

УДК 539.217

К ВОПРОСУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Ф. А. Ибрагимов, Т. Р. Тедеев, К. С. Харебов

Авторами разработана методика определения характеристик физического состояния пористых и капиллярно-пористых сред. Получены расчетные зависимости для определения количественных показателей поровой жидкости. Эти зависимости позволяют уточнить известные классификационные показатели многофазных пористых сред.

Рассмотрим пористую многокомпонентную среду, в общем случае состоящую из твердых частиц, жидкости и газа. В качестве примера можно привести почву, грунт, породу и т. д. Для рассматриваемого объема среды можно выделить объем, занятый твердыми частицами V_s и объем пор V_ν . Тогда полный объем среды $V_t = V_s + V_\nu$, где $V_\nu = V_w + V_g$, а V_g и V_w — соответственно объемы газа и жидкости (рис. 1).

Известно [3], что для единицы объема среды выполняется условие

$$m + n = 1, \quad (1)$$

где $n = V_\nu/V_t$ — объем пор среды, $m = V_s/V_t$ — объем твердых частиц среды.

Представим величину пористости n рассматриваемой среды в виде суммы

$$n = n_w + n_g. \quad (2)$$

Для объема жидкости приведем следующее известное отношение

$$n_w = V_w/V_t = nS_w, \quad (3)$$

где S_w — степень влажности или коэффициент водонасыщенности [3]:

$$S_w = n_w/n = W/W_{sw}. \quad (4)$$

Здесь W_{sw} — полная влагоемкость, соответствующая полному заполнению пор среды жидкостью:

$$W_{sw} = n\rho_w/m\rho_s, \quad (5)$$

где ρ_w — плотность жидкости (воды), ρ_s — плотность твердых частиц среды. Содержание газа в единице объема среды будем оценивать по величине

$$n_g = V_g/V_t = V_V/V_t - V_w/V_t = n - n_w, \quad (6)$$

или с учетом зависимости (3)

$$n_g = n - n_w = n - nS_w = n(1 - S_w). \quad (7)$$

Отношение объема газа к объему пор назовем степенью газосодержания и определим следующим образом

$$S_g = V_g/V_\nu = V_\nu/V_\nu - V_w/V_\nu = 1 - V_w/V_\nu. \quad (8)$$

Учитывая соотношения (3) и (4), зависимость (8) можно представить в виде

$$S_g = 1 - S_w, \quad (9)$$

или

$$S_w + S_g = 1. \quad (10)$$

Равенство (7) с учетом (9) принимает следующий вид

$$n_g = nS_g. \quad (11)$$

Для объема газа в единице объема рассматриваемой среды имеем

$$n_g = m_g/\rho_g = (m_a + m_c)/\rho_g, \quad (12)$$

где m_a — масса сухого воздуха, m_c — масса водяного пара. Учитывая, что $m_a = \rho_a n_a$ и $m_c = \rho_c n_c$, получим

$$n_g = (n_a \rho_a + n_c \rho_c)/\rho_g = n_a \rho_{ao} + n_c \rho_{co}, \quad (13)$$

где n_a и ρ_a — объем и плотность сухого воздуха, n_c и ρ_c — объем и плотность водяного пара.

Представим зависимость для объема газа (13) в виде суммы приведенных объемов сухого воздуха и водяного пара

$$n_g = n_a^p + n_c^p. \quad (14)$$

Справедливо следующее соотношение для приведенных объемов

$$n_a^p/n_c^p = \rho_{ao}/\rho_{co}, \quad (15)$$

где ρ_{ao} — относительная плотность сухого воздуха:

$$\rho_{ao} = \rho_a / \rho_g, \quad (16)$$

ρ_{co} — относительная плотность водяного пара:

$$\rho_{co} = \rho_c / \rho_g. \quad (17)$$

Известно [4], что сумма относительных плотностей бинарной смеси равна единице:

$$\rho_{ao} + \rho_{co} = 1. \quad (18)$$

Зависимость (14) можно представить в другом виде с учетом (9) и (11)

$$n_a^p + n_c^p = n(1 - S_w), \quad (19)$$

тогда принимая во внимание соотношение (15) имеем

$$n_a^p (\rho_{co} / \rho_{ao} + 1) = n(1 - S_w), \quad (20)$$

или с учетом (16)

$$n_a^p = n(1 - S_w) \rho_{ao} = n S_g \rho_{ao}. \quad (21)$$

Аналогично для водяного пара можно найти

$$n_c^p = n(1 - S_w) \rho_{co} = n S_g \rho_{co}. \quad (22)$$

Важно отметить, что следуя классическим традициям [2, 3] можно получить следующее:

$$n_a^p / n = S_a^p = (1 - S_w) \rho_{ao} = S_g \rho_{ao}. \quad (23)$$

Аналогично из соотношения (22) получается:

$$n_c^p / n = S_c^p = (1 - S_w) \rho_{co} = S_g \rho_{co}. \quad (24)$$

Складывая (23) и (24) получаем следующую зависимость

$$S_a^p + S_c^p = S_g (\rho_{ao} + \rho_{co}) = S_g, \quad (25)$$

учитывая (9) имеем

$$S_a^p + S_c^p + S_w = 1. \quad (26)$$

Известно [1], что по механизму образования и по энергии связи с твердой компонентой среды различают одиннадцать видов жидкой составляющей среды. Наиболее существенное значение в формировании свойств пористой среды

имеют следующие структурные разновидности пористой жидкости: жидкость мономолекулярной адсорбции, жидкость полимолекулярной адсорбции, диффузионная, капиллярная и гравитационная жидкости.

Общее содержание жидкой компоненты в среде составляет

$$W = W_{mw} + W_{pw} + W_{dw} + W_{cw} + W_{sw}, \quad (27)$$

где W_{mw} — влажность монослойной адсорбции:

$$W_{mw} = n_{mw} \rho_{mw} / m \rho_s, \quad (28)$$

W_{pw} — влажность полислойной адсорбции:

$$W_{pw} = n_{pw} \rho_{pw} / m \rho_s, \quad (29)$$

W_{dw} — диффузионная влажность:

$$W_{dw} = n_{dw} \rho_{dw} / m \rho_s, \quad (30)$$

W_{cw} — капиллярная влажность:

$$W_{cw} = n_{cw} \rho_{cw} / m \rho_s, \quad (31)$$

W_{sw} — гравитационная влажность;

$$W_{sw} = n_{sw} \rho_{sw} / m \rho_s. \quad (32)$$

Представим объем жидкости в единице объема рассматриваемой среды в следующем виде

$$n_w = n_{mw} + n_{pw} + n_{dw} + n_{cw} + n_{sw}, \quad (33)$$

или с учетом зависимости (4)

$$n_{mw} + n_{pw} + n_{dw} + n_{cw} + n_{sw} = n S_w. \quad (34)$$

Отношение объемов всех составляющих разновидностей жидкого компонента можно получить из соотношений (28) — (32). Окончательно такие соотношения имеют следующий вид:

$$\frac{n_{iw}}{n_{jw}} = \frac{W_{iw} \rho_{jw}}{W_{jw} \rho_{iw}}, \quad (i, j = m, p, d, c, s). \quad (35)$$

Подставляя зависимость (35) в равенство (34) можно выразить объем той или иной структурной разновидности пористой воды:

$$n_{iw} = nS_w M_{iw}, \quad (i = m, p, d, c, s), \quad (36)$$

где для каждой структурной разновидности величина M_{iw} имеет вид

$$M_{iw} = \frac{W_{iw}\rho_{iw}}{\sum_{i=m}^s W_{iw}/\rho_{iw}}, \quad (i = m, p, d, c, s). \quad (37)$$

Заметим, что сумма величин M_{iw} для всех структурных разновидностей воды равна единице:

$$\sum_{i=m}^s M_{iw} = 1, \quad (i = m, p, d, c, s). \quad (38)$$

Для определения степени содержания той или иной структурной разновидности представим зависимость (36) в следующем виде

$$n_{iw}/n = S_{iw} = S_w M_{iw}, \quad (i = m, p, d, c, s). \quad (39)$$

Суммированием зависимостей вида (39) можно получить

$$\sum_{i=m}^s S_{iw} = S_w \sum_{i=m}^s M_{iw}, \quad (40)$$

или с учетом соотношения (38)

$$\sum_{i=m}^s S_{iw} = S_w, \quad (i = m, p, d, c, s). \quad (41)$$

Подставляя зависимость (41) в развернутом виде в равенство (26) для всех составляющих компонентов среды имеем:

$$S_a^\rho + S_c^\rho + S_{mw} + S_{pw} + S_{dw} + S_{cw} + S_{sw} = 1. \quad (42)$$

Окончательно исходную зависимость (1) для единицы объема среды можно представить в виде:

$$m + n_a^\rho + n_c^\rho + n_{mw} + n_{pw} + n_{dw} + n_{cw} + n_{psw} = 1, \quad (43)$$

или с учетом (39)

$$m + nS_a^\rho + nS_c^\rho + nS_{mw} + nS_{pw} + nD_{dw} + nS_{cw} + nS_{sw} = 1, \quad (44)$$

вынося общий множитель — величину пористости n за скобки, имеем:

$$m + n(S_a^\rho + S_c^\rho + S_{mw} + S_{pw} + S_{dw} + S_{cw} + S_{sw}) = 1, \quad (45)$$

откуда с учетом (42) обратно получаем исходную зависимость (1).

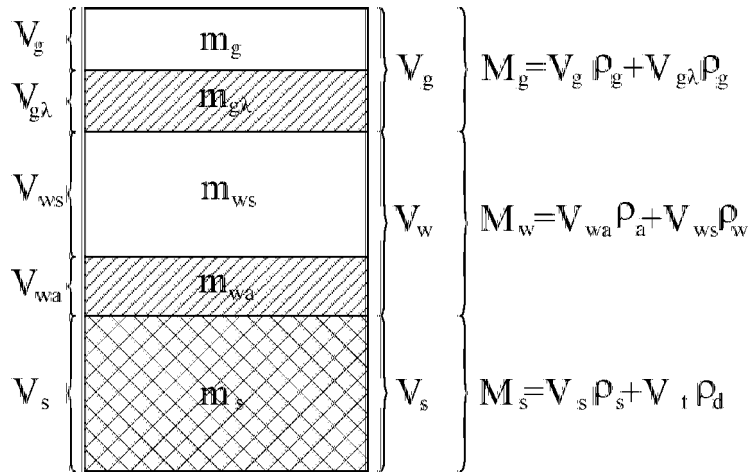


Рис. 1. Объем и масса составляющих компонентов в элементе пористой среды

В заключение отметим, что для практических расчетов величину степени влажности из зависимости (4) следует определять с учетом весового содержания структурных разновидностей поровой жидкости.

Литература

1. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы. / Под редакцией академика Сергеева Е.М.—М.: Недра, 1985.—354 с.
2. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды.—М.: Мир, 1971.—451 с.
3. Далматов Б. И. Механика грунтов. Основания и фундаменты.—Л.: Стройиздат, 1988.—415 с.
4. Лыков А. В. Тепломассообмен.—М.: Энергия, 1972.—560 с.