

Г.А. Янченко**О ВЗАИМОСВЯЗЯХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛОТНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ ВЛАЖНОСТИ И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ**

Выявлены взаимосвязи между показателями плотностных свойств горных пород и показателями содержания в них воды. Показано, что увлажнение пород изменяет их плотностные свойства, как напрямую (в породах появляется дополнительная масса), так и косвенно, влияя на разрыхляемость и набухаемость пород. Полученные взаимосвязи носят фундаментальный характер. Однако их использование в практических расчетах предъявляют определенные требования к исходным параметрам, входящим в эти взаимосвязи. Параметры определенные на образцах пород зачастую не полностью отражают особенности состояния массива горных пород.

Ключевые слова: горная порода, плотность, объемная плотность, насыпная плотность, влажность, влагосодержание, взаимосвязь.

При анализе влияния увлажнения горных пород на их плотностные свойства за показатели плотностных свойств горных пород были взяты плотность ρ , объемная плотность $\rho_{об}$ и насыпная плотность $\rho_{нас}$, которые в соответствии с рекомендациями работы [1] должны определяться следующим образом:

$$\rho = M_{с.пор} / V_{м.ск} = M_{м.ск} / V_{м.ск}; \quad (1)$$

$$\rho_{об} = M_{с.пор} / V_{с.пор} = M_{м.ск} / (V_{м.ск} + V_{пус}) = \rho(1 - P_{о.п}); \quad (2)$$

$$\rho_{нас} = M_{с.пор} / K_{раз} V_{с.пор} = \rho_{об} / K_{раз}, \quad (3)$$

где $M_{с.пор}$, $V_{с.пор}$, $M_{м.ск}$, $V_{м.ск}$ – масса, кг, и объем, m^3 , соответственно сухой породы в естественном (неразрушенном, неразрыхленном) состоянии и ее минерального скелета; $V_{р.с.пор}$ – объем разрыхленной сухой породы, m^3 ; $V_{пус}$ – суммарный объем всех пустот в сухой неразрушенной (неразрыхленной) породе, m^3 ; $P_{о.п.} = V_{пус} / V_{с.пор}$ – показатель общей пористости, дол. ед; $K_{раз} = V_{р.с.пор} / V_{с.пор}$ – коэффициент разрыхления сухой породы в результате ее разрушения или разрыхления в соответствующем процессе горного производства, дол. ед.

Согласно [1] эти показатели наиболее легко определяются в лабораторных условиях, то есть практически в стандартных физических условиях. Определенная таким образом плотность пород ρ является стандартным справочным показателем соответствующей породы. Величина ρ не изменяется в процессах ведения горных работ, когда может происходить изменение состояния породы (увлажнение, промерзание, разрушение и так далее). Объемная $\rho_{об}$ и насыпная $\rho_{нас}$ плотности горной породы в условиях ведения горных работ практически всегда изменяются, что предопределяет необходимость пересчета этих показателей применительно к конкретному изменению состояния породы. Как показано в [1] наиболее легко это осуществляется, если основой для пересчета является $\rho_{об}$, определенная по формуле (2).

Довольно сильное влияние на изменение состояния горных пород оказывает их увлажнение. Изменяются очень многие физические свойства горных пород, в том числе и плотностные.

Особенностью изменения состояния пород в результате их увлажнения является то, что вода при увлажнении пород располагается в порах, трещинах и других пустотах, изменяя объем пород не напрямую за счет прибавления своего объема, а косвенно, влияя на их набухаемость и разрыхляемость. При этом надо иметь в виду, что во влажных горных породах, особенно в связных и рыхлых, $K_{\text{раз}}$ и $K_{\text{наб}}$ в общем зависят от величины их влажности, что обозначим как $K_{\text{раз}}(W)$ и $K_{\text{наб}}(W)$. Зависимости и в ряде пород иногда могут иметь довольно сложный вид. Например, при увлажнении такой мелкозернистой породы как кварцевый песок может иметь место как уменьшение $K_{\text{раз}}$, так и его увеличение. Это обусловлено тем, что в определенных диапазонах влажности вода может способствовать слипанию мелких твердых частиц в более крупные конгломераты, а в других диапазонах – наоборот.

В [2] отмечено, что показателями содержания воды в горных породах, используемыми в различных процессах горного производства являются: массовая влажность W_m , массовое влагосодержание w_m , объемная влажность $W_{\text{об}}$, объемное влагосодержание $w_{\text{об}}$, размерное массовое влагосодержание d_m , абсолютная влажность $W_{\text{аб}}$ и абсолютное влагосодержание $w_{\text{аб}}$, определяемые следующим образом:

$$W_m = M_v / M_{\text{вл.пор}}; \quad (4)$$

$$w_m = M_v / M_{\text{с. пор}} = M_v / M_{\text{м. ск}}; \quad (5)$$

$$W_{\text{об}} = V_v / V_{\text{вл. пор}} = V_v / [K_v V_{\text{с. пор}}]; \quad (6)$$

$$w_{\text{об}} = \frac{V_v}{K_v V_{\text{с. пор}}}; \quad (7)$$

$$d_m = M_v / M_{\text{с. пор}}; \quad (8)$$

$$w_{\text{аб}} = \frac{M_v}{K_v V_{\text{с. пор}}}; \quad (9)$$

$$W_{\text{аб}} = M_v / V_{\text{вл. пор}} = M_v / (K_v V_{\text{с. пор}}), \quad (10)$$

где $M_{\text{вл.пор}}$, M_v – масса влажной породы и воды в ней, кг; $V_{\text{вл.пор}}$, V_v – объем влажной породы и воды в ней, м³; K_v – коэффициент изменения объема горных пород в результате их разрыхления (разрушения) и увлажнения, дол. ед.;

$$[W_a] = \frac{\text{кг ВОДЫ}}{\text{м}^3 \text{ вл. пор.}}; [W_m, w_m, W_{\text{об}}, w_{\text{об}}] = \text{дол. ед.}; [d_m] = \frac{\text{кг ВОДЫ}}{\text{кг сух. пор.}};$$

$$[w_{\text{аб}}] = \frac{\text{кг ВОДЫ}}{\text{м}^3 \text{ сух. пор.}}.$$

Если породы находятся в естественном (неразрыхленном, неразрушенном) состоянии ($K_{\text{раз}}(W) = 1,0$), то изменение их объема будет происходить только за счет увлажнения, поэтому у этих пород $K_v = K_{\text{наб}}(W)$, а изменение объема рыхлых пород может происходить, как за счет изменения коэффициента разрыхления $K_{\text{раз}}$ в ковше экскаватора будет отличаться от $K_{\text{раз}}$ в кузове автосамос-

вала, причем характер этого изменения будет зависеть от влажности породы), так и за счет изменения коэффициента набухания $K_{\text{наб}}(W)$, поэтому у этих пород K_V в общем виде определяется как $K_V = K_{\text{раз}}(W) K_{\text{наб}}(W)$. На практике при определении изменения объема рыхлых горных пород в результате изменения их разрыхляемости и увлажнения довольно трудно выделить по отдельности влияние $K_{\text{раз}}(W)$ и $K_{\text{наб}}(W)$ на величину K_V . Поэтому у этих пород экспериментально определяют непосредственно величину K_V , одновременно учитывающую влияние как $K_{\text{раз}}(W)$, так и $K_{\text{наб}}(W)$.

Показатели влажности и влагосодержания, определяемые по выражениям (4)...(10) соответствуют классическому подходу [4, 5] оценки состояния твердых веществ насыщенных влагой при положительных температурах. Согласно ему влажность характеризует содержание влаги в веществах, отнесенное на их влажное состояние, а влагосодержание – на сухое.

Чтобы выявить взаимосвязь между объемной плотностью влажной горной породы $\rho_{\text{об, вл.пор}}$ и W_M , учтем, что $M_{\text{с.пор}} = M_{\text{вл.пор}} (1 - W_M)$ [2]. Следовательно:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{об, вл.пор}} &= \frac{M_{\text{вл.пор}}}{V_{\text{вл.пор}}} = \frac{M_{\text{с.пор}}}{(1 - W_M) K_{\text{наб}}(W) V_{\text{с.пор}}} = \frac{1}{(1 - W_M) K_{\text{наб}}(W)} \left(\frac{M_{\text{с.пор}}}{V_{\text{с.пор}}} \right) = \\ &= \frac{\rho_{\text{об}}}{(1 - W_M) K_{\text{наб}}(W)} = \frac{(1 - P_{\text{о.п}}) \rho}{(1 - W_M) K_{\text{наб}}(W)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Учитывая взаимосвязь между $\rho_{\text{об, вл.пор}}$ и насыпной плотностью влажной рыхлой горной породы $\rho_{\text{нас, вл.пор}}$, получим:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{нас, вл.пор}} &= \frac{\rho_{\text{об, вл.пор}}}{K_{\text{раз}}(W)} = \frac{\rho_{\text{об}}}{(1 - W_M) K_{\text{раз}}(W) K_{\text{наб}}(W)} = \\ &= \frac{(1 - P_{\text{о.п}}) \rho}{(1 - W_M) K_{\text{раз}}(W) K_{\text{наб}}(W)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Учитывая, что $W_M = w_M / (1 + w_M)$ [2] и используя (11) и (12), получим взаимосвязи между $\rho_{\text{об, вл.пор}}$, $\rho_{\text{нас, вл.пор}}$ и w_M :

$$\rho_{\text{об, вл.пор}} = \frac{\rho_{\text{об}}}{\left(1 - \frac{w}{1 + w_M}\right) K_{\text{наб}}(W)} = \frac{\rho_{\text{об}} (1 + w_M)}{K_{\text{наб}}(W)} = \frac{(1 + w_M) (1 - P_{\text{о.п}}) \rho}{K_{\text{наб}}(W)}. \quad (13)$$

$$\rho_{\text{об, вл.пор}} = \frac{\rho_{\text{об}} (1 + w_M)}{K_{\text{раз}}(W) K_{\text{наб}}(W)} = \frac{(1 + w_M) (1 - P_{\text{о.п}}) \rho}{K_{\text{раз}}(W) K_{\text{наб}}(W)}. \quad (14)$$

Найдем теперь взаимосвязи между $\rho_{\text{об, вл.пор}}$, $\rho_{\text{нас, вл.пор}}$ и $w_{\text{об}}$. При этом учтем, что:

$$P_{\text{о.п}} = \frac{V_{\text{пус}}}{V_{\text{с.пор}}} = \frac{V_{\text{с.пор}} - V_{\text{м.ск}}}{V_{\text{с.пор}}}, \rightarrow V_{\text{с.пор}} = \frac{V_{\text{м.ск}}}{1 - P_{\text{о.п}}}, \rightarrow$$

$$V_{\text{вл.пор}} = K_{\text{наб}}(W) V_{\text{с.пор}} = \frac{K_{\text{наб}}(W) V_{\text{м.ск}}}{1 - P_{\text{о.п}}}.$$

Окончательно получаем:

$$\begin{aligned}\rho_{об, вл. пор} &= \frac{M_{вл. пор}}{V_{вл. пор}} = \frac{(M_{м. ск} + M_B)}{K_{наб}(W) V_{с. пор}} = \frac{1}{K_{наб}(W)} \left(\frac{M_{м. ск}}{V_{с. пор}} + \frac{V_B \rho_B}{V_{с. пор}} \right) = \\ &= \frac{\rho_{об} + w_{об} \rho_B}{K_{наб}(W)} = \frac{\rho_{об} + 1000 w_{об}}{K_{наб}(W)},\end{aligned}\quad (15)$$

где $[\rho, \rho_{об, вл. пор}] = \text{кг/м}^3$; $\rho_B \approx 1000 \text{ кг/м}^3$.

Взаимосвязь между $\rho_{нас, вл. пор}$ и $w_{об}$ найдем, учитывая, что насыпная плотность связана с объемной плотностью через $K_{раз}(W)$:

$$\rho_{нас, вл. пор} = \frac{\rho_{об, вл. пор}}{K_{раз}(W)} = \frac{\rho_{об} + w_{об} \rho_B}{K_{раз}(W) K_{наб}(W)} \approx \frac{\rho_{об} + 1000 w_{об}}{K_{раз}(W) K_{наб}(W)}.\quad (16)$$

Учитывая, что $w_{об} = K_{наб}(W) W_{об}$ [2], из (15) и (16) найдем взаимосвязи между $\rho_{об, вл. пор}$, $\rho_{нас, вл. пор}$ и $W_{об}$:

$$\begin{aligned}\rho_{об, вл. пор} &= \frac{\rho_{об} + w_{об} \rho_B}{K_{наб}(W)} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}(W)} + \frac{w_{об} \rho_B}{K_{наб}(W)} = \\ &= \frac{\rho_{об}}{K_{наб}(W)} + \rho_B W_{об} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}(W)} + 1000 W_{об};\end{aligned}\quad (17)$$

$$\rho_{нас, вл. пор} = \frac{1}{K_{раз}(W)} \left(\frac{\rho_{об}}{K_{наб}(W)} + W_{об} \rho_B \right) = \frac{1}{K_{раз}(W)} \left(\frac{\rho_{об}}{K_{наб}(W)} + 1000 W_{об} \right),\quad (18)$$

Если при определении d_m взять M_B и $M_{с. пор}$ в одинаковых единицах измерения, например в кг, то численно d_m и w_m будут равны. В этом случае взаимосвязи между $\rho_{об, вл. пор}$, $\rho_{нас, вл. пор}$ и d_m будут аналогичны выражениям (13) и (14):

$$\rho_{об, вл. пор} = \frac{\rho_{об} (1 + d_m)}{K_{наб}(W)} = \frac{(1 + d_m)(1 - P_{о.л}) \rho}{K_{наб}(W)}.\quad (19)$$

$$\rho_{нас, вл. пор} = \frac{\rho_{об} (1 + d_m)}{K_{раз}(W) K_{наб}(W)} = \frac{(1 + d_m)(1 - P_{о.л}) \rho}{K_{раз}(W) K_{наб}(W)}.\quad (20)$$

Учитывая, что $w_m = \frac{w_{аб}}{\rho_{об}}$ [2], найдем взаимосвязи между $\rho_{об, вл. пор}$, $\rho_{нас, вл. пор}$ и $w_{аб}$. Используя уравнения (13) и (14), получим:

$$\rho_{об, вл. пор} = \frac{\rho_{об} \left(1 + \frac{w_{аб}}{\rho_{об}} \right)}{K_{наб}(W)} = \frac{\rho_{об} + w_{аб}}{K_{наб}(W)} = \frac{(1 - P_{о.л}) \rho + w_{аб}}{K_{наб}(W)}.\quad (21)$$

$$\rho_{нас, вл. пор} = \frac{\rho_{об} + w_{аб}}{K_{раз}(W) K_{наб}(W)} = \frac{(1 - P_{о.л}) \rho + w_{аб}}{K_{раз}(W) K_{наб}(W)}.\quad (22)$$

Учитывая, что $W_{аб} = W_{об} \rho_B$ [2] и используя взаимосвязи (17) и (18), найдем взаимосвязи между $\rho_{об, вл. пор}$, $\rho_{нас, вл. пор}$ и W_a :

$$\rho_{об, вл. пор} = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}(W)} + W_{об} \rho_B = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}(W)} + \frac{W_{аб}}{\rho_B} \rho_B = \frac{\rho_{об}}{K_{наб}(W)} + \frac{W_{аб}}{\rho_B};\quad (23)$$

$$\rho_{\text{нас, вл. пор}} = \frac{1}{K_{\text{раз}}(W)} \left(\frac{\rho_{\text{об}}}{K_{\text{наб}}(W)} + W_{\text{аб}} \right). \quad (24)$$

Полученные выше взаимосвязи между показателями плотностных свойств горных пород и содержания воды в них носят фундаментальный характер. Однако их использование в практических расчетах предъявляет определенные требования к определению исходных параметров, входящих в эти взаимосвязи. Необходимо четко представлять себе, в каких условиях они получены. Например, если $P_{\text{о.п}}$ получен в лабораторных условиях на образцах горных пород, то навряд ли он будет объективно отражать $P_{\text{о.п}}$ горного массива, который может иметь большие пустоты природного или техногенного происхождения, которые невозможно учесть при отборе образцов.

Поэтому в идеале, в практических расчетах надо использовать исходные показатели, определенные экспериментально для конкретного состояния породы в рассматриваемом процессе горного производства. Однако в большинстве случаев проведение таких исследований практически невозможно. Приходится пользоваться данными, приведенными в соответствующих литературных источниках, которые зачастую не являются объективными характеристиками породы в данном процессе, или определенными в лабораторных условиях. В этом случае надо быть готовым к тому, что получаемые результаты расчетов будут содержать определенную погрешность. Насколько она будет большой, зависит от профессионализма специалиста и наличия соответствующей информации у него.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янченко Г.А. О показателях плотности горных пород и минералов // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 4. – С. 139–149.
2. Янченко Г.А. Показатели влажности и влагосодержания горных пород и взаимосвязи между ними // Горнопромышленные ведомости. – 2013. – № 6 – С. 81–91. **ГИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

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

UDC 622.02:552.08(045)

ON THE RELATIONSHIP INDICATORS DENSITY PROPERTIES OF ROCKS AND THEIR HUMIDITY AND MOISTURE

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

Identified the relationship between indicators of density of rock properties and parameters the content of water in them. It is shown that the hydration of rocks change their density properties, both directly (in the rocks, an additional mass), and indirectly by affecting raznijsmot and swelling properties of rocks. The resulting relationships are fundamental. However, their use in practical calculations impose certain requirements for the initial parameters included in these relationships. The parameters defined on the rock samples are often not fully reflect the characteristics of rock massif.

Key words: rocks, density, bulk density, bulk density, moisture content, moisture content, the relationship.

REFERENCES

1. Yanchenko G.A. Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal, 2007, no 4, pp. 139–149.
2. Yanchenko G.A. Gornopromyshlennye vedomosti, 2013, no 6, pp. 81–91.