

УДК 539.42; 620.17.254

ВЛИЯНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ ЛЬДА НА ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ ОТ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ МЕРЗЛОГО ГРУНТА

В. В. Баландин^{*,**}, Н. С. Селютина^{**,***}, Ю. В. Петров^{*,**,***}

* Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, 603600 Нижний Новгород, Россия

** Институт проблем машиноведения РАН, 199178 Санкт-Петербург, Россия

*** Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Санкт-Петербург, Россия
E-mails: rustydog2007@yandex.ru, nina.selutina@gmail.com, yp@yp1004.spb.edu

На основе структурно-временного подхода проводится анализ экспериментальных зависимостей прочности мерзлого песчаного грунта от скорости деформации. Представлены результаты динамических испытаний на одноосное сжатие при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне скоростей деформации от 400 до 2600 с^{-1} образцов мерзлого песчаного грунта двух типов с измеренной при комнатной температуре массовой долей льда 10 и 18 %. С использованием известных экспериментальных данных проведены исследования зависимости прочности от скорости деформации при различных температурах замораживания мерзлого песка с массовой долей льда 30 %.

Ключевые слова: мерзлый песчаный грунт, прочность, скорость деформации, массовая доля льда.

DOI: 10.15372/PMTF20190316

Введение. Проведение исследований прочности мягких грунтов при температурах замораживания ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и высоких скоростях деформации необходимо для разработки современных стандартов и моделей, используемых в строительной и транспортной промышленности. В ряде квазистатических экспериментов (см., например, [1, 2]) показано, что статическая прочность песчаного грунта увеличивается с уменьшением температуры замораживания при постоянной массовой доле льда и уменьшается с увеличением массовой доли льда при постоянной температуре замораживания. В динамических экспериментах на прочность глиняного и песчаного мерзлых грунтов [3, 4] наблюдается зависимость предела прочности от скорости деформации, аналогичная обнаруженной в экспериментах на прочность горных пород при комнатной температуре [5]. В настоящее время для описания наблюдаемого в мерзлых грунтах динамического эффекта разрабатывается феноменологический подход, учитывающий изменение прочности при высокоскоростном нагружении. Эмпирические численные модели на основе фактора динамического увеличения (DIF) [5, 6],

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы на 2014–2020 гг. (контракт № 14.578.21.0246 (RFMEFI57817X0246)), а также Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 17-38-50140, 17-01-00618, 18-51-80008 БРИКС).

© Баландин В. В., Селютина Н. С., Петров Ю. В., 2019

используемые в расчетах динамической прочности горных пород, применяются также при исследовании мерзлых грунтов. В работе [3] отмечено, что результаты расчетов, полученные с использованием традиционных численных моделей Джонсона — Кука [7] и Z-WT [8] включая модели на основе DIF, не согласуются с результатами динамических экспериментов с мерзлыми грунтами.

В работах [9–11] на основе структурно-временного подхода определяется характер зависимости прочности от скорости деформации в широком диапазоне ее значений. Параметры модели определяются как параметры материала и оцениваются на основе данных эксперимента. При этом параметры структурно-временного подхода, включая соответствующий параметр инкубационного времени, не зависят от истории нагружения. Структурная зависимость инкубационного времени как одного из параметров модели позволяет рассматривать мерзлый грунт с различной массовой долей льда или температурой замораживания как материал, получаемый при одних и тех же условиях и обладающий определенным набором механических свойств. Систематизируя данные об инкубационном времени для грунтов, полученные при различных значениях массовой доли льда или температуры замораживания, можно прогнозировать изменение предела прочности мерзлого грунта в широком диапазоне скоростей деформации.

При комнатной температуре горные породы [5] с большой влажностью имеют большую динамическую прочность при высоких скоростях деформации, что обусловлено воздействием гидростатического давления [5], препятствующим распространению микродефектов и микротрещин в материале. В экспериментах с мерзлым грунтом (глиной) с массовой долей льда 10, 15 и 30 % при температурах замораживания -8 , -28 °С и скорости деформации 600 с^{-1} наблюдается совместное влияние температуры и массовой доли льда на динамическую прочность, что, по мнению авторов работы [4], обусловлено только конкуренцией процессов вязкого и хрупкого разрушения мерзлых грунтов.

Влияние температуры замораживания и массовой доли льда на динамическую прочность мерзлого песчаного грунта в широком диапазоне скоростей деформации исследуется с помощью критерия инкубационного времени. В данной работе критерий впервые применяется для описания прочности мерзлых грунтов при температурах ниже 0 °С. Представлены результаты динамических испытаний на одноосное сжатие при температуре -18 °С в диапазоне скоростей деформации от 400 до 2600 с^{-1} для мерзлого песчаного грунта с измеренной при комнатной температуре массовой долей льда 10 и 18 %. Полученные экспериментальные зависимости прочности мерзлого песчаного грунта от скорости деформации в широком диапазоне ее значений анализируются на основе критерия инкубационного времени. Значение характерного времени при различных температурах замораживания мерзлого песка определяется по экспериментальным данным, представленным в работе [3].

1. Методика проведения экспериментов с замороженным песком. Для проведения динамических испытаний замороженного грунта были изготовлены образцы в виде цилиндров высотой 10 мм и диаметром 16 мм из песка с измеренной при комнатной температуре массовой долей воды 10 и 18 %. Для приготовления образцов использовалась питьевая вода. Образцы с массовой долей воды 18 % были практически полностью насыщены водой. Для изготовления образцов использовалась естественная песчаная смесь, из которой были удалены частицы размером более 1 мм и менее 0,1 мм. Плотность сухого песка составляла 1750 кг/м^3 . Образцы размещались в специальных цилиндрических обоймах. Песок требуемой влажности засыпался в обойму и уплотнялся до плотности, близкой к 1920 кг/м^3 , для песка с массовой долей льда 10 % и до плотности 2050 кг/м^3 для песка с массовой долей льда 18 %. Затем образцы замораживались в морозильной камере при температуре -18 °С в течение 24 ч, после чего извлекались из обойм и выдерживались при той же температуре также в течение 24 ч.

Динамические испытания мягких грунтов проводились с использованием метода Кольского [12–15]. Экспериментальная установка включала газовую пушку калибром 20 мм, измерительно-регистрирующую аппаратуру и комплект изготовленных из алюминиевого сплава Д16Т разрезных стержней Гопкинсона диаметром 20 мм и длиной 1500 мм для проведения испытаний на сжатие.

Установка была модифицирована для проведения испытаний при отрицательных температурах. Из пенопласта была изготовлена специальная камера, в которой размещались образец и примыкающие к нему концы мерных стержней. Камера охлаждалась парами жидкого азота, так чтобы концы мерных стержней и образец имели температуру $-18\text{ }^\circ\text{C}$. Температура концов стержней и образцов регистрировалась термопарой, размещенной на мерном стержне вблизи исследуемого образца.

2. Критерий инкубационного времени. Предложенный в [9–11] критерий разрушения, применяемый для описания процесса хрупкого разрушения материалов (критерий инкубационного времени), записывается в следующем виде:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left(\frac{F(t')}{F_c} \right)^\alpha dt' \leq 1. \quad (1)$$

Здесь τ — инкубационное время, являющееся характерным временем релаксационного процесса микроразрушения, предшествующего макроскопическому разрыву; $F(t)$ — интенсивность локального силового поля; F_c — статический предел локального силового поля; t_* — время разрушения (момент выполнения равенства в условии (1)); α — параметр, характеризующий напряженность силового поля.

Особенностью рассматриваемого подхода является введение инкубационного времени как характеристики материала. Инкубационное время зависит от предшествующих разрушению релаксационных процессов развития микродефектов в структуре материала вследствие образования микротрещин. Исследуем более подробно влияние параметра τ на процесс разрушения, происходящий при различных скоростях внешнего нагружения.

Критерий разрушения (1) предполагает наличие инкубационного периода, предшествующего макроскопическому разрыву образца. Инкубационный процесс является важным фактором разрушения как при медленном, так и при быстром нагружении. При быстром способе нагружения динамическое разрушение имеет ряд особенностей, в частности, возникает зависимость прочности от скорости деформации (времени). При медленном нагружении по линейному закону $\sigma(t) = \dot{\sigma}tH(t)$ согласно условию (1) напряжение в момент разрушения определяется формулой $\sigma(t_*) = \sigma_c + \dot{\sigma}(\tau/2)$, где σ_c — статический предел прочности. В соответствии с полученным соотношением в момент времени, когда в материале достигнут статический предел прочности σ_c , материал не является разрушенным. До наступления макроскопического разрыва в материале происходит процесс накопления микрповреждений, характеризующийся временным периодом τ .

Рассмотрим один из способов интерпретации и определения параметра τ при механическом разрыве материала. Предположим, что растягиваемый стандартный образец из данного материала разрывается на две части при напряжении P , которое возникает в некоторый момент времени $t = 0$. Пусть $F(t) = PH(t)$, где $H(t)$ — функция Хевисайда. При квазихрупком разрушении происходит разгрузка материала и локальное напряжение в зоне возникновения разрыва быстро (но не мгновенно) уменьшается от значения P до нуля. При этом возникает волна разгрузки, которая распространяется по образцу и может быть зарегистрирована известными (например, интерферометрическими) методами. Зависимость напряжения в зоне разрыва от времени может быть представлена в виде $\sigma(t) = P - Pf(t)$, где значение функции $f(t)$ в течение некоторого временного промежутка T увеличивается от 0 до 1.

Классической теории прочности соответствует случай $f(t) = H(t)$, т. е. согласно классическому подходу разрыв происходит мгновенно ($T = 0$). В действительности разрыв материала (образца) представляет собой процесс, протекающий во времени, а функция $f(t)$ описывает кинетику перехода от “бездефектного” состояния $f(0) = 0$ к состоянию полного разрушения $f(T) = 1$ в данной точке. Применяя в данном случае критерий разрушения (1), получаем $T = \tau$ при $P = F_c$. Период τ может быть измерен в опытах по статическому разрушению образцов различными способами, например по времени нарастания давления на фронте волны разгрузки, определенном интерферометрическим способом по профилю скорости точек поверхности образцов.

Запишем критерий инкубационного времени (1) для бездефектных материалов в обобщенной форме, используемой для описания динамических эффектов [9–11] хрупкого разрушения:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left(\frac{\sigma(s)}{\sigma_c} \right)^\alpha ds \leq 1. \quad (2)$$

Здесь $\sigma(t)$ — временная зависимость роста среднего напряжения в образце. Условие $\alpha \geq 1$ выполняется для твердых тел. В случае $\alpha = 1$ критерий инкубационного времени хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Случаи растяжения и сжатия рассматриваются как две независимые формулировки критерия (2) с различными характеристиками разрушения. Иными словами, параметр σ_c описывает статический предел при сжатии или растяжении в зависимости от рассматриваемого процесса.

Построим схему расчета предельного значения локальных напряжений при сжатии или растяжении на основе критерия инкубационного времени для бездефектных образцов (2) с линейной зависимостью локальных напряжений от времени $\sigma(t)$. Момент разрушения можно определить из условия знака равенства в критерии (2). На практике динамическая прочность оценивается минимальным значением локальных напряжений, при которых в материале отсутствуют разрушения. В данной работе в качестве параметра процесса принимается динамическая прочность образца, в качестве постоянной материала — не зависящее от истории нагружения инкубационное время.

Полагаем, что до момента хрупкого разрушения (максимальная величина напряжений) рост деформаций в материале описывается линейной функцией времени $\varepsilon(t) = \dot{\varepsilon}tH(t)$, где $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформации. Изменение локальных напряжений в материале определяем законом Гука $\sigma(t) = E\varepsilon(t)$, где E — модуль Юнга. Таким образом, временная зависимость локальных напряжений имеет вид

$$\sigma(t) = E\dot{\varepsilon}tH(t) = \dot{\sigma}tH(t), \quad (3)$$

где $\dot{\sigma}$ — скорость нагружения материала.

Решение (3) зависит от соотношения инкубационного времени и времени процесса разрушения: $0 < t_* < \tau$ и $t_* \geq \tau$. Можно разделить воздействия на квазистатические, когда время процесса t_* сравнимо с инкубационным временем или больше его ($t_* \geq \tau$), и динамические, когда время нагружения материала меньше инкубационного времени ($t_* < \tau$).

Локальные напряжения в момент разрушения t_* определяются предельным напряжением $\sigma_* = \sigma(t_*)$. В случае $\alpha = 1$ зависимость предела прочности от скорости деформации записывается в следующем виде:

$$\sigma_*(\dot{\varepsilon}) = \begin{cases} \sqrt{2\sigma_c E \dot{\varepsilon} \tau}, & t_* < \tau, \\ \sigma_c + E \dot{\varepsilon} \tau / 2, & t_* \geq \tau. \end{cases} \quad (4)$$

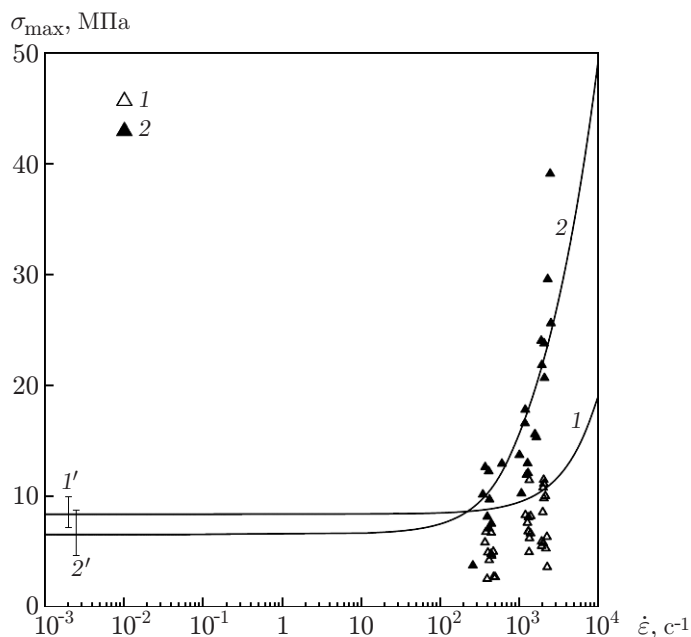


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические зависимости предела прочности от скорости деформации мерзлого песчаного грунта при различных значениях температуры и массовой доли льда, измеренной при комнатной температуре: точки — экспериментальные данные (1 — $\varphi = 10\%$, $T = -18\text{ }^\circ\text{C}$, 2 — $\varphi = 18\%$, $T = -18\text{ }^\circ\text{C}$), линии — результаты расчета (1 — $\varphi = 10\%$, $\tau = 4,3\text{ мкс}$, $T = -18\text{ }^\circ\text{C}$, 2 — $\varphi = 18\%$, $\tau = 37\text{ мкс}$, $T = -18\text{ }^\circ\text{C}$), 1', 2' — разброс экспериментальных данных [1] (1' — $\varphi = 15,5\%$, $T = -15\text{ }^\circ\text{C}$, 2' — $\varphi = 24,5\%$, $T = -15\text{ }^\circ\text{C}$)

В зависимости (4) первое выражение соответствует динамическим воздействиям, второе — квазистатическим.

Зависимость (4) описывает поведение материала при медленном и быстром нагружении. В качестве необходимых констант для расчета используются предел прочности и модуль Юнга, определяемые на основе результатов стандартных статических испытаний. Для большинства материалов при применении критерия (3) параметр α полагается равным единице, при этом, как отмечено выше, инкубационное время τ имеет физический смысл времени релаксации, в течение которого происходит накопление микродефектов. Для расчета инкубационного времени необходимо использовать экспериментальные данные (скорость деформации, предел прочности) и методом наименьших квадратов по первому выражению (4) оценить инкубационное время. Имея набор параметров σ_c , E , τ , можно построить нелинейную зависимость предела прочности от скорости деформации при динамических нагрузках.

3. Влияние льда на прочность замороженного песка. Результаты динамических экспериментов при температуре $T = -18\text{ }^\circ\text{C}$ в диапазоне скоростей деформации от 400 до 2600 с^{-1} показали, что прочность мерзлого песчаного грунта с массовой долей льда $\varphi = 18\%$ выше, чем у песчаного грунта с массовой долей льда $\varphi = 10\%$ (рис. 1). Проведем анализ этих экспериментальных данных с использованием критерия инкубационного времени при $\alpha = 1$ (см. (4)). В качестве данных о статической прочности для образцов с различной массовой долей льда используем экспериментальные данные [1]. На рис. 1 показаны теоретические зависимости предела прочности от скорости деформации замороженного песчаного грунта с массовой долей льда $\varphi = 10\%$ ($\tau = 4,3\text{ мкс}$) и $\varphi = 18\%$ ($\tau = 37\text{ мкс}$). Наблюдается постепенное увеличение предела прочности замороженного

песчаного грунта с массовой долей льда 10 % при инкубационном времени $\tau = 4,3$ мкс, а также быстрое увеличение предела прочности замороженного песчаного грунта с массовой долей льда $\varphi = 18$ % при $\tau = 37$ мкс. Наличие точки пересечения теоретических кривых зависимостей $\sigma_{\max}(\dot{\epsilon})$ для мерзлого песчаного грунта двух типов при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 225 \text{ с}^{-1}$ свидетельствует о том, что характер зависимостей статической и динамической прочности от массовой доли льда различается: с увеличением массовой доли льда с 15,5 до 24,5 % статическая прочность мерзлого песчаного грунта при квазистатических нагрузках уменьшается [1, 2], в то время как с увеличением массовой доли льда с 10 до 18 % динамическая прочность, наоборот, увеличивается (см. рис. 1).

В случае статического нагружения воздействие льда на образцы замороженного песчаного грунта с массовой долей льда $\varphi = 10, 18$ % приводит к их разрушению. При большой массовой доле льда скорость образования дефектов увеличивается, а прочность мерзлого грунта уменьшается. В случае динамического нагружения воздействие льда на образцы замороженного песчаного грунта с массовой долей льда $\varphi = 10, 18$ % приводит к замедлению образования микротрещин в течение инкубационного периода: чем больше массовая доля льда, тем больше динамическая прочность. Согласно критерию инкубационного времени большее инкубационное время соответствует материалу с большей прочностью. Полученные результаты расчетов показывают, что инкубационное время является меньшим у мерзлого песчаного грунта с меньшей массовой долей льда. Анализ, проведенный на основе структурно-временной модели, показал преимущество используемого критерия, состоящее в том, что он позволяет точно определить статическую и динамическую прочность. Также приведенные результаты показали, что прочность материала зависит от температуры замораживания. С использованием экспериментальных данных о песчаном грунте [3] с измеренной при комнатной температуре массовой долей льда 30 % проведена оценка параметров структурно-временной модели при определении прочности при сжатии в диапазоне скоростей деформации $400 \div 1000 \text{ с}^{-1}$ при температурах замораживания $T = -3, -8, -18, -28$ °С. Оценки инкубационного времени показали, что при уменьшении температуры замораживания оно увеличивается (43,6 мкс при $T = -3$ °С, 70,7 мкс при $T = -8$ °С, 51 мкс при $T = -18$ °С и 91,1 мкс при $T = -28$ °С).

На рис. 2 показаны экспериментальные и теоретические зависимости $\sigma_{\max}(\dot{\epsilon})$ при различных значениях τ, T . Увеличение динамической прочности с уменьшением температуры замораживания можно объяснить увеличением инкубационного времени. Инкубационное время принимает максимальное значение при температуре $T = -28$ °С. Полученные качественные оценки инкубационного времени при различных значениях массовой доли льда и температуры позволяют выбрать значения этих параметров таким образом, чтобы статическая и динамическая прочность материала в рассматриваемых условиях деформирования была выбрана оптимально.

Заключение. На основе структурно-временного подхода и полученных экспериментальных данных построены зависимости предела динамической прочности на разрыв от скорости деформации в широком диапазоне ее значений для замороженного песчаного грунта с различной массовой долей льда. Сравнение экспериментальных зависимостей при различной массовой доле льда показало, что при высокоскоростном деформировании больший предел прочности наблюдается у грунта с большей массовой долей льда. В рамках структурно-временного подхода наблюдаемый эффект объясняется уменьшением инкубационного времени при уменьшении массовой доли льда в мерзлом грунте.

С использованием предлагаемого подхода построены зависимости предела прочности от скорости деформации при различных значениях температуры замораживания. Определены значения инкубационного времени при температуре $T = -3, -8, -18, -28$ °С. Показано, что использование структурно-временного подхода позволяет качественно (а при

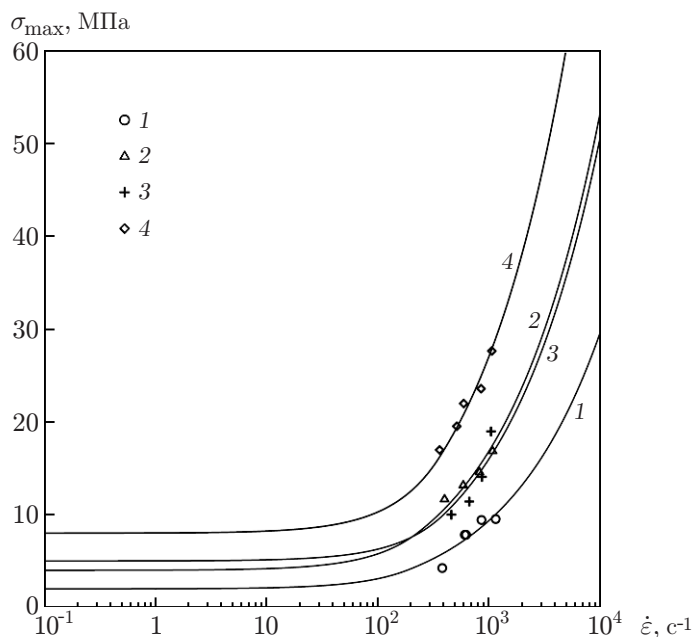


Рис. 2. Зависимости прочности мерзлого песчаного грунта с измеренной при комнатной температуре массовой долей льда $\varphi = 30\%$ от скорости деформации при различных значениях температуры:

точки — экспериментальные данные [3] (1 — $T = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 — $T = -8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 — $T = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 — $T = -28\text{ }^{\circ}\text{C}$), линии — результаты расчетов, полученные в данной работе (1 — $T = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 43,6\text{ мкс}$, 2 — $T = -8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 70,7\text{ мкс}$, 3 — $T = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 51\text{ мкс}$, 4 — $T = -28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 91,1\text{ мкс}$)

наличии достаточных данных и количественно) оценить влияние массовой доли льда и температуры на статическую и динамическую прочность мерзлого песчаного грунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li H.-P., Zhu Y.-L., Pan W. D. Uniaxial compressive strength of the saturated frozen silt at constant strain rates // J. Glaciology Geocryology. 2002. V. 24, N 5. P. 659–664.
2. Yu W., Zhu Y., Zhang J., He P. Studied on using a preboring pressuremeter test to determine the mechanical properties of frozen soils // J. Glaciology Geocryology. 2000. V. 22, N 4. P. 366–371.
3. Xie Q., Zhu Z., Kang G. Dynamic stress-strain behavior of frozen soil: Experiments and modeling // Cold Regions Sci. Technol. 2014. V. 106/107. P. 153–160.
4. Ma Y., Zhu Z.-W., Ma W., Ning J.-G. Characteristics of stress-strain curves and convergence phenomenon of frozen soil under dynamic loading // Engng Mech. 2015. V. 32, N 10. P. 52–59.
5. Zhang Q. B., Zhao J. Determination of mechanical properties and full-field strain measurements of rock material under dynamic loads // Intern. J. Rock Mech. Mining Sci. 2013. V. 60. P. 423–439.
6. Alam M. S., Chakraborty T., Matsagar V., et al. Characterization of Kota sandstone under different strain rates in uniaxial loading // Geotech. Geological Engng. 2015. V. 33, N 1. P. 143–152.
7. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of the 7th Intern. symp. on ballistics, Hague (Netherlands), Apr. 19–21, 1983. Hague: S. n., 1983. P. 541–547.

8. **Wang L. L., Shi S. Q.** ZWT nonlinear viscoelastic constitutive relation of thermal research and application // J. Ningbo Univ. 2000. V. 13, N B12. P. 141–149.
9. **Петров Ю. В.** О “квантовой” природе динамического разрушения твердых тел // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321, № 1. С. 66–68.
10. **Gruzdov A., Sitnikova E., Morozov N., Petrov Y.** Thermal effect in dynamic yielding and fracture of metals and alloys // Math. Mech. Solids. 2009. V. 14. P. 72–87.
11. **Petrov Y. V., Gruzdov A. A., Bratov V. A.** Structural-temporal theory of fracture as a multiscale process // Phys. Mesomech. 2012. V. 15, N 3/4. P. 232–237.
12. **Брагов А. М., Грушевский Г. М., Ломунов А. К. и др.** Исследование динамической сжимаемости сухого песка в диапазоне амплитуд нагрузок до нескольких гигапаскалей // Прикл. пробл. прочности. 2006. Т. 68. С. 221–228.
13. **Брагов А. М., Константинов А. Ю., Ломунов А. К.** Способ определения динамического коэффициента трения на основе модифицированного метода Кольского // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, вып. 10. С. 69–72.
14. **Bragov A., Lomunov A.** Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method // Intern. J. Impact Engng. 1995. V. 16, iss. 2. P. 321–330.
15. **Bragov A., Igumnov L., Konstantinov A., et al.** Investigation of strength properties of freshwater ice // EPJ Web Conf. 2015. V. 94. 01070.

*Поступила в редакцию 7/VIII 2018 г.,
после доработки — 27/IX 2018 г.
Принята к публикации 29/IX 2018 г.*
