

УДК 539.2:621.311.25

DOI: 10.17223/00213411/64/6/89

*А.И. ПОТЕКАЕВ, Г.Н. ПАРВАТОВ, В.В. СКРИПНЯК, В.А. СКРИПНЯК***ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЛЬДА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ \***

Исследовано физико-механическое поведение льда на примере фазы льда Ih методом численного моделирования с использованием вычислительной модели повреждаемой среды для описания закономерностей деформации и разрушения льда при динамическом нагружении. Развитие неупругих деформаций и эволюция поврежденности льда при высокоскоростном нагружении описаны моделью Джонсона – Холмквиста (JH2). Расчеты выполнены в 3D-постановке с применением явной разностной схемы второго порядка точности. Для калибровки вычислительной модели использовались экспериментальные данные, полученные в широком диапазоне скоростей деформации, с помощью метода Кольского, а также в экспериментах по нагружению льда плоскими ударными волнами. Показано, что предложенные физико-механические представления и разработанная модель о поведении льда при динамических нагрузках обеспечивают качественное и количественное согласие полученных результатов механического поведения льда Ih с имеющимися экспериментальными данными в диапазоне давлений от 0 до 150 МПа, при температурах от 193 до 273 К и в диапазоне скоростей деформации от 0 до 2000 1/с. Это свидетельствует о правильности представлений и позволяет прогнозировать поведение льда при динамических нагрузках.

*Ключевые слова:* лед, механическое поведение льда, высокие скорости деформации, разрушение, динамическая прочность на сжатие.

**Введение**

Физико-механическое поведение льда при нагрузках, особенно динамических, чрезвычайно важно для прикладных проблем, поэтому систематические исследования механических свойств твердых водных фаз ведутся с начала прошлого столетия. Экспериментальные исследования показали, что при давлениях до 2 ГПа лед находится в 17 различных кристаллических фазах, характеризующихся разными удельными объемами, температурами и скрытыми теплотами плавления [1]. Наибольший интерес представляет механическое поведение модификации водяного льда в стабильной гексагональной фазе Ih, существующей при давлениях до 150 МПа в диапазоне температур от 193 до 273 К [1–11].

Разработка физико-механических представлений и физико-математических моделей для описания механического поведения водяного льда Ih при динамических воздействиях в последние годы ведется в нескольких направлениях [2–14]. Разрабатываются феноменологические макромеханические модели для описания отклика льда на динамические воздействия с классическими динамическими критериями разрушения [2, 3]. Интенсивно разрабатываются модели механического поведения льда в рамках механики повреждаемых сред [4]. Экспериментальные исследования показали, что механическое поведение льда Ih, включая режимы разрушения, зависит от скорости деформации [2–9]. В этой связи для понимания и прогнозирования механического поведения льда при динамических воздействиях разрабатываются представления, учитывающие его вязкопластичность и разрушение в результате зарождения и роста трещин [5, 10–12]. В разрабатываемых многоуровневых моделях учитываются размеры кристаллитов и характерная структура льда на мезоскопическом уровне [13, 14]. Несмотря на интенсивную разработку представлений и моделей механического поведения льда Ih при динамических воздействиях, понимание процессов высокоскоростной деформации и динамики разрушения далеко от уровня, необходимого для построения прогноза.

Особенно важна потребность в понимании, описании и прогнозировании механического поведения льда при динамическом нагружении в температурном диапазоне 193–273 К, которая возникает при прогнозировании высокоскоростного взаимодействия ледяных частиц с конструкциями авиационной техники, наземных и надводных транспортных систем, с лопатками газотурбинных двигателей и нагнетателей и др.

\* Работа поддержана частично РФФИ, грант № 19-08-01152, и Фондом Д.И. Менделеева Томского государственного университета.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>