

КРИТИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВЫХ СРЕДАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

Т. И. Кравченко, В. В. Филатов

Владимирский государственный университет

Поступила в редакцию 28 июля 2015 г.

Аннотация: в статье выполнено исследование устойчивости слоистых водонасыщенных оснований под действием внешних нагрузок с оценкой критического усилия, возникающего в грунтовых средах. Сопоставлены результаты исследования несущей способности однослойных и многослойных водонасыщенных грунтовых сред под действием различных внешних нагрузок на основания сооружений. Расчётом установлено, что запас прочности в моделях слоистых водонасыщенных грунтовых сред ниже на 3-5 %, чем в моделях однослойных сред при одинаковых физико-механических грунтовых показателях от действия тех же нагрузок. При анализе графических зависимостей так же отмечено, что угол наклона графиков $P_{кр}(\gamma)$ и $P_{кр}(C)$ к оси абсцисс для моделей многослойных сред меньше, чем, для моделей однослойных сред. Графические зависимости позволяют упростить расчёты критических усилий и максимальной глубины их развития для слоистых водонасыщенных грунтов, получить общую характеристику несущей способности грунтового полупространства.

Ключевые слова: водонасыщенный грунт, модель грунтовой среды, многослойные грунтовые среды, критическое давление, неравносторонняя нагрузка, симметричная нагрузка, грунтовое полупространство, угловые коэффициенты.

CRITICAL EFFORTS IN WEAK WATER-SATURATED SOILS UNDER THE ACTION OF EXTERNAL LOADS

Abstract: in the paper investigation of the stability of a layered water-saturated grounds under the action of external loads the evaluation of critical forces encountered in underground environments. The Matched results of the research bearing capacity of single-layer and multi-layer water-saturated soils under the action of various external loads to the Foundation structures. The calculation determined that a margin of safety in models of layered saturated soils is lower by 3-5 % than in models of single-layer media with the same physical and mechanical soil indicators from the actions of those same loads. The analysis of the graphic dependences also noted that the slope of curves $RRC(\gamma)$ and $RRC(C)$ to the axis of the abscisses for models of multi-media is smaller than for models of single-layer media. Graphic dependences allow to simplify calculations of critical effort and maximum depth for their development of layered saturated soils, General characteristics of the bearing capacity of the soil half-space.

Keywords: saturated soil, the model of soil, layered soil environment, critical pressure, neravnomernaya load, balanced load, the soil half-space, the angular coefficients.

Введение

Проектировщикам часто приходится сталкиваться с комплексом проблем, возникающих при строительстве новых и реконструкции существующих инженерных сооружений в районах распространения слабых водонасыщенных, глинистых, торфяных грунтов и илов, которые широко распространены на территории России. На различной глубине от поверхности земли встречаются грунты, пропитанные водой. Грунтовые воды оказывают большое влияние на структуру и физическое состояние грунтов. Вода задерживается при просачивании над водоупорными (главным образом – тяжелыми глинистыми) грунтами и накапливается в водопроницае-

мых грунтовых слоях. Изменение уровня грунтовых вод после возведения сооружения может резко понизить прочность основания и вызвать серьезные деформации сооружения. Поэтому при проектировании сооружения на водонасыщенных слабых грунтах необходимо выполнять специальные научные исследования: установить пределы распространения плывунов, возможность выноса их в местах резких перепадов поверхности рельефа, характер и рельеф подстилающих грунтов. Результатом исследований является расчёт устойчивости слабых грунтовых сред, как оснований инженерных сооружений с учётом несущей способности в зависимости от степени их водонасыщения.

1. Расчёт несущей способности многослойных и однослойных грунтовых сред

В работах [1–3] представлено решение плоской задачи в линейной постановке под действием внешней нагрузки, приложенной к полупространству, эпюра которой представляет прямоугольный треугольник. В трудах [4–5] рассмотрен общий случай, когда модель многослойной грунтовой среды представляет собой два плоско-параллельных слоя (один из них водонасыщенный), лежащих на однородном полупространстве, а эпюра внешней нагрузки имеет вид некоторых треугольных и трапециевидных нагрузок (рис. 1а и

ба). При расчётах, мощности поверхностного и водонасыщенного слоёв приняты $h_1 = h_2 = 0,3$ м. Решение задач выполнялось при различных физико-механических характеристиках полупространства (табл. 1).

Для однослойной среды грунтовая модель представляет собой тяжёлое полупространство, а эпюра внешней нагрузки имеет вид некоторых треугольных и трапециевидных нагрузок (рис. 1б и 6б). Рассмотрим некоторые случаи оценки критического усилия и глубины его проявления от действия некоторых внешних нагрузок.

Таблица 1

Физико-механические свойства водонасыщенных грунтов

Наименование грунтов	Удельный вес грунта γ , кН/м ³	Угол внутреннего трения φ , град	Удельное сцепление грунта, C , кПа	Глубина водонасыщенного грунта от уровня поверхностного слоя h , м	Максимальная глубина предельного напряжения $z_{\text{макс}}$, м	Усилия, возникающие на уровнях водонасыщенных грунтов, P , МПа	Критические усилия, $P_{\text{кр}}$, МПа
Суглинки мягкопластичные	13,07	11	7	0,3	2,51	0,03	0,20
	12,3	6,6	5	0,45			
	13,45	14	11	0,6			
	18,76	21	20				
Супесь пластичная	12,90	10	6	0,3	2,18	0,03	0,15
	11,4	5,5	4,3	0,45			
	13,2	13	7,0	0,6			
	18,97	17	14				

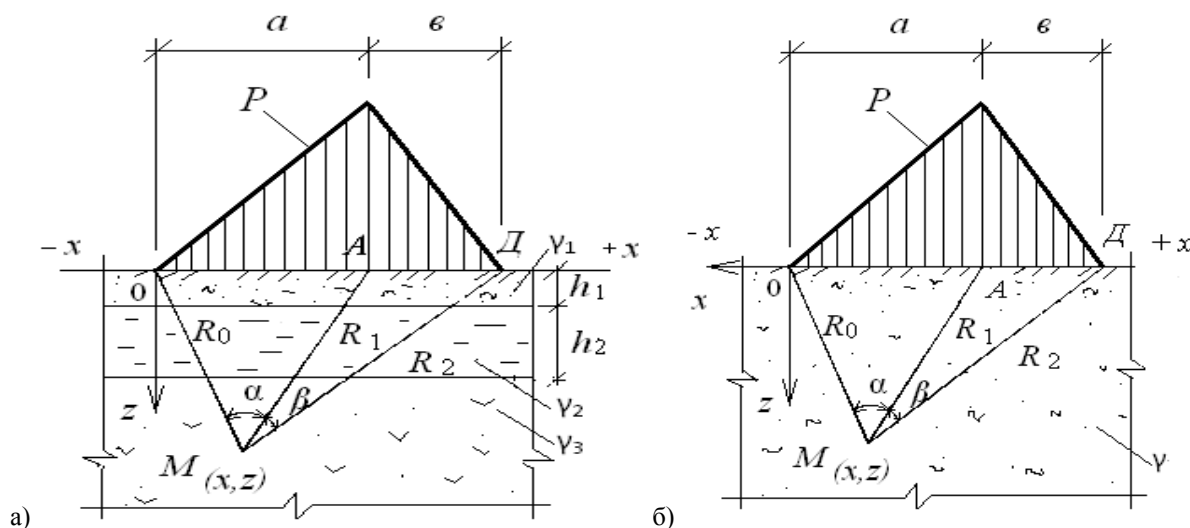


Рис. 1. Модель грунтовой среды и эпюра неравносторонней нагрузки: а) для слоистой среды; б) для однослойной среды

1.1. Неравносторонняя нагрузка

В этом разделе расчётные схемы моделей грунтовых сред представлены на рис. 1: а) для слоистой среды; б) для однослойной грунтовой среды. Внешняя нагрузка имеет вид неравностороннего треугольника. Для модели слоистой грунтовой среды от действия

внешней неравносторонней нагрузки формула критического усилия $P_{\text{кр}}$ имеет вид [4]

$$P_{\text{кр}} = \frac{N}{2M} \left\{ - \left[\left(1 - \frac{4ML}{N^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right] \right\}, \quad (1)$$

где $M = \frac{0,88P^2}{\sin\varphi} \left[(0,96 - \sin\varphi) \left(\epsilon \ln \frac{R_1}{R_0} + a \ln \frac{R_1}{R_2} \right) + 0,4(\epsilon\alpha - a\beta) \right];$

$$N = -\left\{0,88\pi a v \gamma_3 + \frac{C_2 a v}{(a+v)} (v x \alpha + a(a+v-x)\beta)\right\}; \quad (2)$$

$$L = -\frac{\pi a v C_2}{(a+v)} [\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 - \gamma_3 (h_1 + h_2) + C \operatorname{ctg} \varphi].$$

Максимальная глубина проявления критического усилия z_{\max} равна [4]

$$z_{\max} = \frac{\left(\frac{x}{a} \alpha + \frac{a+v-x}{v} \beta\right) + \frac{\pi}{P} [\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 - \gamma_3 (h_1 + h_2) + C \operatorname{ctg} \varphi]}{\frac{(0,96 - \sin \varphi)}{\sin \varphi} \left(\frac{1}{a} \ln \frac{R_1}{R_0} + \frac{1}{v} \ln \frac{R_1}{R_2}\right) + \frac{0,4}{\sin \varphi} \left(\frac{\alpha}{a} - \frac{\beta}{v}\right) - \frac{\pi \gamma_3}{P}}, \quad (3)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – объёмный вес плоско-параллельных слоёв и полупространства; h_1, h_2 – мощности плоско-параллельных слоёв; C – удельное сцепление связного грунта; φ – угол внутреннего трения грунта; α и β – углы

видимости базы действия нагрузки.

Для однослойной грунтовой среды от неравносторонней нагрузки формула критического усилия $P_{\text{кр}}$ равна [4]

$$P_{\text{кр}} = \frac{N}{2M} \left\{ - \left[\left(1 - \frac{4ML}{N^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right] \right\}, \quad (4)$$

где $M = \frac{0,88P^2}{\sin \varphi} \left[(0,96 - \sin \varphi) \left(v \ln \frac{R_1}{R_0} + a \ln \frac{R_1}{R_2} \right) + 0,4(v\alpha - a\beta) \right];$

$$N = -\left\{0,88\pi a v \gamma_3 + \frac{C_2 a v}{(a+v)} (v x \alpha + a(a+v-x)\beta)\right\}; \quad (5)$$

$$L = -\frac{\pi v C_2 C \operatorname{ctg} \varphi}{(a+v)}.$$

Максимальная глубина проявления критического усилия z_{\max} равна

$$z_{\max} = \frac{\left(\frac{x}{a} \alpha + \frac{a+v-x}{v} \beta\right) + \frac{\pi C \operatorname{ctg} \varphi}{P}}{\frac{(0,96 - \sin \varphi)}{\sin \varphi} \left(\frac{1}{a} \ln \frac{R_1}{R_0} + \frac{1}{v} \ln \frac{R_1}{R_2}\right) + \frac{0,4}{\sin \varphi} \left(\frac{\alpha}{a} - \frac{\beta}{v}\right) - \frac{\pi \gamma}{P}}. \quad (6)$$

Графический вид зависимостей $P_{\text{кр}}$ и z_{\max} от физико-механических характеристик (C, φ, γ увлажнённых грунтов при длине базы нагрузки $a+v$) представ-

лен на рис. 2 а, б и 3 а, б (для слоистой среды) и на рис. 4 а, б и 5 а, б (для однослойной).

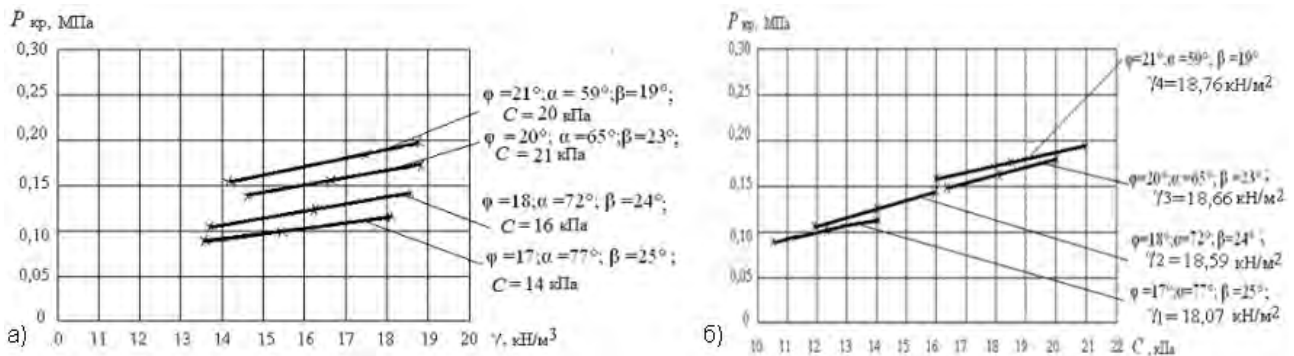


Рис. 2. Зависимость критической нагрузки $P_{\text{кр}}$ от действия неравносторонней нагрузки для слоистой среды от: а) удельного веса грунта γ при постоянных значениях удельного сцепления C ; б) удельного сцепления грунта C при постоянных значениях удельного веса γ .

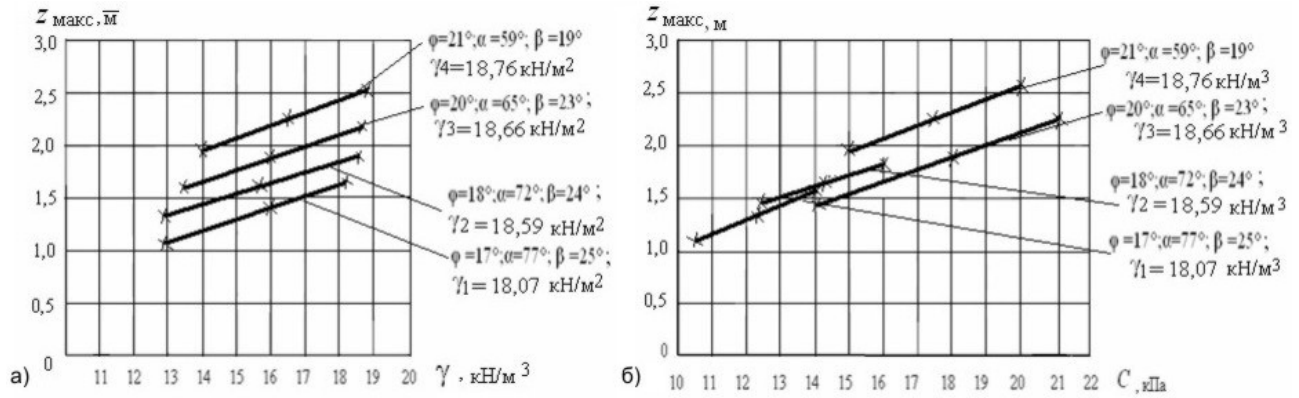


Рис. 3. Зависимость глубины развития критического усилия $z_{\text{макс}}$ от действия неравносторонней нагрузки для слоистой среды от: а) удельного веса грунта γ при постоянных значениях удельного сцепления C ; б) удельного сцепления грунта C при постоянных значениях удельного веса γ .

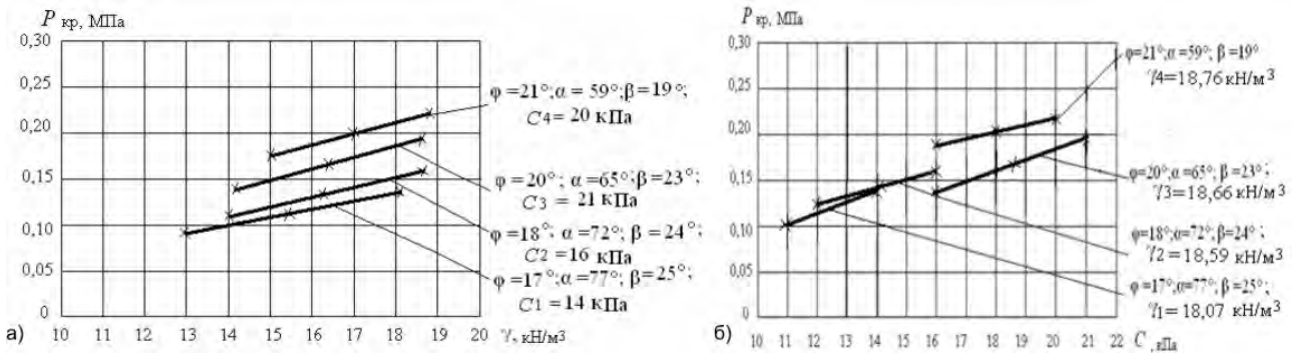


Рис. 4. Зависимость критической нагрузки $P_{\text{кр}}$ от действия неравносторонней нагрузки для однослойной среды от: а) удельного веса грунта γ при постоянных значениях удельного сцепления C ; б) удельного сцепления грунта C при постоянных значениях удельного веса γ .

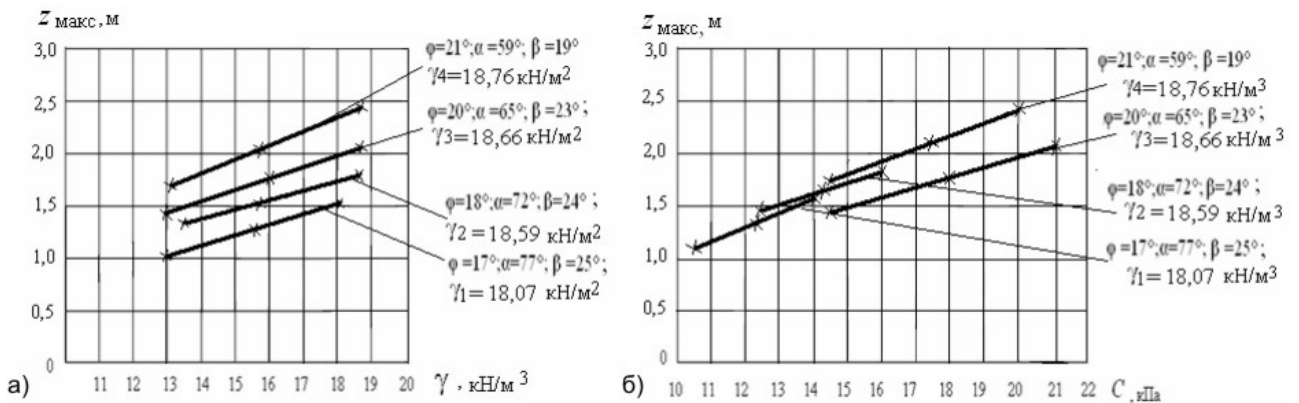


Рис. 5. Зависимость глубины развития критического усилия $z_{\text{макс}}$ от действия неравносторонней нагрузки для однослойной среды от: а) удельного веса грунта γ при постоянных значениях удельного сцепления C ; б) удельного сцепления грунта C при постоянных значениях удельного веса γ .

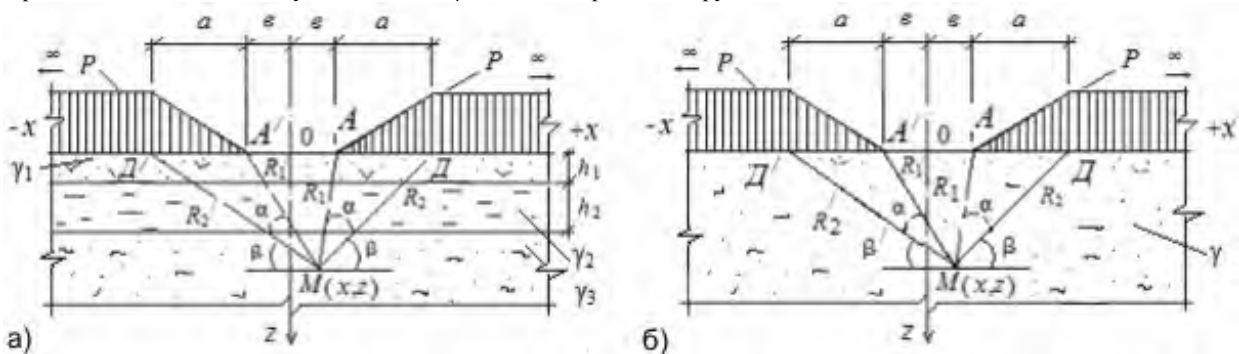


Рис. 6. Модель грунтовой среды и эпюра симметричной нагрузки: а) для слоистой среды; б) для однослойной среды.

Модели грунтовой среды от действия симметричной нагрузки приведены на рис. 6: а) для слоистой среды; б) для однослойной грунтовой среды. Внешняя

нагрузка представлена в виде неравнобоких симметричных трапеций. Критическое усилие $P_{кр}$ для модели слоистой грунтовой среды имеет вид [5]

$$P_{кр} = \frac{N}{2M} \left[\left(1 - \frac{4ML}{N^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right], \quad (7)$$

$$\text{где } M = \frac{1,76}{\sin \varphi} \left[(0,96 - \sin \varphi) \ln \frac{R_2 R_2'}{R_1 R_1'} + 0,4(\alpha - \alpha') \right];$$

$$N = -\{1,76\pi a \gamma_3 + \frac{C}{a} [a(\beta + \beta') - \varepsilon(\alpha + \alpha') + x(\alpha - \alpha')]\}; \quad (8)$$

$$L = -\pi C_z [\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 - \gamma_3 (h_1 + h_2) + C \operatorname{ctg} \varphi].$$

Глубина развития критического усилия z_{\max} равна -

$$z_{\max} = \frac{[a(\beta + \beta') - \varepsilon(\alpha + \alpha') + x(\alpha - \alpha')] + \frac{\pi a}{P} [\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 - \gamma_3 (h_1 + h_2) + C \operatorname{ctg} \varphi]}{\frac{0,96 - \sin \varphi}{\sin \varphi} \ln \frac{R_2 R_2'}{R_1 R_1'} + \frac{0,4(\alpha - \alpha')}{\sin \varphi} - \frac{\pi \gamma_3}{P}}. \quad (9)$$

Критическое усилие $P_{кр}$ для модели однослойной среды равно [5] -

$$P_{кр} = \frac{N}{2M} \left[\left(1 - \frac{4ML}{N^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right], \quad (10)$$

$$\text{где } M = \frac{1,76}{\sin \varphi} \left[(0,96 - \sin \varphi) \ln \frac{R_2 R_2'}{R_1 R_1'} + 0,4(\alpha - \alpha') \right];$$

$$N = -\{1,76\pi a \gamma + \frac{C}{a} [a(\beta + \beta') - \varepsilon(\alpha + \alpha') + x(\alpha - \alpha')]\}; \quad (11)$$

$$L = -\pi C_z C \operatorname{ctg} \varphi.$$

Глубина проявления критического усилия z_{\max} равна -

$$z_{\max} = \frac{(\beta + \beta') + \left(\frac{x}{a} \alpha - \frac{x}{a_1} \alpha'\right) + \frac{\pi C \operatorname{ctg} \varphi}{P}}{\frac{0,96 - \sin \varphi}{\sin \varphi} \left(\frac{1}{a} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{a_1} \ln \frac{R_2'}{R_1'}\right) + \frac{0,4}{\sin \varphi} \left(\frac{\alpha}{a} - \frac{\alpha'}{a_1}\right) - \frac{\pi \gamma}{P}}. \quad (12)$$

Зависимости $P_{кр}$ и z_{\max} от удельного веса полу-пространства γ , удельного сцепления C и угла полного внутреннего трения φ для слоистой среды пред-

ставлены на рис. 7 а, б и 8 а, б, для однослойной - на рис. 9 а, б и 10 а, б.

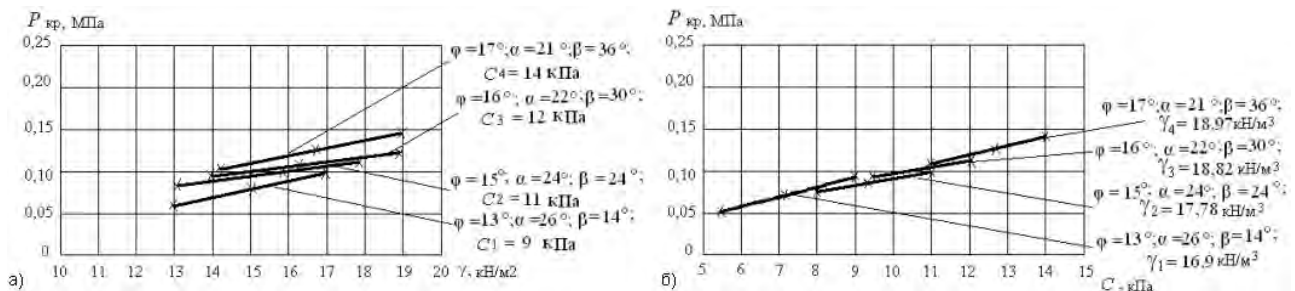


Рис. 7. Зависимость критической нагрузки РКР от действия симметричной нагрузки для слоистой среды от: а) удельного веса грунта γ при постоянных значениях удельного сцепления C ; б) удельного сцепления грунта C при постоянных значениях удельного веса γ

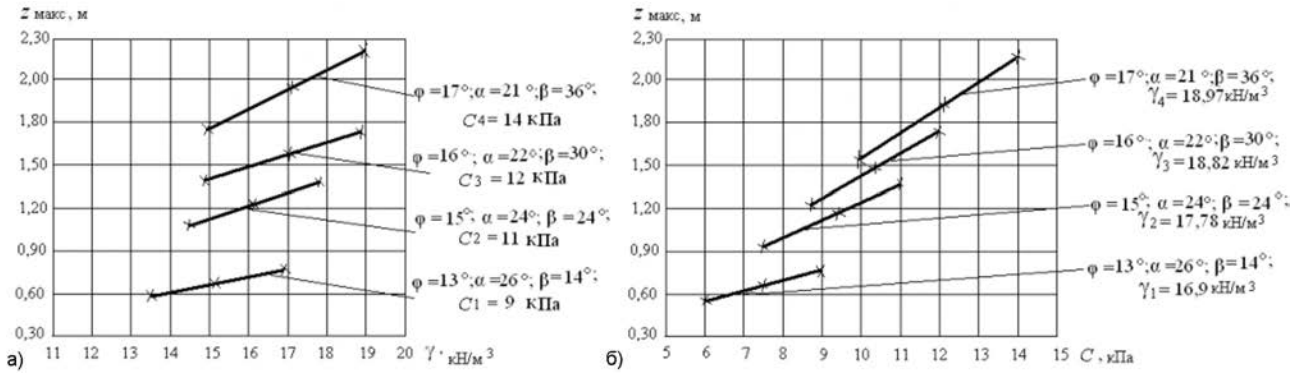


Рис. 8 Зависимость глубины развития критического усилия $z_{\text{макс}}$ от действия симметричной нагрузки для слоистой среды от: а) удельного веса грунта γ при постоянных значениях удельного сцепления C ; б) удельного сцепления грунта C при постоянных значениях удельного веса γ нагрузки

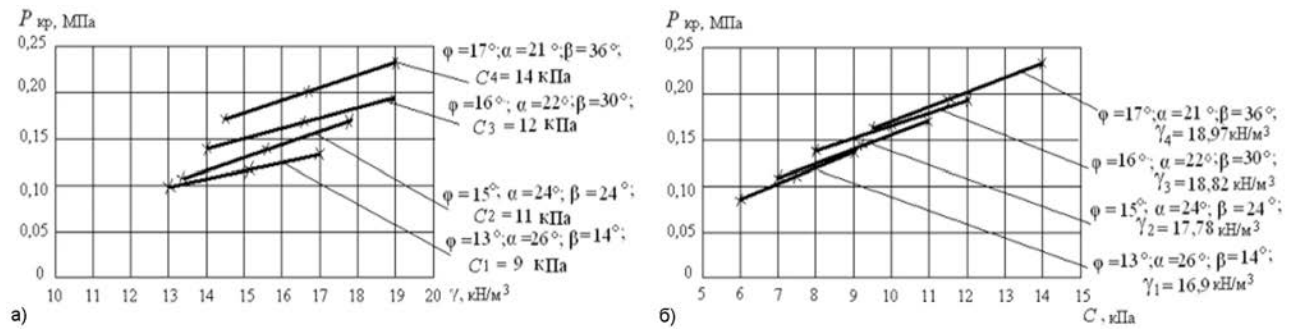


Рис. 9. Зависимость критической нагрузки РКР от действия симметричной нагрузки для однослойной среды от: а) удельного веса грунта γ при постоянных значениях удельного сцепления C ; б) удельного сцепления грунта C при постоянных значениях удельного веса γ

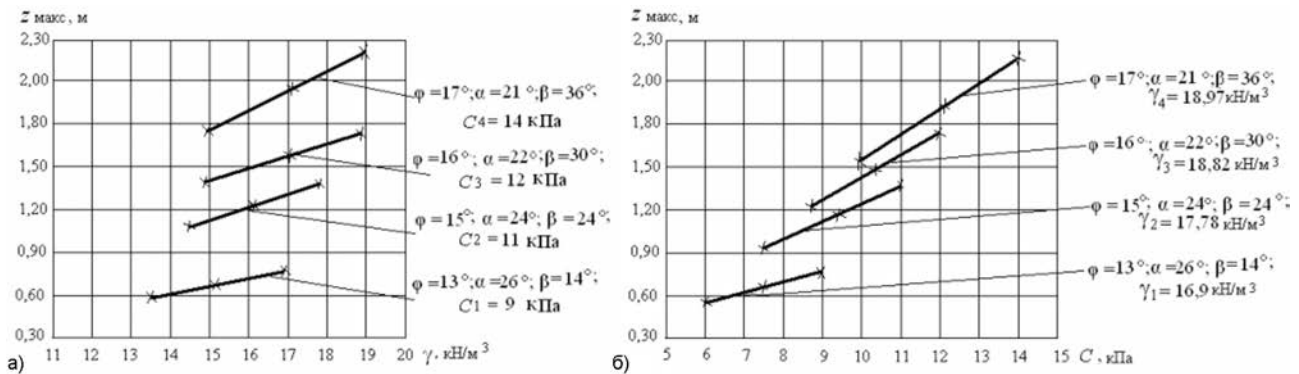


Рис. 10. Зависимость глубины развития критического усилия $z_{\text{макс}}$ от действия симметричной нагрузки для однослойной среды от: а) удельного веса грунта γ при постоянных значениях удельного сцепления C ; б) удельного сцепления грунта C при постоянных значениях удельного веса γ нагрузки

Выводы

В результате полученных аналитических и графических решений плоских задач следует отметить общие закономерности и различия в расчётах $P_{\text{кр}}$ и $z_{\text{макс}}$ для однослойных и многослойных грунтовых сред.

1. Для слоистых и однослойных грунтовых сред при нагружении их внешней нагрузкой с увеличением физико-механических показателей: φ , γ и C происходит увеличение критического усилия $P_{\text{кр}}$ и $z_{\text{макс}}$ (см. рис. 2–5 и рис. 7–10); при этом угловой коэффициент (угол наклона графиков $P_{\text{кр}}(\gamma)$ и $P_{\text{кр}}(C)$ к оси абсцисс) увеличивается с ростом φ и C (см. рис. 2–4 и рис. 7–9). Для

однослойных грунтовых сред угловые коэффициенты выше на 6–8%, чем для многослойных сред;

2. При расчётах несущей способности грунтовых сред с одинаковыми физико-механическими характеристиками полупространства численное значение критической нагрузки $P_{\text{кр}}$ на графиках в однослойных грунтовых средах больше (см. рис. 4 и 9), чем в многослойных (см. рис. 2 и 7), т.е. запас прочности однослойной грунтовой среды выше на 3–5%. Значения глубин проявления критического давления $z_{\text{макс}}$ в многослойных грунтовых средах выше на 3–4%, чем в однослойных;

3. Для всех грунтовых сред с одинаковыми физико-механическими характеристиками полупространства при расчётах максимальной глубины $z_{\text{макс}}$ в зависимости от приложенной нагрузки изменение её численного значения происходит неодинаково и зависит от слоистости среды.

Графические приближённые зависимости $P_{\text{кр}}(C)$, $z_{\text{макс}}(C)$ и $z_{\text{макс}}(\gamma)$, представленные на графиках позволяют упростить расчёты критических усилий и максимальной глубины проявления этого усилия при исследовании грунтов, получить общую характеристику несущей способности грунтового полупространства на основании экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко, Т. И. Оценка предельного критического усилия на упруго-пластическую грунтовую среду от действия треугольной нагрузки / Т. И. Кравченко, В. В. Филатов // Изв. вузов. Горный журнал, 2012. – № 5. – С. 68–72.

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Кравченко Т. И., кандидат технических наук, заведующая лабораториями кафедры «Сопротивление материалов».
E-mail: tatyana.tkachenko@yandex.ru
Тел.: 8(4922)479905

Филатов В. В., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры «Сопротивление материалов»
E-mail: v.filatov@yandex.ru
Тел.: 8 (4922)479905

2. Кравченко, Т. И. Изучение и оценка предельного напряжённого состояния слабых грунтов оснований инженерных сооружений: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т. И. Кравченко. – Екатеринбург. – 2013. – 131 с.

3. Кравченко, Т. И. Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии Урала и сопредельных территорий: материалы II Всесоюзной научно-практической конференции УГГУ / Т. И. Кравченко, В. В. Филатов. – Екатеринбург, 2013. – С. 48–50.

4. Кравченко, Т. И. Оценка критического усилия в модели грунтовой среды от действия внешней нагрузки в форме неравностороннего треугольника / Т. И. Кравченко, В. В. Филатов // Известия вузов. Горный журнал, 2015. – № 4. – С. 68 – 72.

5. Кравченко, Т. И. Оценка критической нагрузки, обусловленной отрицательной формой техногенного рельефа / Т. И. Кравченко, В. В. Филатов // Вестн. Курганского гос. ун-та. Сер.: Естественные науки. – 2015 г. – № 35. – С. 67 – 70.

Federal STATE budgetary educational Institution of higher professional education "Vladimir state University named after Alexander G. and Nicholas G. Stoletovs"

Kravchenko T. I., candidate of technical Sciences, Head of the laboratories of the Department "Mechanics of Materials"
E-mail: tatyana.tkachenko@yandex.ru
Tel.: 8(4922)479905

Filatov V. V., Doctor of geological-mineral. Sciences, Professor of "Resistance materials" Departments.
E-mail: v.filatov@yandex.ru
Tel.: 8(4922)479905