

DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.07

УДК 624.131

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РАСЧЕТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОСНОВАНИЯ ПОД ШТАМПОМ КОНЕЧНОЙ ЖЕСТКОСТИ С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТИ НАДФУНДАМЕНТНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Л.А. Бартоломей¹, О.А. Богомолова², В.Д. Гейдт¹, А.В. Гейдт¹

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

²Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 12 января 2023

Одобрена: 22 марта 2023

Принята к публикации:

03 июля 2023

Ключевые слова:

однородное основание, фундамент конечной жесткости, жесткость надфундаментной конструкции, обобщенный параметр прочности грунта – давление связности, расчетное сопротивление, условие расчета осадок в линейной постановке.

АННОТАЦИЯ

Задачей, поставленной в настоящем исследовании, является определение значений обобщенного прочностного параметра грунта основания σ_{ce}^R , при которых глубина ΔZ развития кулоновских областей пластических деформаций под краями фундамента конечной жесткости толщиной H , нагруженного равномерно распределенной нагрузкой переменной интенсивности q , и фундамента той же толщины, несущую жесткую надфундаментную конструкцию переменной высоты H^* , не будут превышать четверти ширины фундамента $2b$, т.е. значения σ_{ce}^R , при которых расчет осадок основания можно вести в упругой постановке. В результате установлено, что численные значения величин σ_{ce}^{R*} и σ_{ce}^R при условии, что $\frac{2b}{H} \leq 6$ и $\varphi \in [20-35^\circ]$ несущественно отличаются друг от друга, однако при других значениях $\frac{2b}{H}$ их разница становится весьма значительной. Если $\frac{2b}{H} \leq 6$, то при проведении инженерных расчетов можно пренебречь влиянием величины $\frac{E}{E_0} = 1$ на численные значения σ_{ce}^{R*} и σ_{ce}^R , используя при этом соответствующие значения $\overline{\sigma_{ce}^R}$ или $\overline{\sigma_{ce}^{R*}}$. Если определена величина приведенного давления связности $\sigma_{ce} = c(\gamma_0 H \tan \varphi)^{-1}$ как некоего обобщенного показателя прочности закрепленного грунта, то, используя графики, приведенные на рис. 3 и 4, можно определить величины σ_{ce}^{R*} и σ_{ce}^R , сравнивая которые с величиной σ_{ce} , сделаем вывод о том, можно или нет проводить расчет осадок в линейной постановке. Ориентируясь на численные значения σ_{ce}^{R*} и σ_{ce}^R , можно определить величины γ_0 ; φ ; E_0 , которые должны быть получены в процессе закрепления грунтового основания, чтобы заданная внешняя нагрузка не превышала величины расчетного сопротивления.

© ПНИПУ

© Бартоломей Леонид Адольфович – доктор технических наук, профессор, e-mail: vd.geidt@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8092-6476.

Богомолова Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: boazaritcyn@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1163-6285.

Гейдт Владимир Давидович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: vd.geidt@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6006-5218.

Гейдт Андрей Владимирович – аспирант, e-mail: andrejgeydt@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2649-6927.

Leonid A. Bartolomey – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: vd.geidt@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8092-6476.

Oksana A. Bogomolova – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: boazaritcyn@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1163-6285.

Vladimir D. Geidt – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: vd.geidt@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6006-5218.

Andrei V. Geidt – Postgraduate Student, e-mail: vd.geidt@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-2649-6927.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

NUMERICAL DETERMINATION OF THE VALUE OF THE CALCULATED RESISTANCE OF THE BASE UNDER THE STAMP OF FINAL STIFFNESS, TAKING INTO ACCOUNT THE RIGIDITY OVER THE FOUNDATION STRUCTURE

L.A. Bartolomey¹, O.A. Bogomolova², V.D. Geidt¹, A.V. Geidt¹

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

²Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 12 January 2023

Approved: 22 March 2023

Accepted for publication:
03 July 2023

Keywords:

homogeneous base, foundation of final stiffness, stiffness over the foundation structure, generalized parameter of soil strength – connectivity pressure, design resistance, condition for calculating sediment in linear formulation.

ABSTRACT

The task set in this study is to determine the values of the generalized strength parameter of the soil of the base σ_{ce}^R , at which the depth ΔZ of the development of coulomb areas of plastic deformations under the edges of the foundation of final stiffness with a thickness H , loaded with a uniformly distributed load of variable intensity q , and a foundation of the same thickness bearing a rigid over the foundation structure of variable height H^* will not exceed a quarter of the width of the foundation $2b$, that is, the values of σ_{ce}^R , at which the calculation of the base sediment can be carried out in an elastic setting. As a result, it was established that the numerical values of the values σ_{ce}^{R*} and σ_{ce}^R , provided that $\frac{2b}{H} \leq 6$ and $\varphi \in [20^\circ-35^\circ]$ do not differ significantly from each other, however, with other values of $\frac{2b}{H}$, their difference becomes very significant. If $\frac{2b}{H} \leq 6$, then the influence of the value $\frac{E}{E_o}$ on the numerical values of σ_{ce}^{R*} and σ_{ce}^R can be neglected when performing engineering calculations, using the corresponding values $\overline{\sigma_{ce}^R}$ or $\overline{\sigma_{ce}^{R*}}$. If the value of the reduced cohesion pressure is determined $\sigma_{ce} = c(\gamma_o Htg\varphi)^{-1}$, as some generalized indicator of the strength of the fixed soil, then using the graphs shown in Figures 3 and 4, it is possible to determine the values of σ_{ce}^{R*} and σ_{ce}^R , comparing which with the value of σ_{ce} , it can be concluded whether or not it is possible to calculate the sediment in a linear formulation. Focusing on the numerical values of σ_{ce}^{R*} and σ_{ce}^R , it is possible to determine the values of γ_o ; φ ; c ; E_o , which must be obtained in the process of fixing the soil base, so that the given external load does not exceed the value of the calculated resistance.

© PNRPU

Введение

Проведение любых мероприятий по укреплению грунта основания ведет к улучшению его прочностных и деформационных свойств [1, 2]. Изменяются объемный вес грунта, угол внутреннего трения, удельное сцепление и модуль деформации (γ_o ; φ ; c ; E_o соответственно). Все эти изменения оказывают свое воздействие на величину осадок основания [3].

В работах [4–6], где рассмотрены вопросы трансформации полей напряжений и перемещений в основании жестких штампов, отмечено следующее. Если приложить равномерно распределенную нагрузку заданной интенсивности q и ширины $2b$ непосредственно к поверхности грунта основания, или передать ее на основание через фундамент конечной жесткости, или заменить ее штампом конечной жесткости и жесткой надфундаментной частью эквивалентной высоты H^* , то напряжения и перемещения в соответствующих точках активной зоны фундамента будут отличаться друг от друга. Эти отличия будут зависеть от ширины фундамента, отношения модулей деформации материала фундамента и однородного грунта основания $\frac{E}{E_o}$, численных значений q и эквивалентной высоты надфундаментной части H^* [4–6].

Максимально чувствительными к изменению величины отношения $\frac{E}{E_o}$ являются вертикальные напряжения σ_z в точках, расположенных в активной зоне фундамента (АЗФ).

Например, при росте величины $\frac{E}{E_0}$ численные значения напряжений σ_z в соответствующих точках под подошвами толстого штампа (штамп плюс жесткая над фундаментная конструкция) и штампа с эквивалентной равномерно распределенной нагрузкой уменьшаются, причем данная тенденция ярче выражена в первом случае: численные значения вертикальных напряжений в точках, расположенных на оси симметрии толстого штампа непосредственно под его подошвой, примерно на 24–30 % меньше аналогичных напряжений для штампа толщиной H .

Численные значения вертикальных напряжений σ_z и величина $\frac{E}{E_0}$ определяют значения вертикальных перемещений в соответствующих точках АЗФ: чем больше $\frac{E}{E_0}$, тем равномернее осадки штампа, однако их численные значения растут пропорционально увеличению величины $\frac{E}{E_0}$. Сопоставление графических зависимостей вида $\frac{S}{H} = f\left(\frac{E}{E_0}\right)$ для рассмотренного в работе [5] примера показывает, что осадки штампа, нагруженного равномерно распределенной нагрузкой, существенно выше соответствующих осадок штампа с эквивалентной высотой над фундаментной части H^* , т.е., когда жесткость надфундаментной конструкции учитывается. Например, при $\frac{E}{E_0} \in [1,0-70]$, равной 20, разница численных значений вертикальных перемещений составляет 37,66–45,55 %, а при $\frac{E}{E_0} = 20$ и $\frac{2b}{H} \in [2-20]$ – 39,3–51 %. В общем же расчетные осадки штампа от действия распределенной нагрузки всегда больше осадок штампа с эквивалентной высотой надфундаментной части H^* : при $q \in [0-20\gamma_0 H]$, $2b \in [2b-20b]$ и $H^* \in [0-10H]$ разница составляет от 1 до 64 %.

Графики зависимости величины осадки штампа от его эквивалентной высоты H^* и интенсивности внешней нагрузки q , как и ожидалось, оказались практически прямыми линиями: при всех рассмотренных сочетаниях численных значений переменных расчетных параметров достоверность линейной аппроксимации $R^2 \geq 0,96$.

Образование областей пластических деформаций под штампом толщиной H может начаться как под его краями, так и в глубине активной зоны под подошвой в точке, расположенной на вертикальной оси симметрии штампа, или одновременно в обоих местах в зависимости от величины отношения $\frac{E}{E_0}$. Если области пластических деформаций (ОПД) начинают развиваться только под краями $\frac{E}{E_0}$ фундамента, то после их смыкания упругое грунтовое ядро (УГЯ) будет иметь форму равнобедренного треугольника с криволинейными боковыми сторонами. Если развитие ОПД начинается одновременно под фундаментом и его краями, то УГЯ будет иметь форму криволинейной трапеции. Процесс образования и развития ОПД под штампом эквивалентной высоты H^* при всех рассмотренных значениях $\frac{E}{E_0}$ всегда начинается под его краями, а форма грунтового ядра после смыкания

ОПД всегда имеет вид равнобедренного треугольника с криволинейными боковыми сторонами. Смыкание пластических областей в этом случае происходит всегда примерно на одной и той же глубине вне зависимости от ширины штампа.

Было отмечено, что полученные результаты можно использовать при условии, что в каждом конкретном случае глубина развития пластических областей под краями фундамента, вычисленная на основании условия пластичности Кулона [7, 8], не превышает величины $\frac{2b}{4}$, что соответствует нагрузке, равной величине расчетного сопротивления R [9, 10].

Постановка задачи

Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать задачу исследования следующим образом: определить значения обобщенного прочностного параметра грунта основания $\sigma_{св}^R$, при которых глубина ΔZ развития кулоновских областей пластических деформаций под краями фундамента толщиной H , нагруженного равномерно распределенной нагрузкой переменной интенсивности q , и фундамента той же толщины, несущего жесткую над фундаментную конструкцию переменной высоты H^* , не будет превышать четверти ширины фундамента $2b$:

$$\Delta Z \leq \frac{2b}{4} = \frac{b}{2}. \quad (1)$$

Другими словами, целью является определить численные значения величин q и H^* , эквивалентных в «силовом» смысле величине расчетного сопротивления R .

Величина приведенного давления связности $\sigma_{св} = c(\gamma_o H \operatorname{tg} \varphi)^{-1}$, как видно из символической записи выражения для ее вычисления, действительно, связывает между собой прочностные характеристики грунта c и φ , его удельный вес γ_o и глубину заложения фундамента H , равную его толщине.

Исследования многих ученых [3, 11–13] показали, что применение того или иного способа укрепления грунта основания влечет за собой рост прочностных и деформационных характеристик грунта – угла внутреннего трения φ , сцепления c , модуля деформации E_o . Следовательно, будет каким-то образом изменяться и величина расчетного сопротивления R и, как следствие, величина $\sigma_{св}^R$.

Существенное влияние на величину $\sigma_{св}^R$ будет оказывать величина отношения модулей деформации материала фундамента и грунта $\frac{E}{E_o}$. Для иллюстрации последнего утверждения ниже приведен рис. 1, который легко поддается анализу.

Приведем еще один пример. На рис. 2 приведены графические интерпретации результатов расчетов по определению величин $\sigma_{св}^{R*}$ и $\sigma_{св}^R$ при условии, что $2b = 4H$, $q = 12\gamma H$, $H^* = 6H$, $\varphi = 35^\circ$, $\frac{E}{E_o} = 10$, $\frac{\gamma}{\gamma_o} = 2$, $\xi_o = 0,39$. В результате проведения расчетов установлено, что при условии равенства глубины развития ΔZ областей пластических деформаций, возникающих под краями фундаментов, численные значения критической величины приведенного давления связности соответственно равны $\sigma_{св}^{R*} = 2,47$ и $\sigma_{св}^R = 2,23$, т.е. разница составляет 11 %.

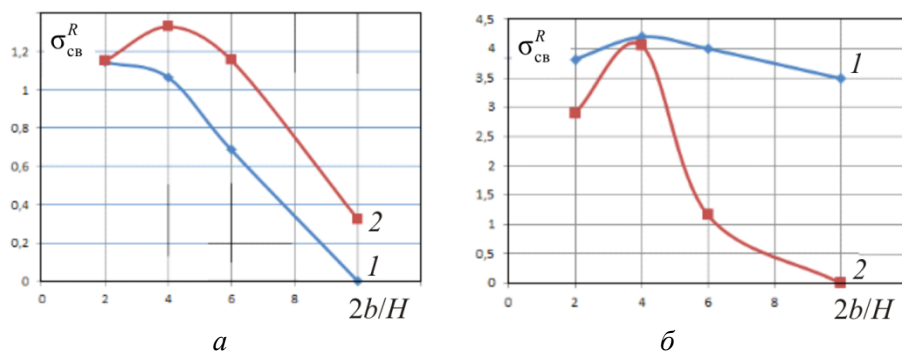


Рис. 1. Графические зависимости вида $\sigma_{cb}^R = f\left(\frac{2b}{H}\right)$ для определения критической величины σ_{cb}^R с учетом жесткости надфундаментной конструкции (1) и без таковой (2) при $\frac{E}{E_0} = 1$ (а) и $\frac{E}{E_0} = 10$ (б)

Fig. 1. Graphical dependencies of the form $\sigma_{cb}^R = f\left(\frac{2b}{H}\right)$ for determining the critical value of the σ_{cb}^R , taking into account the stiffness over the foundation structure (1) and without it (2) at $\frac{E}{E_0} = 1$ (a) and $\frac{E}{E_0} = 10$ (b)

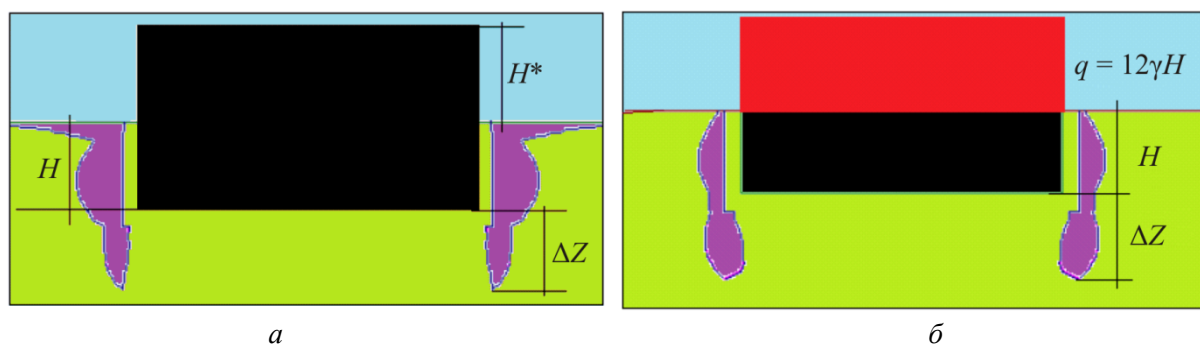


Рис. 2. Области пластических деформаций в однородном основании штампа толщиной $H + H^*$ (а) и штампа толщиной H (б), нагруженного эквивалентной равномерно распределенной нагрузкой интенсивности q имеют одинаковые значения ΔZ , при условии, что $\sigma_{cb}^{R*} > \sigma_{cb}^R$

Fig. 2. The regions of plastic deformations in the homogeneous base of the $H + H^*$ thickness stamp (a) and the H -thickness (b) die loaded with the equivalent uniformly distributed intensity load q have the same values ΔZ , provided that the $\sigma_{cb}^{R*} > \sigma_{cb}^R$

Таким образом, показано, что при всех прочих равных условиях величины σ_{cb}^{R*} и σ_{cb}^R будут зависеть от величины отношения модулей деформации материала фундамента и грунта основания $\frac{E}{E_0}$ и способа учета нагрузки от надфундаментной конструкции.

Теперь дадим окончательную формулировку цели исследования, результаты которого приведены ниже: определить численные значения обобщенных прочностных параметров грунта основания σ_{cb}^{R*} и σ_{cb}^R при условии, что $\frac{E}{E_0} = 1; 2; 5; 10; 100; 1000; \frac{2b}{H} = 2; 4; 6; 10; 20$. Интенсивность равномерно распределенной нагрузки, передаваемой на жесткий фундамент толщиной H , последовательно принимает значения $q(\gamma_0 H)^{-1} = 0; 3; 12; 20$, угол внутреннего

трения грунта – $\varphi = 20; 25; 30; 35^\circ$, а высоте жесткой над фундаментной части сооружения последовательно присваиваются значения $H^* = 0, 1,5H, 6H, 10H$ (Учитывая условие [4–7], что $\gamma = 2\gamma_o$, нетрудно видеть, что соответствующие значения равномерно распределенной нагрузки и нагрузки от надфундаментной части сооружения (H^*) в силовом смысле эквивалентны.)

Для чего это нужно? Предположим, что каким-либо образом проведены мероприятия по закреплению грунта основания, и в результате испытания образцов закрепленного грунта определены его улучшенные прочностные и деформационные характеристики, а затем рассчитана величина приведенного давления связности $\sigma_{cb} = c(\gamma_o H \text{tg}\varphi)^{-1}$ как некоего обобщенного показателя прочности. Если полученное значение будет больше величин $\sigma_{cb}^{R^*}$ и σ_{cb}^R , то силовые эквиваленты внешнего воздействия (q и H^*) не превышают величины расчетного сопротивления и расчет осадок основания можно проводить в линейной постановке. С другой стороны, ориентируясь на численные значения $\sigma_{cb}^{R^*}$ и σ_{cb}^R , можно определить величины $\gamma_o; \varphi; c; E_o$, которые должны быть получены в процессе закрепления грунтового основания, чтобы опять же расчет осадок можно было выполнять в линейной постановке.

Результаты вычислений

Исходя из условий поставленной задачи при помощи компьютерных программ [14, 15] получено 960 численных значений величины σ_{cb}^R , соответствующих всем возможным сочетаниям переменных расчетных параметров, пределы изменения которых приведены выше.

Отметим, что для получения этих результатов было выполнено гораздо большее количество вычислительных операций, ведь для каждого конкретного сочетания переменных расчетных параметров величина $\sigma_{cb}^{R^*}$ и σ_{cb}^R и определялась подбором таким образом, чтобы выполнялось равенство $\Delta Z = \frac{b}{2}$, выполнение которого контролировалось при помощи анализа изображений ОПД на дисплее компьютера (см. рис. 2).

Таблица 1

Результаты расчетов $\sigma_{cb}^{R^*}$ и σ_{cb}^R

Table 1

Calculation results $\sigma_{cb}^{R^*}$ and σ_{cb}^R

$2b = 6H; (q = 12\gamma H; H^* = 6H)$						
$\frac{E}{E_o}$	$\varphi = 35^\circ$		$\varphi = 30^\circ$		$\varphi = 25^\circ$	
	σ_{cb}^R	$\sigma_{cb}^{R^*}$	σ_{cb}^R	$\sigma_{cb}^{R^*}$	σ_{cb}^R	$\sigma_{cb}^{R^*}$
1	1,87	1,99	3,22	3,25	5,22	5,065
2,5	1,98	2,13	3,3	3,41	5,26	5,242
5	2,085	2,22	3,318	3,53	5,24	5,29
10	2,16	2,16	3,37	3,51	5,13	5,33
25	2,192	2,19	3,411	3,56	5,12	5,38
50	2,22	2,21	3,46	3,565	5,18	5,40
100	2,29	2,21	3,48	3,565	5,25	5,385
$\overline{\sigma_{cb}^R} (\overline{\sigma_{cb}^{R^*}})$	2,11	2,32	3,36	3,48	5,2	5,299
$\Delta, \%$	9,95		5,8		1,9	

Анализ полученных результатов показал, что численные значения величин $\sigma_{\text{св}}^{R^*}$ и $\sigma_{\text{св}}^R$ при условии, что $\frac{2b}{H} \leq 4$ и $\varphi \in [20-35^\circ]$, несущественно отличаются друг от друга; при других значениях $\frac{2b}{H}$ их разница становится весьма значительной. Кроме того, установлено, что при тех же условиях при проведении инженерных расчетов можно пренебречь влиянием величины $\frac{E}{E_0}$ на численные значения $\sigma_{\text{св}}^{R^*}$ и $\sigma_{\text{св}}^R$. Подтверждением этого могут служить данные, представленные в качестве примера в табл. 1.

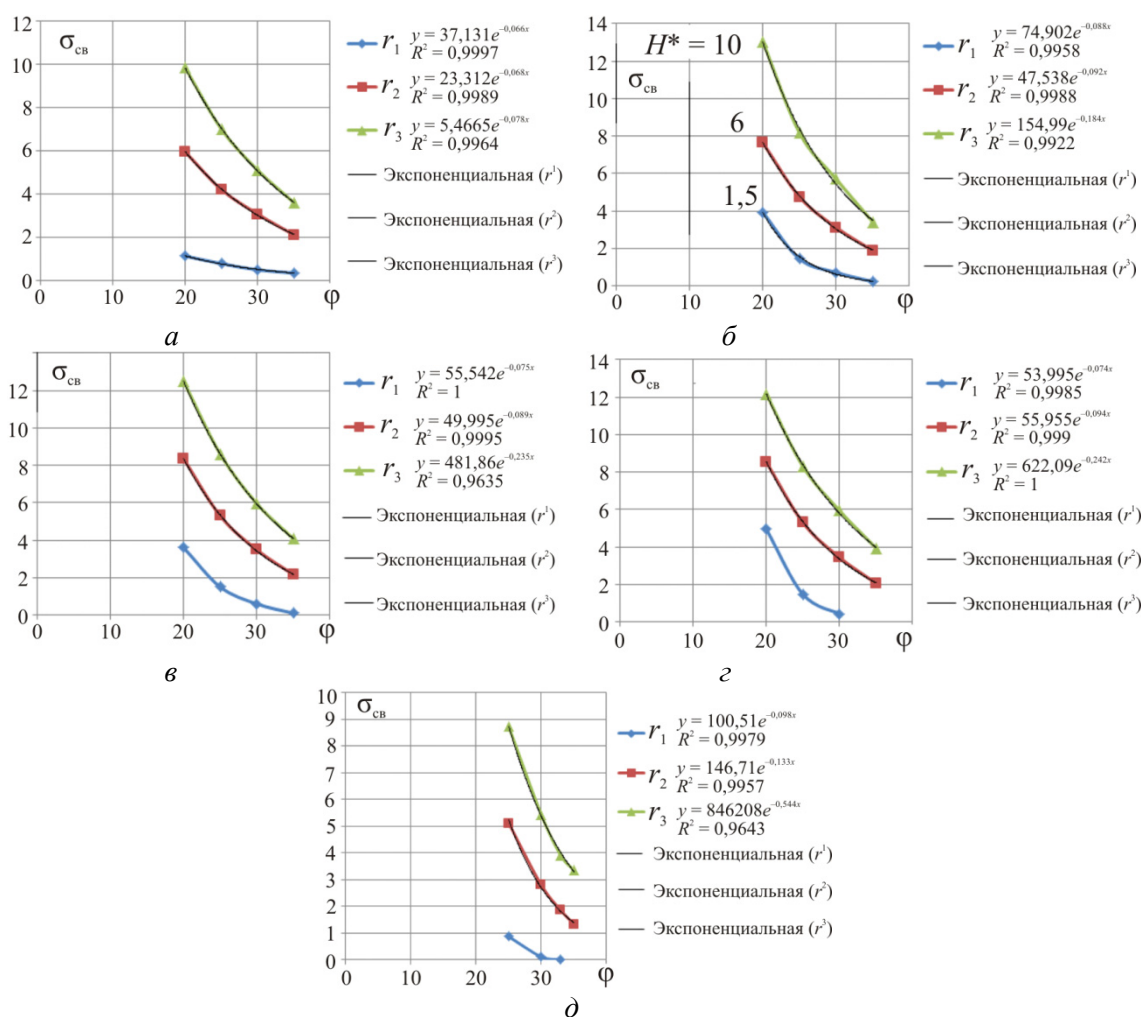


Рис. 3. Графические зависимости вида $\sigma_{\text{св}}^{R^*} = f(\varphi)$ для определения критической величины расчетного сопротивления с учетом жесткости надфундаментной конструкции при $2b = 2H; 4H; 6H; 10H; 20H$ (соответственно а–д) и любых значениях величины отношения $\frac{E}{E_0}$, рассмотренных в работе

Fig. 3. Graphical dependencies of the form $\sigma_{\text{св}}^{R^*} = f(\varphi)$ to determine the critical value of the design resistance, taking into account the stiffness over the foundation structure at $2b = 2H; 4H; 6H; 10H; 20H$ (respectively а–д) and any values of the value of the ratio $\frac{E}{E_0}$ considered in the work

Несмотря на эти данные, построены графические зависимости вида $\sigma_{\text{св}}^{R^*} = f(\varphi)$ и $\sigma_{\text{св}}^R = f(\varphi)$, которые приведены на рис. 3 и 4. При этих построениях использованы соответствующие значения $\overline{\sigma_{\text{св}}^R}$ и $\overline{\sigma_{\text{св}}^{R^*}}$ для всех возможных сочетаний численных значений переменных расчетных параметров, обозначенных выше.

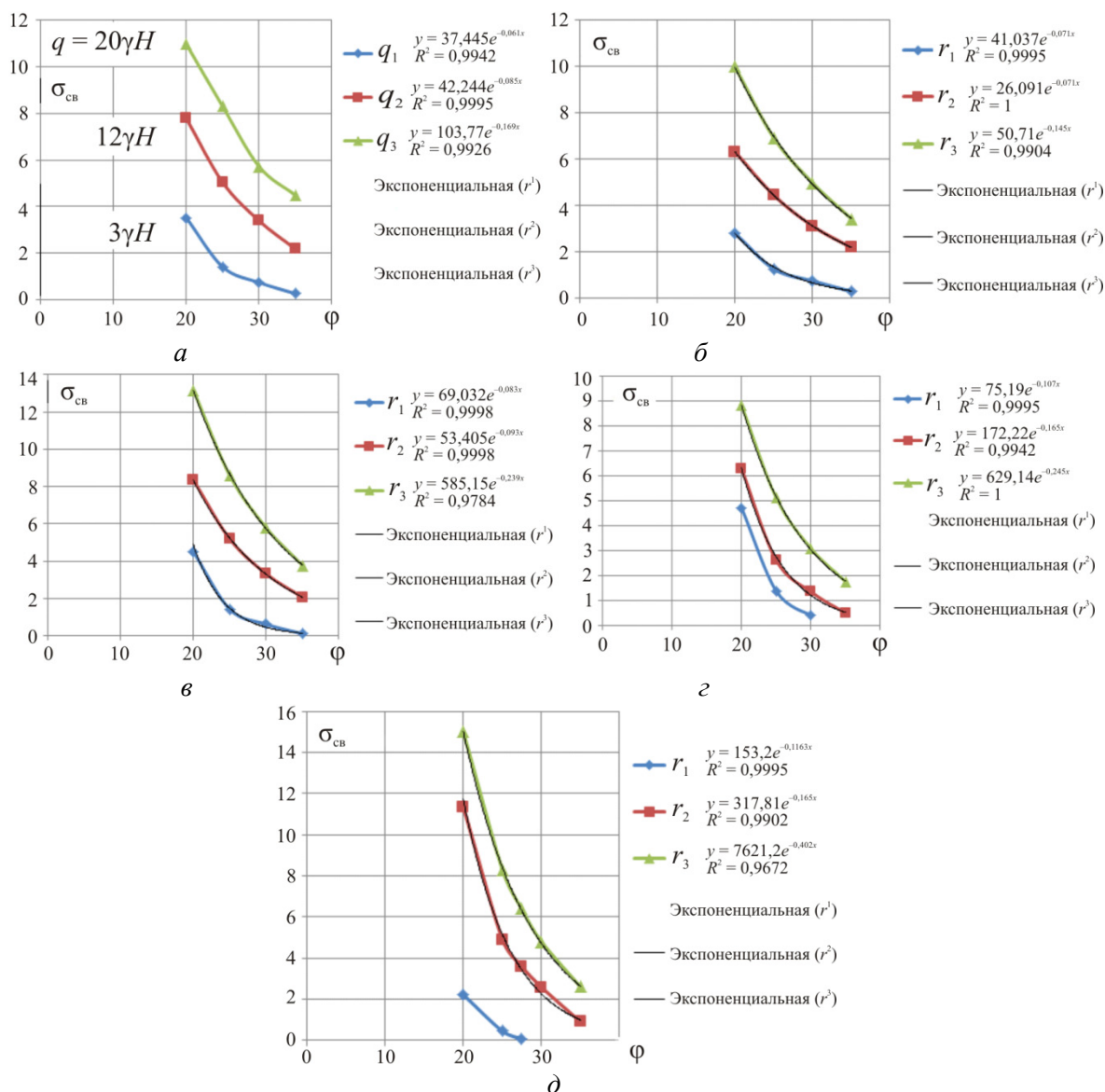


Рис. 4. Графические зависимости вида $\sigma_{\text{св}}^R = f(\varphi)$ для определения критической величины расчетного сопротивления без учета жесткости надфундаментной конструкции при $2b = 2H; 4H; 6H; 10H; 20H$ (соответственно а–д) и любых значениях величины отношения $\frac{E}{E_0}$, рассмотренных в работе

Fig. 4. Graphical dependencies of the form $\sigma_{\text{св}}^R = f(\varphi)$ for determining the critical value of the design resistance without taking into account the stiffness over the foundation structure at $2b = 2H; 4H; 6H; 10H; 20H$ (respectively а–д) and any values of the value of the ratio $\frac{E}{E_0}$ considered in the work

Оказалось, что все построенные кривые могут быть аппроксимированы экспоненциальной зависимостью

$$\overline{\sigma_{cb}^R} = ae^{b\varphi}; \quad \overline{\sigma_{cb}^{R^*}} = a^* e^{b^*\varphi}, \quad (2)$$

причем достоверность аппроксимации для всех вариантов $R^2 \geq 0,96$.

Величины $\overline{\sigma_{cb}^R}$ и $(\overline{\sigma_{cb}^{R^*}})$ для промежуточных значений H^* и q можно определить по графикам (см. рис. 3, 4), используя итерационные методы.

Значения $\overline{\sigma_{cb}^R}$ и $(\overline{\sigma_{cb}^{R^*}})$ можно вычислить, используя формулы (2) и графики для определения коэффициентов $a; b; a^*; b^*$, приведенные на рис. 5.

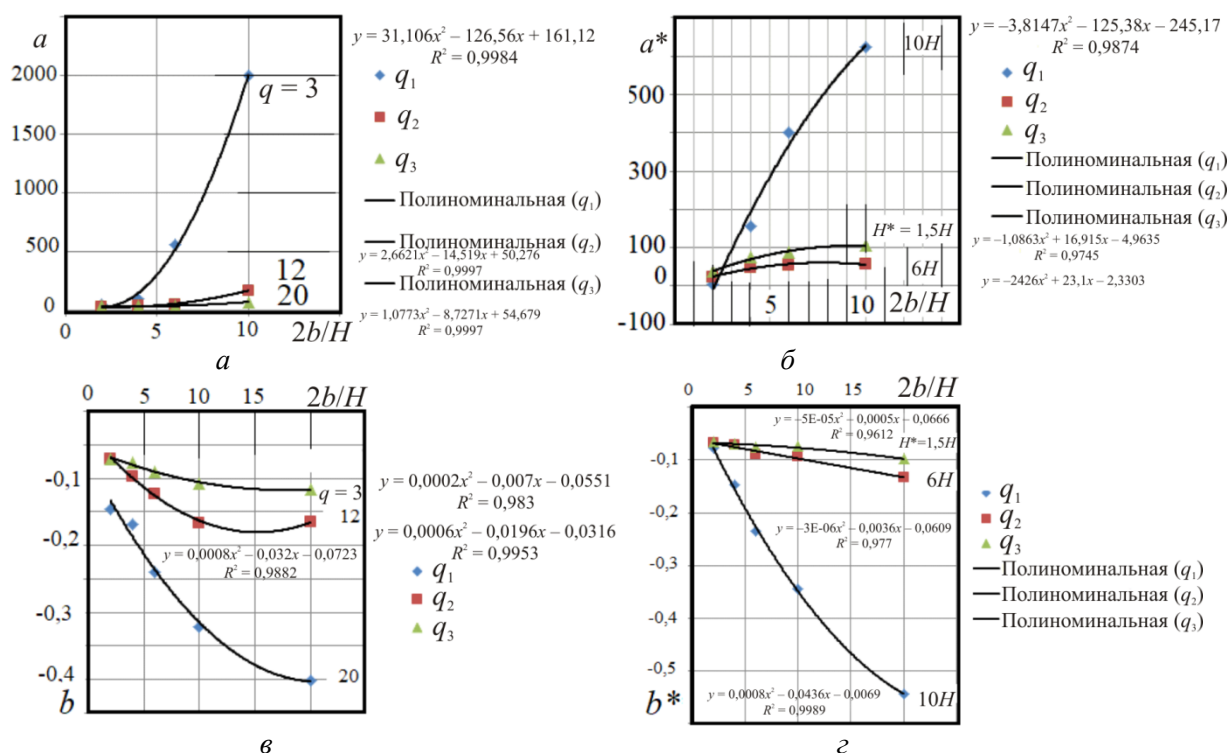


Рис. 5. Графические зависимости для определения коэффициентов $a; b; a^*; b^*$

(соответственно $a-z$), используемых в формулах (2)

Fig. 5. Graphical dependencies for determining the coefficients $a; b; a^*; b^*$ (respectively $a-z$), used in formulas (2)

Коэффициенты $a; b; a^*; b^*$ для промежуточных значений переменных расчетных параметров могут быть определены по графикам (5) и при помощи табл. 2 и 3, при этом необходимо использовать итерационные методы.

Теперь, зная для каких-то конкретных условий величину приведенного давления связности $\sigma_{cb} = c(\gamma_o H \text{tg}\varphi)^{-1}$, можно, используя графики (см. рис. 3, 4), определить, соответствуют или нет конкретные значения H^* и q расчетному сопротивлению R . Если $\sigma_{cb} \leq \overline{\sigma_{cb}^R}$ или $\sigma_{cb} \leq \overline{\sigma_{cb}^{R^*}}$, то значения q или H^* по силовому эквиваленту равны или превышают величину R . Следовательно, результаты расчетов по определению осадок, выполненных в упругой постановке, следует использовать с некоторой корректировкой. Если величина σ_{cb} ,

напротив, превышает соответствующие значения $\overline{\sigma_{cb}^R}$ или $\overline{\sigma_{cb}^{R^*}}$, то силовой эквивалент q и H^* не превышает величины R и расчет осадок можно вести в упругой постановке [16].

Таблица 2

Коэффициенты $a; b$

Table 2

Coefficients $a; b$

$\frac{2b}{H}$	q					
	3	12	20	1,5	6	10
	a			b		
2	50,71	26,091	41,037	-0,145	-0,071	-0,071
4	103,77	42,244	37,445	-0,169	-0,085	-0,061
6	585,15	53,405	69,032	-0,239	-0,093	-0,083
10	629,14	172,22	75,19	-0,245	-0,166	-0,107
20	7621,2	317,81	153,2	-0,402	-0,165	-0,116

Таблица 3

Коэффициенты $a^*; b^*$

Table 3

Coefficients $a^*; b^*$

$\frac{2b}{H}$	H^*					
	3	12	20	1,5	6	10
	a^*			b^*		
2	5,4465	23,312	37,131	-0,078	-0,068	-0,066
4	154,99	48,538	74,902	-0,148	-0,092	-0,088
6	481,86	49,995	55,542	-0,235	-0,089	-0,075
10	622,09	55,955	53,955	-0,242	-0,094	-0,074
20	84802	146,71	100,51	-0,544	-0,133	-0,098

Кроме того, графики, приведенные на рис. 3, 4, можно использовать для задания параметров корректировки физико-механических свойств основания при его укреплении.

Выводы

1. Анализ полученных результатов показал, что численные значения величин $\sigma_{cb}^{R^*}$ и σ_{cb}^R при условии, что $\frac{2b}{H} \leq 6$ и $\varphi \in [20-35^\circ]$, несущественно отличаются друг от друга, однако при других значениях $\frac{2b}{H}$ их разница становится весьма значительной.

2. Если $\frac{2b}{H} \leq 6$, то при проведении инженерных расчетов можно пренебречь влиянием величины $\frac{E}{E_0}$ на численные значения $\sigma_{cb}^{R^*}$ и σ_{cb}^R , используя при этом соответствующие значения $\overline{\sigma_{cb}^R}$ или $\overline{\sigma_{cb}^{R^*}}$.

3. Если определена величина приведенного давления связности $\sigma_{cb} = c(\gamma_0 H \text{tg} \varphi)^{-1}$ как некое обобщенного показателя прочности закрепленного грунта, то, используя графики, приве-

денные на рис. 3 и 4, можно определить величины $\sigma_{cb}^{R^*}$ и σ_{cb}^R , сравнивая которые с величиной σ_{cb} , делаем вывод о том, можно или нет проводить расчет осадок в линейной постановке.

4. Ориентируясь на численные значения $\sigma_{cb}^{R^*}$ и σ_{cb}^R , можно определить величины γ_o , φ , c , E_o , которые должны быть получены в процессе закрепления грунтового основания, чтобы заданная внешняя нагрузка не превышала величины расчетного сопротивления.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Bryson S., El Naggar H. Evaluation of the efficiency of different ground improvement techniques // Proceeding of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 683–686.
2. Radhakrishnan G., Raju G.V.R., Venkateswarlu D. Study of consolidation accelerated by sand drains // Proceeding of the Indian Geotechnical Conference, 2010.
3. Soil improvement techniques / Gaafer, Manar, Bassioni, Hesham, Mostafa, Tareq // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2015. – Vol. 6, iss. 12.
4. Компьютерное моделирование осадок жесткого штампа на однородном весоном основании / Л.А. Бартоломей, О.А. Богомолова, В.Д. Гейдт, А.В. Гейдт // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, №. 2. – С. 5–17. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.01
5. Численная оценка влияния жесткости надфундаментной части сооружения и деформационных свойств грунтового массива на осадки и устойчивость основания / Л.А. Бартоломей, О.А. Богомолова, В.Д. Гейдт, А.В. Гейдт // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2022. – Вып. 2(87). – С. 6–18.
6. Компьютерное моделирование осадок штампа на однородном основании с учетом жесткости надфундаментной конструкции / Л.А. Бартоломей, О.А. Богомолова, В.Д. Гейдт, А.В. Гейдт // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск 28–30 сентября 2022 г. – Новочеркасск, Южно-Российский гос. политехн. ун-т им. М.И. Платова, 2022. – С. 124–137.
7. Coulomb C.A. Application des riles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L`architecture // Memories de savants strangers de L`Academlie des sciences de Paris, 1773. – 233 p.
8. Coulomb C.A. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemesde statique relatifs, a la architecture // Mem. Acad. Roy. Div. Sav. – 1776. – Vol. 7. – P. 343–387.
9. Bhattacharya P., Kumar J. Bearing capacity of foundations on soft clays with granular column and trench // Soils and Foundations. – 2017. – № 57. – P. 488–495.
10. Oh W.T., Vanapalli S.K. Modeling the stress versus settlement behavior of shallow foundations in unsaturated cohesive soils extending the modified total stress approach // Soils and Foundations. – 2018. – № 58. – P. 382–397.
11. Surendra Maharjan, Hussain Saliq. Stabilization of clay soil using fly ash and lime for construction work // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 4, iss. 12. – P. 11869–11874.

12. George K. Burke. Jet grouting system: Advantages and disadvantages, in drilled shaft, micropiling, deep mixing remedial methods and specialty foundation system. – ASCE, Orlando, Florida, 2004.

13. Шенкман Р.И., Пономарев А.Б. Метод расчета осадок фундаментов на основании, улучшенном с использованием вертикальных грунтовых элементов в оболочке из геосинтетических материалов // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 64–76. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.06.

14. Устойчивость. Напряженно-деформированное состояние: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009614399 / О.А. Богомолова [и др.]; зарег. 30 июня 2009 г.

15. FEA: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015617889 / О.А. Богомолова и др.; зарег. 23 июля 2015 г.

16. Матвиенко Ю.О., Дыба В.П., Матвиенко М.П. Формула расчетного сопротивления грунта для плитных фундаментов // *Construction and Geotechnics*. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 37–45. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.04

References

1. Bryson S., El Naggar H. Evaluation of the efficiency of different ground improvement techniques // *Proceeding of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Paris, 2013. – Pp. 683-686.

2. Radhakrishnan G., Raju G.V.R., and Venkateswarlu D. Study of consolidation accelerated by sand drains // *Proceeding of the Indian Geotechnical Conference*, 2010.

3. Gaafer, Manar, Bassioni, Hesham, Mostafa, Tareq. Soil Improvement Techniques // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. – 2015. – Vol. 6, iss. 12.

4. Bartolomey L.A., Bogomolova O.A., Geidt V.D., Geidt A.V. Computer simulation of rigid plate settlement on a homogeneous weight base. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 2, pp. 5-17. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.01.

5. Bartolomey L.A., Bogomolova O.A., Geidt V.D., Geidt A.V. Numerical assessment of the influence of the rigidity of the above-foundation part of the structure and the deformation properties of the soil mass on the settlement and stability of the foundation. *Bulletin of the Volgograd State Architectural and Construction University. Construction and Architecture*, 2022, iss. 2(87), pp. 6-18.

6. Bartolomey L.A., Bogomolova O.A., Geidt V.D., Geidt A.V. Computer modeling of stamp settlements on homogeneous foundation taking into account stiffness of above-foundation structure. *Soil Mechanics in Geotechnics and Foundation Engineering: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*, Novocherkassk, September 28-30, 2022. Novocherkassk, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), 2022, pp. 124-137.

7. Coulomb C.A. Application des riles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture. *Memories de savants strangers de L'Academiie des sciences de Paris*, 1773, 233 p.

8. Coulomb C. A. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. *Mem. Acad. Roy. Div. Sav.*, 1776, vol. 7, pp. 343-387.

9. Bhattacharya P., Kumar J. Bearing capacity of foundations on soft clays with granular column and trench. *Soils and Foundations*, 2017, no. 57, pp. 488–495.

10. Oh W.T., Vanapalli S.K. Modeling the stress versus settlement behavior of shallow foundations in unsaturated cohesive soils extending the modified total stress approach. *Soils and foundations*, 2018, no. 58, pp. 382–397.
11. Surendra Maharjan, Hussain Saliq. Stabilization of clay soil using fly ash and lime for construction work. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2015, vol. 4, iss. 12, pp. 11869-11874.
12. George K. Burke. Jet grouting system: Advantages and disadvantages, in drilled shaft, micropiling, deep mixing remedial methods and specialty foundation system. ASCE, Orlando, Florida, 2004.
13. Shenkman R.I., Ponomaryov A.B. Calculation of vertical deformations of the foundations on the soft soil improved by geotextile encased stone columns. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 3, pp. 64-76. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.06.
14. Bogomolova O.A. [et al.]. Ustoichivost' (Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie) [Stability (Stress-strain state)]. Certificate of state registration of computer program EVM № 2009613499 (2009).
15. Bogomolova O.A. [et al.]. FEA: Certificate of state registration of computer program no. 2015617889 (2015).
16. Matvienko J.O., Dyba V.P., Matvienko M.P. Formula of the design resistance of soil for plate foundations. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 37-45. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.04.