

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.

Цель данной работы – на примере льда Ih исследовать механический отклик льда на воздействие ударных импульсов методом моделирования с применением модели повреждаемой среды.

Приближения, модели и применяемые методы

Изучение механического поведения льда при динамических нагрузках осуществлено на примере фазы льда Ih с помощью метода численного моделирования в приближении сплошной среды с повреждениями. Механическое поведение льда при динамических воздействиях описывалось в рамках подхода Джонсона – Холмквиста [15].

Для исследования была построена вычислительная модель механического поведения льда Ih при динамических воздействиях. Для уточнения численных значений параметров модели механического поведения льда, рассматриваемого как среда с повреждениями (*MAT_110) [16], в определяющем уравнении для льда были использованы экспериментальные данные [6].

Моделируемый образец льда имел цилиндрическую форму (рис. 1) с диаметром $2r = 20$ мм, толщиной $h = 10$ мм и соответствовал геометрическим характеристикам образца эксперимента [6].

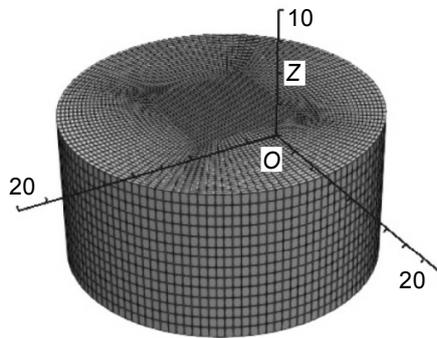


Рис. 1. Моделируемый образец (расчетная область) водного льда

Конечно-элементная модель образца (рис. 1) состояла из 54 000 гексаэдрических лагранжевых элементов, соответствующих элементам ELFORM1 в пакете LS DYNA (ANSYS Inc.) [16]. Контакт между поверхностями взаимодействующих фрагментов, образующихся при разрушении модельного образца, задавался с помощью эрозионной модели *ERODING_SINGLE_SURFACE [16]. В модели образец находился между двумя жесткими стенками, одна из которых считалась неподвижной в пространстве, что описывалось граничными условиями в *RIGID_WALL_GEOMETRIC_FLAT. Вторая стенка являлась подвижной, граничные условия на ней имели опцию *RIGID_WALL_GEOMETRIC_FLAT_MOTION. На боковой поверхности образца задавались свободные граничные условия.

Форма и амплитуда нагружающего импульса были выбраны в соответствии с экспериментальными данными [6]. При движении стенки в направлении оси OZ (рис. 1) со скоростью, соответствующей нагружающему импульсу, объем модельного образца сжимался и фрагментировался в результате зарождения и роста повреждений.

Упругое поведение поликристаллического водяного льда Ih характеризуется умеренной анизотропией [15], поэтому лед рассматривался как изотропная повреждаемая среда. Зависимости модулей упругости льда Ih от температуры в диапазоне от 193 до 273 К описывались феноменологическими соотношениями [17–19]:

$$E = E_{T_m} + k_E (T_m - T), \quad G = G_{T_m} + k_G (T_m - T), \quad \nu = \nu_{T_m} + k_\nu (T_m - T), \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга; $E_0 \approx 10$ ГПа – феноменологическая постоянная для льда Ih; $E_{T_m} = 8.93$ ГПа; $k_E = 0.012$ ГПа K^{-1} ; T_m – температура плавления льда; G – модуль сдвига; $G_{T_m} = 3.31$ ГПа; $k_G = 0.0045$ ГПа K^{-1} ; $\nu_{T_m} = 0.308$; $k_\nu = 7 \cdot 10^{-5}$ K^{-1} . При температурах, близких к температуре плавления льда 273 К, модуль Юнга составляет 8.93 ГПа. Приведенные численные значения коэффициентов были получены при аппроксимации экспериментальных данных в [12–14] соотношениями (1).

Механический отклик льда Ih на интенсивные импульсные воздействия в диапазоне давлений до начала фазового перехода определяется соотношениями [2, 20–22]:

$$p = k_1 \mu + k_2 \mu^2 + k_3 \mu^3 \quad \text{при сжатии,}$$

$$p = k_1 \mu \quad \text{при растяжении,} \quad (2)$$

где $p = -(1/3)\sigma_{kk}$ – давление; σ_{ij} – компоненты тензора напряжения; $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ – массовая плотность, ρ_0 – массовая плотность льда при температуре, близкой к температуре плавления.

Численные значения коэффициентов $k_1 - k_3$ в уравнениях состояния (2) были определены с помощью аппроксимации экспериментальной ударной адиабаты [16]. Значения предела упругости Гюгонио (HEL), давления на пределе упругости Гюгонио (P_{HEL}) и предела текучести льда σ_{HEL} на пределе упругости можно определить с помощью формул [16, 21]:

$$\text{HEL} = k_1 \mu_{\text{HEL}} + k_2 \mu_{\text{HEL}}^2 + k_3 \mu_{\text{HEL}}^3 + (4/3)G[\mu_{\text{HEL}}/(1 + \mu_{\text{HEL}})], \quad (3)$$

$$P_{\text{HEL}} = k_1 \mu_{\text{HEL}} + k_2 \mu_{\text{HEL}}^2 + k_3 \mu_{\text{HEL}}^3, \quad \sigma_{\text{HEL}} = 1.5(\text{HEL} - P_{\text{HEL}}),$$

где $\mu_{\text{HEL}} = \rho_{\text{HEL}}/\rho_0 - 1$, ρ_{HEL} – массовая плотность на пределе упругости Гюгонио; G – модуль сдвига.

Эквивалентное напряжение σ_{eq} при неупругом деформировании льда Ih будет определяться в рамках модели выражением [17]

$$\sigma_{\text{eq}} = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*), \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{eq}} = [(3/2)\sigma_{ij}\sigma_{ij} - (3p)^2]^{1/2}$ – эквивалентное напряжение; D – параметр повреждаемости льда; $\sigma_i^* = a(p^* + t^*)^n (1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*)$ – напряжение течения льда в неповрежденном состоянии; $\sigma_f^* = b(p^*)^m (1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*) \leq SF_{\text{max}}$ – сопротивление деформации локальных объемов разрушенного льда при сжатии; $t^* = T/P_{\text{HEL}}$, $p^* = p/P_{\text{HEL}}$; a, b, m, n, c – постоянные материала; T – максимальная прочность на растяжение; $\dot{\varepsilon}^*$ – нормированная скорость неупругой деформации; SF_{max} – постоянная, характеризующая максимальное напряжение деформирования локальных объемов разрушенной среды. Соотношение (4) учитывает эффект повреждения льда в рамках подхода механики повреждаемых сред [23–25]. Повреждение среды происходит в результате распределенного растрескивания внутри нагружаемого объема льда при динамических воздействиях, что согласуется с экспериментальными наблюдениями [2].

Параметр поврежденности льда D определялся соотношением [15]:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon^p}{\varepsilon_f^p}, \quad (5)$$

где $\Delta \varepsilon^p$ – приращение эквивалентной неупругой деформации в 3D-сеточном элементе; $\varepsilon_f^p = d_1(p^* + t^*)d_2$, d_1 и d_2 – постоянные для льда, характеризующие протекание процессов зарождения и накопления повреждений структуры в сеточном элементе.

Моделирование выполнено с использованием решателя пакета LS DYNA (ANSYS Inc.) [16].

Результаты и их обсуждение

Численные значения коэффициентов уравнений (2) – (4) определялись двумя методами: непосредственно аппроксимацией имеющихся экспериментальных данных [20–22] и из условия получения согласия расчета и эксперимента о макроскопических параметрах отклика образцов на динамические воздействия. Результаты моделирования высокоскоростного сжатия цилиндрического образца льда с использованием решателя LS-DYNA [16] сопоставлялись с экспериментальными данными [6]. В результате были определены численные значения параметров, обеспечивающие согласие результатов моделирования с экспериментальными данными:

$$\rho_0 = 8 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \quad G = 3.5 \text{ ГПа}, \quad a = 0.88, \quad b = 0.1, \quad c = 0.0001, \quad m = 0.25, \quad n = 0.258,$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ с}^{-1}, \quad T = 0.0089 \text{ ГПа}, \quad SF_{\text{max}} = 999, \quad \text{HEL} = 0.3 \text{ ГПа}, \quad P_{\text{HEL}} = 0.25 \text{ ГПа},$$

$$d_1 = 0.35, \quad d_2 = 0.5, \quad k_1 = 8.9 \text{ ГПа}, \quad k_2 = 0 \text{ ГПа}, \quad k_3 = 0 \text{ ГПа}, \quad FS = 0.15.$$

Так как нас интересует механическое поведение льда при динамических нагрузках, то нами были вычислены параметры поврежденности льда D и распределения эквивалентных напряжений

$\sigma_{\text{eq}} = [(3/2)\sigma_{ij}\sigma_{ij} - (3p)^2]^{1/2}$ в зависимости от длительности нагружения. Расчеты выполнены для модельных образцов (см. рис. 1) с использованием приведенных выше согласующих параметров при импульсных нагрузках вдоль оси Z со скоростью 20 м/с. Результаты расчетов пространственно-временного распределения D и σ_{eq} представлены на рис. 2 для трех моментов времени 20, 50 и 75 мкс от начала нагружения образца. Интенсивность окраски образцов наглядно демонстрирует эволюцию пространственного распределения параметра повреждения D и эквивалентных напряжений σ_{eq} при вертикальном сжатии. В частности, с увеличением времени сжатия образца возрастают сжимающие напряжения в направлении действия нагрузки и растягивающие напряжения в радиальном направлении. Эти напряжения обуславливают образование мелкораздробленной зоны льда в центральной части образца и радиальных трещин. Можно видеть, что с увеличением длительности динамического сжатия возрастают количество и глубина радиальных трещин. При временах сжатия 50 и 75 мкс четко проявляется тенденция формирования синхронного бимодального (двухпикового) пространственного распределения параметра поврежденности D и эквивалентного напряжения σ_{eq} . Зона объемного разрушения, где характерный размер фрагментов не превышал шага расчетной сетки, возникала на контактной поверхности между образцом и подвижной жесткой стенкой. Продвижение этой зоны в глубь образца сопровождалось укрупнением характерного размера фрагментов и формированием радиальных трещин.

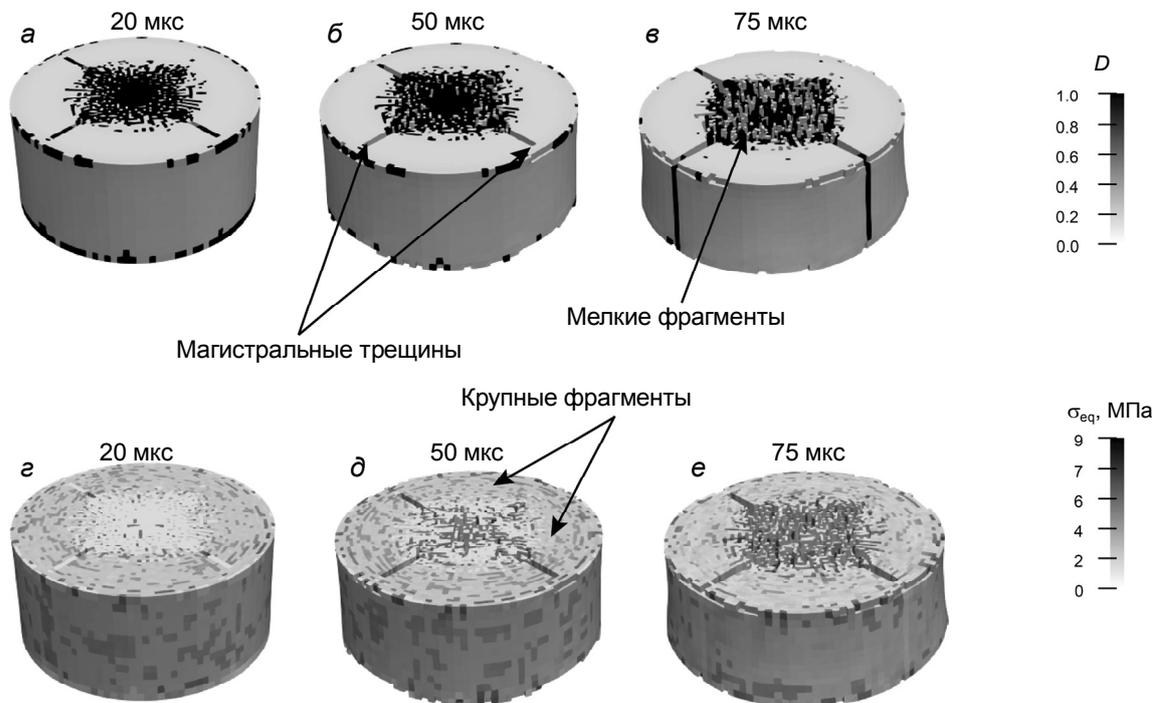


Рис. 2. Результаты численного моделирования динамического сжатия льда: параметр поврежденности D (а–в), эквивалентные напряжения (г–е)

Таким образом, в исследуемых условиях нагружения образца разрушение развивается из центральной поверхности.

Рассмотрим изменения напряжения динамического сжатия льда во времени, поскольку именно эти закономерности играют определяющую роль в прикладной области.

В процессе динамического нагружения образца величины инженерной деформации $\varepsilon_{1\text{eng}}$ рассчитывались по изменению высоты образца, вычисляемой по перемещению подвижной жесткой стенки:

$$\varepsilon_{1\text{eng}} = \frac{1}{h_0} \int_0^t v(t) dt, \quad (6)$$

где h_0 – начальная высота образца; $v(t)$ – скорость подвижной стенки.

Учитывая найденные изменения величины деформации ε_{1eng} , определим изменения интегрального усилия сжатия образца во времени, регистрируемые на неподвижной стенке, и изменения во времени истинных напряжений в виде

$$\sigma_{1true} = (F(t) / \pi r^2)(1 + \varepsilon_{1eng}), \quad (7)$$

где σ_{1true} – истинное напряжение; $F(t)$ – усилие на границе с неподвижной стенкой; r – радиус образца на границе с неподвижной стенкой.

Полученные числовые значения истинных напряжений в процессе деформации цилиндрического образца при высокоскоростном осевом сжатии приведены на рис. 3 в виде зависимости «истинное напряжение – время» в сравнении с экспериментальными данными [6, 26]. Значения истинных напряжений при сжатии льда Ih с высокой скоростью деформации (2000 с^{-1}) хорошо согласуются с экспериментальными данными не только качественно, но и количественно. Отсутствие осцилляций на расчетной кривой «истинное напряжение – время» обусловлено применением представлений эрозионной модели разрушения [16, 27]. Критерий разрушения эквивалентен условию (5). При достижении максимальной эквивалентной неупругой деформацией предельного значения в сеточных элементах, эти элементы считаются разрушенными и удаляются из расчетной области.

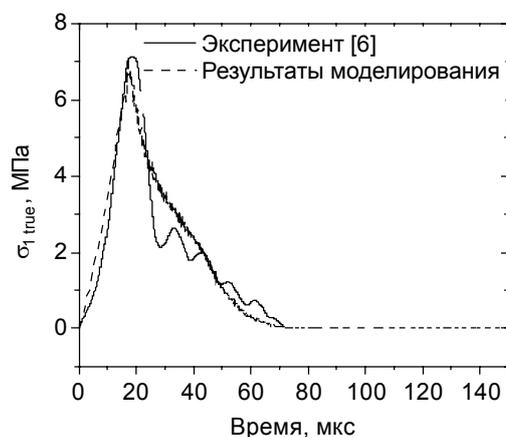


Рис. 3. Истинное напряжение осевого сжатия от времени при динамическом сжатии льда с амплитудой скорости 20 м/с

Расчетное значение удельной поглощенной энергии в рассмотренных условиях нагружения составило 273.9 Дж/кг, в то время как экспериментально полученная величина ~ 292.1 Дж/кг. Расхождение между расчетными и полученными в эксперименте значениями поглощенной энергии составляет менее 10%, что подтверждает адекватность модели высокоскоростной деформации льда Ih в диапазоне скоростей деформации от 0.1 до 2000 с^{-1} .

Таким образом, разработанная модель и обсуждаемые физико-механические представления о поведении льда при динамических нагрузках обеспечивают качественное и количественное согласие полученных результатов механического поведения льда Ih с имеющимися экспериментальными данными и могут быть использованы для прогнозирования результатов высокоскоростного взаимодействия ледяных тел и града с летательными аппаратами и элементами конструкций транспортных систем.

Заключение

Изучено механическое поведение льда при динамических нагрузках на примере льда Ih. Построена вычислительная модель механического поведения льда Ih при высокоскоростных динамических воздействиях. Механическое поведение льда при динамических нагрузках описывалось в рамках подхода Джонсона – Холмквиста. Для уточнения численных значений параметров модели механического поведения льда в определяющем уравнении для льда использовались экспериментальные данные.

Показано, что предложенные физико-механические представления и разработанная модель 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 различных динамических нагрузках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шавлов А. В. . Лед при структурных превращениях. – Новосибирск: Наука, 1996. – 188 с.
2. Saletti D., Georges D., Gouy V., et al. // *Int. J. of Impact Eng.* 2019. Vol.132. – P. 103315. DOI: 10.1016/j.iimpeng.2019.103315.
3. Pernas-Sánchez J., Pedroche D.A., Varas D., et al. // *Int. J. Solids Structur.* – 2012. – V. 49(14). – P. 1919–1927. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.03.038.
4. Wang Y., Qin Y., and Yao X. // *Appl. Ocean Res.* – 2020. – V. 103. – P. 102347. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102347.
5. Sain T. and Narasimhan R. // *Int. J. Solids Structur.* – 2011. – V. 48(5). – P. 817–827. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.11.016
6. Bragov A., Igumnov L., Konstantinov A., et al. // *EPJ Web Conf.* – 2015. – V. 94. – P. 01070. DOI: 10.1051/epjconf/20159401070.
7. Schulso E. // *J. Phys. Colloques.* – 1987. – V. 48(C1). – P. C1-207–C1-220.
8. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю., Повереннов Е.Ю. // *Изв. вузов. Физика.* – 2012. – Т. 55. – № 9/3. – С. 42–45.
9. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю. и др. // *Изв. вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 7/3. – С. 38–40.
10. Hunke E. C. // *Proc. of the IUTAM Symposium on Scaling Laws in Ice Mechanics and Ice Dynamics.* Fairbanks, Alaska, U.S.A., 13–16 June 2000. – 2000. – P. 289–297.
11. Tuhkuri J. and Polojärvi A. // *Philos. Trans. R. Soc. A.* – 2018. – V. 376(2129). – P. 20170335. DOI: 10.1098/rsta.2017.0335.
12. Orlov Y.N. and Orlov M.Y. // *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics.* – 2015. – V. 38. – P. 81–89.
13. Bergan P.G., Cammaert G., Skeie G., and Tharigopula V. // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2010. – V. 10. – P. 012102. DOI: 10.1088/1757-899x/10/1/012102.
14. Montagnat M., Castelnau O., Bons P.D., et al. // *J. Struct. Geology.* – Elsevier, 2013. – V. 61. – P. 78–108. DOI: 10.1016/j.jsg.2013.05.002.hal-01746108.
15. Johnson G.R. and Holmquist T.J. // *AIP Conf. Proc.* – 1994. – V. 309. – P. 981–984. DOI: 10.1063/1.46199.
16. LS DYNA keywords user's manual. Vol. II. Material models. 09/08/20 (r:13191) LS –DYNA R12. Livermore Software Technology, An Ansys Company.
17. Sinha N. K. // *Cold Regions Sci. Technol.* – 1989. – V. 17(2). – P. 127–135. DOI:10.1016/s0165-232x(89)80003-5.
18. Shaw G. H. // *J. Chem. Phys.* – 1986. – V. 84(10). – P. 5862–5868. DOI: 10.1063/1.449897.
19. Petrovic J. J. // *J. Mater. Sci.* – 2003. – V. 38(1). – P. 1–6. DOI: 10.1023/a:1021134128038.
20. Neumeier J. J. // *J. Phys. Chem. Reference Data.* – 2018. – V. 47(3). – P. 033101. DOI: 10.1063/1.5030640.
21. Stewart S.T. and Ahrens T.J. // *J. Geophys. Res.: Planets.* – 2005. – V. 110. – P. E03005. DOI: 10.1029/2004je002305.
22. Feistel R. and Wagner W. // *J. Phys. Chem. Reference Data.* – 2006. – V. 35(2). – P. 1021–1047. DOI: 10.1063/1.2183324.
23. Sain T. and Narasimhan R. // *Int. J. Solids Structur.* – 2011. – V. 48. – P. 817–827.
24. Макаров П.В., Еремин М.О., Перышкин А.Ю. // *Изв. вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 7/3. – С. 74–76.
25. Коноваленко И.С., Коноваленко И.С., Смолин А.Ю., Псахье С.Г. // *Изв. вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 7/3. – С. 167–169.
26. Jones S. // *J. Phys. Chem.* – 1997. – V. 32. – P. 6099–6101.
27. Pandolfi A., Li B., and Ortiz M. // *Int. J. Fracture.* – 2012. – V. 184(1–2). – P. 3–16. DOI: 10.1007/s10704-012-9788-x.

Поступила в редакцию 10.12.2020.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Потеев Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор НИ ТГУ, e-mail: poteev@spti.tsu.ru;

Парватов Георгий Николаевич, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр. СФТИ ТГУ, e-mail: georgpa@yandex.ru;

Скрипняк Владимир Владимирович, к.ф.-м.н., доцент НИ ТГУ, e-mail: skrp2012@yandex.ru;

Скрипняк Владимир Альбертович, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой НИ ТГУ, e-mail: skrp2006@yandex.ru.