronnyy zhurnal [Electronic Journal]. [www.neva.ru/journal](http://www.neva.ru/journal), <http://www.math.spbu.ru/user/diffjournal> (In Russian).
2. Kim H., Kedward K. T. Modeling hail ice impacts and predicting impact damage initiation in composite structures. *AIAA Journal*. 2006. Vol. 38. No. 7. P. 1278–1288.
3. Kim H. Simulation of compressive 'cone-shaped' ice specimen experiments using LS-DYNA. *13th International LS-DYNA Users Conference. Session: Constitutive Modelling*. 2015. P. 1–9.
4. Carney K.S., Benson D.J., DuBois P., Lee R. A phenomenological high strain rate model with failure for ice. *International Journal of Solids and Structures*. 2006. Vol. 43. No 25. P. 7820–7839.

5. Schulson E.M. Brittle failure of ice. *Engineering Fracture Mechanics*. 2001. **68**. P. 1839–1887. DOI: 10.2138/gsrng.51.1.201.
6. Petrovic J.J. Review. Mechanical properties of ice and snow. *Journal of Materials Science*. 2003. **38**. P. 1–6.
7. Sain T., Narasimhan R. Constitutive modeling of ice in the high strain rate regime. *International Journal of Solids and Structures*. 2011. No 48. P. 817–827.
8. Pernas-Sanchez J., Pedroche D.A., Varas D., López-Puente J., Zaera R. Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts. *International Journal of Solids and Structures*. 2012. No 49. P. 1919–1927.
9. Shazly M., Prakash V., Lerch B. High strain-rate behavior of ice under uniaxial compression. *International Journal of Solids and Structures*. 2009. No 46. P. 1499–1155.
10. Tippmann J., Kim H., Rhymer J. Experimentally validated strain rate dependent material model for spherical ice impact simulation. *International Journal of Impact Engineering*. 2013. No 57. P. 43–54.
11. Sun J., Lam N., Zhang L., Ruan D., Gad E. Contact forces generated by hailstone impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. No 84. P. 145–158.
12. Rhymer J., Kim H., Roach D. The damage resistance of quasi-isotropic carbon/epoxy composite tape laminates impacted by high velocity ice. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012. Vol. 43. Iss. 7. P. 1017–1168.
13. Anghileri M., Gastelletti L.-M. L., Invernizzi F., Mascheroni M. A survey of numerical models for hail impact analysis using explicit finite element codes. *International Journal of Impact Engineering*. 2005. No 31. P. 929–944.
14. Fasanella E., Boitnott R. Test and analysis correlation of high speed impacts of ice cylinders. *6<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference. Session: Impact Analysis*. 2006. P. 31–42.
15. Sherburn A., Horstemeyer M. Hydrodynamic modelling of impact craters in ice. *International Journal of Impact Engineering*. 2010. No 37. P. 27–36.
16. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya vysokoskorostnogo vzaimodeystviya tel [Theoretical and Experimental Studies of High-speed Interaction of Bodies]*. Ed. A.V. Gerasimov. Tomsk. TGU Publ. 2007. 572 p. (In Russian).
17. Glazyrin V.P., Orlova Yu.N. Chislennoe issledovanie povedeniya presnovodnogo l'da pri deystvii kompaktnykh udarnikov v dozvukovom diapazone skorostey [Numerical research of behavior of freshwater ice at action compact impactors in subsonic of speeds]. *Trudy Tomskogo gosuniversiteta. Seriya obshchenauchnaya [Proceedings of the Tomsk State University. A Series of Scientific]*. 2009. Vol. 273. Iss. 2. P. 209–212 (In Russian).
18. Glazyrin V.P., Orlov M.Yu., Orlova Yu.N. Kompyuternoe modelirovanie protsessa vnedreniya krupnogabaritnogo udarnika v ledovo-vodnye sredy [Computer simulation of the process of implementation of large-dimensional drummer into ice-water environment]. *Trudy Tomskogo gosuniversiteta. Seriya fiziko-matematicheskaya [Proceedings of the Tomsk state University. A Series of the Physics and Mathematics]*. 2012. Vol. 292. P. 329–335 (In Russian).
19. Glazyrin V.P., Orlov M.Yu., Orlova Yu.N. Analiz probitiya pregrad ledyanymi udarnikami [Analysis of breaking through barriers with ice drummers]. *Izvestiya vuzov. Fizika. [Russian Physics Journal]*. 2013. Vol. 56. No 7.3. P. 41–44 (In Russian).
20. Sadyrin A.I. Model dinamicheskogo deformirovaniya i razrusheniya betona [The model of dynamic deformation and fracture of concrete]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2003. Iss. 65. P. 5–14 (In Russian).
21. Bazhenov V.G., Kotov V.L., Krylov S.V., Balandin V.V., Bragov A.M., Tsvetkova E.V. Eksperimental'no-teoreticheskiy analiz nestatsionarnykh protsessov vzaimodeystviya deformiruemyykh udarnikov s gruntovoy sredoy [Experimental-theoretical analysis of nonstationary interaction of deformable impactors with soil]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 2001. Vol. 42. No 6. P. 190–198 (In Russian).
22. Abouzyarov M.K., Bazhenov V.G., Kotov V.L., Kochetkov A.V., Feldgun V.R. Metod raspada razryvov v dinamike uprugoplasticheskikh sred [The method of decay of discontinuities in the dynamics of elastoplastic media]. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki [Computational Mathematics and Mathematical Physics]*. 2000. Vol. 40. No 6. P. 940–953 (In Russian).

23. Abouzyarov M.K., Krylov S.V., Tsvetkova E.V. Modelirovanie gidrouprugoplasticheskogo vzaimodeystviya s pomoshch'yu programmnoogo kompleksa UPSGOD [The simulation of the hydro-elastoplastic interaction using the UPSGOD codes]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2013. Vol. 75. Pt. 1. P. 25–32 (In Russian).

24. Bragov A.M., Balandin V.V., Lomunov A.K., Filippov A.R. Metodika opredeleniya udarnoy szhimaemosti myagkikh gruntov po rezul'tatam obrashchennykh eksperimentov [Method for determining the shock compressibility of soft soils as a result of addressed experiments]. *Pisma v ZhTF [Technical Physics Letters]*. 2006. Vol. 32. Iss. 11. P.52–54 (In Russian).

### NUMERICAL MODELING OF SHOCK INTERACTION OF ELASTIC CYLINDER WITH ICE

**Balandin V.I.<sup>1</sup>, Krylov S.V.<sup>1</sup>, Poverennov E.Yu.<sup>2</sup>, Sadovskiy V.V.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,  
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

<sup>2</sup>*JSC “OKBM Afrikantov”, Nizhni Novgorod, Russian Federation*

Shock interaction processes of elastic cylinder with ice are investigated using methods of numerical simulation. The results of series of laboratorial inverted experiments of a normal impact of the cylindrical bodies into ice which has been obtained using freezing of distilled water are presented. Research experiments of main relationships of shock interaction of elastic cylinder with ice obstacle are performed using test machine PG-57 which based on the measuring bar method in the inverted experiment. The experimental data are compared with numerical results based on the S.K. Godunov modified difference method and commercial software LS-DYNA. The propagation dynamics of wave processes into the obstacle of the ice layer and behavior of the resistance forces due to penetration with different impact velocities are analyzed. The approximate volume compressibility curve of used ice is obtained. The satisfactory correspondence of derived results which have been obtained using different softwares and experimental data is noted.

*Keywords:* ice, numerical modeling, shock interaction, comparison with experiment.