

УДК 622.023.2

ВЛИЯНИЕ АБСОРБЦИИ НА АКТИВНОЕ ДАВЛЕНИЕ ПЫЛЕВАТОГО ГРУНТА

Г. Хаджи-Никович¹, К. Джокович², С. Вуйич³

¹Белградский университет, E-mail: gordana.hadzinikovic@rgf.bg.ac.rs,
Дюшина, 7, г. Белград, Сербия,

²Институт испытаний материалов,
бул. Воеводы Мишича 43, г. Белград, Сербия

³Горный институт, E-mail: slobodan.vujic@ribeograd.ac.rs,
Батайнички пут, 2, г. Белград, Сербия

Подпорные стенки часто строят в ненасыщенных грунтах на небольших глубинах над уровнем грунтовых вод. Определение активного давления ненасыщенного грунта весьма важно для проектирования данных конструкций и основывается на расширенной теории боковых давлений Ранкина с учетом взаимозависимости активных давлений грунта и абсорбции в последнем. Для ненасыщенного пылеватого грунта, размещенного над уровнем грунтовых вод в длительных условиях, угол внутреннего трения определен на основании кривой “влажность – абсорбция”. Для различных глубин подпорных стен и значений абсорбции, которая постоянна или линейно убывает с глубиной, определены активные давления и критическая высота котлованов с вертикальными стенками без крепления. Результаты подтверждают, что абсорбция снижает силы активного давления на подпорную стену и критическая высота вертикальных котлованов (выемок) значительно растет при повышении абсорбции.

Ненасыщенный грунт, абсорбция, зависимость “влажность – абсорбция”, лабораторные испытания, активное давление грунта, стабильность вертикального котлована

При проектировании подпорных конструкций (подпорных стенок) самым существенным является определение активного давления грунта. Подпорные стенки часто строятся в ненасыщенном грунте, который отличается возможностью поглощения — абсорбцией или отрицательным поровым давлением. В результате поверхностного натяжения на границе раздела “воздух – вода” давление капиллярной воды ниже давления наружного воздуха. В таком случае абсорбция определяется как разность давления воздуха с наружной стороны мениска u_a и давления воды в мениске u_w , т. е. $u_a - u_w$ [1]. Абсорбция увеличивает сопротивление ненасыщенного грунта сдвигу и ее необходимо включить в лабораторные испытания и геостатические расчеты. Без учета данного факта активное давление грунта чаще всего определяется исходя из предположения, что грунт — насыщенный и воздействием абсорбции на сопротивление сдвигу ненасыщенного грунта пренебрегают. Традиционные анализы активного давления ненасыщенного грунта в этом случае приводят к неэкономичному проектированию подпорных конструкций [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования, науки и технологического развития Республики Сербии (проект TR 36014).

В результате абсорбции ненасыщенный грунт отличается сцеплением, состоящим из двух компонентов: первым является эффективное сцепление c' , для второго компонента $(u_a - u_w)\text{tg}\varphi^b$ необходимо знание абсорбции грунта $u_a - u_w$ и угла внутреннего трения ненасыщенного грунта φ^b . Исходя из данного подхода, в отношении ненасыщенного грунта можно применить теорию боковых давлений грунта Ранкина [3].

Толщина зоны над уровнем подземных вод на отдельных участках в районе г. Белграда может составлять 5–10 м. Для пылеватого грунта данной зоны определена ненасыщенная прочность на сдвиг грунта [4, 5] методом Ваналли [6]. Угол φ^b вычислен на основании характеристической кривой “влажность–абсорбция” [7] экспериментальным путем в 15-барном экстракторе с полупроницаемыми пластинами в соответствии со стандартом ASTM [8, 9]. Полученные результаты соответствуют таковым других исследователей [10, 11].

Результаты настоящей работы подтверждают, что абсорбция снижает силу активного давления ненасыщенного грунта. С учетом данного факта проектирование подпорных конструкций может быть более реальным и экономичным при условии сохранения абсорбции в грунте и после проведения геотехнических работ.

АКТИВНОЕ ДАВЛЕНИЕ НЕНАСЫЩЕННОГО ГРУНТА

Распределение активного давления ненасыщенного грунта зависит от распределения абсорбции по глубине [12]. Абсорбция может быть постоянной или убывать с глубиной до уровня грунтовых вод. При постоянной абсорбции общее сцепление — постоянное, диаграмма распределения активных давлений для ненасыщенного грунта сдвигается влево параллельно диаграмме насыщенного грунта (рис. 1).

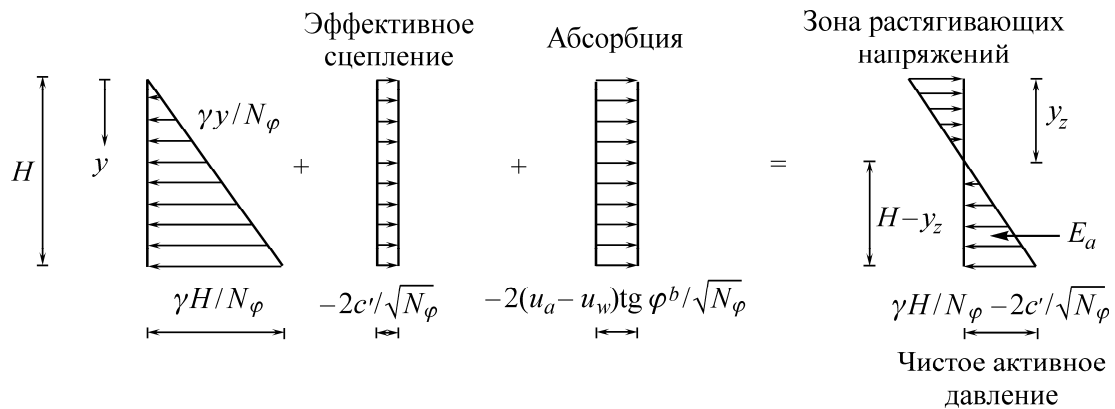


Рис. 1. Распределение активного давления ненасыщенного грунта с постоянной абсорбцией

Сила активного давления (равнодействующая активного давления) E_a может быть определена интегрированием активного давления грунта от основания стены до глубины зоны растяжения:

$$E_a = \frac{\gamma}{N_\varphi} \frac{(H^2 - y_z^2)}{2} - \frac{2c'}{\sqrt{N_\varphi}} (H - y_z) - \frac{2(u_a - u_w)\text{tg}\varphi^b}{\sqrt{N_\varphi}} (H - y_z), \quad (1)$$

где γ — удельный вес грунта; y_z — глубина зоны растяжения; c' — эффективное сцепление; $u_a - u_w$ — абсорбция; φ^b — угол трения, зависящий от абсорбции; N_φ — коэффициент:

$$\frac{1}{N_\varphi} = \text{tg}^2 \left[45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right], \quad (2)$$

здесь φ' — эффективный угол внутреннего трения.

Глубина зоны растягивающих напряжений также рассчитывается в зависимости от распределения абсорбции по глубине. При постоянной абсорбции для определения глубины растяжений y_z применяется соотношение

$$y_z = \frac{2c'}{\gamma} \sqrt{N_\varphi} + 2 \frac{(u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b}{\gamma} \sqrt{N_\varphi}. \quad (3)$$

Во многих случаях отмечается снижение абсорбции с глубиной: на поверхности грунта абсорбция самая высокая, на глубине уровня грунтовых вод — нулевая. Различные профили абсорбции, убывающей с глубиной, показаны на рис. 2.

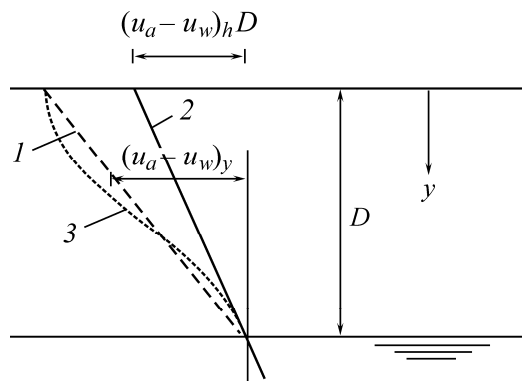


Рис. 2. Формы распределения абсорбции, снижающейся с глубиной: 1 — прямолинейная аппроксимация; 2 — гидростатическое распределение; 3 — типичное распределение отрицательного (избыточного) порового давления

Абсорбция на поверхности грунта выражается через гидростатическое давление с применением фактора f_w . Отрицательное поровое давление на поверхности грунта зависит от глубины до уровня грунтовых вод:

$$(u_a - u_w)_h = \gamma_w D, \quad (4)$$

где $(u_a - u_w)_h$ — абсорбция на поверхности грунта; D — глубина до уровня грунтовых вод.

При $y < D$ абсорбция равна

$$(u_a - u_w)_y = f_w (u_a - u_w)_h \left(1 - \frac{y}{D}\right). \quad (5)$$

При линейном снижении абсорбции по глубине до уровня грунтовых вод глубина зоны растягивающих напряжений (с учетом общего горизонтального давления $u_a = 0$)

$$y_z = \frac{2c' \sqrt{N_\varphi} + 2 f_w (u_a - u_w)_h \operatorname{tg} \varphi^b \sqrt{N_\varphi}}{\gamma + \frac{2 \sqrt{N_\varphi}}{D} f_w (u_a - u_w)_h \operatorname{tg} \varphi^b}. \quad (6)$$

Эпюры активного давления ненасыщенного грунта с абсорбцией, которая линейно убывает с глубиной, представлены на рис. 3.

При проведении геотехнических работ откосы временных выемок в цементированном мелкозернистом (тонкозернистом) грунте обычно остаются стабильными даже в случаях, когда они вертикальные или почти вертикальные [13]. Предполагая, что в данном случае образуется клин с ровной поверхностью скольжения, критическую высоту вертикальной выемки H_c можно определить из условия равновесия сил, действующих на оползающий клин (рис. 4).

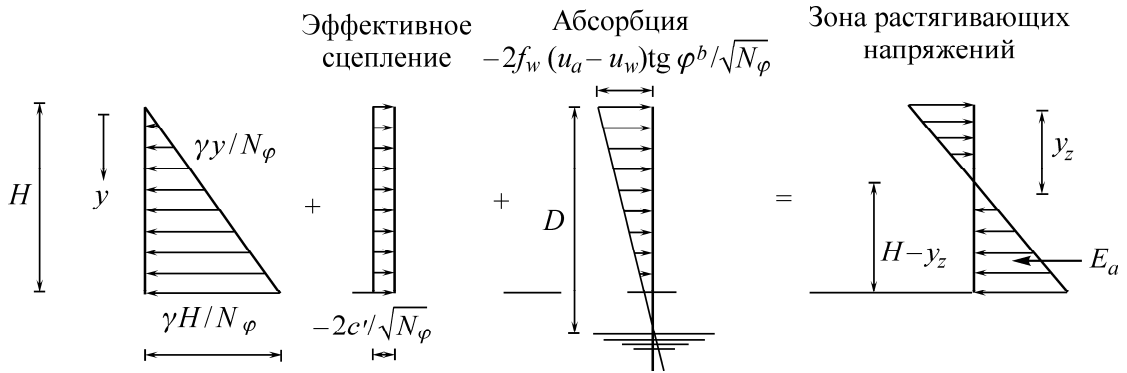


Рис. 3. Распределение активного давления ненасыщенного грунта с линейно убывающей абсорбцией

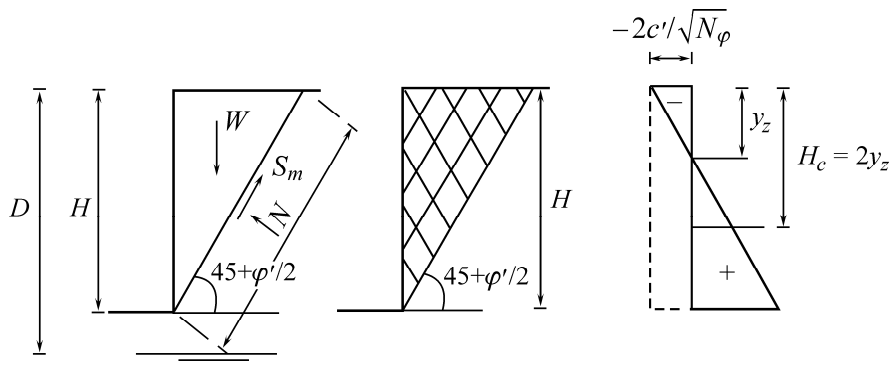


Рис. 4. Критическая высота выемки без крепления стенок в ненасыщенном грунте

Поверхность скольжения формируется под углом $45^\circ + \varphi/2$ по отношению к горизонтали. Сдвигающая сила S_m , оказывающая сопротивление скольжению, содержит часть прочности ненасыщенного грунта, зависящую от абсорбции $u_a - u_w$:

$$S_m = c'l + (N - u_a l) \operatorname{tg} \varphi' + (u_a - u_w) l \operatorname{tg} \varphi^b, \quad (7)$$

где N — нормальная составляющая; l — длина поверхности скольжения.

Зная глубину зоны растягивающих напряжений y_z , можно найти критическую глубину вертикальной стенки выемки без ее крепления:

$$H_c = 2y_z. \quad (8)$$

Сила активного давления на подпорную стенку равна нулю при высоте выемки, равной двойному значению глубины зоны растяжения. При глубине выемки меньше критической H_c выемка устойчива и без крепления (в предположении, что грунт подвергается определенным напряжениям растяжений без появления трещин). Трещины сдвига в грунте снижают критическую глубину выемки H_c .

СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ НЕНАСЫЩЕННОГО ГРУНТА

Сопротивление сдвигу ненасыщенного грунта [14] можно определить на основании характеристической кривой “влажность – абсорбция SWCC” [15] и исходя из эффективных параметров прочности насыщенного грунта c' и φ' . Имеется несколько подходов и уравнений для расчета сопротивления сдвигу ненасыщенного грунта [16]. В настоящей работе применялся подход Ванапалли [6]:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi' S_e, \quad (9)$$

где τ_f — сопротивление сдвигу ненасыщенного грунта; c' — эффективное сцепление насыщенного грунта; φ' — эффективный угол внутреннего трения насыщенного грунта; $\sigma - u_a$ — чистое нормальное напряжение; $u_a - u_w$ — абсорбция; S_e — эффективная водонасыщенность, определенная на основании характеристической кривой “влажность – абсорбция SWCC” [7].

Параметр сопротивления сдвигу ненасыщенного грунта φ^b представляет собой угол внутреннего трения, зависящий от абсорбции. Его также можно найти исходя из эффективной водонасыщенности [17, 18]:

$$\operatorname{tg} \varphi^b f_w(u_a - u_w) = S_e \operatorname{tg} \varphi'. \quad (10)$$

Для значения абсорбции в грунте принимается гидростатическое распределение отрицательного порового давления по отношению к уровню грунтовых вод. Значение абсорбции зависит от глубины уровня грунтовых вод, поверхностного и приповерхностного дренажа вокруг объекта, микроклиматических условий вокруг объекта, изменения уровня грунтовых вод в результате строительства объекта и пр.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТА И ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЙ

Исследования проводились на ненасыщенном пылеватом грунте холмистого участка в районе г. Белграда. Поверхность участка представлена комплексом пылеватых осадочных пород толщиной до 10 м. В данном комплексе выделяются два горизонта лессовых осадочных пород с измененной первичной структурой и слой погребенной почвы, расположенный между ними в виде пластов с высокой долей мелкозернистой (глинистой) фракции по отношению к измененным лессам осадочных пород. Глины и мергели размещены под данным комплексом на глубине 10–15 м. Грунтовые воды находятся на глубине более 10 м [4].

Осадочные породы содержат до 75 % частиц размером 0.06–0.002 мм, содержание фракции больше 0.06 мм — 10–15 %, меньше 0.002 мм — также 10–15 %. В отношении фазового состава данные осадочные породы содержат 60–65 % твердых частиц. Пористость составляет 35–40 %, влажность 18–20 %, уровень насыщенности 75–80 %. Объемный вес сухого грунта — 16.0–17.0 кН/м³, объемный вес в естественном влажном состоянии $\gamma = 19.0 - 20.0$ кН/м³.

В соответствии с классификацией Касагранде, лесные осадочные породы являются среднепластичными глинами CI с границей текучести $LL = 36 - 39$ %, границей раскатывания $PL = 23$ %, числом пластичности $PI = 13 - 16$ %, коллоидной активностью $K_p > 1.25$.

По геологическим и гидрогеологическим характеристикам грунта и их физическим свойствам понятно, что данные осадочные породы находятся выше уровня грунтовых вод и в ненасыщенном состоянии.

Для образцов пылеватого ненасыщенного грунта путем лабораторных испытаний определены:

- характеристики кривой “влажность – абсорбция”, т. е. эффективный уровень насыщения – абсорбция, $S_e - (u_a - u_w)$ -зависимости;
- зависимости ненасыщенного сопротивления сдвигу от абсорбции, т. е. $\tau_f - (u_a - u_w)$ -зависимости;
- зависимости угла внутреннего трения ненасыщенного грунта от абсорбции, т. е. $\varphi^b - (u_a - u_w)$ -зависимости.

Характеристические кривые “эффективная степень насыщения – абсорбция” получены в результате экспериментальных испытаний путем дренирования насыщенных образцов грунта под разным давлением в 15-баровом экстракторе с полупроницаемыми пластинами в соответствии со стандартами ASTM [8, 9]. Проведены также трехосные эксперименты по определению эффективного сцепления c' и эффективного угла внутреннего трения φ' насыщенного грунта [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты экспериментов использовались для определения силы активного давления ненасыщенного грунта на подпорную стенку. Характеристическая кривая “эффективная степень насыщения – абсорбция”, полученная для одного из образцов, показана на рис. 5.

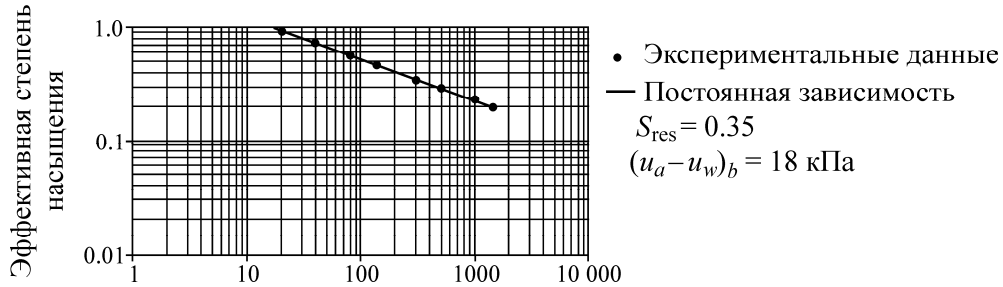


Рис. 5. Характеристическая кривая “эффективная степень насыщения – абсорбция”

Зависимости сопротивления сдвигу ненасыщенного грунта τ_f от абсорбции $u_a - u_w$ с применением уравнения (9) приведены на рис. 6а, а зависимости угла внутреннего трения ненасыщенного грунта φ^b от абсорбции $u_a - u_w$ с помощью уравнения (10) — на рис. 6б.

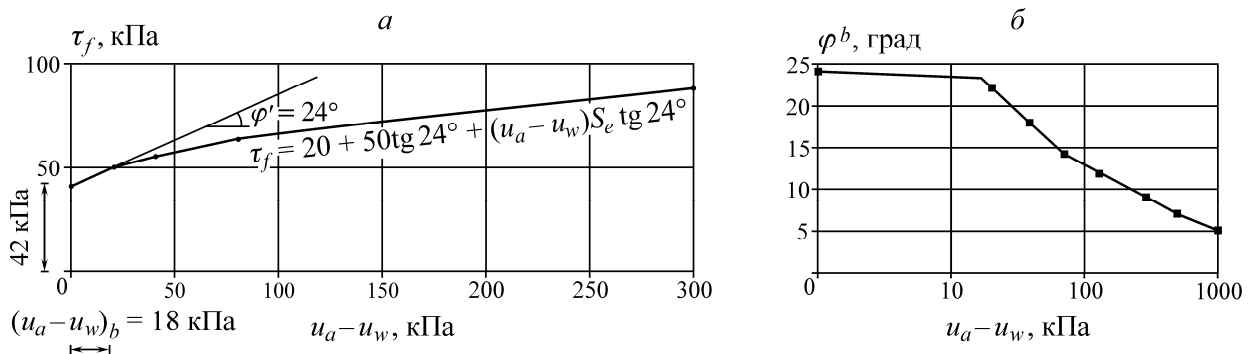


Рис. 6. Зависимость от абсорбции: а — сопротивления сдвигу ненасыщенного грунта; б — угла внутреннего трения ненасыщенного грунта

Активное давление ненасыщенного грунта σh_a и сила активного давления E_a для разных высот подпорной стенки и разных значений абсорбции в условиях постоянной абсорбции показаны в табл. 1 и на рис. 7а, в условиях линейно убывающей с глубиной абсорбции — в табл. 2 и на рис. 7б.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что абсорбция значительно влияет на силу активного давления грунта на подпорную стенку. При увеличении абсорбции в грунте с 0 до 60 кПа сила активного давления, действующая на подпорную стенку высотой 5 м, снижается с 32 до 0 кПа (рис. 7а).

Даже при постоянной абсорбции по глубине ее следует замерять на протяжении времени. При этом значение силы активного давления на стенку меняется: самая большая сила возникает при абсорбции, равной нулю. Это подтверждает значимость роли ненасыщенного сопротивления сдвигу грунта над уровнем грунтовых вод.

ТАБЛИЦА 1. Активное давление грунта и сила активного давления при условии постоянной абсорбции

Высота подпорной стенки, м	σh_a , кПа	Абсорбция $u_a - u_w$, кПа						
	E_a , кН/м	0	20	40	60	80	100	150
Глубина зоны растягивающих напряжений y_z , м		2.25	3.2	4.2	5.2	6.2	7.1	9.6
$H_1 = 5.0$	σh_{a1}	23.8	15.3	6.9	—	—	—	—
	E_{a1}	32.3	13.6	2.8	—	—	—	—
$H_2 = 7.5$	σh_{a2}	45.4	36.9	28.5	20.1	11.6	3.2	—
	E_{a2}	119.15	78.9	47.0	23.3	7.8	—	—
$H_3 = 10.0$	σh_{a3}	67.02	58.6	50.1	41.7	33.3	24.8	3.7
	E_{a3}	259.7	198.3	145.4	100.5	63.9	35.6	—

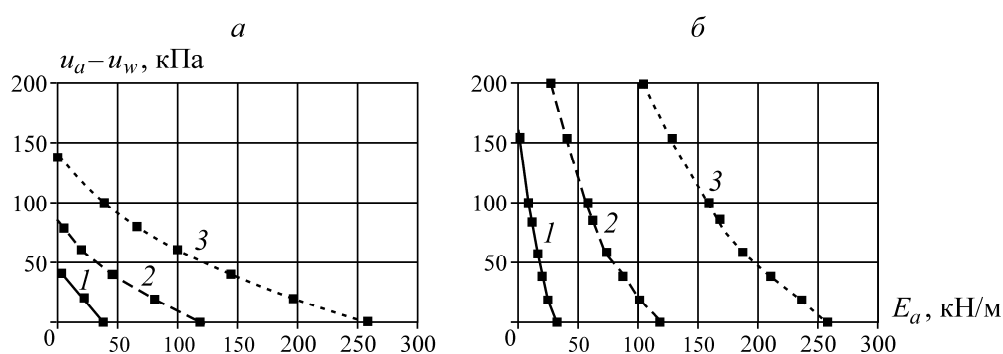


Рис. 7. Зависимость между силой активного давления на стенку и абсорбцией в ненасыщенном грунте: *a* — с постоянной абсорбцией; *б* — с линейно убывающей абсорбцией (1 — $H = 5$ м; 2 — 7.5; 3 — 10 м)

ТАБЛИЦА 2. Сила активного давления грунта при условии линейно убывающей по глубине абсорбции

Высота подпорной стенки, м	y_z , м	Абсорбция $u_a - u_w$, кПа						
	E_a , кН/м	0	20	40	60	80	100	150
$H_1 = 5.0$	y_{z1}	2.75	2.77	3.17	3.48	3.73	3.93	4.31
	E_{a1}	32.3	24.9	19.2	15.02	11.41	8.44	4.41
$H_2 = 7.5$	y_{z2}	5.25	2.9	3.42	3.85	4.22	4.53	5.14
	E_{a2}	119.2	102.1	88.5	73.7	64.6	57	43.53
$H_3 = 10.0$	y_{z3}	7.75	2.97	3.57	4.09	4.55	4.94	5.75
	E_{a3}	259.7	232.8	210.33	190.7	173.09	158.17	128.61

В случае линейно убывающей абсорбции с глубиной (рис. 7б) силы активного давления рассчитаны при условии уровня грунтовых вод на 1 м ниже основания стенки и при $f_w = 1$ (абсорбция грунта определена в соответствии с гидростатическим распределением). Из анализа результатов, показанных на рис. 7б, становится ясным, что сила активного давления при росте абсорбции снижается в меньшей степени, чем в случае ненасыщенного грунта с постоянной абсорбцией.

Сила активного давления на стенку зависит также от абсорбции грунта. С увеличением абсорбции сила активного давления действует ближе к основанию стены.

Анализ прочности вертикальной выемки без крепления выполнен для постоянной абсорбции и для абсорбции, линейно убывающей по глубине. Результаты анализа прочности и критической глубины выемки без крепления при постоянной абсорбции в грунте представлены в табл. 3 и на рис. 8.

ТАБЛИЦА 3. Критические глубины выемки без крепления при постоянной абсорбции по глубине

$u_a - u_w$, кПа	0	20	40	60	80	100
y_{z2} , м	2.25	3.2	4.2	5.2	6.2	7.1
H_{c2} , м	4.5	6.4	8.4	10.4	12.3	14.2

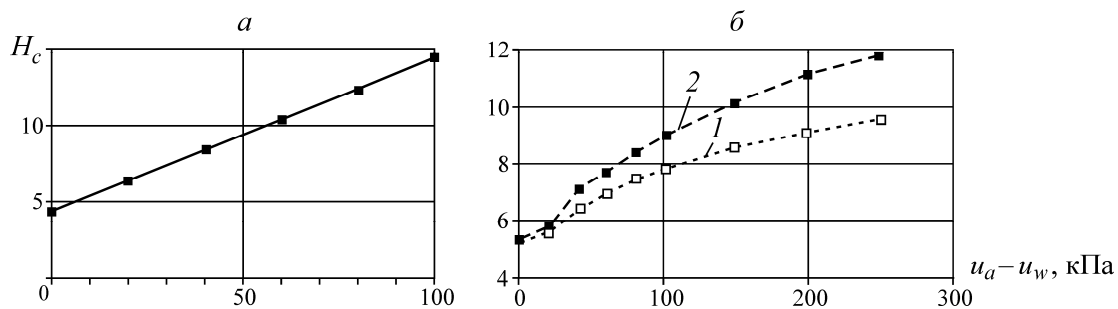


Рис. 8. Зависимость критической глубины выемки без крепления от абсорбции в ненасыщенном грунте: а — с постоянной абсорбцией; б — с линейно убывающей абсорбцией (1 — уровень грунтовых вод 6.0 м; 2 — 8.5 м)

Результаты анализа прочности и критической высоты выемки без крепления при линейно убывающей абсорбции по глубине представлены в табл. 4. Анализ устойчивости проводился по двум разным уровням грунтовой воды: $D_1 = 6.0$ и $D_2 = 8.5$ м от поверхности участка.

ТАБЛИЦА 4. Критические глубины выемок без крепления в грунте с линейно убывающей абсорбцией

$u_a - u_w$, кПа	0	20	40	60	80	100	150
y_{z1} , м для $D = 6.0$ м	2.25	2.8	3.2	3.5	3.7	3.9	4.3
H_{c1} , м	5.5	5.6	6.4	7.0	7.4	7.8	8.6
y_{z2} , м для $D = 8.5$ м	2.25	2.9	3.6	3.8	4.2	4.5	5.1
H_{c2} , м	5.5	5.8	7.2	7.6	8.4	9.0	10.2

ВЫВОДЫ

При анализе активных давлений в ненасыщенном грунте необходимо определить параметры сопротивления сдвигу для эффективных напряжений: сцепление c' , угол внутреннего трения φ' и общее сцепление c . Для установления общего сцепления необходимы угол внутреннего трения ненасыщенного грунта φ^b и значение абсорбции грунта. Для пылеватых осадочных пород в ненасыщенном состоянии углы φ^b определены на основании опытной зависимости влажности от абсорбции. Значение абсорбции определялось с учетом глубины уровня грунтовых вод.

Наличие абсорбции в грунте значительно снижает интенсивность сил активного давления на подпорную стенку. Абсорбция может быть постоянной по глубине или убывающей при увеличении глубины. В ненасыщенном грунте с постоянной абсорбцией по глубине при увеличении абсорбции с 0 до 100 кПа сила активного давления на подпорную стенку высотой 7.5 м

снижается с 120 кПа до нуля. Сила активного давления в ненасыщенном грунте с линейно убывающей абсорбцией снижается меньше, чем в грунте с постоянно убывающей абсорбцией. С ростом абсорбции сила активного давления действует ближе к основанию подпорной стенки.

Критическая глубина вертикальной выемки без крепления в ненасыщенном грунте равна двойной глубине зоны растягивающих напряжений. Критическая глубина также растет с ростом абсорбции. Важным является сохранение абсорбции грунта после выемки, которое можно достичь защитой от дополнительного увлажнения. При наличии в грунте трещин сдвига критическая глубина выемки будет снижаться. Глубина зоны растягивающих напряжений растет с ростом абсорбции грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gens A.** The development of unsaturated soil mechanics, Proceedings of Šuklje day 2014, Slovensko geotehniško društvo, Ljubljana, 2013.
2. **Fredlund D. G.** Unsaturated soil mechanics in engineering practice, Journal of geotechnical and environmental engineering ASCE, 2006, Vol. 132, Issue 3.
3. **Fredlund D. G. and Rahardjo H.** Soil mechanics for unsaturated soils, Wiley & Sons, New York, 2006.
4. **Hadži-Niković G.** Constitutive dependencies of unsaturated soil area of Belgrade, PhD Thesis, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, 2005.
5. **Hadži-Niković G.** The influence of the grain-size distribution and soil structure on the unsaturated shear strength of loess sediments in Belgrade, Annales Geologiques de la Peninsule Balkanique, 2009, No. 70.
6. **Vanapalli S. K., Fredlund D. G., Pufahl D. E., Clinton A. W.** Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, Canadian Geotechnical Journal, 1996, Vol. 33, No. 3.
7. **Brooks R. H. and Corey A. T.** Hydraulic properties of porous media, Colorado State Univ. Hydrol. Paper, 1964, No. 3.
8. **ASTM D 2325-68.** Standard test method for capillary-moisture relationships for coarse- and medium textured soils by porous-plate apparatus.
9. **ASTM D 3152-72.** Standard test method for capillary-moisture relationships for fine-textured soils by pressure-membrane apparatus.
10. **Vanapalli S. K., Fredlund D. G., Pufahl D. E.** The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till, Geotechnical Testing Journal, 1996, 19/3.
11. **Vanapalli S. K. and Fredlund D. G.** Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength, Proc. Geo Denver Conf ASCE Special Publication, 2000, No. 99, Reston.
12. **Skachkov M. N.** Density and pressure in granular media in the gravity field, Journal of Mining Science, 2011, Vol. 47, No. 1.
13. **Yakovlev D. V., Tsirel' S. V., Zuev B. Yu., and Pavlovich A. A.** Earthquake impact on pitwall stability, Journal of Mining Science, 2012, Vol. 48, No. 4.
14. **Fredlund D. G., Xing A., Fedlund M. D., and Barbour S. L.** The relationship of the unsaturated soil shear strength function to the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33, No. 3.
15. **Barbour S. L.** The soil-water characteristic curve – a historical perspective and application to the behaviour of unsaturated soils, Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35.
16. **Bobryakov A. P., Revuzhenko A. F.** Loose material flow on the slope of conic embankment, Journal of Mining Science, 2005, Vol. 41, No. 2.
17. **Wang X., Pan Y., and Wu X.** A continuum grain-interface-matrix model for slabbing and zonal disintegration of the circular tunnel surrounding rock, Journal of Mining Science, 2013, Vol. 49, No. 2.
18. **Mamaev Yu. A. and Khrunina N. P.** Effect of water saturation on elastic characteristics of alluvial sands in terms of the nagim river placer, Journal of Mining Science, 2012, Vol. 48, No. 5.

Поступила 15/XII 2014