

УДК 539.217

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ СВЯЗАННОЙ ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

**В. Б. Заалишвили, Т. Р. Тедеев, К. С. Харебов**

В данной работе получены аналитические зависимости, позволяющие прогнозировать колебания плотности на всем интервале изменения связанной жидкости. Разработанная методика учитывает особенности структурных разновидностей поровой влаги. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с экспериментальными данными других авторов.

Известно [4], что методика определения плотности связанной воды, которая сравнительно больше свободной, требует дальнейшего совершенствования. Немногочисленные экспериментальные и теоретические исследования [2, 3] носят противоречивый и незаконченный характер.

Рассмотрим некоторый объем капиллярно-пористой среды. При массе скелета среды  $m_d$ , объем будет равен

$$V_t = \frac{m_d}{\rho_d}, \quad (1)$$

а для объема твердых частиц среды имеем

$$V_s = \frac{m_d}{\rho_s}, \quad (2)$$

где  $\rho_d$  — плотность скелета пористой среды;  $\rho_s$  — плотность твердых частиц пористой среды.

Предположим, что в порах среды содержится вода, величина (количество) которой соответствует максимальной молекулярной влагоемкости

$$W_{mmw} = W_{mw} + W_{pw} + W_{dw}, \quad (3)$$

где  $W_{mw}$  — влага монослойной адсорбции,  $W_{pw}$  — влага полислойной адсорбции,  $W_{dw}$  — диффузионная влажность.

Суммарный объем жидкости в среде будет составлять

$$n_w = n_{mw} + n_{pw} + n_{dw}. \quad (4)$$

Представим объем твердого компонента вместе с жидкой в следующем виде

$$V_s = \frac{m_d}{\rho_s} + \frac{m_{mw}}{\rho_{mw}} + \frac{m_{pw}}{\rho_{pw}} + \frac{m_{dw}}{\rho_{dw}}, \quad (5)$$

где  $\rho_{mw}$  — плотность мономолекулярной влаги,  $\rho_{pw}$  — плотность полимолекулярной влаги,  $\rho_{dw}$  — плотность диффузионной влаги.

Соотношение (5) можно переписать в другом виде:

$$V_s = m_d \left[ \frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{1}{\rho_{mw}} \cdot \frac{m_{mw}}{m_d} + \frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{m_{pw}}{m_d} + \frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{m_{dw}}{m_d} \right]. \quad (6)$$

Заметим, что величина  $V_s$  из зависимости (6) не является контракционным объемом капиллярно-пористой среды [1].

Величину влагосодержания среды будем оценивать по верхнему пределу полимолекулярной адсорбции

$$H_w = \frac{W}{W_{mpw}}, \quad (7)$$

т. е. если  $H_w = 1$ , то влажность среды будет  $W = W_{mpw}$ .

Зависимость (7) можно переписать в развернутом виде:

$$\left( \frac{m_w}{m_d} \right)^{Aw} = H_w \left( \frac{m_w}{m_d} \right)^{mpw}. \quad (8)$$

Нижний предел влагосодержания среды представим следующим образом:

$$\left( \frac{m_w}{m_d} \right)^{Aw} = H_w^i \left( \frac{m_w}{m_d} \right)^{mpw}. \quad (9)$$

Если считать, что  $H_w^i$  — нижняя граница влагосодержания, а  $\rho_{iw}$  — плотность воды при этой влажности, то для влажности мономолекулярной адсорбции можно написать равенство

$$\frac{H_w}{\rho(H_w)} \left( \frac{m_w}{m_d} \right)^{mpw} = \frac{H_w^i}{\rho_{iw}} \left( \frac{m_w}{m_d} \right)^{mpw} + \frac{H_w - H_w^i}{\rho_{mw}} \left( \frac{m_w}{m_d} \right)^{mpw} \quad (10)$$

или преобразованием можно получить

$$\frac{H_w}{\rho(H_w)} = \frac{H_w}{\rho_{mw}} - \frac{H_w^i}{\rho_{mw}} \left( \frac{\rho_{iw} - \rho_{mw}}{\rho_{iw}} \right). \quad (11)$$

После того, как мы вынесем общий множитель  $\frac{1}{\rho_{mw}}$  за скобки, получим

$$\frac{H_w}{\rho(H_w)} = \frac{1}{\rho_{mw}} \left[ H_w - H_w^i \left( 1 - \frac{\rho_{mw}}{\rho_{iw}} \right) \right]. \quad (12)$$

Для влажности монослойной адсорбции окончательно можно написать

$$\rho(H_w) = \frac{H_w \rho_{mw}}{H_w - H_w^i \left( 1 - \frac{\rho_{mw}}{\rho_{iw}} \right)} \quad (13)$$

или с учетом зависимости (7) имеем

$$\rho(W) = \frac{W \rho_{mw}}{W - W_w^i \left( 1 - \frac{\rho_{mw}}{\rho_{iw}} \right)}, \quad (14)$$

где  $W_w^i$  — плотность при  $H_w = H_{iw}$ .

В интервале полимолекулярной адсорбции  $H_w^m < H_w \leq H_w^p$  равенство (10) можно представить в следующем виде

$$\frac{H_w}{\rho(H_w)} = \frac{H_w^i}{\rho_{iw}} + \frac{H_w^m - H_w^i}{\rho_{mw}} + \frac{H_w - H_w^m}{\rho_{pw}} \quad (15)$$

или после некоторых преобразований имеем

$$\frac{H_w}{\rho(H_w)} = \frac{1}{\rho_{pw}} \left[ H_w - H_w^i \frac{\rho_{pw}}{\rho_{mw}} \left( 1 - \frac{\rho_{mw}}{\rho_{iw}} \right) - H_w^m \left( 1 - \frac{\rho_{pw}}{\rho_{mw}} \right) \right]. \quad (16)$$

Окончательно зависимость для определения плотности в интервале полислойной адсорбции имеет вид

$$\rho(H_w) = \frac{H_w \rho_{pw}}{H_w - H_w^i \frac{\rho_{pw}}{\rho_{mw}} \left( 1 - \frac{\rho_{mw}}{\rho_{iw}} \right) - H_w^m \left( 1 - \frac{\rho_{pw}}{\rho_{mw}} \right)} \quad (17)$$

или через влажность пористой среды

$$\rho(W) = \frac{W \rho_{pw}}{W - W_w^i \frac{\rho_{pw}}{\rho_{mw}} \left( 1 - \frac{\rho_{mw}}{\rho_{iw}} \right) - W_w^m \left( 1 - \frac{\rho_{pw}}{\rho_{mw}} \right)}. \quad (18)$$

На интервале диффузионной влажности  $H_w^p < H_w \leq H_w^{dw}$  для определения зависимости плотности от влажности можно составить равенство

$$\frac{H_w}{\rho(H_w)} = \frac{H_w^i}{\rho_{iw}} + \frac{H_w^m - H_w^i}{\rho_{mw}} + \frac{H_w^p - H_w^m}{\rho_{pw}} + \frac{H_w - H_w^p}{\rho_{dw}} \quad (19)$$

или после некоторых преобразований, получим

$$\frac{H_w}{\rho(H_w)} = \frac{H_w}{\rho_{dw}} - \frac{H_w^i}{\rho_{mw}} \left[ 1 - \frac{\rho_{mw}}{\rho_{iw}} \right] - \frac{H_w^m}{\rho_{pw}} \left[ 1 - \frac{\rho_{pw}}{\rho_{mw}} \right] - H_w^p \left[ 1 - \frac{\rho_{dw}}{\rho_{pw}} \right]. \quad (20)$$

Вынося величину  $\frac{1}{\rho_{dw}}$  за общие скобки, имеем

$$\frac{H_w}{\rho(H_w)} = \frac{1}{\rho_{dw}} \left\{ H_w - H_w^i \frac{\rho_{dw}}{\rho_{mw}} \left[ 1 - \frac{\rho_{mw}}{\rho_{iw}} \right] - H_w^m \frac{\rho_{dw}}{\rho_{pw}} \left[ 1 - \frac{\rho_{pw}}{\rho_{mw}} \right] - H_w^p \left[ 1 - \frac{\rho_{dw}}{\rho_{pw}} \right] \right\}. \quad (21)$$

Окончательно для диффузионного интервала изменения влажности зависимость плотности от влажности имеет вид

$$\rho(H_w) = \frac{H_w \rho_{dw}}{H_w - H_w^i \frac{\rho_{dw}}{\rho_{mw}} \left( 1 - \frac{\rho_{mw}}{\rho_{iw}} \right) - H_w^m \frac{\rho_{dw}}{\rho_{pw}} \left( 1 - \frac{\rho_{pw}}{\rho_{mw}} \right) - H_w^p \left( 1 - \frac{\rho_{dw}}{\rho_{pw}} \right)} \quad (22)$$

или с учетом зависимости (7)

$$\rho(W) = \frac{W \rho_{dw}}{W - W_w^i \frac{\rho_{dw}}{\rho_{mw}} \left( 1 - \frac{\rho_{mw}}{\rho_{iw}} \right) - W_w^m \frac{\rho_{dw}}{\rho_{pw}} \left( 1 - \frac{\rho_{pw}}{\rho_{mw}} \right) - W_w^p \left( 1 - \frac{\rho_{dw}}{\rho_{pw}} \right)}. \quad (23)$$

В первом приближении для ориентировочных расчетов, при условии, что нижний предел влагосодержания находится в интервале полислойной адсорбции, можно составить следующее упрощенное равенство

$$\frac{H_w}{\rho(H_w)} = \frac{H_p}{\rho_p} + \frac{H_w - H_p}{\rho_w}, \quad (24)$$

где  $\rho_w$  — плотность воды  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ .

Из равенства (24) преобразованием можно получить

$$\frac{H_w}{\rho(H_w)} = \frac{H_p}{\rho_p} - \frac{H_p}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_p} \right). \quad (25)$$

Окончательно зависимость для плотности связанной воды имеет вид

$$\rho(H_w) = \frac{H_w \rho_w}{H_w - H_p \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_p}\right)} \quad (26)$$

или учитывая зависимость (7) можно написать

$$\rho(W) = \frac{W \rho_w}{W - W_p \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_p}\right)}. \quad (27)$$

На основе разработанной методики рассмотрим модельную задачу определения плотности в зависимости от влажности (рис. 1).

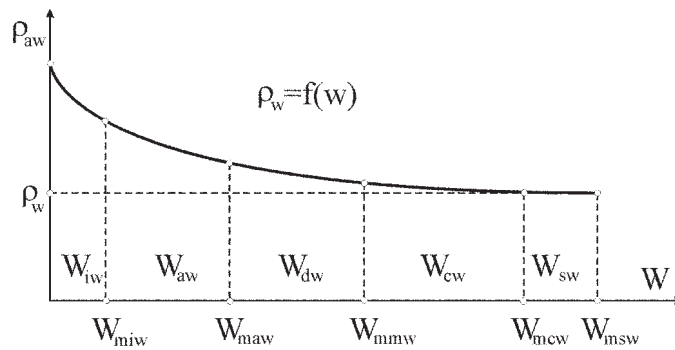


Рис. 1. Условная кривая изменения плотности связанной воды пористой среды

Для ориентировочных расчетов выделим три характерных интервала изменения влажности: интервал монослойной адсорбции  $H_W^I \leq H_W \leq H_W^M$ , интервал полислойной адсорбции  $H_W^M < H_W \leq H_W^P$  и интервал диффузионной влажности  $H_W^P < H_W \leq H_W^d$ . Примем на интервале монослойной адсорбции следующие расчетные значения плотности —  $\rho_{IW} = 1.8 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{MW} = 1.44 \text{ г/см}^3$ , в качестве верхней границы интервала полислойной адсорбции имеем —  $\rho_{PW} = 1.2 \text{ г/см}^3$ , для диффузионного интервала будем считать, что  $\rho_{dW} = \rho_W = 1 \text{ г/см}^3$ . На исследуемом интервале  $H_W^I \leq H_W \leq H_W^P$  функцию влагосодержания будем оценивать по величине относительной упругости водяного пара  $P/P_S$ . Для сравнения полученных результатов приведем экспериментальные данные Кульчицкого Л. И. из [3], см. таблицу 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента по величине $P/P_s$												
$P/P_s$	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
												0.98
$\rho\left(\frac{P}{P_s}\right)$	1.80	1.51	1.44	1.38	1.31	1.30	1.29	1.29	1.31	1.30	1.29	1.2
Результаты расчетов авторов по величине $H_w$												
$H_w$	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$\rho(H_w)$	1.80	1.48	1.45	1.31	1.27	1.25	1.24	1.24	1.23	1.23	1.22	1.22

При этом согласно зависимости (13) для первого интервала имеем  $\rho(H_W) = H_W \cdot 1.44 / (H_W - 0.002)$ , второй интервал согласно (17) характеризуется  $\rho(H_W) = H_W \cdot 1.2 / (H_W - 0.017)$  и для диффузионного интервала из зависимости (22) получается  $\rho(H_W) = H_W / (H_W - 0.181)$ . Результаты расчета приведены в таблице 1.

Анализ зависимостей (10)–(23) позволяет сделать следующие выводы:

1. Полученные аналитические зависимости позволяют прогнозировать колебания плотности на всем интервале изменения связанной влаги и в то же время сравнительно просты для применения в расчетах.

2. Преимущество разработанной методики заключается в учете особенностей структурных разновидностей поровой влаги.

3. Результаты сравнительного расчета по поставленной задаче показали, что расхождение с данными эксперимента составляет 2–5%.

### Литература

1. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона.—М.: Стройиздат, 1981.—464 с.
2. Далматов Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты.—Л.: Стройиздат, 1988.—415 с.
3. Кульчицкий Л. И. Роль воды в формировании свойств глинистых пород.—М.: Недра, 1975.—212 с.
4. Тер-Мартirosян З. Г. Прогноз механических процессов в массивах многофазных грунтов.—М.: Недра, 1986.—292 с.