

Г.А. Янченко

О ВЗАИМОСВЯЗЯХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛОТНОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И ГРУНТОВ С ПОКАЗАТЕЛЯМИ СОДЕРЖАНИЯ В НИХ ВЛАГИ

Выявлены взаимосвязи между объемной и насыпной плотностью мерзлых горных пород и показателями содержания в них влаги, а именно: суммарные массовые и объемные влажность и влагосодержание, суммарные массовые и объемные льдистость и льдосодержание, массовые и объемные влажность и влагосодержание, абсолютные влажность и влагосодержание. Показано, что содержание влаги в мерзлых породах изменяет их плотностные свойства, как напрямую (в породах появляется дополнительная масса), так и косвенно, влияя на разрыхляемость и набухаемость пород, показатели которых определяются экспериментально. Помимо взаимосвязей, имеющих фундаментальный характер, получены приближенные взаимосвязи, позволяющие рассчитывать показатели плотностных свойств у ряда пород при минимуме информации о содержании в них влаги.

Ключевые слова: мерзлая порода, мерзлый грунт, показатели содержания влаги, объемная и насыпная плотность, взаимосвязи.

Плотностные свойства мерзлых горных пород и грунтов (далее мерзлые породы) входят в число наиболее важных физических свойств, оказывающих довольно большое влияние на процесс их разработки. Кроме того, при их использовании наиболее легко осуществить переход от показателей массового содержания влаги (лед и незамерзшая вода) в мерзлых породах к объемным показателям. Последние, согласно [1], часто более удобны и наглядны при анализе взаимозависимостей соответствующих физических свойств мерзлых пород.

На практике экспериментально наиболее легко определяют показатели суммарной массовой влажности

$$W_{\Sigma, м} = \frac{M_{вл}}{M_{м. пор}} = \frac{M_{л} + M_{нев}}{M_{с. пор} + M_{л} + M_{в}}$$

и суммарного массового влагосодержания

$$W_{\Sigma, м} = \frac{M_{вл}}{M_{с.пор}} = \frac{M_{л} + M_{в}}{M_{м.ск}}$$

мерзлых горных пород, где $M_{м.пор}$, $M_{с.пор}$, $M_{вл}$, $M_{л}$, $M_{в}$, $M_{м.ск}$ – масса мерзлой и сухой породы, влаги, льда, незамерзшей воды (далее вода) и минерального скелета, кг, которые связаны между собой следующим образом:

$$W_{\Sigma, м} = \frac{\tau w_{\Sigma, м}}{(1 + \tau w_{\Sigma, м})}. \quad (1)$$

Использование этих показателей позволяет рассматривать мерзлые породы как двухкомпонентные смеси: сухие породы и влага. Поэтому они являются основными при оценке плотностных свойств мерзлых пород. Однако даже в этом случае при выводе взаимосвязей между плотностными свойствами этих пород и показателями содержания влаги в них надо иметь в виду, что увлажнение пород и последующее замерзание в них воды приводят к их набуханию и пучению, что необходимо учитывать использованием коэффициента набухания $K_{наб} = V_{м.пор} / V_{с.пор}$, где $V_{м.пор}$, $V_{с.пор}$ – объем неразрушенных мерзлой и сухой пород, м³, учитывающего увеличение объема породы счет ее увлажнения и последующего замерзания воды. Вывод взаимосвязей между показателями плотностных свойств мерзлых пород и содержания в них влаги в принципе не сложен. Просто в этом случае необходимо четко представлять, что собою характеризуют используемые показатели. Здесь и далее показатели содержания влаги в мерзлых породах и плотностных свойств пород рассматриваются в соответствии с рекомендациями работ [2, 3].

Учитывая это, получим взаимосвязь между объемной плотностью мерзлой породы $\rho_{об, м.пор}$ и $w_{\Sigma, м}$:

$$\begin{aligned} \rho_{об, м.пор} &= \frac{M_{м.пор}}{V_{м.пор}} = \frac{M_{м.ск} + M_{л} + M_{в}}{K_{наб} V_{с.пор}} = \\ &= \frac{1}{K_{наб}} \left(\frac{M_{с.пор}}{V_{с.пор}} + \frac{M_{л} + M_{в}}{V_{с.пор}} \right) = \frac{1}{K_{наб}} \left[\rho_{об} + \frac{(M_{л} + M_{в}) \rho_{об}}{\rho_{об} V_{с.пор}} \right] = \\ &= \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} \left[1 + \frac{(M_{л} + M_{в})}{M_{с.пор}} \right] = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} (1 + \tau w_{\Sigma, м}). \end{aligned}$$

Учитывая (1), получим взаимосвязь между $\rho_{об,м.пор}$ и $W_{\Sigma,м}$:

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} \left(1 + \frac{W_{\Sigma,м}}{1 - W_{\Sigma,м}} \right) = \frac{\rho_{об}}{K_{наб} (1 - W_{\Sigma,м})}.$$

Если в неразрыхленной мерзлой породе все поры, трещины и другие пустоты заполнены влагой (льдом и водой), что имеет место практически всегда, то в этом случае породу можно рассматривать как трехкомпонентную смесь с ненарушенной сплошностью. Тогда, используя показатели массового и объемного составов этой породы, ее $\rho_{об,м.пор}$ можно определить по следующим известным формулам:

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{1}{\frac{m_{д,м.ск}}{\rho} + \frac{m_{д,л}}{\rho_l} + \frac{m_{д,в}}{\rho_v}}; \quad (4)$$

$$\rho_{об, м. пор} = v_{д,м.ск}\rho + v_{д,л}\rho_l + v_{д,в}\rho_v, \quad (5)$$

где $m_{д,м.ск}$, $v_{д,м.ск}$, $m_{д,л}$, $v_{д,л}$, $m_{д,в}$, $v_{д,в}$ – массовые и объемные доли в мерзлой породе соответственно минерального скелета, льда и воды, дол. ед.; ρ , ρ_l , ρ_v – плотность соответственно породы, льда и воды, кг/м³.

Согласно [2], вышеуказанные массовые и объемные доли связаны с показателями содержания влаги в мерзлых породах следующим образом:

$$m_{д, м.ск} = \frac{M_{м.ск}}{M_{м.пор}} = 1 - W_{\Sigma, м} = \frac{1}{1 - \omega_{\Sigma, м}}; \quad m_{д, л} = \frac{M_l}{M_{м.пор}} = I_{\Sigma, м, л};$$

$$m_{д, в} = \frac{M_v}{M_{м.пор}} = W_{м, в}; \quad W_{\Sigma, м} = I_{\Sigma, м, л} + W_{м, в};$$

$$v_{д, м.ск} = \frac{V_{м.ск}}{V_{м.пор}} = \frac{V_{с.пор} (1 - P_{о.л})}{K_{наб} V_{с.пор}} = \frac{1 - P_{о.л}}{K_{наб}};$$

$$v_{д, л} = \frac{V_l}{V_{м.пор}} = I_{\Sigma, об, л}; \quad v_{д, в} = \frac{V_v}{V_{м.пор}} = W_{об, в},$$

где $I_{\Sigma, м, л}$, $I_{\Sigma, об, л}$ – суммарная массовая и объемная льдистость мерзлой породы, то есть льдистость, обусловленная льдом-цементом и сегрегационным льдом (льдом включений), дол. ед.; $W_{м, в}$, $W_{об, в}$ – массовая и объемная влажность мерзлой породы, обусловленная незамерзшей водой, дол. ед.; $V_{м,ск}$, V_l , V_v –

объем минерального скелета, льда и воды, м³; $P_{\text{о.п}}$ — показатель общей пористости породы, дол. ед.

Формулу (5) несколько упростим, что сделает ее более приемлемой для практического использования, при этом учтем что $\rho_{\text{л}} \approx 917 \text{ кг/м}^3$, а $\rho_{\text{в}} \approx 1000 \text{ кг/м}^3$:

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{об. м. пор}} &= \frac{1}{\frac{1 - W_{\Sigma, \text{м}}}{\rho} + \frac{I_{\Sigma, \text{м, л}}}{917} + \frac{W_{\text{м, в}}}{1000}} = \\
 &= \frac{1}{\frac{1 - W_{\Sigma, \text{м}}}{\rho} + 1,1 \cdot 10^{-3} I_{\Sigma, \text{м, л}} + 1 \cdot 10^{-3} W_{\text{м, в}}} = \\
 &= \frac{1}{\frac{1 - W_{\Sigma, \text{м}}}{\rho} + 1,1 \cdot 10^{-3} (W_{\Sigma, \text{м}} - W_{\text{м, в}}) + 1 \cdot 10^{-3} W_{\text{м, в}}} = \quad (6) \\
 &= \frac{1}{\frac{1 - W_{\Sigma, \text{м}}}{\rho} + 1,1 \cdot 10^{-3} W_{\Sigma, \text{м}} - 1 \cdot 10^{-4} W_{\text{м, в}}} \approx \\
 &\approx \frac{1}{\frac{1 - W_{\Sigma, \text{м}}}{\rho} + 1,1 \cdot 10^{-3} W_{\Sigma, \text{м}}} \approx \frac{\rho}{1 + W_{\Sigma, \text{м}} (0,0011\rho - 1)}.
 \end{aligned}$$

где $[\rho_{\text{об. м. пор}}] = \text{кг/м}^3$; $[W_{\Sigma, \text{м}}, I_{\Sigma, \text{м, л}}, W_{\text{м, в}}] = \text{дол. ед.}$

Игнорирование в знаменателе вычитаемого $1 \cdot 10^{-4} W_{\text{м, в}}$ повышает погрешность определения величины $\rho_{\text{об. м. пор}}$ не более чем на 4...5%, так как в связанных породах даже при не очень низких температурах $t \approx -8...-10 \text{ }^\circ\text{C}$ $W_{\text{м, в}} \leq 0,5 W_{\Sigma, \text{м}}$. Покажем это на элементарном примере. Рассмотрим мерзлую связную породу, имеющую $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$, $P_{\text{о.п}} = 0,2$, $K_{\text{наб}} = 1,05$. Предположим, что льдом и водой заполнены равные половины пустотного пространства породы, включающего объемы пор, трещин и других пустот.

Рассмотрим 1 м³ этой породы в сухом состоянии. При ее увлажнении и последующем замерзании воды 1 м³ сухой породы превращается в 1,05 м³ мерзлой породы. При этом объем минерального скелета остается прежним, то есть $V_{\text{м.ск}} = 0,8 \text{ м}^3$, а набухания происходит за счет увеличения объема пустотного пространства. Объем пустотного пространства $V_{\text{п.п}}$ в 1,05 м³ мерзлой породы будет $V_{\text{п.п}} = 1,05 \text{ м}^3 - 0,8 \text{ м}^3 = 0,25 \text{ м}^3$.

Далее примем в первом приближении, что водо-ледяная смесь во всех точках пустотного пространства имеет одинаковый состав, а лед и вода примерно одинаково влияют на изменение объема пустотного пространства. Тогда объемы льда и воды в $1,05 \text{ м}^3$ мерзлой породы будут одинаковы и равны $V_{\text{л}} = V_{\text{в}} = 0,125 \text{ м}^3$. Учитывая полученные результаты, определим объемные доли всех компонентов мерзлой породы:

- минерального скелета

$$v_{\partial, \text{м.ск}} = \frac{V_{\text{м.ск}}}{V_{\text{м.пор}}} = \frac{0,8}{1,05} = 0,762 = \frac{1 - P_{\text{о.п}}}{K_{\text{наб}}} = \frac{0,8}{1,05} = 0,762;$$

- льда и воды

$$v_{\partial, \text{л}} = v_{\partial, \text{в}} = \frac{0,125}{1,05} \approx 0,119.$$

Учитывая объемный состав мерзлой породы, определим по формуле (5) ее объемную плотность:

$$\rho_{\text{об, м.пор}} = 0,762 \cdot 2000 + 0,119 \cdot 917 + 0,119 \cdot 1000 \approx 1524 + 109,1 + 119 \approx 1752 \quad \text{кг/м}^3 \quad (7)$$

Рассматривая $1,0 \text{ м}^3$ мерзлой породы, определим массовые доли минерального скелета, льда и воды в ней. Учитывая найденные выше объемные доли компонентов мерзлой породы, получаем, что в $1,0 \text{ м}^3$ этой породы находится $0,762 \text{ м}^3$ минерального скелета, $0,119 \text{ м}^3$ льда и $0,119 \text{ м}^3$ воды. Следовательно, массовые доли минерального скелета в мерзлой породе будут:

$$m_{\partial, \text{м.ск}} = \frac{M_{\text{м.ск}}}{M_{\text{м.пор}}} = \frac{V_{\text{м.ск}} \rho}{V_{\text{м.пор}} \rho_{\text{об, м.пор}}} = \frac{0,762 \cdot 2000}{1 \cdot 1752} \approx 0,870;$$

$$m_{\partial, \text{л}} = I_{\Sigma, \text{м,л}} = \frac{M_{\text{л}}}{M_{\text{м.пор}}} = \frac{V_{\text{л}} \rho_{\text{л}}}{V_{\text{м.пор}} \rho_{\text{об, м.пор}}} = \frac{0,119 \cdot 917}{1 \cdot 1752} \approx 0,062;$$

$$m_{\partial, \text{в}} = W_{\text{м, в}} = \frac{M_{\text{в}}}{M_{\text{м.пор}}} = \frac{V_{\text{в}} \rho_{\text{в}}}{V_{\text{м.пор}} \rho_{\text{об, м.пор}}} = \frac{0,119 \cdot 1000}{1 \cdot 1752} \approx 0,068.$$

Учитывая, что $W_{\Sigma, \text{м}} = I_{\Sigma, \text{м,л}} + W_{\text{м, в}} = 0,062 + 0,068 = 0,13$, определим теперь величину $\rho_{\text{об, м.пор}}$ по формулам точной (4) и приближенной (6):

$$\rho_{\text{об, м.пор}} = \frac{1}{\frac{1 - W_{\Sigma, \text{м}}}{\rho} + \frac{I_{\Sigma, \text{л}}}{\rho_{\text{л}}} + \frac{W_{\text{м, в}}}{\rho_{\text{в}}}} = \frac{1}{\frac{1 - 0,13}{2000} + \frac{0,062}{917} + \frac{0,068}{1000}} \approx 1752 \quad \text{кг/м}^3$$

$$\rho_{об, м. пор} \approx \frac{\rho}{1 + W_{\Sigma, м} (0,0011\rho - 1)} \approx \frac{2000}{1 + 0,13(0,0011 \cdot 2000 - 1)} \approx 1730 \text{ кг/м}^3$$

Относительная разница между обоими результатами составляет

$$\varepsilon = 100 \left| \frac{1752 - 1730}{0,5(1752 + 1730)} \right| \approx 1,3 \%,$$

что вполне приемлемо для практических расчетов.

Учитывая полученные выше величины $\rho_{об}$, $K_{наб}$, $W_{\Sigma, м}$, определим величину $\rho_{об, м. пор}$ по формуле (3)

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{1600}{1,05(1 - 0,13)} \approx 1751,5 \text{ кг/м}^3$$

Результат практически такой же, как и у формул (4) и (5).

Если в (6) подставить $W_{\Sigma, м}$ из (1), то получим приближенную взаимосвязь между $\rho_{об, м. пор}$ и $W_{\Sigma, м}$ в следующем виде:

$$\rho_{об, м. пор} \approx \frac{(1 + \omega_{\Sigma, м})\rho}{1 + 0,0011\rho\omega_{\Sigma, м}} \quad (8)$$

Учитывая, что:

$$\omega_{\Sigma, м} = \frac{W_{\Sigma, м}}{1 - W_{\Sigma, м}} = \frac{0,13}{1 - 0,13} \approx 0,149,$$

получаем:

$$\rho_{об, м. пор} \approx \frac{(1 + 0,149) \cdot 2000}{1 + 0,0011 \cdot 2000 \cdot 0,149} \approx 1730 \text{ кг/м}^3$$

Таким образом, формулы (6) и (8) дают один и тот же результат.

Учитывая, что [2] $W_{\Sigma, м} = I_{\Sigma, м, л} + W_{м, в}$ и $\omega_{\Sigma, м} = i_{\Sigma, м, л} + \omega_{м, в}$,

где $i_{\Sigma, м, л}$, $w_{м, в}$ — суммарное массовое льдосодержание и массовое влагосодержание за счет незамерзшей воды, дол. ед., представим $\rho_{об, м. пор}$ в формулах (2), (3), (6), (8) как функции $I_{\Sigma, м, л}$, $W_{м, в}$ и $i_{\Sigma, м, л}$, $w_{м, в}$. Например, формула (2) приобретает следующий вид

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} \left(1 + i_{\Sigma, м, л} + \omega_{м, в} \right); \quad (9)$$

а формула (3)

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб} \left(1 - I_{\Sigma, м, л} - W_{м, в} \right)}. \quad (10)$$

Рассмотрим принцип использования этих формул для практических расчетов, используя при этом необходимые численные данные, полученные в вышерассмотренном примере. Принимая во внимание (7), получаем, что в 1 м³ мерзлой породы находится 1524 кг минерального скелета, 109,1 кг льда и 119 кг воды. Учитывая, что масса сухой породы есть масса минерального скелета, определим величины $i_{\Sigma, м, л}$ и $w_{м, в}$:

$$i_{\Sigma, м, л} = \frac{M_{л}}{M_{с. пор}} = \frac{109,1}{1524} \approx 0,071; \quad w_{м, в} = \frac{M_{в}}{M_{с. пор}} = \frac{119}{1524} \approx 0,078$$

Используя эти данные, получаем:

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{1600}{1,05} (1 + 0,071 + 0,078) \approx 1751 \text{ кг/м}^3$$

Величины $I_{\Sigma, м, л}$ и $W_{м, в}$ были определены выше: $I_{\Sigma, м, л} = 0,062$, $W_{м, в} = 0,068$. Используя их, получаем:

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{1600}{1,05(1 - 0,062 - 0,068)} \approx 1752 \text{ кг/м}^3$$

Соответственно формулы (9) и (10) дают одинаковый результат (минимальные расхождения вызваны погрешностями определения исходных величин).

Рассмотрим теперь взаимосвязи между $\rho_{об, м. пор}$ и объемными показателями содержания влаги в мерзлых породах. Учитывая взаимосвязь между $W_{\Sigma, м}$ и $W_{\Sigma, об}$, где $W_{\Sigma, об}$ — суммарная объемная влажность, дол. ед.:

$$\begin{aligned} \frac{W_{\Sigma, м}}{W_{\Sigma, об}} &= \frac{M_{вл}}{M_{м. пор}} : \frac{V_{вл}}{V_{м. пор}} = \frac{M_{вл}}{V_{вл}} \cdot \frac{V_{м. пор}}{M_{м. пор}} = \\ &= \frac{\rho_{вл}}{\rho_{об, м. пор}}, \rightarrow W_{\Sigma, м} = W_{\Sigma, об} \frac{\rho_{вл}}{\rho_{об, м. пор}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $V_{вл}$, $\rho_{вл}$ — объем, м³, и плотность, кг/м³, влаги, то есть смеси льда и воды, в мерзлой породе.

Подставив $W_{\Sigma, м}$ в (3), получаем:

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} \cdot \frac{1}{1 - W_{\Sigma, м}} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} \cdot \frac{1}{1 - W_{\Sigma, об} \frac{\rho_{вл}}{\rho_{об, м. пор}}}, \rightarrow$$

$$\rho_{об, м. пор} - W_{\Sigma, об} \frac{\cancel{\rho_{об, м. пор}} \rho_{вл}}{\cancel{\rho_{об, м. пор}}} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}}, \rightarrow \rho_{об, м. пор} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} + W_{\Sigma, об} \rho_{вл}. \quad (12)$$

Для проверки точности формулы (12), воспользуемся численными данными примера, рассмотренного выше.

Определим сначала величину $\rho_{\text{вл}}$. Рассматривая влагу в мерзлой породе как двухкомпонентную смесь, получим следующие выражения для определения $\rho_{\text{вл}}$ с использованием показателей содержания влаги в мерзлых породах, при этом учтем, что

$$W_{\Sigma, \text{об}} = I_{\Sigma, \text{об}, \text{л}} + W_{\text{об}, \text{г}} \quad \text{и} \quad W_{\Sigma, \text{м}} = I_{\Sigma, \text{м}, \text{л}} + W_{\text{м}, \text{г}} :$$

$$\rho_{\text{вл}} = \rho_{\text{л}} \frac{V_{\text{л}}}{V_{\text{л}} + V_{\text{г}}} + \rho_{\text{г}} \frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{л}} + V_{\text{г}}} = \rho_{\text{л}} \frac{\frac{V_{\text{л}}}{V_{\text{м.пор}}} + \frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{м.пор}}}}{\frac{V_{\text{л}}}{V_{\text{м.пор}}} + \frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{м.пор}}}} + \rho_{\text{г}} \frac{\frac{V_{\text{л}}}{V_{\text{м.пор}}} + \frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{м.пор}}}}{\frac{V_{\text{л}}}{V_{\text{м.пор}}} + \frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{м.пор}}}} =$$

$$= \rho_{\text{л}} \frac{I_{\Sigma, \text{об}, \text{л}}}{I_{\Sigma, \text{об}, \text{л}} + W_{\text{об}, \text{г}}} + \rho_{\text{г}} \frac{W_{\text{об}, \text{г}}}{I_{\Sigma, \text{об}, \text{л}} + W_{\text{об}, \text{г}}} = \rho_{\text{л}} \frac{I_{\Sigma, \text{об}, \text{л}}}{W_{\Sigma, \text{об}}} + \rho_{\text{г}} \frac{W_{\text{об}, \text{г}}}{W_{\Sigma, \text{об}}} ; \quad (13)$$

Аналогично получим формулу для расчета $\rho_{\text{вл}}$ с использованием массовых показателей содержания влаги:

$$\rho_{\text{вл}} = \frac{1}{\frac{M_{\text{л}}}{M_{\text{вл}} \rho_{\text{л}}} + \frac{M_{\text{г}}}{M_{\text{вл}} \rho_{\text{г}}}} = \frac{1}{\left(\frac{M_{\text{л}}}{M_{\text{м.пор}}} \right) \rho_{\text{л}} + \left(\frac{M_{\text{г}}}{M_{\text{м.пор}}} \right) \rho_{\text{г}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{I_{\Sigma, \text{м}, \text{л}}}{W_{\Sigma, \text{м}} \rho_{\text{л}}} + \frac{W_{\text{м}, \text{г}}}{W_{\Sigma, \text{м}} \rho_{\text{г}}}} = \frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{\frac{I_{\Sigma, \text{м}, \text{л}}}{\rho_{\text{л}}} + \frac{W_{\text{м}, \text{г}}}{\rho_{\text{г}}}} . \quad (14)$$

Определим величину $\rho_{\text{вл}}$ по обеим формулам:

$$\rho_{\text{вл}} = \rho_{\text{л}} \frac{I_{\Sigma, \text{об}, \text{л}}}{W_{\Sigma, \text{об}}} + \rho_{\text{г}} \frac{W_{\text{об}, \text{г}}}{W_{\Sigma, \text{об}}} = 917 \frac{0,119}{0,238} + 1000 \frac{0,119}{0,238} \approx 958 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{вл}} = \frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{\frac{I_{\Sigma, \text{м}, \text{л}}}{\rho_{\text{л}}} + \frac{W_{\text{м}, \text{г}}}{\rho_{\text{г}}}} = \frac{0,13}{\frac{0,062}{917} + \frac{0,068}{1000}} \approx 958 \text{ кг/м}^3$$

Ожидаемо результат получился одинаковый. Определим теперь величину $\rho_{\text{об,м.пор}}$ по формуле (12):

$$\rho_{\text{об, м.пор}} = \frac{1600}{1,05} + 0,238 \cdot 958 \approx 1752 \text{ кг/м}^3$$

Используя взаимосвязь (11), преобразуем приближенную формулу (6) для расчета $\rho_{\text{об,м.пор}}$ с использованием $W_{\Sigma, \text{об}}$:

$$\begin{aligned} \rho_{об, м. пор} &\approx \rho - W_{\Sigma, об} \rho_{вл} (0,0011\rho - 1) \approx \\ &\approx 2000 - 0,238 \cdot 958 (0,0011 \cdot 2000 - 1) \approx 1726 \text{ кг/м}^3 \end{aligned} \quad (15)$$

Получаем результат вполне приемлемый для практических расчетов.

Учитывая взаимосвязи между $W_{\Sigma, об}$ и $w_{\Sigma, об}$, где $w_{\Sigma, об}$ – суммарное объемное влагосодержание, дол. ед., неразрыхленных породах:

$$W_{\Sigma, об} = \frac{V_{вл}}{V_{м. пор}} = \frac{V_{вл}}{K_{наб} V_{с. пор}} = \frac{\tau w_{\Sigma, об}}{K_{наб}} \quad (16)$$

получим взаимосвязь между $\rho_{об, м. пор}$ и $w_{\Sigma, об}$. Подставив $W_{\Sigma, об}$ из (16) в (12), получаем:

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} + \frac{\rho_{вл} \tau w_{\Sigma, об}}{K_{наб}} = \frac{\rho_{об} + \rho_{вл} \tau w_{\Sigma, об}}{K_{наб}}. \quad (17)$$

Используя численные данные из рассмотренного выше примера, и учитывая, что $w_{\Sigma, об} = K_{наб} W_{\Sigma, об} = 1,05 \cdot 0,238 \approx 0,25$, получаем:

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{1600 + 958 \cdot 0,25}{1,05} \approx 1752 \text{ кг/м}^3 \quad (18)$$

Учитывая, что $W_{\Sigma, об} = I_{\Sigma, об, л} + W_{об, в}$ и $w_{\Sigma, об} = i_{\Sigma, об, л} + w_{об, в}$, приведем формулы (6), (12), в виде следующих взаимосвязей $\rho_{об, м. пор} = f(I_{\Sigma, об, л}, W_{об, в})$ и $\rho_{об, м. пор} = f(i_{\Sigma, об, л}, i_{об, в})$:

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} + (I_{\Sigma, об, л} + W_{об, в}) \rho_{вл}; \quad (19)$$

$$\rho_{об, м. пор} \approx \rho - \rho_{вл} (I_{\Sigma, об, л} + W_{об, в}) (0,0011\rho - 1); \quad (20)$$

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{\rho_{об} + \rho_{вл} (i_{\Sigma, об, л} + w_{об, в})}{K_{наб}}. \quad (21)$$

Использование в (21) вместо $\rho_{вл}$ показателей $\rho_{л}$ и $\rho_{г}$ несколько изменяет вид этой зависимости:

$$\begin{aligned} \rho_{об, м. пор} &= \frac{M_{м. пор}}{V_{м. пор}} = \frac{M_{с. пор} + M_{вл}}{K_{наб} V_{с. пор}} = \frac{1}{K_{наб}} \left(\rho_{об} + \frac{M_{л}}{V_{с. пор}} + \frac{M_{г}}{V_{с. пор}} \right) = \\ &= \frac{1}{K_{наб}} \left(\rho_{об} + \frac{V_{л} \rho_{л}}{V_{с. пор}} + \frac{V_{г} \rho_{г}}{V_{с. пор}} \right) = \frac{\rho_{об} + i_{\Sigma, об, л} \rho_{л} + w_{об, в} \rho_{г}}{K_{наб}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Рассмотрим использование формулы (22) для практических расчетов. Предварительно определим величины $i_{\Sigma, об, л}$ и $w_{об, в}$. Наиболее легко это сделать, используя взаимосвязи между $i_{\Sigma, об, л}$ и $I_{\Sigma, об, л} = 0,119$, а также $w_{об, в}$ и $W_{об, в} = 0,119$:

$$i_{\Sigma, об, л} = \frac{V_l}{V_{с. пор}} = \frac{K_{наб} V_l}{K_{наб} V_{с. пор}} = K_{наб} \frac{V_l}{V_{м. пор}} = K_{наб} I_{\Sigma, об, л}; \quad (23)$$

$$w_{об, в} = K_{наб} W_{об, в}.$$

Следовательно, $i_{\Sigma, об, л} = w_{об, в} = 1,05 \cdot 0,119 \approx 0,125$.

Учитывая это, получаем:

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{1600 + 0,125 \cdot 917 + 0,125 \cdot 1000}{1,05} \approx 1752 \text{ кг/м}^3$$

Учитывая взаимосвязи объемных показателей компонентов мерзлой породы с объемными показателями содержания влаги в них, представим формулу (5) в следующем виде:

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{1 - P_{о.п}}{K_{наб}} \rho + I_{\Sigma, об, л} \rho_l + W_{об, в} \rho_v =$$

$$= \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} + I_{\Sigma, об, л} \rho_l + W_{об, в} \rho_v. \quad (24)$$

Объемная плотность мерзлых горных пород связана и с другими показателями содержания влаги в них. Используя понятие абсолютной влажности мерзлой породы $W_{\Sigma, аб} = M_{вл} / V_{м. пор}$, получим выражения для расчетов $\rho_{об, м. пор}$ в виде:

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{M_{м. пор}}{V_{м. пор}} = \frac{M_{с. пор} + M_{вл}}{V_{м. пор}} = \frac{M_{с. пор}}{K_{наб} V_{с. пор}} +$$

$$+ \frac{M_{вл}}{V_{м. пор}} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} + W_{\Sigma, аб} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}} + \frac{M_{вл}}{K_{наб} V_{с. пор}} = \frac{\rho_{об} + w_{\Sigma, аб}}{K_{наб}}, \quad (25)$$

где $w_{\Sigma, аб} = M_{вл} / V_{с. пор}$ – абсолютное влагосодержание породы, дол. ед.

Взаимосвязи между насыпной плотностью мерзлых пород $\rho_{нас, м. пор}$ и показателями содержания в них влаги аналогичны таковым между $\rho_{об, м. пор}$ и показателями содержания влаги в неразрушенных мерзлых породах. Просто в последних надо учесть влияние не только набухания мерзлых пород, а и их разрушение. Для этого в [2] предложен интегральный коэффи-

коэффициент K_V , учитывающий увеличение объема породы в результате ее разрыхления (разрушения) и набухания за счет увлажнения и последующего замерзания воды. При использовании K_V надо иметь в виду, что если мерзлая порода не разрыхлена, то $K_p = 1,0$ и $K_V = K_{наб}$, а если порода при отрицательной температуре не содержит влаги, то есть является морозной породой, то $K_{наб} = 1,0$ и $K_V = K_p$ где K_p – коэффициент разрыхления породы, который в сухой породе не зависит от ее температуры. Кроме того, надо иметь в виду, что взаимосвязи между массовыми и объемными показателями влаги в неразрыхленных и разрыхленных мерзлых породах в принципе одинаковы. Просто в первых из них используется $\rho_{об,м.пор}$, а во вторых – $\rho_{нас,м.пор}$. Например, взаимосвязи между $W_{\Sigma,м}$ и $W_{\Sigma,об}$, а также $w_{\Sigma,м}$ и $w_{\Sigma,об}$, а также между $W_{\Sigma,об}$ и $w_{\Sigma,об}$ в разрыхленных мерзлых породах имеют следующий вид:

$$W_{\Sigma,м} = W_{\Sigma,об} \frac{\rho_{вл}}{\rho_{нас,м.пор}}; \quad \tau w_{\Sigma,м} = \tau w_{\Sigma,об} \frac{\rho_{вл}}{\rho_{нас,м.пор}}.$$

$$W_{\Sigma,об} = \frac{V_{вл}}{V_{м.пор}} = \frac{V_{вл}}{K_V V_{с.пор}} = \frac{\tau w_{\Sigma,об}}{K_V}.$$

Если в (2), (3), (9), (10), (12), (17), (19), (21), (22) и (25) заменить $K_{наб}$ на K_V , то получим следующие выражения для расчета $\rho_{нас,м.пор}$:

$$\rho_{нас,м.пор} = \frac{\rho_{об}}{K_V} [1 + \tau w_{\Sigma,м}] = \frac{\rho_{об}}{K_V (1 - W_{\Sigma,м})}. \quad (26)$$

$$\rho_{нас,м.пор} = \frac{\rho_{об}}{K_V} (1 + i_{\Sigma,м,л} + \tau w_{м,г}); \quad (27)$$

$$\rho_{нас,м.пор} = \frac{\rho_{об}}{K_M (1 - I_{\Sigma,м,л} - W)}; \quad (28)$$

$$\rho_{нас,м.пор} = \frac{\rho_{об}}{K_V} + W_{\Sigma,об} \rho_{вл}; \quad (29)$$

$$\rho_{нас,м.пор} = \frac{\rho_{об} + \rho_{вл} \tau w_{\Sigma,об}}{K_V}; \quad (30)$$

$$\rho_{нас,м.пор} = \frac{\rho_{об}}{K_V} + (I_{\Sigma,об,л} + W_{об,г}) \rho_{вл}; \quad (31)$$

$$\rho_{нас, м. пор} = \frac{\rho_{об} + \rho_{вл} \left(i_{\Sigma, об, л} + \omega_{об, в} \right)}{K_V}; \quad (32)$$

$$\rho_{нас, м. пор} = \frac{\rho_{об} + i_{\Sigma, об, л} \rho_l + \omega_{об, в} \rho_v}{K_V}; \quad (33)$$

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{\rho_{об}}{K_V} + I_{\Sigma, об, л} \rho_l + W_{об, в} \rho_v; \quad (34)$$

$$\rho_{об, м. пор} = \frac{\rho_{об}}{K_V} + W_{\Sigma, об} = \frac{\rho_{об} + \omega_{\Sigma, об}}{K_V}, \quad (35)$$

где $[K_V] = \text{дол. ед.}$

Наличие целого ряда взаимосвязей между плотностными свойствами мерзлых пород и показателями содержания в них влаги позволяет в ряде случаев оценивать величины ряда этих показателей без их экспериментального определения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фролов А. Д.* Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. – Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. – 515 с.

2. *Янченко Г. А.* Показатели содержания льда и незамерзшей воды в мерзлых породах и грунтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 11. – С. 93–100.

3. *Янченко Г. А.* О показателях плотности горных пород и минералов // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 4. – С. 139–149.

4. *Янченко Г. А.* О взаимосвязях между показателями суммарного содержания влаги в мерзлых породах и грунтах. Горные науки и технологии. 2016; (1): 25–32. DOI: 10.17073/2500-0632-2016-1-25-32. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Янченко Геннадий Алексеевич – доктор технических наук, профессор, МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru.

Gornyy informatsionno-analitcheskiy byulleten'. 2017. No. 2, pp. 392–404.

UDC 622.02:
552(045)

G.A. Yanchenko

CORRELATIONS BETWEEN THE INDICES OF DENSITY PROPERTIES OF FROZEN ROCKS AND GROUNDS WITH INDICATORS OF MOISTURE CONTENT

Identified the relationship between volume and bulk density of the frozen rocks and its moisture content: total mass and volumetric moisture content and the moisture content, total mass and volumetric ice content and aldosterone, mass and volumetric moisture content

and moisture content, absolute humidity and moisture content. It is shown that the moisture content of the frozen rocks to change their density properties, both directly (in the rocks, an additional mass), and indirectly, affecting razryhlitel and swelling rocks which are determined experimentally. In addition to relationships that have a fundamental character, the approximate relationship allowing to calculate the indicators of the density of properties in a number of breeds with a minimum of information about the moisture content.

Key words: frozen rock, frozen ground, indicators of moisture content, volume and bulk density, the relationship.

AUTHOR

Yanchenko G.A., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

REFERENCES

1. Frolov A. D. *Elektricheskie i uprugie svoystva mertzlykh porod i l'dov* (Electrical and elastic properties of frozen rocks and ice), Pushchino, ONTI PNTs RAN, 1998, 515 p.
2. Yanchenko G. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 11, pp. 93–100.
3. Yanchenko G. A. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2007, no 4, pp. 139–149.
4. Yanchenko G. A. The relationship between the total index moisture in the frozen rocks. *Mining science and technology*. 2016; (1): 25–32. (In Russ.) DOI:10.17073/2500-0632-2016-1-25-32.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

БЕЗОПАСНОСТЬ И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Баловцев С.В., Воробьева О.В., Монастырев Н.Н., Кривошеева С.И., Копылова А.В., Кравцова Е.А.

Освещены вопросы управления промышленной безопасностью при строительстве подземных сооружений и горных предприятий и добыче полезных ископаемых открытым и подземным способом. Рассмотрены актуальные вопросы информационно-аналитического обеспечения анализа и оценки рисков. Представлены проблемы эффективного управления рисками при строительстве подземных сооружений мегаполисов в условиях экономического кризиса. Приведен комплекс мероприятий, направленный на снижение травматизма и профессиональных заболеваний на горнодобывающих предприятиях. Представлена оценка эффективности средств пылеподавления.

Ключевые слова: промышленная безопасность, строительство подземных сооружений, управление рисками, строительный риск, экономический риск, производственный риск, управленческие решения, источники информации, горнодобывающее предприятие, карьер, травматизм, профессиональные заболевания, средства пылеподавления, гидро-снежно-ледяная забойка.

SAFETY AND RISK MANAGEMENT IN MINING

Balovnev S.V., Vorob'eva O.V., Monastyr'ev N.N., Krivosheev S.I., Kopylov A.V., Kravtsova E.A.

The issues of industrial safety management in construction of underground structures and mining enterprises and mining of minerals open and underground method. They discussed topical issues of information and analytical support of analysis and risk assessment. Presents challenges to effective risk management in the construction of underground structures of cities in terms of economic crisis. The complex of measures aimed at reducing accidents and occupational diseases in mining. The estimation of efficiency of means of dust suppression.

Key words: industrial safety, construction of underground facilities, risk management, construction risk, economic risk, operational risk, management decisions, sources of information, mining company, quarry, injuries, occupational diseases, means of dust suppression, hydro-ice-and-snow stopper.