

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 67.03; 519.6; 539.42:56; 663.672

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-313-325>

Оригинальная статья

Моделирование разрушения композиционного материала на основе ледовой матрицы

В. В. Лепов[✉], И. И. Дьячковский

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,

г. Якутск, Российская Федерация

[✉]wisecold@mail.ru

Аннотация

Приводятся результаты работ, выполненных в рамках системно-структурного подхода с целью моделирования элементов конструкций из конструкционных материалов на основе ледовой матрицы, модифицированной высокопрочным базальтовым волокном. Теоретическое и численное моделирование процесса разрушения композиционного материала на основе ледовой матрицы, полученного намораживанием пресной воды с добавлением базальтовой фибры, производилось на основе экспериментальных данных, полученных при разрушении образцов чистого льда и композита на основе ледовой матрицы с различным содержанием наполнителя. Выполнен расчет эффективного модуля упругости получаемых композитов в зависимости от количества армирующего базальтового волокна. На основе серии тестовых расчетов образца композиционного материала на конечно-элементном комплексе ANSYS выявлено несоответствие расчетной прочности данным эксперимента, в связи с чем сделан перерасчет эффективного модуля упругости композита и введены поправки в модели Фойгта и Рейсса, учитывающие неравномерность распределения волокон и неидеальную адгезию с ледовой матрицей. Также по данным о диаметре и длине базальтовых волокон и их случайном распределении в упрочненном слое замороженного материала выполнен расчет по стохастической модели роста трещин на микроуровне. Получено удовлетворительное согласие скорости роста трещины с полученным КЭ-расчетом при использовании полученных эффективных модулей упругости и алгоритма SmartCrackGrowth. Уточненный метод определения эффективных модулей упругости и многоуровневая структурная модель расчета композиционного материала на основе ледовой матрицы рекомендуются для оценки прочности ледового покрова и сооружения зимних дорог с высокой несущей способностью и увеличенным периодом использования в условиях Арктики и Субарктики.

Ключевые слова: композиционный материал на основе ледовой матрицы, базальтовая фибра, модуль упругости, прочность на изгиб, разрушение, трещина, многомасштабное КЭ-стохастическое моделирование

Финансирование. Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект № FWRS-2024-0035) в части теоретических расчетов и при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-21-20122) в части численного моделирования с использованием оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН».

Благодарности. Авторы благодарны сотрудникам Отдела 30 ИФТПС СО РАН, в частности к.ф.-м.н., в.н.с. Сыромятниковой А.С. за предоставленные данные по разрушению образцов из льда и композитов на основе ледовой матрицы в условиях Центральной Якутии.

Для цитирования: Лепов В.В., Дьячковский И.И. Моделирование разрушения композиционного материала на основе ледовой матрицы. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):313–325. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-313-325>

Modeling of ice-matrix composite fracture

Valeriy V. Lepov[✉], Ivan I. Dyachkovsky

Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

[✉]wisecold@mail.ru

Abstract

This article discusses the results of a study that used the structural approach to conduct multiscale modeling of composite materials. These materials are composed of an ice matrix that has been enhanced with high-strength basalt fibers. The research involved numerical modeling to analyze the fracture process of composite materials made by freezing fresh water with added basalt fibers. The analysis included experimental data from samples of pure ice and composites with different amounts of filler. The effective modulus of elasticity of the composites was determined by considering the quantity of basalt fiber reinforcement. The discrepancy between the strength obtained by finite element complex ANSYS numerical calculation and the experimental data was revealed by a series of macroscopic test calculations of the composite material sample, according to which the effective modulus of elasticity of the composite was recalculated and corrections were introduced into the Voight and Reuss models, taking into account the non-uniform distribution of the fibers and the non-ideal adhesion between the fibers and water ice. A stochastic model of crack growth at the micro level was also used with the data on the diameter and length of basalt fibers and their random distribution in the layers of the composite material. Using the newly acquired effective elastic moduli and the SmartCrackGrowth algorithm, a satisfactory agreement of the crack growth rate with the obtained by stochastic calculation was achieved. The refined method of effective elastic moduli and multilevel model of stress-strain state calculation of composite materials are recommended for assessing the strength of ice cover and designing winter roads with high load-bearing capacity and long operational duration in the Arctic and Subarctic environments.

Keywords: ice-matrix composite, basalt fiber, elasticity, bending strength, fracture, crack, multiscale FE-stochastic modeling

Funding. This study was supported by the Program of Basic Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences (No. FWRS-2024-0035) for theoretical calculations, and the Russian Science Foundation (No. 21-52-53036) for numerical modeling with the use of the equipment provided by Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre SB RAS”.

Acknowledgements. The authors are grateful to their colleagues, especially Aitalina S. Syromyatnikova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, IPTPN SB RAS for providing experimental data on ice sample and ice matrix-based composite destruction in Central Yakutia.

For citation: Lepov V.V., Dyachkovsky I.I. Modeling of ice-matrix composite fracture. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):313–325. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-313-325>

Введение

Ключевой возможностью для освоения северных территорий, особенно арктической зоны, является длительный период ледостава, который позволяет эксплуатировать зимние дороги (зимники), обеспечивая: значительную часть зимнего завоза в северные и арктические районы Якутии, благодаря беспрепятственной транспортировке необходимых ресурсов, включая топливо и продукты, через многочисленные реки и озера, болотистую местность. Зачастую зимники являются единственным средством сообщения с удаленными населенными пунктами. Поэтому увеличение их пропускной и несущей способности (грузоподъемности), а также периода использо-

вания является актуальной хозяйственной и научно-технической задачей.

В лесных местностях известной технологией упрочнения зимников является их армирование досками и стволами деревьев, однако в случае безлесных арктических территорий наиболее эффективными признаны технологии армирования геосетками и георешетками одновременно с модификацией структуры ледовой матрицы [1]. Эти исследования основаны на многолетнем опыте исследований в условиях арктического региона с умеренно холодным климатом (Архангельская область) [2–4], однако работы по исследованию прочности композиционных материалов на основе ледовой матрицы в экстремальных клима-

тических условиях Республики Саха (Якутия) только начинаются [5, 6]. Их отличают большие размеры образцов для испытаний и использование естественного холода, что снижает стоимость эксперимента и приближает его к натурным испытаниям конструкций.

Материалы и оборудование

В работах, проведенных в ИФТПС СО РАН, массивные блоки из ледового материала изготавливались при послойном намораживании пресной воды в опалубке из пенополистирола с размерами полости: высота $h = 100$ мм, ширина $b = 500$ мм, длина $L = 870$ мм, при естественно низкой среднесуточной температуре -36 °С [5] и -50 °С [6]. При этом подготавливались и испытывались три вида образцов: из чистого льда (I); армированные на половину высоты (II) и полностью армированные (III) [6]. Наполнитель представлял собой волокна длиной 40 мм и диаметром 18 мкм из базальтового ровинга РБ(Т) 18-2400-041М.

Разрушающая нагрузка $P_{\text{разр}}$ определялась как средняя по результатам трех испытаний, а предел прочности на изгиб при растяжении рассчитывался по формуле $\sigma_{\text{изг}} = \frac{3P_{\text{разр}}l}{2bh^2}$, где l – расстояние между опорами. Важным вопросом для дальнейшего моделирования оставался расчет модуля упругости льда и композиционного материала на основе ледовой матрицы.

В работах по моделированию разрушения гетерогенных композитов на основе ледовой матрицы можно выделить исследования в области многоуровневого моделирования процессов спекания и застывания льда при изменении его фазового состояния, накопления повреждений и формирования пористости и работы, связанные со стохастическим моделированием процессов возникновения и роста микротрещин до достижения магистральной трещиной критической длины.

Морской лед рассматривался в работах Р.В. Гольдштейна с соавторами как бездефектное твердое тело, для которого справедливы соотношения механики сплошных сред и механики разрушения [7–9]. В другой задаче рассматривалось скопление разрушенного морского льда перед ледоколом в постановке, где предполагалась плоская трещина сжатия с замкнутым контуром и выносом продуктов разрушения из зоны расчета, при этом в результате решения кинетического уравнения получены аналитические соотно-

шения для скорости трещины и коэффициента интенсивности напряжений (КИН) [10]. Выявлено, что в режиме с непрерывным истечением продуктов разрушения из области высокого давления происходит неустойчивое развитие очагов разрушения в виде трещин сжатия, при этом управляющим становится процесс истечения, поддерживающий давление в центральной части контакта за счет сопротивления выносу. Данный режим наблюдается при взаимодействии ледового массива с индентором при высокой скорости относительного движения ледокола. Малые скорости характеризуются пульсирующим режимом контактных нагрузок и чередованием фаз устойчивого подрастания давления при накоплении продуктов разрушения в замкнутом объеме и неустойчивого движения очагов разрушения при истечении продуктов разрушения из области контакта.

Следует учитывать, что в случае стационарного воздействия нагрузок на ледовый массив при таком подходе модели деформации и разрушения льда не будут отличаться от моделей твердого тела, в то же время следует заметить, что поведение ледовой матрицы с включениями сильно отличается от поведения сплошных тел, а также подвержено влиянию фазового перехода в области температур, близких к нулю по шкале Цельсия.

Ряд исследователей уже обращали внимание на различия механического поведения армированных ледяных композиционных материалов [11, 12], однако немаловажным оказался и учет изменяющейся внутренней структуры в таких моделях, зачастую имеющей иерархическое строение [13–15]. Поэтому имеются существенные трудности в применении традиционных моделей и подходов теории сплошных сред, деформируемого твердого тела и механики разрушения для композиционных материалов со сложной и изменяющейся в зависимости от условий окружающей среды структурой. В этом случае перспективными становятся многоуровневые подходы, включая конечно-элементные и стохастические модели процессов разрушения [16–19].

Как известно, произвести учет внутренней изменяющейся структуры материала, имеющей стохастический характер, весьма сложно, однако дать адекватную оценку возможно с помощью мартингалов в теории случайных процессов, при этом наилучшим (среднеквадратичным) предсказанием поведения процесса является его текущее состояние. Такой подход [20] применяет-

ся в термодинамике из предположения о марковости происходящих процессов, что применимо и в случае процесса разрушения ледовой матрицы. Исходные данные для стохастического моделирования – механические свойства и данные о микроструктуре – получены на основе испытаний чистого льда и композита с ледовой матрицей, модифицированной базальтовой фиброй при различной ее концентрации [21].

Предполагается, что при температурах от –3 °С и ниже при статическом кратковременном нагружении лед ведет себя как твердое упругое тело, подчиняющееся закону Гука, а пластическая деформация при этом не успевает развиваться. Чистый речной лед имеет статический модуль упругости, или модуль деформации, который всегда меньше динамического, и зависит от температуры [20]:

$E_{ст}(T) = (90,5 + 0,21 \cdot T - 0,0017 \cdot T^2) \cdot 10^3$ МПа, (1)
где T – абсолютная температура воздуха. Экспериментально модуль упругости материала при

изгибе можно определить как $E_{изг} = \frac{l^3 m}{4bh^3}$, где

m , Н/мм, – наклон начального прямолинейного участка кривой нагружения. Он будет различаться для льда с различным содержанием фибры. Коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} определялся приблизительно по эмпирической формуле для образца на трехточечный изгиб с трещиной согласно ISO 12135: «Металлические материалы. Единый метод определения квазистатической вязкости разрушения. Испытание на трехточечный изгиб», ASTM D5045-14 и E1290-08 для разрушающей нагрузки. Сложность связана с тем, что эти формулы рассчитаны на металлические или полимерные пластические материалы.

Оценка эффективного модуля упругости композиционного материала

Эффективные модули упругости (сдвига G и объемный K) композитного материала при отсутствии диаграммы нагружения могут быть найдены из модулей компонентов [21]. Известные подходы Фойгта и Рейсса [22] определяют границы эффективных значений модуля упругости композита на основе простого соотношения компонентов, без рассмотрения особенностей микроструктуры. В подходе Фойгта деформация в материале предполагается однородной, и верхняя граница модуля упругости по правилу смешения фаз

$$m' = \sum C_i m_i, \quad (2)$$

где C_i – объемные доли, m_i – модули упругости (сдвига G или объемного K) компонентов.

Нижнюю границу m'' , в предположении однородных напряжений, определяет модель Рейсса:

$$\frac{1}{m''} = \sum C_i \frac{1}{m_i}. \quad (3)$$

Среднее арифметическое значений m' и m'' называют средним модулем Фойгта–Рейсса–Хилла, по которому можно найти осредненные значения эффективных модулей $\langle G \rangle$ и $\langle K \rangle$ и получить эффективный модуль упругости:

$$\langle E \rangle = \frac{9 \cdot \langle G \rangle \cdot \langle K \rangle}{G + 3 \cdot \langle K \rangle}. \quad (4)$$

На практике результаты оценки эффективного модуля упругости по методу осреднения (2)–(4) хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными для ледовой матрицы другими методами [22, 23].

Свойства базальтовой фибры: прочность на растяжение $\sigma_{раст} = 3000$ МПа, плотность $\rho_{ф} = 2,6$ г/см³, $E = 100$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,23$.

Тогда G и K для льда и базальтовой фибры определяются как

$$G = E/[2(1 - \nu)], \quad K = E/[3(1 - 2\nu)], \quad (5)$$

а для композита как средние значений, полученных по (2) и (3).

Результаты расчетов эффективного модуля упругости и полученные в эксперименте [6] представлены в табл. 1.

Предполагая, что между замороженными слоями матрицы создается равнопрочное соединение, а распределение несжимаемой базальтовой фибры равномерно случайное, можно визуализировать процесс разрушения и вычислить скорость роста трещины поперек замороженных слоев при различных концентрациях модификатора согласно табл. 2.

Как показали предварительные расчеты, разрушающая нагрузка не достигалась при полученных эффективных модулях упругости. Очевидно, что базальтовая фибра за счет неравномерного распределения и неполного сцепления с ледовой матрицей снижает прочностные характеристики композита. В этом случае подход Фойгта–Рейсса–Хилла должен быть модифицирован и увеличена доля матрицы на коэффициент неоднородности:

Таблица 1

Осредненные (эффективные) модули упругости льда, базальтовой фибры и композита лед-фибра, согласно (2)–(5)

Table 1

Averaged (effective) elastic moduli of ice, basalt fiber, and ice-fiber composite, according to (2)–(5)

Модуль	Лед	Базальтовая фибра	Ледовая матрица с базальтовой фиброй, об. %			
			0,3	0,75	1,5	2,25
<G>, МПа	329,4	61688	513,5	789,6	1249,8	1710
<K>, МПа	496,5	58642	670,9	932,6	1368,7	1804,8
<E>, МПа	423	95000	1227,4	1847,5	2874,5	3898,7

Таблица 2

Характеристики ледовой матрицы, содержащей базальтовую фибру

Table 2

Characteristics of the ice-matrix containing basalt fiber

Весовое (объемное) содержание фибры, %	Кол-во слоев фибры	Расстояние между слоями фибры, мм	Расстояние между фибрами в слое, мм	Разруш. нагрузка $P_{разр}$, Н	Предел прочности $\sigma_{изг}$, МПа	Эффект. модуль Юнга <E>, МПа	K_{IC} , МПа · м ^{0.5}
0	–	–	–	4300	0,6	423	0,0111
0,8 (0,3)	7	1	0,3	6700	1,56	1227,4	0,0444
2 (0,75)	10	8,9	0,2	10125	2,27	1847,5	0,0671
4 (1,5)	12	7,2	0,11	15750	3,54	2874,5	0,1044
6 (2,25)	16	5,3	0,1	18000	4,04	3898,7	0,1193

$$\frac{1}{m''} = \sum(k_i C_i + (1 - k_i) C_j) \frac{1}{m_j}, \quad (6)$$

где $0 \geq k_i \geq 1$ – коэффициент неоднородности распределения наполнителя и/или сцепления i -й фазы с j -й матрицей. В случае исследуемого композита может быть принято $k = 0,224$, что учитывает 20-кратное превышение разрушающей нагрузки в эксперименте над расчетной.

Выбор начальных и граничных условий для численного решения

Расчет напряжения и деформации для дальнейшей оценки роста трещины производился в чистой и модифицированной базальтовой фиброй ледовой матрице средствами программного комплекса ANSYS 2020 R2 (образовательная лицензия). Для снижения трудоемкости расчета задавалась симметрия по плоскости XOY. Произведено разбиение на КЭ-сетку с тетраэдрической формой ячеек на 11 216 (до перестраивания) элементов. Для визуализации и расчета скорости роста трещины задается функция Smart Crack Growth, перестраивающая сетку по мере расчета,

при этом согласно алгоритму вокруг трещины выделяется сфера с измельченной КЭ-сеткой (рис. 1).

Геометрия предварительной трещины задавалась в соответствии с экспериментом в виде треугольного надреза (рис. 2). Для статичной функции моделируемой трещины задается величина критического коэффициента интенсивности на-

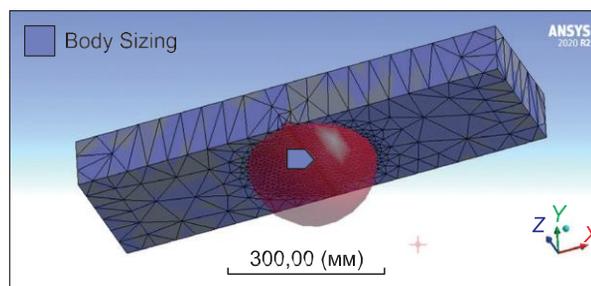


Рис. 1. Схема разбиения образца композиционного материала на элементы с выделенной сферой с измельченной сеткой для роста трещины

Fig. 1. Scheme for meshing the composite specimen with a selected sphere using a shredded mesh for crack growth

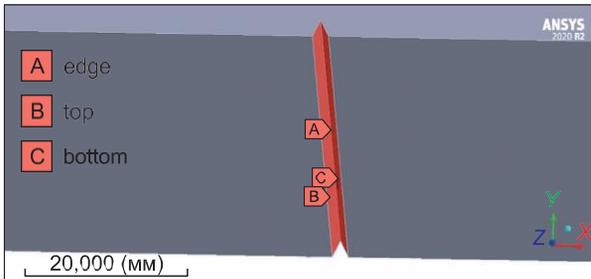


Рис. 2. Схема предварительно заданной трещины (надреза)

Fig. 2. Schematic image of a pre-defined crack (notch)

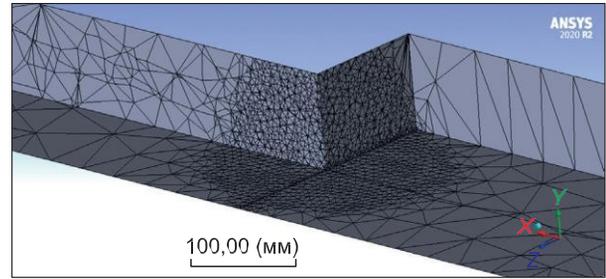


Рис. 3. Измельченная сетка разбиения в зоне роста трещины

Fig. 3. Shredded mesh in the crack growth zone

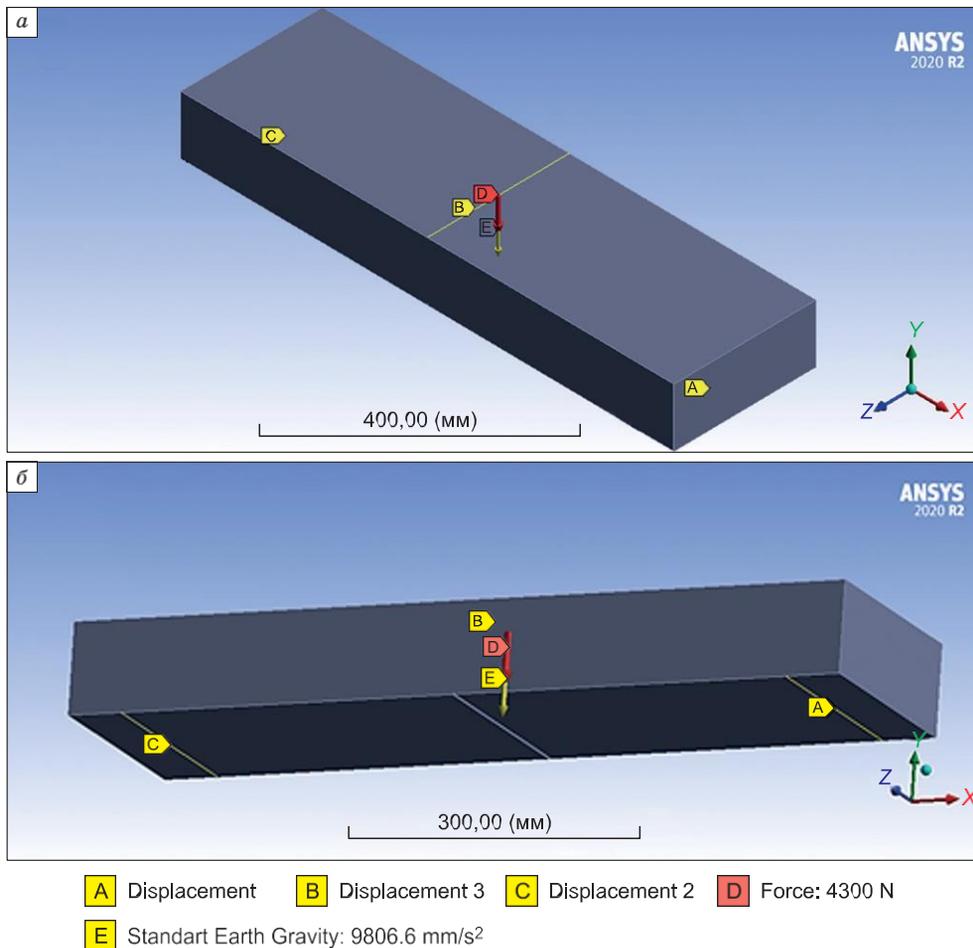


Рис. 4. Заданные начальные (а) и граничные (б) условия

Fig. 4. Defined the initial (a) and the boundary (b) conditions

пряжений K_{IC} для образца (из табл. 2). Вид сетки по разрезу сечения показан на рис. 3.

Следующим этапом моделирования является задание начальных (рис. 4, а) и граничных условий (рис. 4, б): 1) закрепление опоры А в направлении оси x (степень свободы 5) и за-

крепление по перемещениям в направлении x , y , z – опора В (степень свободы 3); 2) сила нагружения 4300 кН и дополнительно учтена сила гравитации ($40,5 \text{ кг} \cdot 9,806 \text{ м/с}^2 = 397 \text{ Н}$); 5) закрепление опоры А в направлении оси x (степень свободы 5) и закрепление по перем-

щениям в направлении x , y , z – опора В (степень свободы 3).

Результаты КЭ-моделирования

Расчет напряжений для чистой ледовой матрицы представлен на рис. 5. Из зависимости напряжений по времени (рис. 5, б) видно, что образец из льда разрушается хрупко при достижении максимальной прочности.

На рис. 6 показаны расчет распространения трещины по алгоритму Smart Crack Growth и зависимость длины трещины по времени. Подра-

стание трещины происходит скачком со скоростью около 0,1 м/с.

Распределение и кривая роста напряжений согласно расчету для ледовой матрицы, модифицированной 16 слоями базальтовой фибры (6 мас.%; 2,25 об.%), представлены на рис. 7.

На рис. 8 показана конфигурация трещины до и после роста трещины по алгоритму Smart Crack. Согласно расчету, скорость трещины в случае чистого льда составит ~0,1 м/с, модифицированного базальтовой фиброй – более 10 м/с. Несмотря на многократно возросшую нагрузку, ско-

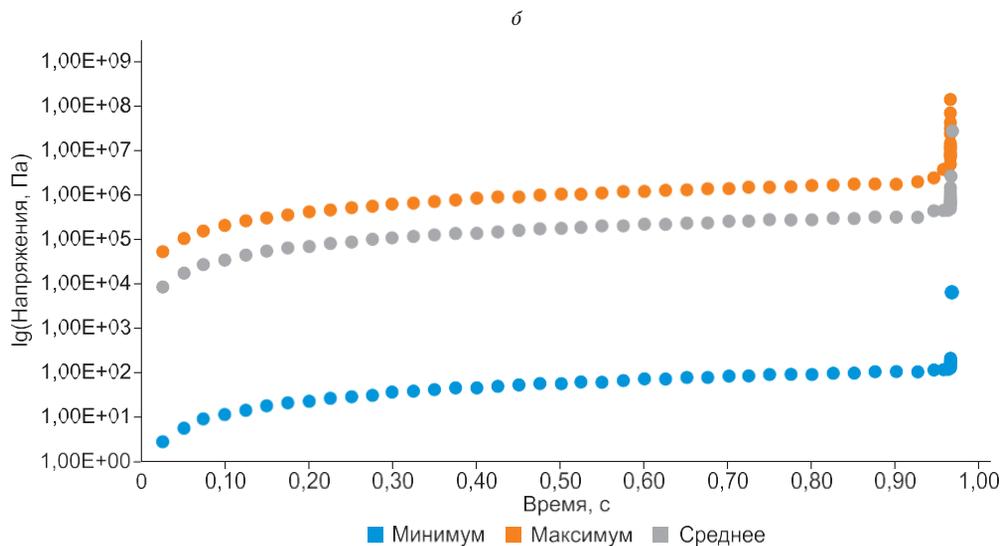
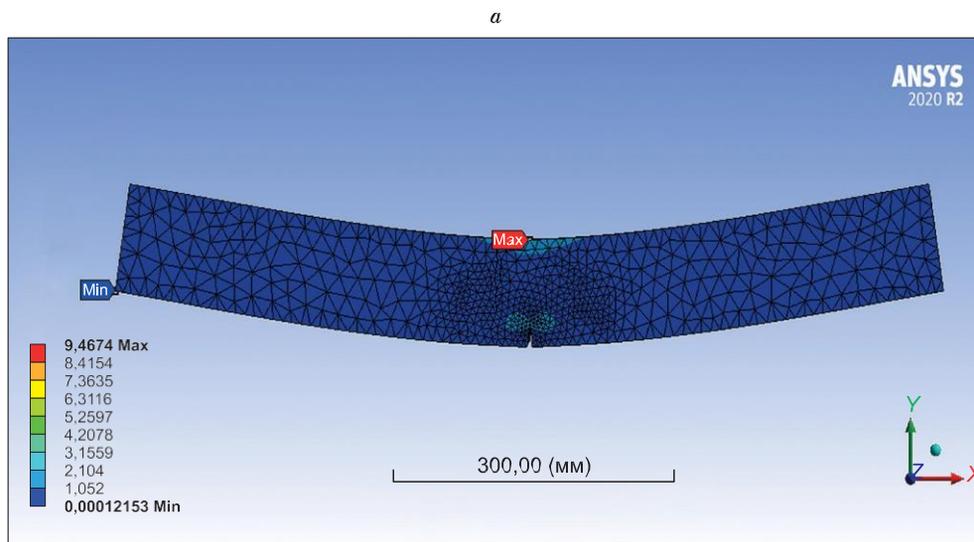


Рис. 5. Силовой расчет: а – распределение напряжений в образце: б – кривая изменения напряжений по времени в логарифмическом масштабе

Fig. 5. Calculation of equivalent stresses: а) a stress distribution in the specimen: б) stress-time curve on a logarithmic scale

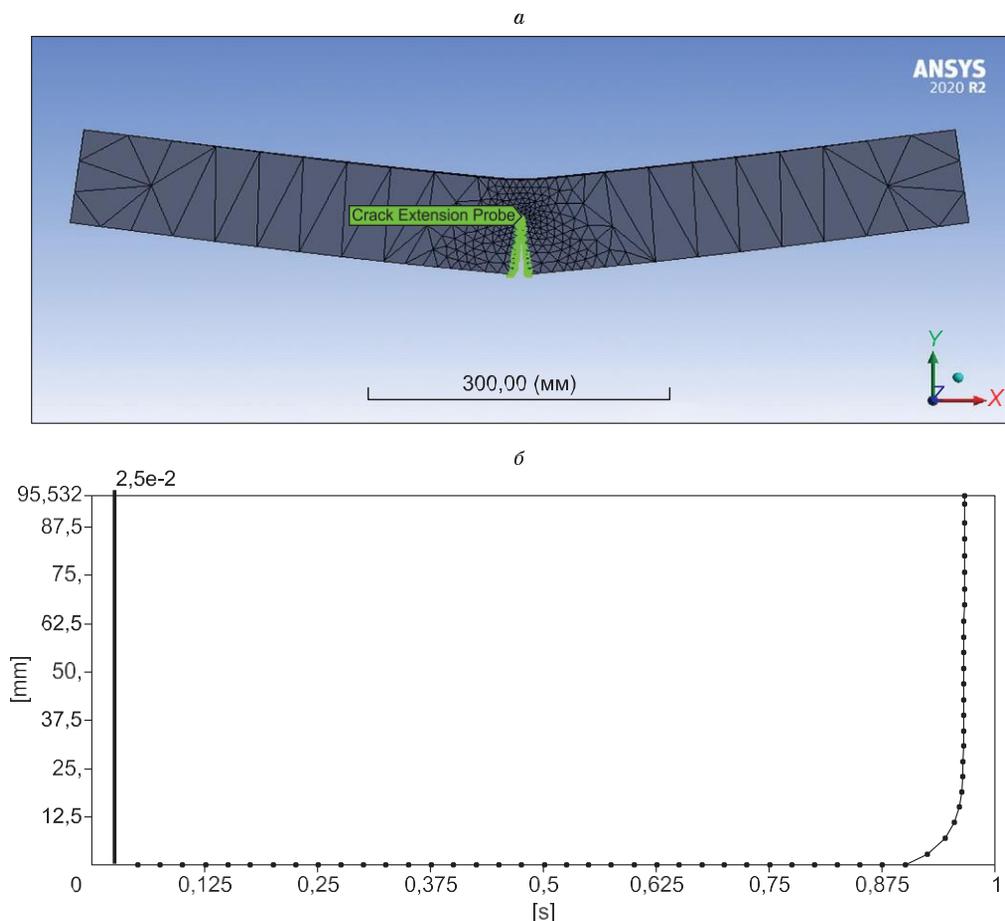


Рис. 6. Вид (а) и кривая роста трещины (б) после приложения нагрузки для образца из чистого пресного льда
Fig. 6. Visualization (a) and the curve (b) of the crack growth after loading for a pure fresh ice sample

рость трещины в композите выросла ненамного, составив около 0,16 м/с.

Трудоемкость расчетов на мобильном 2-ядерном процессоре Intel Core i5-2450M 2501 МГц составила около 6 ч машинного времени для образца из чистого льда и около 5 ч для образца из композиционного материала. По результатам проведенных симуляций трещина образуется только при $K_{IC} = 9300$ для чистого льда и $K_{IC} = 27000 \text{ Па} \cdot \text{м}^{-0.5}$ – для армированного 16 волокнами фибры. В соответствии с этим были изменены теоретические величины эффективной прочности согласно [6].

Стохастическое моделирование роста трещины

В отличие от вязких материалов, таких как металлы и полимеры, в хрупких композитах на основе ледовой матрицы рост трещин подчиняется другим закономерностям. Модель роста

и слияния микротрещин в стохастической постановке учитывает закономерности движения дислокаций во льду [23], а также условие необратимости разрушения Бейли и критерий концентрационного разрушения, основанный на теории перколяции.

В стохастической модели роста трещины механические характеристики льда: модуль Юнга $E = 423 \text{ МПа}$, прочность при одноосном сжатии $\sigma_{сж} = 0,55 \text{ МПа}$, прочность при одноосном растяжении $\sigma = 0,4 \text{ МПа}$, плотность льда $\rho_l = 930 \text{ кг/м}^3$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,358$. Средняя скорость звука (поперечных волн) $C_1 = 3200 \text{ м/с}$. Структура представлена на рис. 9.

Что касается прочности когезионной связи между ледовой матрицей и базальтовой фиброй, то с учетом увеличения объема твердой фазы по сравнению с жидкой на 10 % между фиброй и матрицей образуется прочное механическое сцепление, практически предотвращающее проскаль-

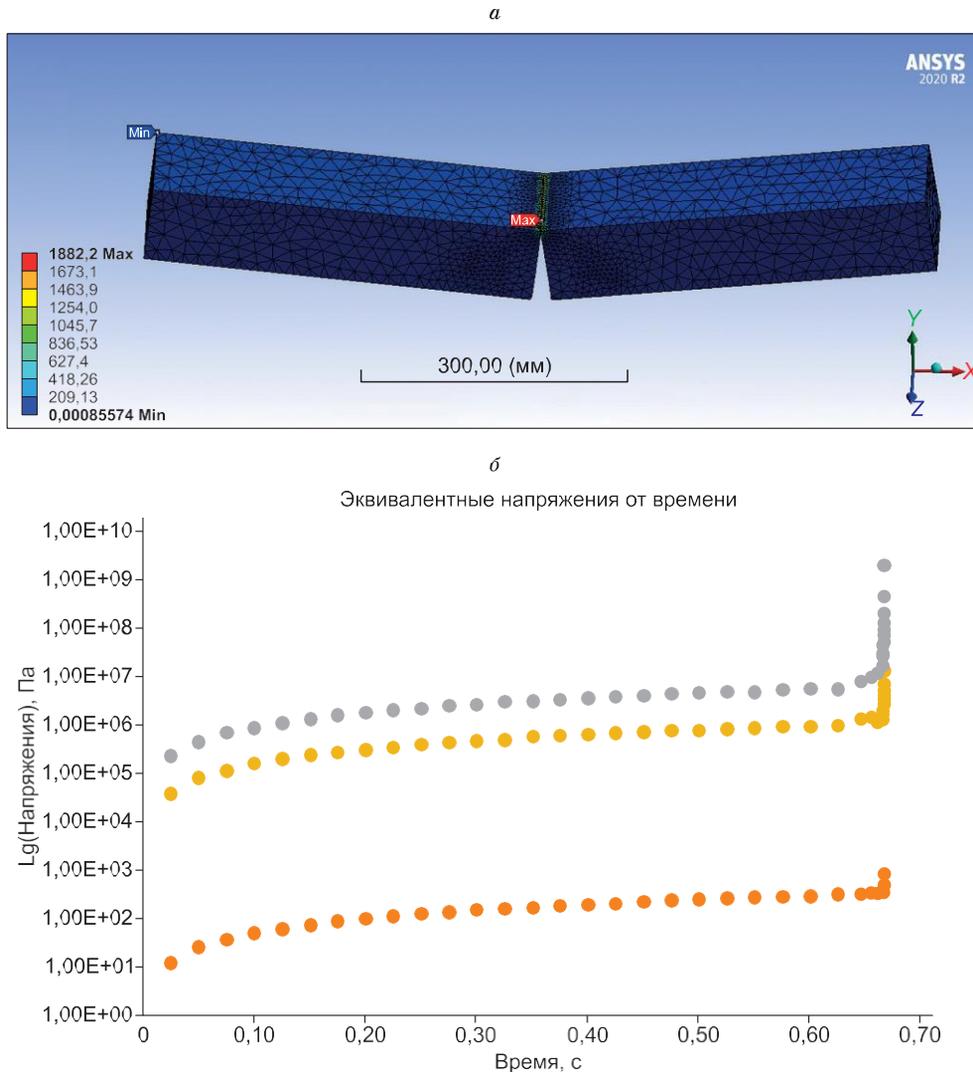


Рис. 7. Распределение (а) и кривая зависимости эквивалентных напряжений в логарифмическом масштабе по времени (б) при деформировании образца из ледового композита, содержащего 6 мас.% базальтовой фибры

Fig. 7. Distribution (а) and the curve of equivalent stresses in a logarithmic time scale (б) during the deformation of an ice composite specimen containing 6% (wt.) of basalt fiber

зывание при низкой температуре и образующее только концентраторы напряжений для движения трещины. Такое предположение, впрочем, будет верно даже для более высокой температуры в условиях сжатия, когда интенсивное таяние льда затруднено термодинамическими условиями фазового перехода.

Разработанная стохастическая модель [24] позволяет на микроуровне получать результаты, близкие к макроскопическим КЭ-расчетам. На рис. 10 показаны результаты компьютерной визуализации роста трещины для чистого льда и максимального содержания базальтовой фибры в ледовой матрице, в характерной области раз-

мером 800×400 мкм. Скорость трещины, полученная для максимальной концентрации фибры при критическом уровне концентрации напряжений, оказалась равной 0,17 м/с. Для чистого льда в условиях наличия естественных пузырьков размером 1 мкм скорость составила 0,11 м/с. Эти величины близки к полученным в макроскопическом расчете по КЭ-модели.

В случае стохастической модели трудоемкость расчета на 6-ядерном процессоре AMD Ryzen 5 1600X 3.60 ГГц составила около 50 ч.

Так же как и в случае построения многоуровневых моделей для древесины и бетона [15, 25], в случае ледового композита может быть выстрое-

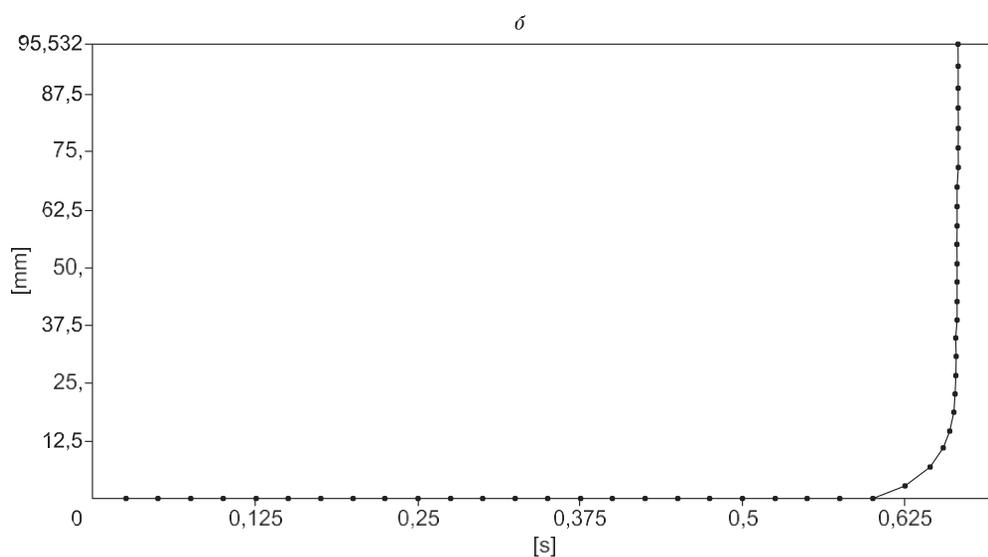
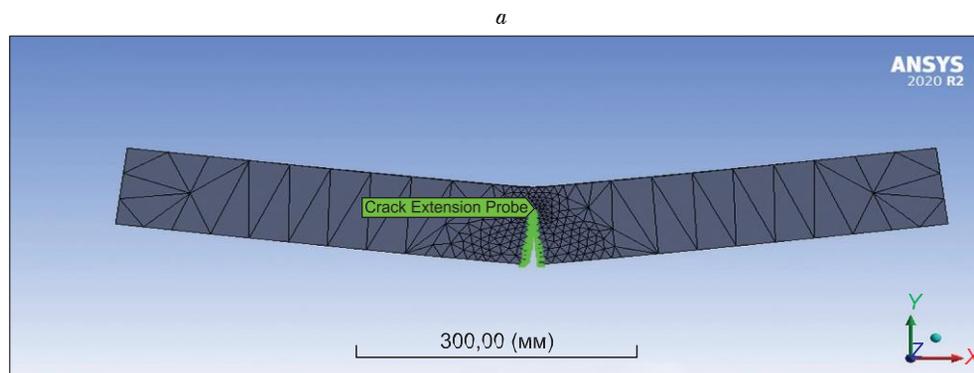


Рис. 8. Вид (а) и кривая роста трещины (б) после приложения нагрузки для образца из ледового композита, содержащего 6 мас.% базальтовой фибры

Fig. 8. Visualization (a) and the curve (b) of the crack growth after loading of an ice composite specimen containing 6% (wt.) of basalt fiber



Рис. 9. Структура поверхности разрушения ледового композита с содержанием базальтовой фибры 2,25 об. %

Fig. 9. Structure of the fracture surface of an ice composite with 2.25 vol.% basalt fiber content

на иерархическая последовательность критических КИН и скоростей трещины, согласно временным и пространственным масштабам протекания процессов разрушения в рамках системно-структурного подхода. Однако это требует более тщательных исследований микроструктуры, в том числе поверхностей разрушения льда и композитов на основе ледовой матрицы, что затруднено температурой фазового перехода и стабилизации их свойств ниже нуля градусов по шкале Цельсия (около 273 К).

Заключение

Метод многоуровневого численного моделирования в рамках системно-структурного подхода применен для оценки интенсивности разрушения и скорости роста трещины в композиционном материале на основе ледовой матрицы. Ввиду того, что оценка модуля упругости для такого материала как речной поликристаллический лед в силу различных условий его образования и сильно выраженного масштабного эффекта неточна в эксперименте и теоретически, то и для композиционного материала на его основе, в частности с базальтовой фиброй в качестве наполнителя, предложен модифицированный метод расчета эффективного модуля Юнга на основе подходов Фойгта и Рейсса путем введения коэффициента неоднородности и сцепления наполнителя с ледовой матрицей.

Скорость роста трещины оценивалась на основе макроскопического расчета по конечно-элементной модели с использованием комплекса ANSYS и алгоритма SmartCrack. Для визуализации и оценки скорости роста трещины на микроуровне применена стохастическая модель разрушения, дополненная кинетическим подходом Бейли и соотношениями теории перколяции [25].

Результаты стохастического моделирования роста трещин в массивах трещин и пор на микроуровне при критическом уровне концентрации напряжений показывают, что расчетная скорость развития разрушения сравнима с результатами, полученными путем конечно-элементного макроскопического расчета. Также расчетные скорости трещины, полученные для чистого льда и композита с максимальной концентрацией базальтовой фибры в ледовой матрице, оказались сравнимы с измеренными в натурном эксперименте с применением датчиков акустической эмиссии [2,17].

Это позволяет говорить о возможности моделирования процессов разрушения ледовых мас-

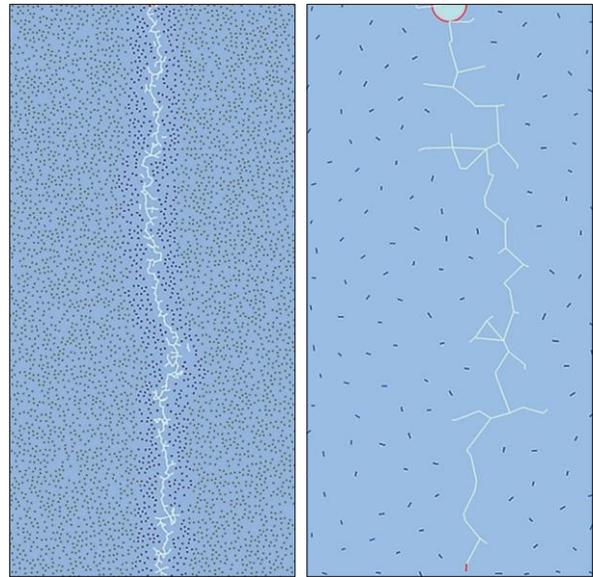


Рис. 10. Визуализация роста трещины: *a* – для чистого речного льда ($v = 0,11$ м/с) и армированного 6 мас.% базальтовой фибры ($v = 0,17$ м/с) (*б*)

Fig. 10. Visualization of the crack growth for: *a*) the pure ice ($v = 0.11$ m/s) and *б*) the composite with 6 % (by weight) of basalt fiber ($v = 0.17$ m/s)

сивов, с учетом условий их естественного и искусственного формирования в речных акваториях как для предотвращения паводковых явлений, так и для продления сроков эксплуатации зимних автомобильных дорог, позволяющих обеспечить транспортную доступность и связность отдаленных северных и арктических территорий, сократить сроки и снизить стоимость северного завоза топлива и продовольствия. Но для обеспечения достоверности и проверки моделей необходимо обустройство специального полигона для натурных испытаний дорог и техники российских Севера и Арктики в Республике Саха (Якутия).

Список литературы / References

1. Гончарова Г.Ю., Сиротюк В.В., Якименко О.В. и др. Повышение несущей способности и безопасности ледовых автозимников с помощью армирования и модификации льда. *Вестник СибАДИ*. 2023;20(6): 786–797. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>
- Goncharova G. Y., Sirotiuk V. V., Yakimenko O. V., et al. Loadbearing capacity and safety for winter roads improvement reinforcement and ice modification. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6):786–797. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>.

2. Syromyatnikova A.S., Andreev Y.M., Sibiryakov M.M., et al. Fracture laws for composite materials based on fresh ice during testing of bulky samples. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2023;4:553–557. <https://doi.org/10.1134/S0036029523040286>
3. Черепанов Г.П. *Механика хрупкого разрушения*. М.: Наука; 1974. 640 с.
- Cherepanov G.P. *Mechanics of brittle fracture*. Moscow: Nauka, 1974. 640 p. (In Russ.)
4. Kujala P., Goldstein R.V., Osipenko N.M. Ship in compressive ice – analysis of the ice failure process. *Report M-165 by the Naval Architecture and Marine Engineering*. Espoo: Helsinki University of Technology; 1990.
5. Goldstein R.V., Osipenko N.M., Tuhkuri J. Modeling of edge cracking and flaking of brittle plates and wedges. *Report M-216*. Otaniemi; 1997. 27 p.
6. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. О модели разрушения льда при большой площади контакта. *Известия РАН. Механика твердого тела*. 2011;1:137–153.
- Goldstein R.V., Osipenko N.M. On an ice failure model with a large contact region. *Mechanics of Solids*. 2011;46(1):109–122.
7. Черепанин Р.Н., Нужный Г.А., Разомасов Н.А. и др. Физико-механические свойства ледяных композиционных материалов, армированных волокнами РУСАР-С. *Материаловедение*. 2017;(7):38–44.
- Cherepanin R.N., Nuzhny G.A., Razomasov N.A., et al. Physical-mechanical properties of ice composites reinforced with RUSAR-S fibers. *Materialovedenie*. 2017;(7):38–44. (In Russ.)
8. Нужный Г.А., Бузник В.М., Черепанин Р.Н. и др. Физико-механические свойства ледяных композиционных материалов, армированных углеродными наполнителями. *Материаловедение*. 2020;(8):35–40.
- Nuzhnyu G.A., Buznik V.M., Cherepanin R.N., et al. Physical-mechanical properties of ice composite materials reinforced with carbon fillers *Materialovedenie*. 2020;(8):35–40. (In Russ.)
9. Лепов В.В., Лепова К.Я., Алымов В.Т., Ларионов В.П. Стохастическое моделирование разрушения гетерогенной повреждаемой среды. *Физическая мезомеханика*. 2002;5(2):23–41.
- Lepov V.V., Lepova K.Ya., Alymov V.T., Lariонов V.P. Stochastic modeling of fracture of heterogeneous damaged media. *Physical Mesomechanics*. 2002;5(2):23–41. (In Russ.)
10. Weinan E., Engquist B., Huang Z.Y. Heterogeneous multiscale method: a general methodology for multiscale modeling. *Physical Review B*. 2003;67(9):092–101.
11. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система. *Физическая мезомеханика*. 2011;14(3):7–26.
- Panin V.E., Egorushkin V.E. Deformable solid body as a nonlinear hierarchically organized system. *Physical Mesomechanics*. 2011;14(3):7–26. (In Russ.)
12. Федотов С.Н. Модели разрушения гетерогенных материалов. *Физическая мезомеханика*. 2015;18(6):24–31.
- Fedotov S.N. Fracture models of heterogeneous materials. *Physical Mesomechanics*. 2015;18(6):24–31. (In Russ.)
13. Fish J., Wagner G.J., Keten S. Mesoscopic and multiscale modelling in materials. *Nature Materials*. 2021;20(6):774–786. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00913-0>
14. Лепов В.В., Ачикасова В.С., Иванова А.А., Лепова К.Я. Структурный подход к многомасштабному моделированию эволюционных процессов в материалах с внутренней микроструктурой. *Наука и образование*. 2015;4(80):82–87.
- Lepov V.V., Achikasova V.S., Ivanova A.A., Lepova K.Y. Structural approach to multiscale modeling of evolutionary processes in materials with internal microstructure. *Nauka i obrazovanie*. 2015;4(80):82–87. (In Russ.)
15. Лепов В.В., Бисонг С.М., Голых Р.Н. Многоуровневый подход к моделированию процессов разрушения материалов с субмикроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023; 28(1):156–171. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>
- Lepov V.V., Bisong S.M., Golykh R.N. Foundation of multilevel approach to fracture modeling for materials with submicrostructure applicable for Arctic and Subarctic environment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):156–171. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>
16. Roldán É., Neri I., Chetrite R., et al. Martingales for physicists: a treatise on stochastic thermodynamics and beyond. *Advances in Physics*. 2024;1–258. <https://doi.org/10.1080/00018732.2024.2317494>
17. Сыромятникова А.С., Андреев Я.М., Сибiryakov М.М. и др. Исследование закономерностей разрушения композиционных материалов на основе пресного льда при испытании массивных образцов. *Деформация и разрушение материалов*. 2022;(10):34–39.
- Syromyatnikova A.S., Andreev Y.M., Sibiryakov M.M., et al. Investigation of fracture patterns of fresh ice based composite materials during testing of massive specimens. *Deformation and Fracture of Materials*. 2022;(10):34–39. (In Russ.)
18. Берденников В.П. *Изучение модуля упругости льда*. М.: Машиностроение; 1948. 123 с.
- Berdennikov V.P. Study of the modulus of elasticity of ice. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1948. 123 p. (In Russ.)
19. Победря Б.Е. *Механика композиционных материалов*. М.: МГУ; 1984. 335 с.
- Pobedrya B.E. *Mechanics of Composite Materials*. Moscow: Moscow State University; 1984. 335 p. (In Russ.)
20. Grimvall G. *Thermophysical properties of materials*. Amsterdam: Elsevier Science B.V.; 1999.
21. Кияшко М.В., Гринчук П.С., Кузнецова Т.А. и др. Определение модуля упругости композиционной керамики на основе SiC. *Письма в Журнал технической физики*. 2021;47(3):47–50. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.03.50577.18551>
- Kiyashko M.V., Grinchuk P.S., Kuznetsova T.A., et al. Determination of elastic modulus of sic-based com-

posite ceramics. *Technical Physics Letters*. 2021;47(2): 150–153.

22. Buznik V.M., Goncharova G.Yu., Grinevich D.V., et al. Strengthening of ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology*. 2022;196:103490. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103490>

23. Gold LW. Engineering Properties of Fresh-Water Ice. *Journal of Glaciology*. 1977;19(81):197–212. <https://doi.org/10.3189/S0022143000215608>

24. Лепов В.В. Алгоритм стохастического моделирования роста трещины в массиве пор и/или трещин вязко-хрупкого материала, в том числе при воздейст-

вии коррозионной среды. *Ноу-хау*. ИФТПС СО РАН, ФИЦ ЯИЦ СО РАН; 2021.

Lepov V.V. *Stochastic model algorithm – formation of crack growth in an array of pores and/or cracks ductile-brittle material, including when exposed to corrosive environment*. Know-how. IPTPN SB RAS, FRC YaSC SB RAS; 2021.

25. Bisong S., Lepov V.V., Etinge A.R. Study of the mechanical behavior and multiscale simulation of the crack propagation in a bilinea wooden beam. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2024;90(3):52–61. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-3-52-61>.

Об авторах

ЛЕПОВ Валерий Валерьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, ResearcherID: F-9875-2011, Scopus Author ID: 6508081764, SPIN: 1397-6725, e-mail: wisecold@mail.ru

ДЬЯЧКОВСКИЙ Иван Иванович, инженер, аспирант, SPIN: 2489-5570, e-mail: e5dii@mail.ru

Вклад авторов

Лепов В.В. – разработка концепции, методология, программное обеспечение, проведение статистического анализа, проведение исследования, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием, администрирование проекта

Дьячковский И.И. – программное обеспечение, верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи, визуализация

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор технических наук, главный научный сотрудник Лепов В.В. является членом редакционного совета журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

LEPOV, Valeriy Valerievich, Dr. Sc. (Eng.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, ResearcherID: F-9875-2011, Scopus Author ID: 6508081764, SPIN: 1397-6725, e-mail: wisecold@mail.ru

DYACHKOVSKY, Ivan Ivanovich, Engineer, Post-Graduate Student, SPIN: 2489-5570, e-mail: e5dii@mail.ru

Authors' contribution

Lepov V.V. – conceptualization, methodology, software, formal analysis, investigation, review & editing, visualization, supervision, project administration

Dyachkovsky I.I. – software, validation, investigation, original draft, visualization

Conflict of interest

One of the authors – Lepov V.V., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher is a member of editorial board of “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this manuscript.

Поступила в редакцию / Submitted 24.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 21.05.2024

Принята к публикации / Accepted 31.05.2024