

Графо-аналитические методы исследования фазовых характеристик влажных грунтов

Костюкович И.П., Костюкович П.Н.
(БГПА)

Определению фазовых характеристик влажных грунтов предшествует измерение четырех основных величин: объема образца V , его массы до высушивания q и после высушивания при температуре $105...110^{\circ}\text{C}$ q_1 и объема твердых частиц V_1 , масса которых q_1 . При этом объем воды в грунте V_2 численно приравнивается к ее массе ($V_2=q_2=q-q_1$) и предполагается, что граница между твердой и жидкой фазами является устойчивой и абсолютно непроницаемой, не позволяющей изменяться объемам и массам фаз при высушивании грунта различной влажности.

По измеренным значениям объемов и масс рассчитываются: плотность грунта $\rho = q / V$, плотность скелета (абсолютно сухого) грунта $\rho_d = q_1 / V$, плотность твердого компонента (твердых частиц) $\rho_s = q_1 / V_1$, абсолютная (весовая) $W = q_2 / q_1$ и объемная $W_0 = V_2 / V = q_2 / V$ влажности, пористость $n = V_n / V$, коэффициенты пористости $e = V_n / V_1$ и водонасыщения $G = V_2 / V_n$, где V_n — объем пор.

Опираясь на имеющийся опыт графо-аналитической обработки экспериментальных данных в грунтоведении и гидрогеологии [1,2], выведем основные корреляционные соотношения, наблюдаемые между фазовыми характеристиками влажных грунтов. Для этого предположим, что имеется множество опытных значений $W_0(W_{01}, W_{02} \dots)$ и $W(W_1, W_2, \dots)$ для какого-либо грунта естественной или нарушенной структуры. Тогда можем записать:

$$\begin{aligned} W_0 &= q_2 / V = q_1 / V \cdot q_2 / q_1 = (q - q_1) / V = \\ &= \rho_d W = \rho - \rho_d. \end{aligned} \quad (1)$$

Из (1) следует, что в координатах W_0-W функция $W_0=f(W)$ представляет собой прямую, исходящую из начала координат ($W_0=W=0$) и имеющую угловой коэффициент, численно равный ρ_d :

$\text{tg} \alpha = \rho_d = \text{const} \neq f(W)$. Это значит, что объемная влажность грунта прямо пропорциональна его абсолютной влажности, а коэффициент

пропорциональности численно равен плотности скелета грунта. Отсюда получаем

$$\left. \begin{aligned} \rho_d &= (W_{02} - W_{01}) / (W_2 - W_1) = \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const} \neq f(W); \\ \rho_d &= W_0 \quad \text{при } W = 1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Равенства (2) позволяют дать новое определение важнейшей фазовой характеристике грунтов ρ_d : величина плотности скелета грунта численно равна его объемной влажности при абсолютной влажности, равной единице.

Поскольку гравитационная, рыхло- и прочносвязанная разновидности волю являются главными факторами, влияющими на взаимодействие фаз и свойства грунтов, то уравнение графика $W_0=f(W)$ положим в основу понятия «фазовая модель» грунта. Очевидно, фазовая модель будет линейной или нелинейной в зависимости от геометрической формы этого графика. Выражения (1) и (2) показывают, что современные представления о фазовых характеристиках грунтов базируются на теории и методологии линейной фазовой модели, определяющим уравнением которой служит функция (1).

Установим, какие корреляционные соотношения присущи линейной фазовой модели. Для этого «разложим» плотность грунта на составляющие:

$$\begin{aligned} \rho &= q / V = q_1 / V + q_1 / V \cdot q_2 / q_1 = \\ &= \rho_d(1 + W) = \rho_d + \rho_d W. \end{aligned} \quad (3)$$

Из (3) видно, что между ρ и ρ_d существуют следующие важные равенства:

$$\rho = 2\rho_d \quad \text{при } W=1; \quad (4)$$

$$\rho = \rho_d \quad \text{при } W=0; \quad (5)$$

$$\rho_d = (\rho_2 - \rho_1) / (W_2 - W_1) = \rho / (1 + W) = \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}. \quad (6)$$

Эти равенства указывают на то, что плотность грунта ρ равна удвоенной плотности его скелета при $W=1$ и плотности скелета при нулевой весовой влажности. Таким образом, равенства (4)...(6) позволяют дать параметру ρ_d два различных определения: 1) плотность скелета грунта есть плотность грунта при его нулевой

влажности; и 2) плотность скелета грунта характеризует темп изменения его плотности ρ при изменении влажности W .

Из (3) следует, что в плоскости $\rho - W$ функция $\rho = f(W)$ представляет собой прямую, отсекающую на оси ординат отрезок ρ_d и имеющую угловой коэффициент $\operatorname{tg}\alpha = \rho_d = \text{const}$. Это значит, что начиная с абсолютно сухого состояния ($W=0$) плотность грунта прямо пропорциональна его весовой влажности, а коэффициентом пропорциональности служит ρ_d .

Третьим классическим примером прямой функциональной зависимости между водно-физическими свойствами грунтов может служить корреляция между ρ и W_0 . Если учесть, что численно $q_2 = V_2$, то имеем

$$\rho = q/V = q_1/V + q_2/V = \rho_d + W_0. \quad (7)$$

$$\rho = \rho_d \text{ при } W_0=0. \quad (8)$$

Сопоставляя (5) и (8), получаем обобщенное определение ρ : плотность грунта есть плотность его скелета при нулевых значениях весовой и объемной влажностей. Определение справедливо и относительно ρ_d : плотность скелета грунта есть плотность грунта в абсолютно сухом состоянии.

Соотношение (7) показывает, что в плоскости $\rho - W_0$ функция $\rho = f(W_0)$ представляет собой прямую, отсекающую на оси ординат отрезок ρ_d и имеющую угловой коэффициент $\operatorname{tg}\alpha = 1$. Это значит, что начиная с абсолютно сухого состояния ($W_0=0$) плотность грунта прямо пропорциональна его объемной влажности, а коэффициентом пропорциональности является 1, т.е. плотность воды.

Следующим примером прямой функциональной зависимости между фазовыми характеристиками грунтов является соотношение между ρ_d и n :

$$\begin{aligned} \rho_d &= q_l/V = q_l/(V_l + V_n) = l/(l/\rho_s + n/\rho_d) = \\ &= \rho_d \rho_s / (\rho_d + n \rho_s). \end{aligned}$$

Разделив обе части этого равенства на ρ_d , получим

$$\rho_d = \rho_s(l - n) = \rho_s - \rho_s n, \quad (9)$$

откуда

$$\rho_d = \rho_s \text{ при } n=0; \quad (10)$$

$$\rho_d = \rho_s = 0 \text{ при } n=1. \quad (11)$$

Из (9) следует, что плотность скелета грунта возрастает к плотности его твердых частиц при условии, что пористость стремится к нулю. Следовательно, плотность твердых частиц грунта есть плотность его скелета при нулевой пористости. Но поскольку даже кристаллические породы обладают пористостью (граниты 0,05-2,0%; кварциты 4-8%; базальты 3-6% и т.д.), то очевидно, что экспериментальные значения

ρ_s будут меньше их теоретических (предельных) значений, достигаемых при $n=0$.

В координатах $\rho_d - n$ график функции $\rho_d = f(n)$ представляет собой прямую, отсекающую на оси ординат отрезок $\rho_d = \rho_s$, а на оси абсцисс — отрезок $n=1$. Это значит, что с ростом пористости плотность скелета грунта уменьшается по линейной зависимости от максимального значения $\rho_d = \rho_s$ при $n=0$ до нуля при $n=1$; темп уменьшения ρ_d характеризуется угловым коэффициентом прямой $\rho_d = f(n)$:

$$\operatorname{tg} \alpha = (\rho_{d2} - \rho_{d1}) / (n_2 - n_1) = \rho_d / (n - 1) = -\rho_s. \quad (12)$$

Получим еще одно преобразование, позволяющее графо-аналитическим способом вести обработку массовых анализов грунтов. Для этого воспользуемся определением коэффициента водонасыщения (относительной влажности или коэффициента влажности):

$$G = V_2 / V_n = (V_2 / V) / (V_n / V) = W_0 / n = (\rho_d / n)W. \quad (13)$$

Из (13) видно, что в координатах $G - W$ график функции $G=f(W)$ представляется прямой, исходящей из начала координат ($G=W=0$) и имеющей угловой коэффициент $\operatorname{tg} \alpha = \rho_d / n = \operatorname{const} \neq f(W)$.

Выражения (1)...(13) показывают, что в линейной фазовой модели такие показатели фазового состояния грунта как W_0 , ρ , G находятся в линейной зависимости от абсолютной влажности, а фазовые характеристики ρ_s , ρ_d , n , e не зависят от влажности, являются константами и определяются как угловые коэффициенты или начальные отрезки соответствующих линейных функций W или n .

Экспериментальная апробация фазовой модели (1)...(13) осуществлялась на многочисленных массивах опытных данных, содержащихся в отчетах Белорусской гидрогеологической экспедиции и характерных для большинства мелких и средних водосборов Беларуси. Анализ показал, что фазовое состояние мелких песков

(рис.1), супесей (рис.2) и суглинков (рис.3), распространенных в верхней толще четвертичных отложений, характеризуется комбинированными фазовыми моделями. Эти модели представляют собой синтез линейной модели (при $0 < W \leq W_0$) с нелинейной (при $W > W_0$), где W_0 – фазовая влажность, являющаяся границей между линейной и нелинейной частями графика $W_0 = f(W)$. С возрастанием дисперсности грунтов значения W_0 уменьшаются и составляют: у песков 16...20%; у супесей и легких суглинков 10...13%; у глин 5...7% и менее (см. табл.).

Фазовое состояние торфяных отложений Беларуси практически на всем диапазоне изменения их влажности (от 10...20 до 800...900%) характеризуется нелинейной фазовой моделью $W_0 = \rho_d(W) \cdot W$ (рис.4).

Таблица

Влияние влажности на осредненные величины фазовых характеристик глин Беларуси. Здесь W, W_0, n – %; ρ, ρ_d – г/см³; e, G – д.е. Расчет n выполнен для наблюдаемого в опытах условия (при $0 < W \leq 36\%$): $\rho_s = \text{const} \neq f(W) = 2,7 \text{ г/см}^3$.

W	W ₀	ρ_d	ρ	n	e	G
0	0	2.19	2.19	19.0	0.23	0
1.5	3.28	2.19	2.223	19.0	0.23	0.17
3.0	6.57	2.19	2.256	19.0	0.23	0.35
4.5	9.8	2.18	2.278	19.0	0,23	0.52
6.0	12.7	2.12	2.247	21.0	0.26	0.60
7.5	15.3	2.04	2.193	24.0	0.32	0.64
9.0	18.0	2.0	2.18	26.0	0.35	0.69
10.5	20.5	1.95	2.155	28.0	0.39	0.73
12.0	22.9	1.91	2.139	29.0	0.41	0.79
13.5	25.1	1.86	2.111	31.0	0.45	0.81
15.0	27.5	1.83	2.105	32.0	0.47	0.86
18.0	31.7	1.76	2.077	35.0	0.54	0.91
21.0	35.5	1.69	2.045	37.0	0.59	0.96
24.0	38.9	1.62	2.009	40.0	0.67	0.97
27.0	41.9	1.55	1.969	43.0	0.75	0.97
30.0	44.5	1.48	1.924	45.0	0.82	0.99
33.0	46.5	1.41	1.875	48.0	0.92	0.97
36.0	47.9	1.33	1.809	51.0	1.04	0.94

Таким образом, применение графо-аналитических методов исследования фазового состояния грунтов Беларуси показало, что в сухом состоянии (при $W \leq W_0$) они обладают всеми свойствами линейной модели (1)...(13) и их расчетные характеристики ρ_s , ρ_d , n , e не зависят от W ; во влажном состоянии (при $W > W_0$) - подчиняются закономерностям нелинейных моделей $W_0 = \rho_d(W) \cdot W$ и их расчетные характеристики, традиционно определяемые по формулам линейной модели $\rho_d = W_0 / W$, становятся функциями влажности. Это говорит о том, что достоверность оценки фазовых характеристик грунтов зависит прежде всего от соответствия расчетной модели уравнению графика $W_0=f(W)$.

Физические процессы, обуславливающие переход линейной модели в нелинейную при различных значениях фазовой влажности, связаны со строением пограничных слоев поровой воды у поверхности твердых частиц, температурой и режимом сушки грунтов, их гидрофильностью, дисперсностью, минералогическим составом и другими факторами, которые требуют отдельного рассмотрения. Во всех случаях формирование нелинейной модели $W_0 = \rho_d(W) \cdot W$ свидетельствует о том, что в диапазоне $W > W_0$ фазовые константы ρ_d , n , e и нередко ρ_s (как у торфов, супесей и суглинков) являются функциями W , а линейные зависимости $\rho(W)$ и $G(W)$ модели (1)...(13) становятся нелинейными (рис.1...4, табл.). Учитывая вид этих функций, легко строить математические основы фазовых моделей. К примеру, в мелких песках Беларуси на всем диапазоне изменения их влажности $\rho_s = \text{const} = 2,65 \text{ г/см}^3$; в диапазоне $0 < W \leq W_\phi = 16\%$ имеет место линейная, а при $W > W_\phi$ - нелинейная модель следующего типа (рис.1):

$$W_0 = \rho_d W, \quad \rho_d = W_0 / W = \text{const} = 1,7 \text{ г/см}^3, \quad 0 < W \leq W_\phi = 0,16; \quad (14)$$

При $W > W_\phi = 0,16$:

$$W_0 = \rho_d(W)W; \quad \rho_d(W) = W_0 / W = 2,066 - 2,286W; \quad (15)$$

$$\rho(W) = \rho_d(W)(1 - W); \quad e(W) = n(W) / [1 - n(W)] \quad (16)$$

$$n(W) = 1 - \rho_d(W) / \rho_s; \quad G(W) = [\rho_d(W) / n(W)]W. \quad (17)$$

Переход от функций $\rho_d(W)$, $n(W)$ и $e(W)$ к соответствующим константам модели (14)...(17) приводит к изменению их размерности и может быть осуществлен на основе теории обобщенных моделей нелинейной фильтрации.

Названия рисунков

Рисунок 1. Фазовая модель $W_0=f(W)$ мелких песков Беларуси и вытекающие из нее зависимости фазовых характеристик от влажности; 1 – линейная аппроксимация опытного графика $W_0=f(W)$ для области $W > W_\Phi = 16,0\%$. Здесь ρ, ρ_d – г/см³; n, e, G – д.е.; $\rho_s = 2,65$ г/см³.

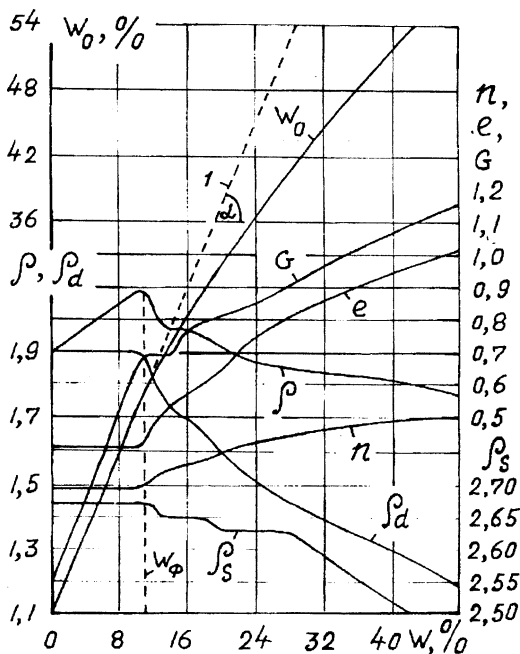
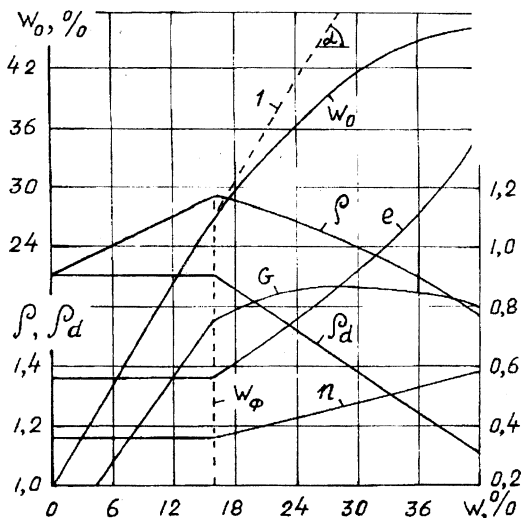


Рисунок 2. Фазовая модель $W_0=f(W)$ супесей Беларуси и вытекающие из нее зависимости фазовых характеристик от влажности; 1 – линейная аппроксимация опытного графика $W_0=f(W)$ для области

$$W > W_\Phi = 11,0\%.$$

Здесь ρ, ρ_d, ρ_s – г/см³; n, e, G – д.е.

Рисунок 3. Фазовая модель $W_0=f(W)$ суглинков Беларуси и вытекающие из нее зависимости фазовых характеристик от влажности; 1 — линейная аппроксимация опытного графика $W_0=f(W)$ для области $W > W_{\Phi} = 11,0\%$. Здесь

ρ, ρ_d, ρ_s — г/см³; n, e, G — д.е.

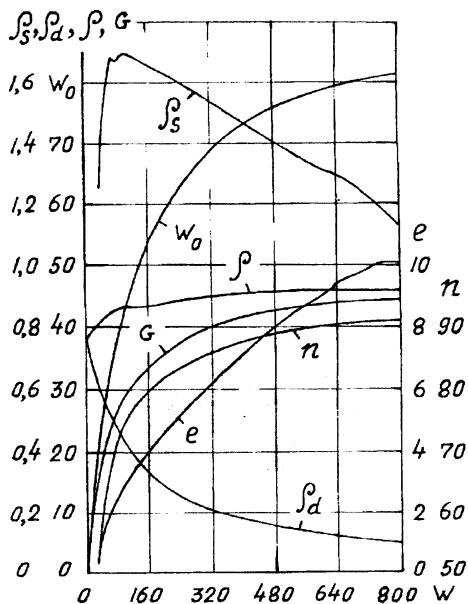
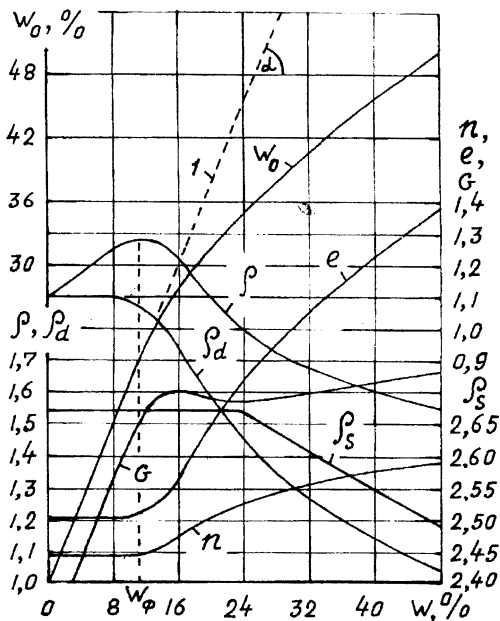


Рисунок 4. Фазовая модель $W_0=f(W)$ торфяных отложений Беларуси и вытекающие из нее зависимости фазовых характеристик от влажности. Здесь ρ, ρ_d, ρ_s — г/см³; W, W_0, n — %; e, G — д.е.