

УДК 624.131

А.М. КАРАУЛОВ, К.В. КОРОЛЕВ, М.В. ШОХИРЕВ

**ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ
ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ**

Приводится решение задачи о несущей способности двухслойного основания. Если вопрос о предельном давлении на однородное грунтовое основание в теории предельного равновесия грунтов достаточно разработан, то для случая многослойного основания строгие статические решения отсутствуют. В то же время реальные основания часто представлены горизонтальным напластованием различных грунтов. В этих случаях оценка их несущей способности может осуществляться исключительно приближенными способами в рамках методов отсеков. В предлагаемой статье рассматривается возможность применения для решения задачи о несущей способности двухслойного основания метода логарифмической спирали. Применение этого метода для определения предельного давления может быть достигнуто без определения распределения напряжений вдоль линии скольжения. Данный подход также следует отнести к разряду приближенных методов, поскольку очертание линии скольжения представляется логарифмической спиралью. Однако здесь существует возможность введения поправочного коэффициента, чтобы приблизить получаемый результат к истинной величине.

К л ю ч е в ы е с л о в а: несущая способность, наклонная нагрузка, логарифмическая спираль.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-743-11-18-27

При проектировании фундаментов мелкого заложения проверка оснований по несущей способности в сейсмических районах выполняется только в особых случаях, оговоренных в основном нормативном документе СНиП 2.02.01–83* «Основания зданий и сооружений». Тем не менее не будет ошибкой считать, что вопрос о несущей способности основания является первостепенным при любом строительстве [1]. Поэтому необходимо располагать методами оценки несущей способности грунтовых оснований для любых условий.

В настоящее время в нормативных документах приводится методика расчета несущей способности грунтовых однородных оснований. Эта методика основана на решениях теории предельного равновесия грунтов [2–4], оформлена в виде формулы и вспомогательной таблицы коэффициентов несущей способности основания. Теория предельного равновесия является теоретической базой решения задач устойчивости в механике грунтов, поэтому представленное решение является эталонным, т.е. не вызывающим сомнений. Следует заметить, что в работе [5] выполнено существенное уточнение данного решения.

Основная проблема заключается в том, что для практического пользования предложено решение лишь для простейшего случая однородного основания. Даже учет жесткого подстилающего слоя, для которого были получены

строгие решения теории предельного равновесия грунтов, не нашел отражения в нормативных документах. В отношении более сложных случаев дана общая рекомендация об использовании приближенных методов или численного моделирования, хотя каждый из этих подходов имеет свои особенности и области применения, требующие специального исследования. Таким образом, вопрос о решении сложных случаев основания, например многослойных, по существу остается открытым. Имеющиеся рекомендации в СНиП 2.02.01–83* по учету прочности слабого подстилающего слоя регламентируют ограничение давления для расчета осадки основания, но не дают оценку его несущей способности [1].

Рассмотрим одну довольно простую расчетную схему – двухслойное грунтовое основание с горизонтальным напластованием и, соответственно, горизонтальной границей. Цель решения будет заключаться в определении предельного давления штампа (фундамента) на основание с равномерной вертикальной пригрузкой. При этом равнодействующая предельного давления будет представлять вертикальную центрально приложенную силу.

В рамках статического метода теории предельного равновесия грунтов до сих пор не удалось получить строгое решение данной задачи. Численное моделирование, как было показано, дает неустойчивые результаты в части предельной нагрузки [6, 7]. Поэтому здесь не рассматривается вопрос соответствия результатов определения несущей способности методами теории устойчивости с результатами решений методом конечных элементов. В данной ситуации целесообразно обратиться к приближенным методам расчета. Наиболее подходящим для поставленной задачи представляется метод логарифмической спирали [8]. Во-первых, в этом методе можно избежать необходимости определения напряжений вдоль линии скольжения без дополнительных гипотез. Приведенные напряжения, действующие по линии скольжения, направлены к центру логарифмической спирали, относительно которого из уравнения моментов определяется предельная нагрузка. Во-вторых, в строгом кинематическом методе теории предельного равновесия, как правило, используются линии скольжения в виде логарифмических спиралей [9]. И, в-третьих, применяя метод логарифмических спиралей, следует ожидать систематическую ошибку по сравнению со строгим решением теории предельного равновесия грунтов. Это обстоятельство существенно облегчает назначение корректировочного коэффициента к результатам решения.

Предварительно рассмотрим ожидаемую величину систематической ошибки метода логарифмической спирали в задаче о предельном вертикальном давлении штампа на однородное основание. Этот выбор обусловлен наличием строгого статического решения теории предельного равновесия для этой задачи. Итак, величина предельной вертикальной нагрузки, согласно наиболее точному варианту статического решения [5], определяется стандартной формулой [1]:

$$p_u = \gamma b N_\gamma + q N_q + c N_c, \quad (1)$$

где γ , c – удельный вес и удельное сцепление грунта;

b , q – ширина штампа и боковая пригрузка;

N_γ , N_q , N_c – коэффициенты несущей способности основания.

Коэффициенты несущей способности основания для вертикальной нагрузки даются выражениями:

$$N_\gamma = \frac{3\sin\varphi\text{ctg}\mu}{4(1+\sin^2\varphi)} \left[(1+2\sin\varphi)\text{ctg}\mu e^{\frac{3\pi}{2}\text{tg}\varphi} + 1 - 2\sin\varphi \right], \quad (2)$$

$$N_q = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} e^{\pi\text{tg}\varphi}, \quad N_c = c\text{ctg}\varphi(N_q - 1), \quad \mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2},$$

где φ – угол внутреннего трения грунта.

Расчетная схема для решения этой задачи методом логарифмической спирали показана на рис. 1.

Задача решается в приведенных напряжениях – ко всем напряжениям добавляется величина – $c\text{ctg}\varphi$. Решение выполняется в относительных переменных: γ – единица массовой силы, b – единица длины. Соответственно, относительное приведенное предельное давление p'_{ul} и относительная приведенная пригрузка q' будут равны:

$$p'_{ul} = \frac{p_{ul} + c\text{ctg}\varphi}{\gamma b}, \quad q' = \frac{q + c\text{ctg}\varphi}{\gamma b}, \quad (3)$$

где p_{ul} – абсолютное значение предельного давления.

Здесь и далее для некоторых переменных метода логарифмической спирали будет вводиться индекс « l ».

Линия скольжения ABD , определяющая область выпора, описывается уравнением логарифмической спирали с центром O (рис. 1):

$$r = r_1 e^{(\theta - \theta_1)\text{tg}\varphi}. \quad (4)$$

Задавая положение линии скольжения параметрами r_1, θ_1 , из уравнения моментов относительно центра логарифмической спирали определяется соответствующее давление p' :

$$p' = -2 \frac{M_\gamma + M_q}{2r_1 \sin\theta_1 + 1}, \quad (5)$$

где M_γ и M_q – моменты от собственного веса грунта и пригрузки.

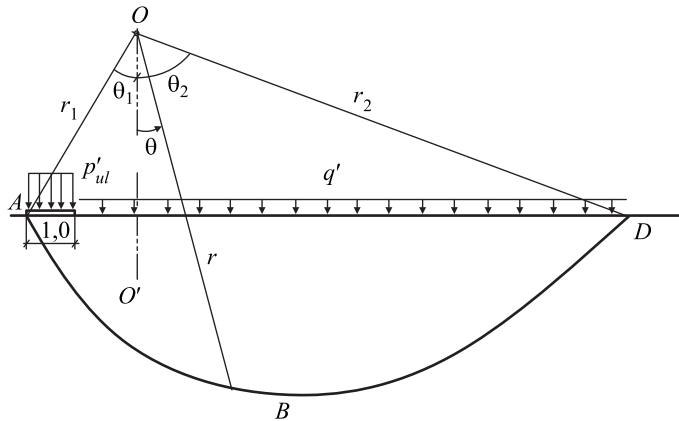


Рис. 1. Расчетная схема метода логарифмической спирали для однородного основания

Величины M_γ и M_q даются выражениями:

$$M_\gamma = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (r \cos \theta - r_2 \cos \theta_2) \frac{r^2 \sin \theta \cos(\theta - \varphi_1)}{\cos \varphi_1} d\theta =$$

$$= \frac{r_1^3}{4} \{ e^{3(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi} F(\theta_2, \varphi) - F(\theta_1, \varphi) + 2 \cos \theta_1 [\sin^2 \theta_1 - e^{2(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi} \sin^2 \theta_2] \}, \quad (6)$$

$$M_q = \frac{q'}{2} [r_2^2 \sin^2 \theta_2 - (r_1 \sin \theta_1 + 1)^2].$$

Здесь функцией $F(\theta_i, \varphi_i)$ обозначено выражение

$$F(\theta_i, \varphi_i) = \frac{\cos \theta_i - 2 \cos(2\varphi_i + \theta_i)}{1 + 8 \sin^2 \varphi_i} - \frac{\cos 3\theta_i}{3}. \quad (7)$$

Угол θ_2 находится из уравнения

$$e^{(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1} \cos \theta_2 - \cos \theta_1 = 0. \quad (8)$$

Наконец, относительное приведенное предельное давление p'_{ul} есть минимум функции p' по координатам r_1, θ_1 :

$$p'_{ul} = \min p'(r_1, \theta_1). \quad (9)$$

Поиск минимума осуществляется численно градиентным методом [10]. Для углов $\varphi = 0 - 45^\circ$ с шагом 5° и относительных приведенных пригрузок $q' = 1 - 10$ с шагом 1,0 были определены величины относительных приведенных предельных нагрузок. Для примера приведем анализ результатов численного решения для угла $\varphi = 30^\circ$. В таблице даны полученные значения p'_{ul} .

Значения p'_{ul} для $\varphi = 30^\circ$

q'	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p'_{ul}	43,6	67,0	90,2	113	136	158	181	204	227	250

Зависимость $p'_{ul}(q')$ достаточно точно описывается линейной функцией:

$$p'_{ul} = N_{\gamma l} + N_{q l} \cdot q', \quad (10)$$

где $N_{\gamma l} = 21,24$ и $N_{q l} = 22,91$ – коэффициенты несущей способности.

Следовательно, абсолютное значение предельного давления определится формулой (1):

$$p_{ul} = \gamma b N_{\gamma l} + q N_{q l} + c N_{c l}, \quad N_{c l} = c \operatorname{ctg} \varphi (N_{q l} - 1). \quad (11)$$

Для коэффициентов $N_{\gamma l}$ и $N_{q l}$ были получены аппроксимационные зависимости от угла φ (рад):

$$N_{\gamma l} = 0,134 e^{9,81\varphi}, \quad N_{q l} = 0,893 e^{6,32\varphi}. \quad (12)$$

Расхождение результатов расчета несущей способности по методу логарифмической спирали с результатами решения статическим методом теории предельного равновесия выразим отношением $k = \frac{p'_u}{p'_{ul}}$. На рис. 2 представлена номограмма значений k в зависимости от φ и q' .

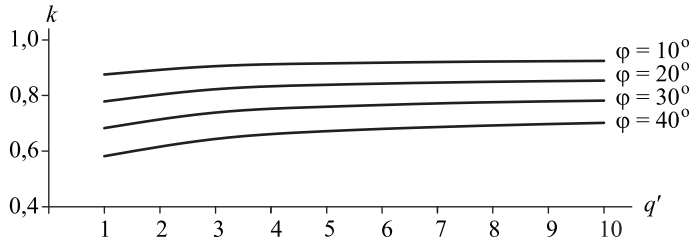


Рис. 2. Номограмма $k(\varphi, q')$

Как следует из номограммы, метод логарифмической спирали существенно завышает предельную нагрузку. При этом ошибка возрастает с увеличением угла внутреннего трения и уменьшением пригрузки. Очевидно, что при оценке несущей способности по результатам решения методом логарифмической спирали следует обязательно вводить поправочный понижающий коэффициент.

Обратимся теперь к задаче определения несущей способности двухслойного основания. На рис. 3 показана расчетная схема метода логарифмической спирали для этого случая.

Мощность первого слоя грунта с характеристиками γ_1, c_1 и φ_1 составляет величину l . Характеристики второго слоя грунта – γ_2, c_2 и φ_2 . Рассмотрим положение линии скольжения, пересекающей оба слоя грунта. В точках B и C линия скольжения пересекает границу слоев. Эта линия состоит из трех отрезков логарифмических спиралей, имеющих общий центр O и определяемых уравнениями –

$$\begin{aligned} \text{участок } AB (\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2): r &= r_1 e^{(\theta - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1}, \\ \text{участок } BC (\theta_2 \leq \theta \leq \theta_3): r &= r_2 e^{(\theta - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2}, \\ \text{участок } CD (\theta_3 \leq \theta \leq \theta_4): r &= r_3 e^{(\theta - \theta_3) \operatorname{tg} \varphi_1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь угол θ отсчитывается от вертикали OO' в положительном направлении против часовой стрелки. Радиусы r_2, r_3 и r_4 будут равны:

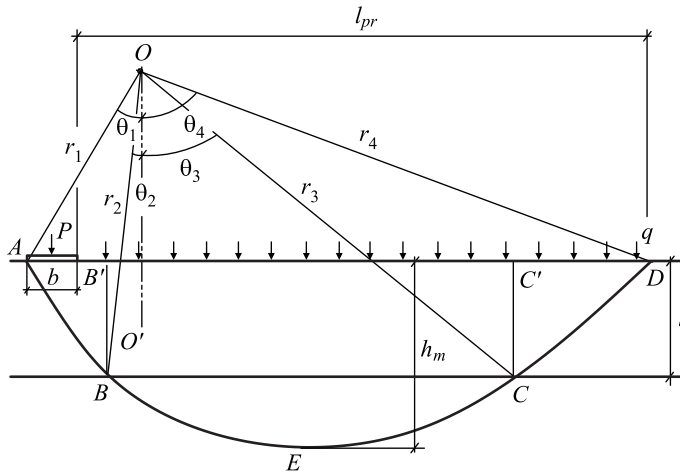


Рис. 3. Расчетная схема метода логарифмической спирали для двухслойного основания

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 e^{(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1}, \\ r_3 &= r_2 e^{(\theta_3 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2} = r_1 e^{(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1 + (\theta_3 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2}, \\ r_4 &= r_3 e^{(\theta_4 - \theta_3) \operatorname{tg} \varphi_1} = r_1 e^{(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1 + (\theta_3 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2 + (\theta_4 - \theta_3) \operatorname{tg} \varphi_1}. \end{aligned} \quad (14)$$

Углы θ_2 , θ_3 и θ_4 определяются из трансцендентных уравнений –

$$\begin{aligned} \text{для угла } \theta_2: r_2 \cos \theta_2 - r_1 \cos \theta_1 &= r_1 [e^{(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1} \cos \theta_2 - \cos \theta_1] = l, \\ \text{для угла } \theta_3: r_3 \cos \theta_3 - r_2 \cos \theta_2 &= e^{(\theta_3 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2} \cos \theta_3 - \cos \theta_2 = 0, \\ \text{для угла } \theta_4: r_4 \cos \theta_4 - r_3 \cos \theta_3 &= e^{(\theta_4 - \theta_3) \operatorname{tg} \varphi_1} \cos \theta_4 - \cos \theta_3 = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Заметим, что угол θ_1 и радиус r_1 полностью определяют геометрию области выпора и являются исходными параметрами задачи.

Рассмотрим решение задачи в абсолютных величинах. Вертикальная сила предельного давления P_{ul} приложена в середине штампа. Частное значение этой силы P , соответствующей произвольной схеме выпора, определяется из уравнения моментов относительно центра логарифмических спиралей:

$$P = -2 \frac{M_\gamma + M_c + M_q}{2r_1 \sin \theta_1 + b}. \quad (16)$$

Моменты от действия собственного веса грунта γ_1 и γ_2 , удельного сцепления c и пригрузки q будут определяться выражениями:

момент от собственного веса грунта –

$$\begin{aligned} M_\gamma &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \gamma_1 (r \cos \theta - r_1 \cos \theta_1) \frac{r^2 \sin \theta \cos(\theta - \varphi_1)}{\cos \varphi_1} d\theta + \\ &+ \int_{\theta_2}^{\theta_3} \gamma_2 (r \cos \theta - r_2 \cos \theta_2) \frac{r^2 \sin \theta \cos(\theta - \varphi_2)}{\cos \varphi_2} d\theta + \\ &+ \int_{\theta_3}^{\theta_4} \gamma_1 (r \cos \theta - r_1 \cos \theta_1) \frac{r^2 \sin \theta \cos(\theta - \varphi_1)}{\cos \varphi_1} d\theta + \\ &+ \frac{\gamma_1 l}{2} (r_3^2 \sin^2 \theta_3 - r_2^2 \sin^2 \theta_2) = \frac{\gamma_1 r_1^3}{4} \{ e^{3(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1} F(\theta_2, \varphi_1) - \\ &- F(\theta_1, \varphi_1) + 2 \cos \theta_1 [\sin^2 \theta_1 - e^{2(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1} \sin^2 \theta_2] \} + \\ &+ \frac{\gamma_2 r_2^3}{4} \{ e^{3(\theta_3 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2} F(\theta_3, \varphi_2) - F(\theta_2, \varphi_2) + \\ &+ 2 \cos \theta_2 [\sin^2 \theta_2 - e^{2(\theta_3 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2} \sin^2 \theta_3] \} + \\ &+ \frac{\gamma_1 r_1^3}{4} \left\{ e^{3(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1} F(\theta_4, \varphi_1) - F(\theta_3, \varphi_1) + \right. \\ &+ \left. 2 \cos \theta_1 \frac{r_1}{r_3} [\sin^2 \theta_3 - e^{2(\theta_4 - \theta_3) \operatorname{tg} \varphi_1} \sin^2 \theta_3] \right\} + \\ &+ \frac{\gamma_1 l}{2} (r_3^2 \sin^2 \theta_3 - r_2^2 \sin^2 \theta_2); \end{aligned} \quad (17)$$

момент, обусловленный удельным сцеплением грунта –

$$\begin{aligned}
 M_c = & c_1 r_1 e^{-\theta_1 \operatorname{tg} \varphi_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} e^{2\theta \operatorname{tg} \varphi_1} d\theta + c_2 r_2 e^{-\theta_2 \operatorname{tg} \varphi_2} \int_{\theta_2}^{\theta_3} e^{2\theta \operatorname{tg} \varphi_2} d\theta + \\
 & + c_1 r_3 e^{-\theta_3 \operatorname{tg} \varphi_1} \int_{\theta_3}^{\theta_4} e^{2\theta \operatorname{tg} \varphi_1} d\theta = \frac{c_1 r_1^2}{2 \operatorname{tg} \varphi_1} [e^{2(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1} - 1] + \\
 & + \frac{c_2 r_2^2}{2 \operatorname{tg} \varphi_2} [e^{2(\theta_3 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2} - 1] + \frac{c_1 r_3^2}{2 \operatorname{tg} \varphi_1} [e^{2(\theta_4 - \theta_3) \operatorname{tg} \varphi_1} - 1];
 \end{aligned} \tag{18}$$

момент от пригрузки –

$$M_q = \frac{q}{2} [r_4^2 \sin^2 \theta_4 - (r_1 \sin \theta_1 + b)^2]. \tag{19}$$

Здесь значение $F(\theta_i, \varphi_i)$ принимается по формуле (7). Располагая функцией $P(r_1, \theta_1)$, остается найти ее минимум, который можно рассматривать как несущую способность основания или предельное давление на основание $P_{ul} = \min P(r_1, \theta_1)$. Однако полученный результат следует откорректировать, поскольку непосредственное решение методом логарифмической спирали завышает предельную нагрузку.

Для примера предположим, что указанный минимум существует и ему отвечает линия скольжения, пересекающая оба грунтовых слоя. В этом случае необходимо также зафиксировать соответствующие этой линии скольжения радиус r_1 и углы $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и θ_4 . Корректировку предельного давления предлагается выполнять в следующей последовательности. Во-первых, следует определить длину участка линии скольжения, расположенного в первом l_1 и во втором l_2 слое грунта. В соответствии со схемой на рис. 3 можно записать:

$$l_1 = \frac{1}{\sin \varphi_1} (r_1 e^{(\theta_2 - \theta_1) \operatorname{tg} \varphi_1} + r_3 e^{(\theta_4 - \theta_3) \operatorname{tg} \varphi_1}), \quad l_2 = \frac{r_2}{\sin \varphi_2} e^{(\theta_3 - \theta_2) \operatorname{tg} \varphi_2}. \tag{20}$$

Во-вторых, следует найти отношение предельных нагрузок, определенных статическим методом теории предельного равновесия грунтов и методом логарифмической спирали для однородного основания, сложенного первым грунтом k_1 и вторым грунтом k_2 . Эти величины будут равны:

$$\begin{aligned}
 k_1 = & \frac{\gamma_1 b N_\gamma(\varphi_1) + q N_q(\varphi_1) + c N_c(\varphi_1)}{\gamma_1 b N_{\gamma l}(\varphi_1) + q N_{q l}(\varphi_1) + c N_{c l}(\varphi_1)}, \\
 k_2 = & \frac{\gamma_2 b N_\gamma(\varphi_2) + q N_q(\varphi_2) + c_2 N_c(\varphi_2)}{\gamma_2 b N_{\gamma l}(\varphi_2) + q N_{q l}(\varphi_2) + c_2 N_{c l}(\varphi_2)}.
 \end{aligned} \tag{21}$$

Тогда поправочный коэффициент предлагается рассчитать по формуле

$$k_l = \frac{k_1 l_1 + k_2 l_2}{l_1 + l_2}. \tag{22}$$

Ожидаемое предельное давление на основание предлагается оценить величиной P_u :

$$P_u = k_l \cdot P_{ul}. \quad (23)$$

В заключении отметим, что в случае слабого подстилающего слоя возможно наличие двух локальных минимумов функции $P_{ul} = \min P(r_1, \theta_1)$, из которых следует принимать наименьшее значение предельного давления.

Вывод. Предельное давление на двухслойное основание можно определять методом логарифмической спирали по формуле (23) с поправочным коэффициентом, определяемым формулой (22).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Малышев М.В.* Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. М.: Стройиздат, 1994. 228 с.
2. *Соколовский В.В.* Статика сыпучей среды. М.: Физматгиз, 1960. 240 с.
3. *Строганов А.С.* Прочность оснований сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1983. № 3. С. 23–27.
4. *Соловьев Ю.И.* Несущая способность предельно напряженного основания под ленточным фундаментом // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1979. № 4. С. 21–23.
5. *Королев К.В.* Канонические уравнения статики сыпучей среды при малом влиянии удельного веса грунта и решение задачи Прандтля // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 5. С. 2–6.
6. *Королев К.В., Караулов А.М.* Об определении предельной нагрузки в упругопластических расчетах грунтовых оснований методом конечных элементов // Геотехника: актуальные теоретические и практические проблемы / Межвуз. тем. сб. тр. СПб.: СПбГАСУ, 2007. С. 102–107.
7. *Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шашкин В.А.* Основы совместных расчетов зданий и оснований. СПб.: Изд-во ин-та «Геореконструкция», 2014. 328 с.
8. *Хуан Я.Х.* Устойчивость земляных откосов. М.: Стройиздат, 1988. 240 с.
9. *Соловьев Ю.И., Караулов А.М., Смолин Ю.П.* Современные методы расчета устойчивости земляного полотна железных дорог. Новосибирск: СГАПС, 1996. 82 с.
10. *Васильев Ф.П.* Лекции по методам решения экстремальных задач. М.: Изд-во МГУ, 1974. 374 с.

Караулов Александр Михайлович, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: karaulov_am@mail.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Королев Константин Валерьевич, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: korolev_kv@mail.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Шохирев Максим Витальевич, асп.; E-mail: 170596maxim@gmail.com

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 12.10.2020

Karaulov Alexander Mikhaylovich, DSc, Professor; E-mail: karaulov_am@mail.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Korolev Konstantin Valer'evich, DSc, Professor; E-mail: korolev_kv@mail.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Shokhirev Maxim Vital'evich, Post-graduate Student;

E-mail: _170596maxim@gmail.com

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

ESTIMATION OF BEARING ABILITY THE TWO-LAYER EARTH BASES

The decision of a problem on bearing ability of the two-layer basis is resulted. If the question on limiting pressure upon the homogeneous earth basis in the theory of limiting balance soils is developed enough, for a case multi-layer the bases strict static decisions are absent. At the same time the real bases are frequently submitted horizontal superposition various soils. In these cases the estimation of their bearing ability can be carried out by exclusively approached ways within the framework of methods of compartments. In offered clause the opportunity of application for the decision of a problem on bearing ability of the two-layer basis of a method of a logarithmic spiral is considered. Application of this method for definition of limiting pressure can be achieved without definition of distribution of pressure along a line of sliding. The given approach also should be attributed to the category of the approached methods as the outline of a line of sliding is represented by a logarithmic spiral. However, here there is an opportunity of introduction of correction factor to approach received result to true size.

Key words: bearing ability, inclined loading, logarithmic spiral.

REFERENCES

1. *Malyshev M.V.* Prochnost' gruntov i ustoychivost' osnovaniy sooruzheniy [Durability soils and stability of the bases of constructions]. Moscow, Stroyizdat, 1994. 228 p. (in Russian)
2. *Sokolovskiy V.V.* Statika sypuchey sredy [Statics of the loose environment]. Moscow, Fizmatgiz, 1960. 240 p. (in Russian)
3. *Stroganov A.S.* Prochnost' osnovaniy sooruzheniy [Durability of the bases of constructions]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Bases, the bases and mechanics soils]. 1983. No. 3. Pp. 23–27. (in Russian)
4. *Solov'ev Yu.I.* Nesushchaya sposobnost' predel'no napryazhennogo osnovaniya pod lentochnym fundamentom [Ability of extremely intense basis under the tape base]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Bases, the bases and mechanics soils]. 1979. No. 4. Pp. 21–23. (in Russian)
5. *Korolev K.V.* Kanonicheskiye uravneniya statiki sypuchey sredy pri malom vliyaniy udel'nogo vesa grunta i resheniye zadachi Prandtlya [Initial of the equation of a statics of the loose environment at small influence of densities of a ground and the decision of problem Prandtl]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Bases, the bases and mechanics soils]. 2012. No. 5. Pp. 2–6. (in Russian)
6. *Korolev K.B., Karaulov A.M.* Ob opredelenii predel'noy nagruzki v uprugoplasticheskikh raschetakh gruntovykh osnovaniy metodom konechnykh elementov [About definition of a maximum load in elastic-plastic calculations of the earth bases by a method of final elements]. Geotekhnika: aktual'nyye teoreticheskiye i prakticheskiye problemy. Mezhev. tem. sbornik trudov [Geotechnics: actual theoretical and practical problems. Interhigh school thematic collection of works]. Saint Petersburg, SPbGASU, 2007. Pp. 102–107. (in Russian)
7. *Ulitskiy V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Shashkin V.A.* Osnovy sovmestnykh raschetov zdaniy i osnovaniy [Bas of joint calculations of buildings and the bases]. Saint Petersburg, Publishing house of institute «Georeconstruction», 2014. 328 p. (in Russian)

8. *Huan Ya.H.* Ustoychivost' zemlyanykh otkosov [Stability of earthen slopes]. Moscow, Stroyizdat, 1988. 240 p. (in Russian)
 9. *Solov'ev Yu.I., Karaulov A.M., Smolin Yu.P.* Sovremennyye metody rascheta ustoychivosti zemlyanogo polotna zheleznykh dorog [Modern methods of calculation of stability of an earthen cloth of railways]. Novosibirsk, SGAPS, 1996. 82 p. (in Russian)
 10. *Vasil'ev F.P.* Lektsii po metodam resheniya ekstremal'nykh zadach [Lecture on methods of the decision of extreme problems]. Moscow, Publishing house of the Moscow State University, 1974. 374 p. (in Russian)
-