

УДК 624.131:551.345

*Поступила в редакцию 10.11.2023
Received 10.11.2023*

РАЗВИТИЕ ПОЛОЖЕНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ МЕРЗЛЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД И ГОРНЫХ ПОРОД

Г. П. Бровка

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье приведены математические модели для расчета температуры и теплоты фазового перехода связанной воды в лед, а также потоков влаги и водорастворимых соединений под воздействием градиентов температуры, гидростатического давления и концентрации водорастворимых соединений в промерзающих дисперсных средах. Показано, что определяющим фактором прочности засоленных горных пород при отрицательных температурах является содержание соответствующего количества незамерзшей воды независимо от того, чем оно обусловлено: температурой, концентрацией солей в поровом растворе или их совместным влиянием. Приведены принципы использования равновесной термодинамики, термодинамики необратимых процессов и теории дальнедействующих поверхностных сил для расчетов формирования прочностных свойств мерзлых пород.

Ключевые слова: физико-химическая механика мерзлых пород; фазовые переходы воды в лед; морозное пучение; прочность мерзлых засоленных пород.

Для цитирования. Бровка Г. П. Развитие положений физико-химической механики мерзлых дисперсных сред и горных пород // Природопользование. – 2023. – № 2. – 118–129.

DEVELOPMENT OF PHYSICAL AND CHEMICAL MECHANICS OF FROZEN DISPERSES MEDIA AND ROCKS

G. P. Brovka

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents mathematical models for calculating of the temperature and heat of the phase transition of bound water into ice, as well as the flow of moisture and water-soluble compounds under the influence of temperature gradients, hydrostatic pressure and the concentration of water-soluble compounds in freezing dispersed media. It has been shown that the determining factor in the strength of saline rocks at negative temperatures is the content of the corresponding amount of unfrozen water, regardless of what causes it; temperature, salt concentration in the pore solution, or their combined influence. The principles of the use of equilibrium thermodynamics, the thermodynamics of irreversible processes and long-range surface forces for calculating of the formation of the strength properties of frozen rocks are presented.

Keywords: physical and chemical mechanics of frozen rocks; phase transitions of water into ice; frost heaving; strength of frozen saline rocks.

For citation. Brovka G. P. Development of physical and chemical mechanics of frozen disperses media and rocks. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 118–129.

Введение. Классическое определение физико-химической механики дисперсных систем, в свое время основанной П. А. Ребиндером, можно представить как раздел коллоидной химии, изучающий поверхностные явления в процессах структурообразования, деформации и разрушения дисперсных систем. При этом основное внимание уделяется процессам смачивания и сорбции на поверхностях раздела фаз, установления и прочности контактов межфазного взаимодействия в зависимости от компонентного состава и дисперсности исследуемых материалов.

На основании работ, выполненных в Институте природопользования НАН Беларуси и Тверском техническом университете (г. Тверь, Россия), под руководством известного ученого академика И. И. Лиштвана создана научная школа «Физико-химия и физико-химическая механика природных дисперсных систем». На ее становление оказали большое влияние работы ученых с мировым именем: А. В. Думанского, П. А. Ребиндера, Б. В. Дерягина, Ф. Д. Овчаренко, М. П. Воларовича, А. В. Лыкова,

И. В. Чураева, С. С. Корчунова, Н. И. Гамаюнова. Коллоидно-химические исследования развились в связи с задачами практики по созданию новых технологий добычи и переработки торфа и сапропеля.

Научным центром исследований в Институте природопользования в области физико-химической механики дисперсных систем стала созданная в 1974 г. И. И. Лиштваном лаборатория физико-химической механики природных дисперсных систем (далее – лаборатория ФХМПДС).

Эти исследования не ограничились только торфяной тематикой. В них были вовлечены и другие природные дисперсные системы, такие как бурый уголь, горючие сланцы, заторфованные грунты и почвы, а также горные породы из участков проходки шахтных стволов с использованием искусственного замораживания. Кроме традиционных подходов, характерных для классической физико-химической механики дисперсных систем, в лаборатории ФХМПДС с активным участием автора начали развиваться исследования, связанные с процессами тепло- и массопереноса, формированию структуры и деформационно-прочностных характеристик промерзающих грунтов и горных пород.

Выполненные исследования показали, что процессы формирования и преобразования структуры в дисперсных средах, как правило, происходят в неоднородных температурных и влажностных полях, а также с изменением концентрации водорастворимых соединений. При этом в дисперсной среде за счет неоднородных температурных и влажностных полей создаются градиенты гидростатического давления и механические напряжения, выполняющие функции, аналогичные внешним механическим воздействиям на локальные физико-химические процессы.

Особенно явно прослеживается влияние температурных полей на процессы деформации и формирования прочности в промерзающих грунтах и горных породах. В таких процессах проявляются определенные особенности, не характерные для области положительной температуры. Это позволяет отнести такие исследования к области физико-химической механики мерзлых пород. Указанное направление начало развиваться во второй половине XX в. и включает изучение процессов формирования прочности, деформации и разрушения промерзающих, мерзлых и оттаивающих грунтов и горных пород с учетом физикохимии поверхностных явлений в дисперсных средах, процессов тепло- и массопереноса, механики горных пород.

В свое время Б. А. Савельевым были сформулированы [1] основные направления физико-химической механики мерзлых пород:

- изучение влияния физико-химических факторов совместно с механическими и термическими воздействиями на формирование и изменение дисперсной системы (размер частиц, пористость), а также активности внутренних поверхностей раздела фаз;
- определение воздействия физико-химических факторов на формирование физического и химического состава, строение и заданные свойства породы;
- разработка новых путей упрочнения и ослабления мерзлых пород на основе физико-химической теории прочности.

Методологический подход. При развитии положений физико-химической механики мерзлых пород можно руководствоваться методологией термодинамики необратимых процессов [2, 3], позволяющей выделить термодинамические движущие силы переноса, сформулировать феноменологические уравнения и затем на основании законов сохранения энергии, массы и импульса сформировать систему дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса, в которых в качестве постоянных коэффициентов фигурируют характеристики материалов, определяемые экспериментально. В этом направлении, прежде всего, необходимо отметить теорию Онзагера, дающую возможность выявить взаимное влияние характеристик переноса различных движущих сил, так называемые перекрестные эффекты.

Несмотря на неоспоримые достижения теории переноса Онзагера, следует указать на ее определенную ограниченность и необходимость дальнейшего развития теоретических положений тепло- и массопереноса во влажных дисперсных средах. Ограниченность теории Онзагера заключается в формализованном подходе к выбору потоков и движущих сил переноса. Дальнейшее развитие теории переноса в дисперсных средах требует учета конкретных механизмов переноса.

Большое влияние на теорию процессов влагопереноса и структурообразования в дисперсных средах оказала теория расклинивающего давления Б. В. Дерягина и его последователей [4–8]. Теоретически и экспериментально было доказано наличие в тонких пленках жидкости, гидравлически связанной с объемной фазой избыточного давления, названного расклинивающим. Расклинивающее давление $\pi(h)$ можно трактовать как разность гидростатических давлений в тонкой пленке и в объемной фазе.

В работах Б. В. Дерягина, Н. В. Чураева, В. М. Муллера развиты теоретические положения действующих поверхностных сил и процессов переноса в капиллярно-пористых материалах [8–11]. Путем сочетания методов физической химии поверхностных явлений и неравновесной термодинамики в этих работах получены кинетические уравнения, описывающие процессы капиллярного осмоса, диф-

фузиофореза, термоосмоса, термофореза и термокристаллизационного течения незамерзающих прослоек при отрицательных температурах. Все указанные явления могут иметь место в природных дисперсных материалах. Однако они не исчерпывают всей сложности процессов тепло- и массопереноса в грунтах и горных породах. К тому же, теория поверхностных сил в настоящее время не дает возможности с достаточной степенью точности для конкретных дисперсных сред определить дальнodelействующие поверхностные силы и оценить их влияние на процессы тепло- и массопереноса, формирование деформационно-прочностного состояния мерзлых грунтов и горных пород. Поэтому конкретные проявления дальнodelействующих поверхностных сил можно оценивать с помощью равновесной термодинамики и учета гидродинамики тонких слоев жидкости. Как показано Н. В. Чураевым [11], для описания течения в тонких пленках и прослойках с учетом дальнodelействующих поверхностных сил или расклинивающего давления можно использовать законы гидродинамики, как и для объемной фазы жидкости. Гидродинамика тонких слоев жидкости позволяет на основании данных о структуре материала и толщине водных прослоек оценить коэффициенты переноса, связывающие потоки и движущие силы (коэффициенты гидродинамической проводимости).

В работах, выполненных в лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем, развивается подход, основанный на использовании локального термодинамического равновесия в тонких пленках воды в направлении, перпендикулярном к поверхности твердой дисперсной фазы, и расчета распределения гидростатического давления в различных направлениях как основной движущей силы влагопереноса.

Основные положения фазового равновесия и гидродинамики тонких слоев жидкости в мерзлых дисперсных средах можно сформулировать следующим образом:

1. Процессы тепломассопереноса во влажных дисперсных средах необходимо рассматривать с учетом непрерывного изменения термодинамических характеристик тонких слоев воды в направлении нормали к поверхности твердой дисперсной фазы.

$$\mu = \varepsilon - sT + pV_w = \varepsilon_0 - s_0T - p_0V_w, \quad (1)$$

$$p - p_0 = [(\varepsilon_0 - \varepsilon) - (s - s_0)T]/V_w = (f_0 - f)/V_w, \quad (2)$$

где μ – химический потенциал связанной воды; ε , s , p – локальные значения внутренней энергии, энтропии и гидростатического давления в тонкой пленке воды соответственно; ε_0 , s_0 , p_0 – значения внутренней энергии, энтропии и гидростатического давления в объемной фазе воды соответственно; T – абсолютная температура; V_w – удельный объем воды; f_0 – свободная энергия Гельмгольца в объемной фазе воды; f – свободная энергия Гельмгольца в тонкой пленке.

2. Следует строго разграничивать конвективные и диффузионные потоки вследствие различия их движущих сил и механизмов переноса. Потоки переносимых субстанций под действием градиентов гидростатического давления и поверхностных дальнodelействующих сил следует считать конвективными и для них можно использовать законы гидродинамики с учетом специфики тонких слоев жидкости. К диффузионным потокам следует относить только потоки, реализуемые за счет молекулярного переноса. Это, прежде всего, потоки за счет градиента концентрации и термодиффузионные потоки.

3. В основе расчета процессов переноса при отрицательных температурах лежит предположение о равенстве химического потенциала незамерзшей воды химическому потенциалу льда, обусловленного локальной температурой. Конвективный поток влаги в мерзлой среде определяется градиентами температуры, гидростатического давления и концентрации водорастворимых соединений в жидкой фазе. Диффузионный поток определяется в основном градиентами водорастворимых соединений.

4. Вблизи поверхности твердой дисперсной фазы гидростатическое давление в соответствии с выражением (2) может достигать значительной величины (10–100 МПа), и это необходимо учитывать в распределении водорастворимых соединений в тонких слоях воды, в частности, в тонких порах мембран, где свободная энергия Гемгольца f воды имеет сравнительно большие по абсолютной величине отрицательные значения, и вследствие этого повышенное гидростатическое давление будет препятствовать проникновению через поры мембраны водорастворимых соединений, имеющих большие радиусы гидратации.

5. Для информационного обеспечения математических моделей переноса в тонких слоях жидкости необходимо получать информацию о термодинамических характеристиках связанной воды в дисперсных средах (внутренней энергии, энтропии, химического потенциала) экспериментальными и расчетными методами, используя статическую термодинамику, молекулярную динамику и теорию дальнodelействующих поверхностных сил.

6. Для контроля и полноты математических моделей переноса в тонких слоях воды в дисперсных средах наряду с развиваемым подходом, характеризуемым гидродинамикой тонких слоев жидкости с учетом дальнедействующих поверхностных сил, рекомендуется использовать теорию Онзагера с конретизацией движущих сил и механизмов переноса в соответствии с их физическими аналогами.

С помощью развитого подхода получены новые научно-методические результаты, которые представлены ниже.

Фазовое равновесие воды в грунтах и горных породах при отрицательной температуре. Разработана термодинамическая модель фазового равновесия воды в органогенных природных дисперсных системах, основанная на учете энергетической и энтропийной составляющих химического потенциала влаги, а также на предположении о том, что при промерзании происходит частичная дегидратация агрегатов органоминерального скелета дисперсной системы и ледяные включения формируются в межагрегатном пространстве. На основании термодинамической модели получены формулы для расчета температуры и теплоты фазового перехода различных категорий влаги в лед с учетом их термодинамических параметров, определенных при положительных температурах.

В общем случае, когда имеет место энергетическое и энтропийное связывание воды в дисперсной системе, температуру T_Φ и теплоту Q_Φ фазовых переходов вода – лед, соответствующих влагосодержанию W , необходимо рассчитывать по формулам

$$T_\Phi(W) = \left[L + \Delta\mu - \left(\frac{\partial \Delta\mu}{\partial T} \right)_w \right] / \frac{L}{T_0} - \left(\frac{\partial \Delta\mu}{\partial T} \right)_w, \quad (3)$$

$$Q_\Phi = L - (C_v - C_l)(T_0 - T_\Phi) + \Delta\mu - \left(\frac{\partial \Delta\mu}{\partial T} \right)_w T_\Phi, \quad (4)$$

где L – теплота фазового перехода вода – лед в стандартных условиях, Дж/кг; C_v и C_l – удельные теплоемкости воды и льда соответственно, Дж/кг·К; T_0 – стандартная температура фазового перехода (273 К).

Данные формулы достаточно универсальны, они позволяют рассчитать температуру и теплоту фазовых переходов различных категорий связанной воды от чисто энергетической связи воды до чисто энтропийной связи, которая может иметь место при наличии в ней водорастворимых веществ. В температурном диапазоне 0...–250 °С отличие теплоты фазового перехода от L может превышать 10 %, и это необходимо учитывать в калориметрических опытах по определению количества незамерзшей воды.

Понижение температуры фазового перехода категории влаги, соответствующей ее количеству на твердую фазу материала W_n , и содержащую водорастворимые соединения с концентрацией C_m/W_n , будет определяться уравнением, полученным на предположении о аддитивности матричного и осмотического потенциалов незамерзшей воды в породе:

$$\Delta T_\Phi = f_1(W_n) + T_0 \left(\frac{RT}{L} \right) v_i \frac{M_v C_m}{M_c W_n}, \quad (5)$$

где $f_1(W_n)$ – функция зависимости понижения температуры фазовых переходов за счет матричного потенциала без наличия водорастворимых соединений; R – универсальная газовая постоянная; M_v и M_c – молекулярные массы воды и водорастворимого соединения соответственно; v_i – число ионов, на которые диссоциирует молекула водорастворимого соединения; C_m – концентрации водорастворимых соединений на твердую фазу материала; W_n – количество незамерзшей воды.

Для более точной оценки температуры фазового перехода связанной воды в лед необходимо учесть наличие в дисперсионной среде так называемого нерастворяющего объема для категории сильно связанной воды в тонкодисперсных материалах [12, 13]. В работе [14] на конкретном примере показано, что гидростатическое давление вблизи поверхности твердой фазы дисперсных сред может достигать значений порядка 109 Н/м². Это снижает концентрацию гидратированных ионов, имеющих больший объем, чем объем молекул воды вблизи поверхностей твердой фазы дисперсных сред. При учете нерастворяющего объема количество незамерзшей воды W_n необходимо заменить на $(W_n - W_{nr})$.

С помощью предложенного подхода можно оценить зависимость количества незамерзшей воды от температуры по значению температуры начала замерзания засоленной породы и зависимости количества незамерзшей воды от температуры для соответствующей незасоленной породы. Для этого определяют разность температуры начала замерзания засоленной и незасоленной пород $\Delta t_{зс}$, на кривой зависимости количества незамерзшей воды от температуры в незасоленной породе определяют

значение температуры, соответствующее определенному количеству незамерзшей воды $t_{ho}(W_H)$. Затем рассчитывают температуру, соответствующую определенному количеству незамерзшей воды в засоленной породе:

$$t_{hc}(W_H) = t_{ho}(W_H) + \Delta t_{sc} \left(\frac{W - W_{nr}}{W_H - W_{nr}} \right). \quad (6)$$

Значения параметра, соответствующего количеству влаги нерастворяющего объема W_{nr} , по предварительным оценкам составляют от 0,005 до 0,025 кг/кг. При этом минимальное количество нерастворяющего объема соответствует песчаным породам, а максимальное количество – глинистым.

О правомерности использования такого подхода свидетельствует сравнение (рис. 1) расчетных и экспериментальных данных по зависимости количества незамерзшей воды от температуры образцов засоленной аргиллитоподобной глины, полученных в лаборатории ФХМПДС [15].

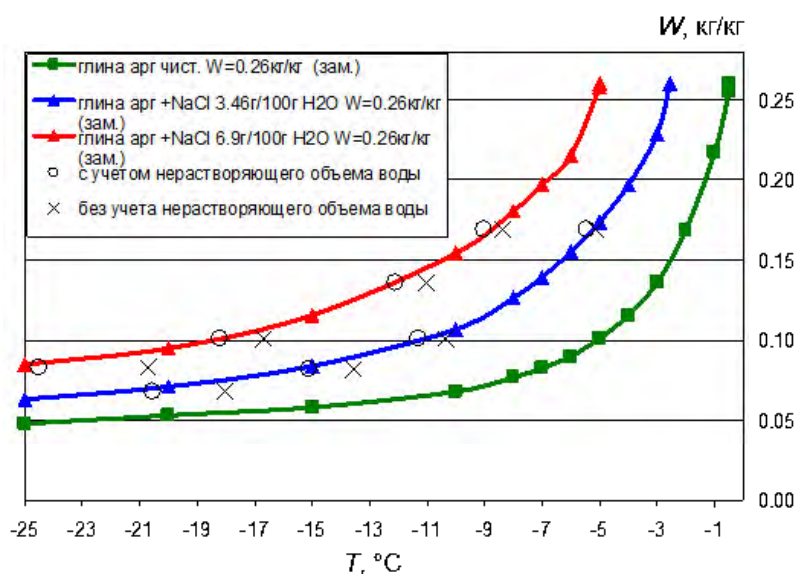


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные данные по зависимости количества незамерзшей воды в глине аргиллитоподобной при влагосодержании 0,26 кг/кг и различной степени засоления:

- – расчет с учетом нерастворяющего объема воды ($W_{nr} = 0,015$ кг/кг);
- × – расчет без учета нерастворяющего объема воды

Fig. 1. Experimental and calculated data on the ratio of intact water in argillite-like clay with a moisture content of 0.26 kg/kg and a different salinization degree:

- – calculation with an insoluble water volume ($W_{nr} = 0.015$ kg/kg);
- × – calculation excluding the insoluble water volume

Процессы переноса в грунтах и горных породах при отрицательной температуре.

Несмотря на достаточно большой объем публикаций по вопросам переноса влаги при промерзании грунтов и почв, в настоящее время остаются дискуссионными вопросы переноса влаги, водорастворимых соединений и формирования сил морозного пучения в промерзающих породах. Б. В. Дерягиным и Н. В. Чураевым [10] на основании термодинамики необратимых процессов было показано, что основными движущими силами влагопереноса по незамерзающим прослойкам воды являются градиенты температуры и гидростатического давления согласно уравнению

$$q_s = -\alpha \rho_s \left(\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\rho_n L}{T} \frac{\partial T}{\partial X} \right), \quad (7)$$

где α – коэффициент гидродинамической проводимости незамерзающих прослоек; ρ_v и ρ_n – плотности воды и льда соответственно; P – гидростатическое давление; L – удельная теплота фазового перехода вода – лед; X – координата.

С помощью этого уравнения можно рассчитать и максимальное гидростатическое давление (давление пучения) в точке с температурой T , при котором прекращается миграция влаги. Однако в общих случаях в промерзающих породах на влагоперенос и давление пучения могут оказывать влияние передвижения включений льда и частиц породы в направлении, противоположном градиенту гидростатического давления, и наличие водорастворимых соединений.

Следует отметить, что аналогичное уравнение можно получить с учетом локального термодинамического равновесия, используя уравнения (1) и (2), линейного распределения температуры вдоль поверхности твердой фазы и линейного понижения химического потенциала льда $\Delta\mu_{\text{л}}$ с понижением температуры в соответствии с зависимостью

$$\Delta\mu_{\text{л}} = -L \frac{T_0 - T}{T_0}. \quad (8)$$

При наличии градиента гидростатического давления и с учетом формулы (7) миграционный поток в мерзлой зоне можно выразить уравнением

$$q_w = -a_w(W_{\text{н}}) \rho_{\text{ск}} \frac{dW_{\text{н}}}{dT} \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{T_0}{\rho_{\text{л}} L} \frac{\partial P}{\partial x} \right), \quad (9)$$

где $a_w(W_{\text{н}})$ – коэффициент диффузии незамерзшей воды.

Для простоты анализа полагается, что льдонакопление в мерзлой зоне происходит при температуре $T_{\text{л}}$, при которой гидростатическое давление, обусловленное перепадом температуры, превышает локальную структурную прочность материала $P_{\text{ск}}$. Распределение температуры в мерзлой зоне полагается линейным. При условии постоянства потока влаги в диапазоне от температуры начала заморозки T_{ξ} до температуры льдовыделения $T_{\text{л}}$ формула для выражения миграционного потока в мерзлой зоне будет иметь вид

$$q_w = - \left[\frac{(T_{\xi} - T_{\text{л}}) - (P_{\text{ск}} - P_0) \frac{T_0}{\rho_{\text{л}} L}}{\int_{T_{\xi}}^{T_{\text{л}}} \left[a_w(W_{\text{н}}) \frac{dW_{\text{н}}}{dT} \rho_{\text{ск}} \right] dT} \right] \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (10)$$

Выражение в скобках можно представить как коэффициент пропорциональности $K_{\text{м}}$ между градиентом температуры и потоком влаги из талой зоны в мерзлую, который можно назвать коэффициентом термовлагопроводности мерзлой зоны:

$$K_{\text{м}} = - \left[\frac{(T_{\xi} - T_{\text{л}}) - (P_{\text{ск}} - P_0) \frac{T_0}{\rho_{\text{л}} L}}{\int_{T_{\xi}}^{T_{\text{л}}} \left[a_w(W_{\text{н}}) \frac{dW_{\text{н}}}{dT} \rho_{\text{ск}} \right] dT} \right]. \quad (11)$$

Таким образом, миграционный поток из талой зоны в мерзлую при промерзании горной породы отсутствию внешних механических воздействий можно выразить формулой

$$q_w = -K_{\text{м}}(W_{x=\xi+0}) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (12)$$

где $K_{\text{м}}(W_{x=\xi+0})$ – коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны, являющийся функцией влагосодержания талой зоны на границе с мерзлой.

Это позволяет теоретически обосновать зависимость коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны $K_{\text{м}}$ от количества незамерзшей воды, разности значений температуры на границе промерзания и льдовыделения и прочности структурного сцепления мерзлого грунта.

В монографии автора [16] с помощью данного подхода обоснованы модели хрупкого и вязкого преобразования структуры горных пород при промерзании.

Развивая теорию переноса влаги и формирования градиента гидростатического давления, при наличии водорастворимых соединений в мерзлой породе и с учетом локального термодинамического равновесия по толщине незамерзающей прослойки воды, получена система феноменологических уравнений

$$q_v = -K_{\text{фм}} \left[\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\rho_l L}{T} \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_l R T \sum_i v_i \frac{M_v}{M_{ci}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_{mi}}{W_n} \right) \right] + \sum_i D_{\text{при}} \frac{\rho_v}{\rho_{ci}} \rho_{\text{ск}} W_n \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_{mi}}{W_{n'}} \right), \quad (13)$$

$$q_{ci} = q_v \frac{C_{mi}}{W} - D_{\text{при}} \rho_{\text{ск}} W_n \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_{mi}}{W_{n'}} \right), \quad (14)$$

где ρ_l , ρ_{ci} и $\rho_{\text{ск}}$ – плотность льда, водорастворимого соединения и скелета породы соответственно; W_n – количество незамерзшей воды в породе; $K_{\text{фм}}$ – коэффициент фильтрации мерзлой породы; $D_{\text{при}}$ – коэффициент диффузии водорастворимого соединения в поровом растворе.

Структура уравнения (13) свидетельствует о том, что плотность потока водорастворимых соединений определяется двумя различными механизмами: конвективным и диффузионным. Первый механизм соответствует переносу водорастворимых соединений вместе с потоком жидкости по незамерзающим прослойкам воды, второй – молекулярной диффузией водорастворимых соединений по этим же прослойкам. Движущими силами конвективного переноса являются градиент гидростатического давления, градиент температуры и градиент весовой концентрации водорастворимых соединений. При этом следует отметить, что при наличии водорастворимых соединений различного вида конвективная составляющая для каждого соединения будет определяться суммой градиентов концентраций всех соединений с учетом их диссоциации. Следует отметить, что уравнения (9) и (10) выведены при некоторых упрощениях, предполагающих аддитивность изменения термодинамических характеристик пленок незамерзшей воды от их толщины и наличия в них водорастворимых соединений, соответствующих свойствам идеальных растворов. При отклонении поровых растворов от свойств идеальности в формулах (5), (13) и (14) необходимо использовать криоскопические константы, соответствующие концентрациям конкретных растворов. Использование представленных формул позволяет в первом приближении выявить характер процессов влагопереноса, формирования напряженно-деформированного состояния и преобразования структуры в промерзающих горных породах.

Экспериментальные исследования фазового равновесия воды и процессов переноса в грунтах и горных породах при отрицательной температуре. Разработанные теоретические положения миграции влаги и преобразования структуры при промерзании дисперсных систем с легко деформируемым скелетом, учитывающие влияние прочностных и реологических характеристик скелета породы, геометрию порового пространства и наличие водорастворимых соединений, нашли подтверждение в выполненных соответствующих экспериментальных исследованиях. Было экспериментально установлено, что поток влаги из талой зоны в мерзлую при постоянной внешней нагрузке пропорционален градиенту температуры в мерзлой зоне (рис. 2). Это дает возможность ввести и обосновать феноменологический коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны K_m , численно равный плотности миграционного потока влаги при единичном градиенте температуры в мерзлой зоне как основной характеристики влагопереноса при промерзании.

Использование коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны позволило сформулировать задачу промерзания влажного грунта с учетом перераспределения влаги и морозного пучения [17].

Экспериментально установлено следующее:

- максимальные гидростатические давления при промерзании развиваются в системах, имеющих жесткую недеформируемую матрицу и тонкодисперсный наполнитель;
- наличие в поровом растворе водорастворимых соединений в промерзающей системе снижает миграцию влаги и развиваемые в мерзлой зоне гидростатические давления в той мере, в какой эти соединения понижают осмотический потенциал влаги, независимо от природы этих соединений.

Установленные закономерности можно использовать для регулирования процессов влагопереноса и пучения в промерзающих дисперсных средах.

Для выявления аналитической зависимости условно-мгновенной прочности на одноосное сжатие от количества незамерзшей воды глины аргиллитоподобной сотрудниками лаборатории ФХМПДС были получены данные о зависимости количества незамерзшей воды от температуры для образцов

с различной степенью засоленности и проведена статистическая обработка экспериментальных результатов с получением параметров указанной зависимости [18]. При этом установлено, что наиболее адекватно можно аппроксимировать эту зависимость с помощью степенной функции вида

$$P = \frac{A}{W_n}, \quad (15)$$

где P – прочность, МПа; A – постоянная, зависящая от общего влагосодержания глины аргиллитоподобной, МПа; W_n – количество незамерзшей воды, кг/кг; n – показатель степени.

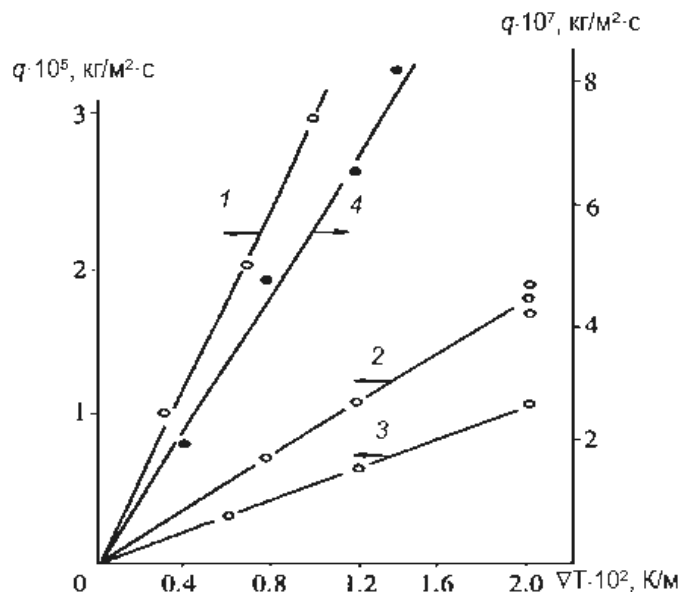


Рис. 2. Зависимость миграционного потока от градиента температуры в мерзлой зоне низинного торфа:
 1 – $W = 3,02$ кг/кг, $\rho_{sk} = 160$ кг/м³; 2 – $W = 2,3$ кг/кг, $\rho_{sk} = 175$ кг/м³; 3 – $W = 2,3$ кг/кг, $\rho_{sk} = 175$ кг/м³;
 4 – кварцевые волокна

Fig. 2. Migration flow depends on the temperature gradient in the frozen zone of the lowland peat:
 1 – $W = 3.02$ kg/kg, $\rho_{sk} = 160$ kg/m³; 2 – $W = 2.3$ kg/kg, $\rho_{sk} = 175$ kg/m³; 3 – $W = 2.3$ kg/kg, $\rho_{sk} = 175$ kg/m³;
 4 – quartz fibers

На рис. 3 представлена анализируемая зависимость, показанная сплошной линией, и экспериментальные точки, полученные при различных параметрах засоления и температуры, для глины аргиллитоподобной при влагосодержании 0,26 кг/кг.

Аналогичные зависимости получены для глины аргиллитоподобной при значениях влагосодержания 0,17 кг/кг ($n = 1,76$; $A = 0,039$ МПа) и 0,21 кг/кг ($n = 1,35$; $A = 0,213$ МПа).

Ранее в лаборатории ФХМПДС было также установлено [19, 20], что сопротивление сдвигу засоленного суглинка, определенного при различной температуре и различной степени засоленности, но с равным количеством незамерзшей воды, практически совпадают. При этом зависимость сопротивления сдвигу от количества незамерзшей воды удовлетворительно аппроксимируется зависимостью такого же типа, как и для аргиллитоподобной глины с показателем степени, равным 3, при значении постоянной $A = 3,6 \cdot 10^2$ Па. Эти данные представлены на рис. 4.

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований и их анализа установлено, что определяющим фактором прочности горных пород при отрицательных температурах является содержание соответствующего количества незамерзшей воды вне зависимости от того, чем оно обусловлено: температурой, концентрацией солей в поровом растворе или их совместным влиянием. Такой подход позволяет оптимизировать многофакторные экспериментальные исследования прочности на одноосное сжатие мерзлых глинистых пород, уменьшая трудоемкость проводимых исследований без снижения их точности и достоверности.

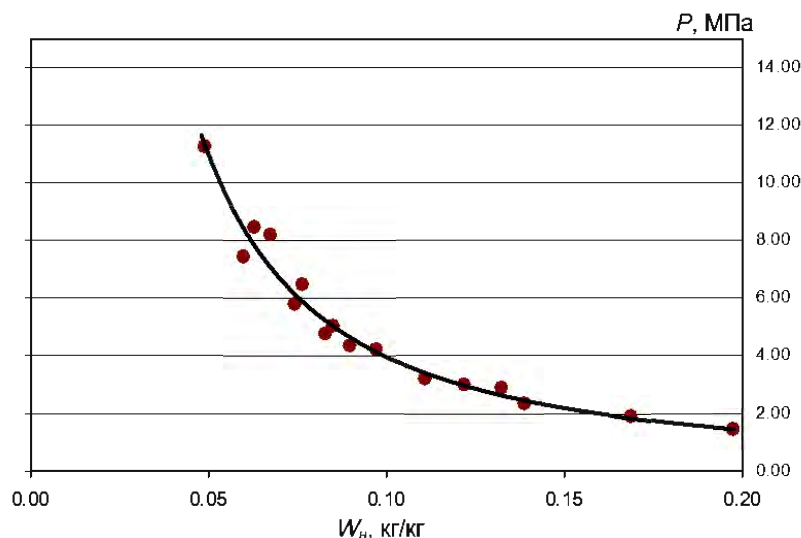


Рис. 3. Аппроксимация зависимости условно-мгновенной прочности на одноосное сжатие от количества незамерзшей воды для глины аргиллитоподобной при влагосодержании 0,26 кг/кг ($n = 1,47$; $A = 0,134$ МПа)

Fig. 3. Approximation of the dependence of the conditional instantaneous strength on one-axis compression on the amount of frozen water for argillite-like clay with a moisture content of 0.26 kg/kg ($n = 1.47$; $A = 0.134$ MPa)

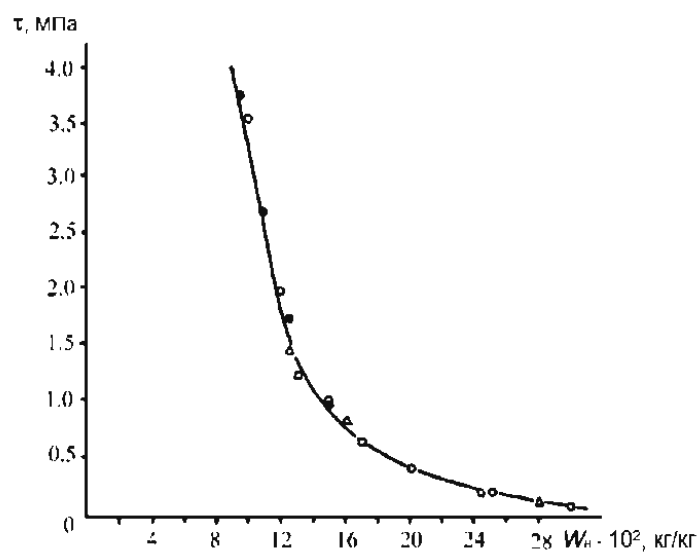


Рис. 4. Зависимость сопротивления сдвигу τ мерзлого суглинка от содержания незамерзшей воды:

● △ □ – экспериментальные данные для образцов с различной исходной концентрацией

порового раствора; ○ – расчетные данные по зависимости; $\tau = \frac{A}{W_n^3}$

Fig. 4. Dependence of the shear resistance of τ freezing loam on the content of frozen water:

● △ □ – experimental data for samples with different reference concentrations pore solution;

○ – calculated dependency data; $\tau = \frac{A}{W_n^3}$

Направления использования результатов исследования. Одним из основных направлений использования новых полученных научно-методических результатов является разработка обоснования проектов проходки шахтных стволов калийных рудников в сложных гидрогеологических условиях с применением искусственного замораживания массива горных пород в районе проходки. Необходимо отметить, что проходка шахтных стволов калийных рудников в сложных гидрогеологических условиях, как правило, осуществляется с применением искусственного замораживания. При этом расходуется значительное количество энергетических ресурсов на обеспечение температурных режимов, используются достаточно дорогостоящие материалы и оборудование. Недостаточно точный и достоверный прогноз температурного режима и прочностных свойств мерзлых пород не позволяет в полной мере минимизировать экономические затраты на обеспечение режимов искусственного замораживания горных пород без снижения рисков безаварийных ситуаций при проходке шахтных стволов.

В указанном направлении за последние годы лабораторией ФХМПДС выполнены НИР для обоснования проектов строительства девяти калийных рудников: в Беларуси – 5, России – 2, Туркменистане – 1, Таиланде – 1.

На базе разработанных математических моделей, конечно-разностных схем и алгоритмов задач теплопереноса с фазовыми переходами создана прикладная программа CRYOS3D для расчета процессов замораживания грунтов на участке заложения шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях. Эта программа позволяет вести расчет и осуществлять визуализацию трехмерных процессов замораживания горных пород с последующей оптимизацией режима замораживания с целью экономии энергетических ресурсов и сокращения времени замораживания (программные средства зарегистрированы в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь и сертифицированы в Российской Федерации).

С 2020 по 2025 г. лаборатория ФХМПДС участвует в выполнении задания «Провести мониторинг энергомассообмена в деятельном слое земной поверхности для оценки изменения температурного режима и развития негативных геокриологических процессов в районе расположения белорусской антарктической станции (Гора Вечерняя)» подпрограммы «Развитие деятельности белорусской антарктической станции», где предполагается использовать наработки лаборатории в области физико-химической механики мерзлых пород.

Перспективы. В настоящее время в целях развития положений физико-химической механики мерзлых пород в лаборатории ФХМПДС создана приборно-методическая база. Это стало возможно благодаря усилиям группы сотрудников, включающей одного доктора технических наук (Г. П. Бровка), одного кандидата технических наук (старший научный сотрудник И. В. Дедюля, занимается приборно-методическим обеспечением исследования деформационно-прочностных характеристик мерзлых грунтов и горных пород), одного кандидата геолого-минералогических наук (старший научный сотрудник А. А. Мурашко, занимается исследованием процессов преобразования структуры при промерзании грунтов и горных пород, обучается в докторантуре и работает над докторской диссертацией на тему «Оценка структурной и деформационно-прочностной устойчивости дисперсных горных пород при естественном промерзании и искусственном замораживании») и трех научных сотрудников, работающих над кандидатскими диссертациями (К. А. Агутин – морозное пучение и процессы переноса влаги и солей при промерзании грунтов и горных пород, А. Г. Бровка – влияние фазового состава воды на теплофизические и прочностные характеристики промерзающих грунтов и горных пород, И. Н. Дорожок – процессы переноса тепла, влаги и водорастворимых сорбируемых соединений в природно-территориальных комплексах). Следует также отметить, что в создании приборно-методической базы по исследованию деформационно-прочностных характеристик мерзлых грунтов и горных пород существенный вклад внес ушедший из жизни в 2022 г. кандидат технических наук И. И. Романенко.

Приборно-методическая база и направления исследований группы указанных сотрудников создают предпосылки для перспективного развития положений физико-химической механики мерзлых пород по вопросам фазового состава воды, переноса тепла, влаги, водорастворимых соединений, морозного пучения, формирования прочностных характеристик и преобразования структуры при промерзании грунтов и горных пород, а также формирования в указанном направлении научной школы.

Заключение. Теоретический анализ и экспериментальные исследования показали, что в основе положений формирования структуры и деформационно-прочностных свойств промерзающих горных пород, являющихся объектом и предметом исследований физико-химической механики указанных пород, лежат, во-первых, в статических условиях – оценка фазового состава воды в мерзлых породах в зависимости от различных факторов, включая термодинамические характеристики связанной воды, температуру, концентрацию водорастворимых соединений и гидростатическое давление, а во-вторых, в динамических условиях – оценка базируется на основных движущих силах формирования свойств мерзлых пород (градиентах температуры, гидростатического давления, концентрации водорастворимых соединений; при этом основная инициатива принадлежит градиенту температуры). При развитии

указанных положений необходимо использовать в тесном взаимодействии комплекс научных направлений, включающий равновесную и неравновесную термодинамику, современную физикохимию поверхностных явлений, учитывающую дальнodelствующиe поверхностные силы, теорию тепло- и массообмена в дисперсных средах и механику горных пород.

Список использованных источников

1. Савельев, Б. А. Физико-химическая механика мерзлых пород / Б. А. Савельев. – М. : Недра, 1989. – 211 с.
2. Де Грот, С. Р. Неравновесная термодинамика / С. Р. Де Грот, П. Мазур. – М. : Мир, 1966. – 456 с.
3. Хаазе, Р. Термодинамика необратимых процессов / Р. Хаазе. – М. : Мир, 1967. – 554 с.
4. Дерягин, Б. В. Смачивающие пленки / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. – М. : Наука, 1984. – 160 с.
5. Дерягин, Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. – М. : Наука, 1985. – 396 с.
6. Чураев, Н. В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н. В. Чураев. – М. : Химия, 1990. – 272 с.
7. Дерягин, Б. В. Упругие свойства пен и тонких пленок / Б. В. Дерягин, Е. В. Обухов // Журн. физ. химии. – 1936. – Т. 7. – С. 207–214.
8. Дерягин, Б. В. Свойства тонких слоев жидкостей и их влияние на взаимодействие твердых поверхностей / Б. В. Дерягин, М. М. Кусаков // Изв. АН СССР. Сер. хим. – 1936. – № 5. – С. 741–753.
9. Дерягин, Б. В. К вопросу об определении понятия и величины расклинивающего давления и его роли в статике и кинетике тонких слоев жидкостей / Б. В. Дерягин // Коллоид. журн. – 1955. – Т. 17, № 3. – С. 207–214.
10. Дерягин, Б. В. Смачивающие пленки / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. – М. : Наука, 1984. – 160 с.
11. Чураев, Н. В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н. В. Чураев. – М. : Химия, 1990. – 272 с.
12. Вода в дисперсных системах / Б. В. Дерягин [и др.]. – М. : Химия, 1989. – 288 с.
13. Злочевская, Р. И. Электроповерхностные явления в глинистых породах / Р. И. Злочевская, В. А. Королев. – М. : Изд-во МГУ, 1988. – 177 с.
14. Тепло- и массоперенос в природных дисперсных системах при промерзании / Г. П. Бровка. – Минск : Наука и техника, 1991. – 191 с.
15. Бровка, А. Г. Влияние концентрации соли в поровом растворе глины аргиллитоподобной на температуру начала замерзания и зависимость количества незамерзшей воды от температуры / А. Г. Бровка, Г. П. Бровка, И. В. Дедюля // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 1. – С. 14–23.
16. Бровка, Г. П. Взаимосвязанные процессы тепло- и массопереноса в природных дисперсных средах / Г. П. Бровка. – Минск : Беларуская навука, 2011. – 363 с.
17. Бровка, Г. П. Математические модели и методы экспериментального исследования для обеспечения моделирования процессов пучения и преобразования структуры при промерзании грунтов / Г. П. Бровка, К. А. Агютин, А. А. Мурашко // Инженерная геология. – 2021. – Т. 16, № 4. – С. 62–71.
18. Бровка, А. Г. Зависимость прочностных характеристик глины аргиллитоподобной от количества незамерзшей воды / А. Г. Бровка, И. В. Дедюля, А. А. Мурашко // Природопользование. – 2021. – № 2. – С. 96–105.
19. Бровка, Г. П. Сопротивление сдвигу мерзлых засоленных грунтов / Г. П. Бровка, И. И. Романенко // Изв. вузов. Горный журн. – 1989. – № 4. – С. 30–33.
20. Бровка, Г. П. Расчеты температурного режима и энергетических затрат при формировании ледопородных ограждений для проходки шахтных стволов / Г. П. Бровка [и др.] // Инженерная геология. – 2021. – Т. 16, № 1. – С. 74–84.

References

1. Savelyev B. A. *Fiziko-himicheskaya mekhanika merzlykh porod* [Physical and chemical mechanics of frozen rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1989, 211 p. (in Russian)
2. De Groot S. R., Mazur P. *Neravnovesnaya termodinamika* [Nonequilibrium thermodynamics]. Moscow, Mir Publ., 1966, 456 p. (in Russian)
3. Khaaze R. *Termodinamika neobratimyykh processov* [Thermodynamics of irreversible processes]. Moscow, Mir Publ., 1967, 554 p. (in Russian)
4. Deryagin B. V., Churayev N. V. *Smachivayushchie plenki* [Wetting films]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 160 p. (in Russian)
5. Deryagin B. V., Churayev N. V., Muller V. M. *Poverhnostnyye sily* [Superficial forces]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 396 p. (in Russian)
6. Churaev N. V. *Fizikohimiya processov massoperenosa v poristyykh telakh* [Physico-chemical processes of massopropenosa in porous bodies]. Moscow, Khimiya Publ., 1990, 272 p. (in Russian)
7. Deryagin B. V., Obukhov E. V. *Uprugie svojstva pen i tonkih plenok* [Elastic properties of foam and thin films]. *J. Physical Chemistry*, 1936, vol. 7, pp. 207–214. (in Russian)

8. Deryagin B. B., Kusakov M. M. *Svoystva tonkih sloev zhidkostej i ih vliyanie na vzaimodejstvie tverdyh poverhnostej* [Properties of thin layers of liquids and their influence on the interaction of solid surfaces]. *Izvestiya of the AS of USSR. Ser. khim.*, 1936, no. 5, pp. 741–753. (in Russian)
9. Deryagin B. V. *K voprosu ob opredelenii ponyatiya i velichiny rasklinivayushchego davleniya i ego roli v statike i kinetike tonkih sloev zhidkostej* [To the question of the definition of the concept and the value of the expanding pressure and its role in the statics and kinetics of thin layers of liquids]. *J. Colloid*, 1955, vol. 17, no. 3, pp. 207–214. (in Russian)
10. Deryagin B. V., Churaev N. V. *Smachivayushchie plenki* [Wetting films]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 160 p. (in Russian)
11. Churaev N. V. *Fizikohimiya processov massoperenosa v poristyyh telakh* [Physico-chemical processes of massopphenos in porous bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 272 p. (in Russian)
12. Deryagin B. V., Churaev N. V., F. D. Ovcharenko [et al.]. *Voda v dispersnyh sistemah* [Water in disperse systems]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 288 p. (in Russian)
13. Zlochevskaya R. I., Korolev V. A. *Elektropoverhnostnye yavleniya v glinistyyh porodah* [Electrosurface phenomena in clay rocks]. Moscow, MSU Publ., 1988, 177 p. (in Russian)
14. Brovka G. P. *Teplo- i massoperenos v prirodnyh dispersnyh sistemah pri promerzanii* [Heat and mass transfer in natural disperse systems during freezing]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1991, 191 p. (in Russian)
15. Brovka A. G., Brovka G. P., Dedulia I. V. *Vliyanie koncentracii soli v porovom rastvore gliny argillitopodobnoy na temperaturu nachala zamerzaniya i zavisimost' kolichestva nezamerzshey vody ot temperatury* [Influence of salt concentration in pore mud argillite-like clay on the temperature of the beginning of freezing and dependence of the amount of frozen water on the temperature]. *Mining Mechanics and Engineering*, 2022, no. 1, pp. 14–23. (in Russian)
16. Brovka G. P. *Vzaimosvyazannyye processy teplo- i massoperenosa v prirodnyh dispersnyh sredah* [Interconnected processes of heat and mass transfer in natural disperse media]. Minsk, Belaruskaya navuka, 2011, 363 p. (in Russian)
17. Brovka G. P., Agutin K. A., Murashko A. A. *Matematicheskie modeli i metody eksperimental'nogo issledovaniya dlya obespecheniya mo-delirovaniya processov pucheniya i preobrazovaniya struktury pri promerzanii gruntov* [Mathematical models and experimental research methods for permutatation and structural transformation in soil freezing]. *Engineering Geology*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 62–71. (in Russian)
18. Brovka A. G., Dedulia I. V., Murashko A. A. *Zavisimost' prochnostnykh harakteristik gliny argillitopodobnoy ot kolichestva nezamerzshey vody* [Dependence of strength characteristics of argillite-like clay on the amount of non-vile water]. *Nature Management*, 2021, no. 2, pp. 96–105. (in Russian)
19. Brovka G. P., Romanenko I. I. *Soprotivlenie sdvigu merzlykh zasolennykh gruntov* [Resistance to displacement of frozen saline soils]. *Izvestiya Vuzov. Gornyy zhurnal = News of Universities. J. Mining*, 1989, no. 4, pp. 30–33. (in Russian)
20. Brovka G. P., Muchko M. V., Agutin K. A., Lipnickij N. A. *Raschety temperaturnogo rezhima i energeticheskikh zatrat pri formirovaniy ledoporodnykh ograzhdenij dlya prohodki shahtnykh stvolov* [Calculations of temperature and energy costs in the formation of ice-propelled fences for mining shafts]. *Engineering Geology*, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 74–84. (in Russian)

Информация об авторе

Бровка Геннадий Петрович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: brovka_gp@tut.by

Information about the author

Gennady P. Brovka – D. Sc. (Technical), Associate Professor, Chief Scientific Associate, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: brovka_gp@tut.by