

О ВЗАИМОСВЯЗЯХ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ СУММАРНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВЛАГИ В МЁРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ И ГРУНТАХ

Влага в мёрзлых горных породах и грунтах представлена в общем случае в виде двух компонентов – льда и незамёрзшей воды. Для количественной оценки содержания влаги в этих породах ранее были предложены два показателя, названные суммарной и общей влажностями. В работе показано, что такие названия неправильно отражают суть этих показателей. На самом деле это суммарные массовые влажность и влагосодержание. Для более полной и точной оценки влияния влаги на физические свойства мёрзлых горных пород в работе предложено использовать суммарные объёмные и абсолютные влажности и влагосодержания. Выявлены взаимосвязи между всеми рассмотренными в работе суммарными показателями влаги в мёрзлых горных породах.

Ключевые слова: мёрзлая горная порода, суммарная влажность, суммарное влагосодержание, суммарная абсолютная влажность, суммарное абсолютное влагосодержание, взаимосвязь между ними.

Для оценки содержания всех видов влаги (лёд, незамёрзшая вода) в мёрзлых горных породах и грунтах (далее – мёрзлые горные породы) в своё время были предложены два показателя – *суммарная и общая влажность*, обозначаемые в абсолютном большинстве литературных источников соответственно как W_c и W_o [1 – 6]. Суммарная влажность была определена как отношение массы всей влаги в мёрзлой породе $M_{вл} = M_{л} + M_{н.в}$, где $M_{л}$, $M_{н.в}$ – масса, кг, льда и незамёрзшей воды, к массе сухой горной породы $M_{с.пор}$, то есть к массе минерального скелета $M_{м.ск}$, а общая влажность – как отношение $M_{вл}$ к массе мёрзлой горной породы $M_{пор}$.

Однако необходимо отметить, что предложенные для W_c и W_o определения не совсем правильно отражают суть этих показателей.

При классическом подходе к определению содержания влаги в веществах [7, 8] под влажностью веществ понимается содержание влаги в них, отнесённое на влажное состояние веществ. Если же содержание влаги в веществе отнесено к его сухому состоянию, то это уже будет влагосодержание. Учитывая, что W_c определяется на сухое состояние породы, то

W_c будет на самом деле *суммарным массовым влагосодержанием*, имеющим полную размерность «кг влаги/кг сух. породы». Обозначать его лучше всего как $w_{\Sigma,м}$ (в технической литературе показатели влагосодержания обозначаются обычно строчной буквой w с соответствующими индексами, здесь нижний индекс « Σ » – условное обозначение суммы, а « $м$ » – массы). Общая влажность W_o есть суммарная массовая влажность. Её обозначить лучше всего как $W_{\Sigma,м}$ (в технической литературе показатели влажности обозначаются обычно прописной буквой W с соответствующими индексами). Таким образом, имеем

$$W_{\Sigma,м} = \frac{M_{вл}}{M_{м.пор}} = \frac{M_{л} + M_{н.в}}{M_{м.пор}}; \quad (1)$$
$$w_{\Sigma,м} = \frac{M_{вл}}{M_{с.пор}} = \frac{M_{л} + M_{н.в}}{M_{с.пор}}.$$

Размерность $[W_{\Sigma,м}, w_{\Sigma,м}] = \text{доли ед.}$

Если в (1) правые части дробей умножить на 100, то $W_{\Sigma,м}$ и $w_{\Sigma,м}$ будут измеряться в процентах по массе (% масс.), однако при этом не надо забывать, что вне зависимости от указанных размерностей этих показателей – *доли единицы* или *массовые проценты*, их полные размерности будут:



$$\left[W_{\Sigma, м} \right] = \text{кг влаги} / \text{кг мёрз. пор.};$$

$$\left[w_{\Sigma, м} \right] = \text{кг влаги} / \text{кг сух. пор.}$$

При этом в соответствии с теорией размерности

$$\left[M_{м. пор} \right] = \text{кг мёрз. пор.} = \\ = \text{кг сух. пор.} + \text{кг влаги},$$

причём вне зависимости от того разрыхлена или нет мёрзлая порода.

Однако, как отмечено в [9], использование при изучении мёрзлых пород только массовых характеристик содержания влаги не позволяет осуществить полный анализ влияния влаги на соответствующие физические свойства мёрзлых пород. Более удобно и наглядно в ряде случаев использовать объёмные показатели содержания влаги, которые определяются аналогично $W_{\Sigma, м}$ и $w_{\Sigma, м}$:

$$W_{\Sigma, об} = \frac{V_{вл}}{V_{м. пор}} = \frac{V_{вл}}{K_V V_{с. пор}} = \frac{V_{л} + V_{н. в}}{K_V V_{с. пор}}; \quad (2)$$

$$w_{\Sigma, об} = \frac{V_{вл}}{K_p V_{с. пор}} = \frac{V_{л} + V_{н. в}}{K_p V_{с. пор}},$$

где $V_{м. пор}, V_{с. пор}$ – объём, m^3 , мёрзлой (разрыхленной и неразрыхленной) породы и сухой неразрыхленной породы; $V_{л}, V_{н. в}$ – объём льда и незамёрзшей воды в мёрзлой породе, m^3 ; $K_p \geq 1,0$ – коэффициент разрыхления сухой породы, доли ед.; K_V – коэффициент изменения объёма горной породы в результате её разрыхления (разрушения) и набухания за счёт увлажнения и последующего замерзания воды, доли ед.

Особенностью изменения состояния пород в результате их увлажнения и последующего образования льда является то, что вода при увлажнении пород располагается в порах, трещинах и других пустотах, изменяя объём пород не напрямую за счёт прибавления своего объёма, а косвенно, влияя на их набухаемость и разрыхляемость. То же

самое имеет место и при замерзании воды. При этом надо иметь в виду, что во влажных горных породах, особенно в связных и рыхлых, коэффициенты разрыхления K_p и набухания $K_{наб}$ зависят от величины их влажности. Эти зависимости в ряде пород иногда могут иметь довольно сложный вид. Например, при увлажнении такой мелкозернистой породы, как кварцевый песок может иметь место как уменьшение K_p , так и его увеличение. Это обусловлено тем, что в определённых диапазонах влажности вода может способствовать слипанию мелких твёрдых частиц в более крупные конгломераты, а в других диапазонах – наоборот. Ещё по более сложным зависимостям изменяются K_p и $K_{наб}$ при замерзании воды, особенно в связных породах, в которых процесс образования льда заканчивается при температурах значительно ниже $0^\circ C$.

Таким образом, изменение объёма сухих пород происходит только за счёт их разрыхления (разрушения), при этом K_p при положительных и отрицательных температурах в принципе одинаков. Влажные породы, находящиеся в неразрыхленном (неразрушенном) состоянии, в этом случае $K_p = 1,0$, изменяют свой объём в процессах увлажнения и последующего замерзания воды. Поэтому у этих пород $K_V = K_{наб}$. У рыхлых пород к процессу набухания за счёт их увлажнения и последующего замерзания воды присоединяется процесс разрыхления. Поэтому у них K_V становится своего рода интегральным показателем, определяемым в общем случае как $K_V = K_p K_{наб}$. На практике при определении изменения объёма рыхлых горных пород в результате изменения их разрыхляемости, увлажнения и замерзания воды очень трудно выделить по отдельности



влияние K_p и $K_{наб}$ на величину K_V . Поэтому у этих пород экспериментально определяют непосредственно величину K_V , одновременно учитывающую влияние как K_p , так и $K_{наб}$.

Если в (2) правые части дробей умножить на 100, то $W_{\Sigma, об}$ и $w_{\Sigma, об}$ будут измеряться в процентах по объёму (% об.). Однако при этом также не надо забывать, что вне зависимости от указанных размерностей этих показателей, доли единицы или объёмные проценты, их полные размерности для неразрыхленных и разрыхленных мёрзлых пород будут:

$$\begin{aligned} [W_{\Sigma, об}] &= \text{м}^3 \text{вл.} / \text{м}^3 \text{мёрз. пор.} = \\ &= \text{м}^3 \text{вл.} / \text{м}^3 \text{разр. мёрз. пор.}; \\ [w_{\Sigma, об}] &= \text{м}^3 \text{вл.} / \text{м}^3 \text{сух. пор.} = \\ &= \text{м}^3 \text{вл.} / \text{м}^3 \text{разр. сух. пор.} \end{aligned}$$

Помимо массовых и объёмных показателей влаги в ряде случаев удобно пользоваться показателями массовой концентрации влаги, которые могут быть отнесены на мёрзлое и сухое состояния породы. В первом случае это будет суммарная абсолютная влажность $W_{\Sigma, аб}$ мёрзлой породы, а во втором – суммарное абсолютное влагосодержание $w_{\Sigma, аб}$, определяемые как:

$$W_{\Sigma, аб} = \frac{M_{вл}}{V_{м. пор}} = \frac{M_{л} + M_{н. в}}{V_{м. пор}} = \frac{M_{л} + M_{н. в}}{K_V V_{с. пор}};$$

$$w_{\Sigma, аб} = \frac{M_{вл}}{K_p V_{с. пор}} = \frac{M_{л} + M_{н. в}}{K_p V_{с. пор}}$$

Все показатели содержания влаги в мёрзлых породах $W_{\Sigma, м}$, $W_{\Sigma, об}$, $w_{\Sigma, м}$, $w_{\Sigma, об}$, $W_{\Sigma, аб}$ и $w_{\Sigma, аб}$ попарно связаны между собой через параметры состояния

пород и плотностные свойства как самих пород, так и компонентов влаги. Это позволяет, зная некоторые из этих показателей, определять другие, а в ряде случаев оценивать параметры состояния мёрзлых пород и их плотностные свойства. Однако даже для одной пары показателей виды взаимосвязи могут различаться. Это определяется подходом к их определению. Для ряда случаев это будет показано ниже. Вывод этих взаимосвязей в принципе не сложен, однако для этого надо чётко представлять суть используемых для этого показателей.

Взаимосвязи между $W_{\Sigma, м}$ и $w_{\Sigma, м}$, имеют такой же вид, как и между массовой влажностью W_M и массовым влагосодержанием w_M у влажных пород:

$$\begin{aligned} W_{\Sigma, м} &= \frac{M_{вл}}{M_{м. пор}} = \frac{M_{вл}}{M_{с. пор} + M_{вл}} = \\ &= \frac{M_{вл} / M_{с. пор}}{\frac{M_{с. пор}}{M_{с. пор}} + \frac{M_{вл}}{M_{с. пор}}} = \frac{w_{\Sigma, м}}{1 + w_{\Sigma, м}}. \end{aligned}$$

Взаимосвязь между $W_{\Sigma, м}$ и $W_{\Sigma, об}$ имеет более сложный вид:

$$\begin{aligned} \frac{W_{\Sigma, м}}{W_{\Sigma, об}} &= \frac{M_{вл}}{M_{м. пор}} \cdot \frac{V_{вл}}{V_{м. пор}} = \frac{M_{вл}}{V_{вл}} \cdot \frac{V_{м. пор}}{M_{м. пор}} = \\ &= \rho_{вл} \frac{K_V V_{с. пор}}{M_{с. пор} + M_{вл}} = \rho_{вл} \frac{K_V}{\frac{M_{с. пор}}{V_{с. пор}} + \frac{M_{вл}}{V_{с. пор}}} = \\ &= \rho_{вл} \frac{K_V}{\rho_{об} + \frac{\rho_{об} M_{вл}}{\rho_{об} V_{с. пор}}} = \rho_{вл} \frac{K_V}{\rho_{об} + \frac{\rho_{об} M_{вл}}{M_{с. пор}}} = \\ &= \rho_{вл} \frac{K_V}{\rho_{об} + \rho_{об} w_{\Sigma, м}}. \quad (3) \end{aligned}$$

Эту взаимосвязь можно получить и в несколько ином виде. Например:



$$\begin{aligned} \frac{W_{\Sigma, м}}{W_{\Sigma, об}} &= \rho_{вл} \frac{K_V V_{с. пор}}{M_{с. пор} + M_{вл}} = \\ &= \rho_{вл} \frac{K_V}{\frac{M_{с. пор}}{V_{с. пор}} + \frac{K_p M_{вл}}{K_p V_{с. пор}}} = \\ &= \rho_{вл} \frac{K_V}{\rho_{об} + K_p \rho_{\Sigma, об}}. \end{aligned} \quad (4)$$

где $\rho_{вл}$ – плотность влаги в мёрзлой горной породе, кг/м³; $\rho_{об}$ – объёмная плотность, кг/м³, породы, определяемые в соответствии с рекомендациями работы [10],

$$\rho_{об} = M_{с. пор} / V_{с. пор} = \rho (1 - P_{о.п});$$

ρ – плотность, кг/м³, породы,

$$\rho = M_{с. пор} / V_{м. ск} = M_{м. ск} / V_{м. ск};$$

$V_{м. ск}$ – объём минерального скелета породы, м³; $P_{о.п} = V_{пус} / V_{с. пор}$ – показатель общей пористости, доли ед.; $V_{пус}$ – суммарный объём всех пустот в сухой неразрушенной (неразрыхленной) породе, м³;

Влага в мёрзлых породах является двухкомпонентным веществом, состоящим из незамёрзшей воды и льда. Учитывая методы расчёта плотности многокомпонентных веществ, получаем

$$\begin{aligned} \rho_{вл} &= \rho_{л} \frac{I_{\Sigma, об, л}}{I_{\Sigma, об, л} + W_{об, н. в}} + \\ &+ \rho_{в} \frac{W_{об, н. в}}{I_{\Sigma, об, л} + W_{об, н. в}} = \\ &= \frac{1}{\frac{I_{\Sigma, м, л}}{(I_{\Sigma, м, л} + W_{м, н. в})\rho_{л}} + \frac{W_{м, н. в}}{(I_{\Sigma, м, л} + W_{м, н. в})\rho_{в}}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$I_{\Sigma, об, л} = V_{л} / V_{м. пор}, \quad W_{об, н. в} = V_{н. в} / V_{м. пор}$$

– суммарная объёмная льдистость мёрзлой породы, доли ед., и её объёмная влажность за счёт незамёрзшей воды, доли ед.;

$I_{\Sigma, м, л} = M_{л} / M_{м. пор}$, $W_{м, н. в} = M_{н. в} / M_{м. пор}$ – суммарная массовая льдистость мёрзлой породы, доли ед., и её массовая влажность за счёт незамёрзшей воды, доли ед.; $\rho_{л}, \rho_{в}$ – плотность льда, $\rho_{л} \approx 917$ кг/м³, и незамёрзшей воды, $\rho_{в} \approx 1000$ кг/м³.

Учитывая значения $\rho_{л}, \rho_{в}$, представим (5) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \rho_{вл} &\approx 917 \frac{I_{\Sigma, об, л}}{I_{\Sigma, об, л} + W_{об, н. в}} + \\ &+ 1000 \frac{W_{об, н. в}}{I_{\Sigma, об, л} + W_{об, н. в}} \approx \\ &\approx \frac{917 I_{\Sigma, об, л} + 1000 W_{об, н. в}}{I_{\Sigma, об, л} + W_{об, н. в}} \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{0,0011 I_{\Sigma, м, л}}{I_{\Sigma, м, л} + W_{м, н. в}} + \frac{0,001 W_{м, н. в}}{I_{\Sigma, м, л} + W_{м, н. в}}}. \end{aligned}$$

Проверим полученные выражения (3) и (4) с помощью теории размерностей. При этом рассмотрим два случая. Первый, когда сухая порода не разрыхлена, то есть $K_p = 1,0$, и второй, когда она разрыхлена, то есть $K_p > 1,0$. При этом учтём, что в первом случае $K_V = \frac{м^3 \text{ мёрз. пор.}}{м^3 \text{ сух. пор.}}$.

Размерность левой части выражений (3) и (4) составляет

$$\left[\frac{W_{\Sigma, м}}{W_{\Sigma, об}} \right] = \left[\frac{M_{вл} V_{м. пор}}{V_{вл} M_{м. пор}} \right] = \frac{\text{кг влаги} \cdot \text{м}^3 \text{ мёрз. пор.}}{\text{м}^3 \text{ влаги} \cdot \text{кг мёрз. пор.}},$$

а правой части (3)

$$\begin{aligned} \left[\rho_{вл} \frac{K_V}{\rho_{об} + \rho_{об} W_{\Sigma, м}} \right] &= \frac{\text{кг влаги} \times \text{м}^3 \text{ мёрз. пор.}}{\text{м}^3 \text{ влаги} \times \text{м}^3 \text{ сух. пор.}} \times \\ &\times \left(\frac{\text{кг сух. пор.}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}} + \frac{\text{кг сух. пор.}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}} \cdot \frac{\text{кг влаги}}{\text{кг сух. пор.}} \right) = \end{aligned}$$



$$= \frac{\text{кг влаги} \cdot \text{м}^3 \text{ мёрз. пор.}}{\text{м}^3 \text{ влаги} \cdot \text{м}^3 \text{ сух. пор.} \cdot \left(\frac{\text{кг сух. пор.} + \text{кг влаги}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}} \right)} = \frac{\text{кг влаги} \cdot \text{м}^3 \text{ мёрз. пор.}}{\text{м}^3 \text{ влаги} \cdot \text{кг мёрз. пор.}}$$

Сравнивая размерности обеих частей выражения (3), видим, что они равны. Абсолютно такой же вывод получается и при рассмотрении выражения (4).

Второй случай рассмотрим для выражения (4). Размерности K_V и K_p и левой части выражения (4) составляют:

$$K_V = \frac{\text{м}^3 \text{ разр. мёрз. пор.}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}};$$

$$[K_p] = \frac{\text{м}^3 \text{ разр. сух. пор.}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}};$$

$$\left[\frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{W_{\Sigma, \text{об}}} \right] = \left[\frac{M_{\text{вл}} V_{\text{м. разр. пор.}}}{V_{\text{вл}} M_{\text{м. пор.}}} \right] = \frac{\text{кг влаги} \cdot \text{м}^3 \text{ разр. мёрз. пор.}}{\text{м}^3 \text{ влаги} \cdot \text{кг мёрз. пор.}}$$

где $V_{\text{м. разр. пор}}$ – объём разрыхленной мёрзлой породы, м^3 .

При анализе размерностей левой части выражений (3) и (4) во втором случае учтено, что при одинаковой суммарной массовой влажности разрыхленной и неразрыхленной мёрзлых пород масса разрыхленной мёрзлой породы равна массе неразрыхленной мёрзлой породы, так как пустоты между отдельностями мёрзлой породы в результате её разрыхления при $W_{\Sigma, \text{м}} = \text{const}$ не изменяют массы породы. Однако при этом надо иметь в виду, что $V_{\text{м. разр. пор}} \neq V_{\text{м. пор.}}$.

Для правой части (4) имеем:

$$\rho_{\text{вл}} K_V = \frac{\text{кг влаги}}{\text{м}^3 \text{ влаги}} \cdot \frac{\text{м}^3 \text{ разр. мёрз. пор.}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}};$$

$$\left[\rho_{\text{об}} + K_p W_{\Sigma, \text{м}} \right] = \frac{\text{кг сух. пор.}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}} + \frac{\text{м}^3 \text{ сух. разр. пор.}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}} \times \frac{\text{кг влаги}}{\text{м}^3 \text{ сух. разр. пор.}} = \frac{\text{кг сух. пор.}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}} + \frac{\text{кг влаги}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}} = \frac{\text{кг мёрз. пор.}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}}$$

Окончательно:

$$\left[\rho_{\text{вл}} \frac{K_V}{\rho_{\text{об}} + K_p W_{\Sigma, \text{м}}} \right] = \rho_{\text{вл}} K_V : \left[\rho_{\text{об}} + K_p W_{\Sigma, \text{м}} \right] = \frac{\text{кг влаги} \cdot \text{м}^3 \text{ разр. мёрз. пор.}}{\text{м}^3 \text{ влаги} \cdot \text{м}^3 \text{ сух. пор.}} : \frac{\text{кг мёрз. пор.}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}} = \frac{\text{кг влаги} \cdot \text{м}^3 \text{ разр. мёрз. пор.}}{\text{м}^3 \text{ влаги} \cdot \text{кг мёрз. пор.}}$$

Таким образом, размерности левой и правой частей (4) одинаковы. Абсолютно такой же результат получается и при рассмотрении выражения (3) для разрыхленных мёрзлых пород.

Взаимосвязи между $W_{\Sigma, \text{м}}$ и $w_{\Sigma, \text{об}}$ имеют вид, аналогичный взаимосвязям (3) и (4) между $W_{\Sigma, \text{м}}$ и $W_{\Sigma, \text{об}}$:

$$\frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{w_{\Sigma, \text{об}}} = \frac{M_{\text{вл}}}{M_{\text{м. пор.}}} : \frac{V_{\text{вл}}}{K_p V_{\text{с. пор.}}} = \frac{M_{\text{вл}}}{V_{\text{вл}}} \cdot \frac{K_p V_{\text{с. пор.}}}{M_{\text{м. пор.}}} = \rho_{\text{вл}} \frac{K_p V_{\text{с. пор.}}}{M_{\text{с. пор.}} + M_{\text{вл}}} = \rho_{\text{вл}} \frac{K_p}{\frac{M_{\text{с. пор.}}}{V_{\text{с. пор.}}} + \frac{M_{\text{вл}}}{V_{\text{с. пор.}}}} = \rho_{\text{вл}} \frac{K_p}{\rho_{\text{об}} + \frac{\rho_{\text{об}} M_{\text{вл}}}{\rho_{\text{об}} V_{\text{с. пор.}}}} = \rho_{\text{вл}} \frac{K_p}{\rho_{\text{об}} + \frac{\rho_{\text{об}} M_{\text{вл}}}{M_{\text{с. пор.}}}} = \rho_{\text{вл}} \frac{K_p}{\rho_{\text{об}} + \rho_{\text{об}} w_{\Sigma, \text{м}}};$$

$$\frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{w_{\Sigma, \text{об}}} = \rho_{\text{вл}} \frac{K_p}{\frac{M_{\text{с. пор.}}}{V_{\text{с. пор.}}} + \frac{M_{\text{вл}}}{V_{\text{с. пор.}}}} =$$



$$= \rho_{\text{вл}} \frac{K_p}{\rho_{\text{об}} + \frac{K_p M_{\text{вл}}}{K_p V_{\text{с.пор}}}} = \rho_{\text{вл}} \frac{K_p}{\rho_{\text{об}} + K_p w_{\Sigma, \text{аб}}}.$$

Найдём теперь взаимосвязь между

$W_{\Sigma, \text{м}}$ и $W_{\Sigma, \text{аб}}$:

$$\begin{aligned} \frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{W_{\Sigma, \text{аб}}} &= \frac{M_{\text{вл}}}{M_{\text{м.пор}}} : \frac{M_{\text{вл}}}{V_{\text{м.пор}}} = \frac{V_{\text{м.пор}}}{M_{\text{м.пор}}} = \\ &= \frac{K_V V_{\text{с.пор}}}{M_{\text{с.пор}} + M_{\text{вл}}} = \frac{K_V}{\frac{M_{\text{с.пор}}}{V_{\text{с.пор}}} + \frac{M_{\text{вл}}}{V_{\text{с.пор}}}} = \\ &= \frac{K_V}{\rho_{\text{об}} + \frac{\rho_{\text{об}} M_{\text{вл}}}{V_{\text{с.пор}}}} = \\ &= \frac{K_V}{\rho_{\text{об}} + \frac{\rho_{\text{об}} M_{\text{вл}}}{M_{\text{с.пор}}}} = \frac{K_V}{\rho_{\text{об}} (1 + w_{\Sigma, \text{м}})}. \end{aligned} \quad (6)$$

В неразрушенных мёрзлых породах ($K_p = 1, 0$) взаимосвязь (6) приобретает следующий вид:

$$\frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{W_{\Sigma, \text{аб}}} = \frac{K_{\text{наб}}}{\rho_{\text{об}} (1 + w_{\Sigma, \text{м}})}.$$

Если же воспользоваться понятиями объёмной плотности мёрзлой породы $\rho_{\text{об, м.пор}}$ и насыпная плотность мёрзлой породы $\rho_{\text{нас, м.пор}}$, то взаимосвязь между

$W_{\Sigma, \text{м}}$ и $W_{\Sigma, \text{аб}}$ можно представить в виде:

у неразрушенной мёрзлой породы

$$\frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{W_{\Sigma, \text{аб}}} = \frac{V_{\text{м.пор}}}{M_{\text{м.пор}}} = \frac{1}{\rho_{\text{об, м.пор}}},$$

а у разрушенной

$$\frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{W_{\Sigma, \text{аб}}} = \frac{V_{\text{м.пор}}}{M_{\text{м.пор}}} = \frac{1}{\rho_{\text{нас, м.пор}}}.$$

Один из видов взаимосвязи между $W_{\Sigma, \text{м}}$

и $w_{\Sigma, \text{аб}}$ можно получить следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{w_{\Sigma, \text{аб}}} &= \frac{M_{\text{вл}}}{M_{\text{м.пор}}} : \frac{M_{\text{вл}}}{K_p V_{\text{с.пор}}} = \frac{K_p V_{\text{с.пор}}}{M_{\text{м.пор}}} = \\ &= \frac{K_p V_{\text{с.пор}}}{M_{\text{с.пор}} + M_{\text{вл}}} = \frac{K_p}{\frac{M_{\text{с.пор}}}{V_{\text{с.пор}}} + \frac{M_{\text{вл}}}{V_{\text{с.пор}}}} = \\ &= \frac{K_p}{\rho_{\text{об}} + \frac{\rho_{\text{об}} M_{\text{вл}}}{V_{\text{с.пор}}}} = \frac{K_p}{\rho_{\text{об}} + \frac{\rho_{\text{об}} M_{\text{вл}}}{M_{\text{с.пор}}}} = \\ &= \frac{K_p}{\rho_{\text{об}} (1 + w_{\Sigma, \text{м}})}. \end{aligned} \quad (7)$$

При другом подходе к поиску взаимосвязи между $W_{\Sigma, \text{м}}$ и $w_{\Sigma, \text{аб}}$ имеем:

$$\begin{aligned} \frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{w_{\Sigma, \text{аб}}} &= \frac{M_{\text{вл}} K_p V_{\text{с.пор}}}{M_{\text{м.пор}} M_{\text{вл}}} = \frac{K_p V_{\text{с.пор}}}{M_{\text{м.пор}}} = \\ &= \frac{K_p V_{\text{с.пор}}}{M_{\text{с.пор}} + M_{\text{вл}}} = \frac{K_p}{\frac{M_{\text{с.пор}}}{V_{\text{с.пор}}} + \frac{M_{\text{вл}}}{V_{\text{с.пор}}}} = \\ &= \frac{K_p}{\rho_{\text{об}} + \frac{K_p M_{\text{вл}}}{K_p V_{\text{с.пор}}}} = \frac{K_p}{\rho_{\text{об}} + K_p w_{\Sigma, \text{аб}}}; \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{w_{\Sigma, \text{аб}}} = \frac{K_p}{\rho_{\text{об}} + K_p w_{\Sigma, \text{аб}}}; \rightarrow \\ &\rightarrow W_{\Sigma, \text{м}} = \frac{w_{\Sigma, \text{аб}} K_p}{\rho_{\text{об}} + K_p w_{\Sigma, \text{аб}}}. \end{aligned} \quad (8)$$

В неразрушенных мёрзлых породах ($K_p = 1, 0$) обе взаимосвязи (7) и (8) между $W_{\Sigma, \text{м}}$ и $w_{\Sigma, \text{аб}}$ приобретают следующий вид:

$$\frac{W_{\Sigma, \text{м}}}{w_{\Sigma, \text{аб}}} = \frac{1}{\rho_{\text{об}} (1 + w_{\Sigma, \text{м}})};$$

и



$$W_{\Sigma, м} = \frac{w_{\Sigma, аб}}{\rho_{об} + w_{\Sigma, аб}}$$

По аналогии найдём теперь последовательно взаимосвязи между другими, не рассмотренными выше, суммарными показателями содержания влаги в мёрзлых породах: $W_{\Sigma, об}$ и $w_{\Sigma, м}$, $W_{\Sigma, об}$ и $w_{\Sigma, об}$, $W_{\Sigma, об}$ и $W_{\Sigma, аб}$, $W_{\Sigma, об}$ и $w_{\Sigma, аб}$, $W_{\Sigma, аб}$ и $w_{\Sigma, об}$, $W_{\Sigma, аб}$ и $w_{\Sigma, аб}$, $w_{\Sigma, м}$ и $w_{\Sigma, об}$, $w_{\Sigma, м}$ и $w_{\Sigma, аб}$ и $w_{\Sigma, об}$ и $w_{\Sigma, аб}$:

$$\begin{aligned} \frac{W_{\Sigma, об}}{w_{\Sigma, м}} &= \frac{V_{вл}}{V_{м. пор}} : \frac{M_{вл}}{M_{с. пор}} = \frac{V_{вл} M_{с. пор}}{V_{м. пор} M_{вл}} = \\ &= \frac{V_{вл}}{M_{вл}} \times \frac{M_{с. пор}}{K_V V_{с. пор}} = \frac{1}{\rho_{вл}} \times \frac{\rho_{об}}{K_V} = \frac{\rho_{об}}{K_V \rho_{вл}}, \\ \frac{W_{\Sigma, об}}{w_{\Sigma, об}} &= \frac{V_{вл}}{V_{м. пор}} : \frac{V_{вл}}{K_p V_{с. пор}} = \\ &= \frac{V_{вл}}{K_V V_{с. пор}} : \frac{V_{вл}}{K_p V_{с. пор}} = \frac{K_p}{K_V}, \end{aligned} \quad (9)$$

если мёрзлая порода не разрыхлена, то есть $K_p = 1,0$, то (9) в этом случае преобразуется в (10):

$$\frac{W_{\Sigma, об}}{w_{\Sigma, об}} = \frac{1}{K_{наб}}; \quad (10)$$

$$\frac{W_{\Sigma, об}}{W_{\Sigma, аб}} = \frac{V_{вл}}{V_{м. пор}} : \frac{M_{вл}}{V_{м. пор}} = \frac{V_{вл}}{M_{вл}} = \frac{1}{\rho_{вл}};$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{\Sigma, об}}{w_{\Sigma, аб}} &= \frac{V_{вл}}{V_{м. пор}} : \frac{M_{вл}}{K_p V_{с. пор}} = \\ &= \frac{V_{вл}}{M_{вл}} \times \frac{K_p V_{с. пор}}{K_V V_{с. пор}} = \frac{K_p}{K_V \rho_{вл}}; \end{aligned}$$

$$\frac{W_{\Sigma, аб}}{w_{\Sigma, об}} = \frac{M_{вл}}{V_{м. пор}} : \frac{V_{вл}}{K_p V_{с. пор}} =$$

$$= \frac{M_{вл}}{V_{вл}} \times \frac{K_p V_{с. пор}}{K_V V_{с. пор}} = \rho_{вл} \frac{K_p}{K_V};$$

$$\frac{W_{\Sigma, аб}}{w_{\Sigma, аб}} = \frac{M_{вл}}{K_V V_{с. пор}} : \frac{M_{вл}}{K_p V_{с. пор}} = \frac{K_p}{K_V};$$

$$\begin{aligned} \frac{w_{\Sigma, м}}{w_{\Sigma, об}} &= \frac{M_{вл}}{M_{с. пор}} : \frac{V_{вл}}{K_p V_{с. пор}} = \\ &= \frac{M_{вл}}{V_{вл}} \times \frac{K_p V_{с. пор}}{M_{с. пор}} = \rho_{вл} \frac{K_p}{\rho_{об}}; \end{aligned}$$

$$\frac{w_{\Sigma, м}}{w_{\Sigma, аб}} = \frac{M_{вл}}{M_{с. пор}} : \frac{M_{вл}}{K_p V_{с. пор}} = \frac{K_p V_{с. пор}}{M_{с. пор}} = \frac{K_p}{\rho_{об}};$$

$$\frac{w_{\Sigma, об}}{w_{\Sigma, аб}} = \frac{V_{вл}}{K_p V_{с. пор}} : \frac{M_{вл}}{K_p V_{с. пор}} = \frac{V_{вл}}{M_{вл}} = \frac{1}{\rho_{вл}}.$$

Выполненные исследования позволили впервые установить вид взаимосвязей между показателями содержания льда и незамёрзшей воды в мёрзлых горных породах и суммарными показателями влаги в этих породах. Показано, что в ряде случаев взаимосвязи между одними и теми же показателями могут различаться, что вызвано методом их вывода. Использование на практике полученных показателей позволяет в ряде случаев сократить количество лабораторных исследований по определению взаимосвязей между соответствующими иными показателями физических свойств мёрзлых горных пород и показателями суммарного содержания влаги и её отдельных компонентов в этих породах.

Библиографический список

1. Грунтоведение: Классический университетский учебник / В.Т. Трофимов, В.А. Королёв, Е.А. Вознесенский и др.; Под ред. В.Т. Трофимова. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.
2. Цытович Н.А. Механика мёрзлых грунтов (общая и прикладная): Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1973. – 448 с.
3. Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах / А.Ф. Антонов, Ю.А. Велли, В.В. Гальперин и др.; Под ред. Ю.А. Велли, В.И.



Докучаева, Н.Ф. Фёдорова. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отд-ние, 1977. – 552 с.

4. Anderson D.M., Pusch R., Penner E. Physical and thermal properties of frozen ground // Geotechnical Engineering for Cold Regions (O.B. Andersland and D.M.Anderson, Eds). N. Y.: Mc. Craw-Hill. 1978. – P. 37–102.

5. Fletcher N.H. The chemical of ice. Cambridge Univ. Press. 1970. – 271 p.

6. Hoekstra P. The physics and chemistry of frozen soils // Highway Research Board. Spec. Rep. № 103, 1969. – P. 78–80.

7. Большая Советская энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия. Т. 5. Вешин-газли, 1971. – 640 с.

8. Корнеева Т.В. Толковый словарь по метрологии, измерительной технике и управлению качеством. Основные термины: около 7000 терминов. – М.: Рус. яз., 1990. – 464 с.

9. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мёрзлых пород и льдов. – Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. – 515 с.

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

“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2016, № 1, pp. 25–32

Title:	The relationship between the total index moisture in the frozen rocks!
Author 1	Name&Surname: Yanchenko G.A. Company: National research technological University "MISiS" Work Position: Professor
Abstract:	Moisture in frozen rocks and soils is presented in the General case in the form of two components – ice and unfrozen water. To quantify the moisture content in these rocks were previously proposed two measures, named total and total moisture. The paper shows that such names incorrectly reflect the essence of these indicators. Actually it is the total mass humidity and moisture content. For a more complete and accurate assessment of the influence of moisture on physical properties of frozen rocks is proposed to use the total volume and absolute humidity and moisture content. Identified the relationship between all considered in the totals of moisture in frozen rocks.
Keywords:	frozen rock, total moisture, the total moisture content, the total absolute humidity, total absolute moisture content, the relationship between them
References:	1. The soil: the Classical University textbook / Trofimov V. T., Korolev V. A., E. A. Voznesensky and others; ed. by Trofimov V. T. – 6-e Izd., revised and enlarged extra – M.: Publishing house of Moscow state University, 2005. – 1024 p. 2. Tsytovich N. And. Mechanics of frozen soils (General and applied): textbook for universities. – M.: Higher school , 1973. – 448 p. 3. Guide for construction on permafrost / A. F. Antonov, Y. A. valley, Vladimir Halperin and others; ed. by J. A. Vallet, V. I. Dokuchaev, N. F. Fyodorov. – L.: stroi-izdat, Leningrad-DEP, 1977. – 552 p. 4. Anderson D.M., Pusch R., Penner E. Physical and thermal properties of frozen ground // Geotechnical Engineering for Cold Regions (O.B. Andersland and D.M.Anderson, Eds). N. Y.: Mc. Craw-Hill. 1978. – P. 37–102. 5. Fletcher N.H. The chemical of ice. Cambridge Univ. Press. 1970. – 271 p. 6. Hoekstra P. The physics and chemistry of frozen soils // Highway Research Board. Spec. Rep. № 103, 1969. – P. 78–80. 7. The great Soviet encyclopedia. – M.: Owls. encyclopedia, Vol. 5. Veshin-gaz-li, 1971. – 640 p 8. Korneeva, T. V. Explanatory dictionary of Metrology, measurement technology and quality management. Key terms: ~ 7000 terms. – Moscow: Rus. lang., 1990. - 464 p. 9. Frolov A. D. Electrical and elastic properties of frozen rocks and ice. – Pushchino: ONTI pnts ran, 1998. -515 S. 10. Yanchenko, A. On the densities of rocks and minerals, Izv. universities. Mining magaz 2007. - No. 4. - P. 139 - 149.

