

УДК 624.131

*КАРАУЛОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
karaulov@stu.ru*

*КОРОЛЕВ КОНСТАНТИН ВАЛЕРЬЕВИЧ, докт. техн. наук, доцент,  
korolev\_kv@mail.ru*

*Сибирский государственный университет путей сообщения,  
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191*

### **ПРАКТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЛАБЫХ ОСНОВАНИЙ ДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ**

Изложен практический метод расчета несущей способности слабых оснований дорожных насыпей. В основу метода положены статические решения теории предельного равновесия грунтов. Силовое воздействие насыпи на основание представлено давлением с трапецидальной эпюрой нормальной компоненты. Даны базовые замкнутые решения для идеально связного и невесомого оснований. Для общего случая рекомендованы аппроксимационные формулы, основанные на результатах численных решений. Дана оценка влияния жесткого подстилающего слоя на несущую способность основания насыпи. Приведены формулы для вычисления предельного давления насыпи на слабое основание в зависимости от характеристик грунта основания и геометрических параметров насыпи.

**Ключевые слова:** несущая способность; основание; слабый грунт; насыпь; теория предельного равновесия.

*ALEKSANDR M. KARAULOV, DSc, Professor,  
karaulov@stu.ru*

*KONSTANTIN V. KOROLEV, DSc, A/Professor,  
korolev\_kv@mail.ru*

*Siberian State Transport University,  
191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia*

### **STRENGTH ANALYSIS OF WEAK BOTTOM SOIL OF ROAD EMBANKMENTS**

The paper deals with the practical method of calculating the bearing capacity of weak bottom soil of road embankments. A theory of soil limit equilibrium underlies this method. A direct force action produced by the embankment on the soil represents the pressure with a trapezoid diagram of the normal component. Closed solutions are considered for an ideal-cohesion and weightless bottom soil. Approximation formulas obtained for the general case, are based on results of numerical calculations. The influence of a rigid layer is estimated for the bearing capacity of the bottom soil. Equations are obtained for the limiting pressure of embankment on the weak soil depending on soil characteristics and geometrical parameters of embankment.

**Keywords:** bearing capacity; base; weak soil; embankment; theory of limit equilibrium.

В связи с интенсивным дорожным строительством в районах распространения слабых оснований возникает необходимость надежной оценки их

несущей способности для различных объектов. При проектировании автомобильных и железных дорог это в первую очередь относится к насыпям, отсыпаемым на слабых грунтах.

Дорожная насыпь представляет собой линейное сооружение, и решение задач для насыпи и основания выполняется для условий плоской деформации в системе координат  $zOy$  (ось  $Oz$  совпадает с направлением силы тяжести). Наряду с обеспечением прочности дорожной одежды и земляного полотна [1] имеет значение обеспечение устойчивости оснований [2]. Если основание сложено слабыми грунтами, то, как правило, прочность материала земляного полотна значительно превосходит прочность слабого грунта основания. Наиболее распространенными расчетными схемами насыпи на слабом основании являются схема однородного основания и схема основания с жестким подстилающим слоем.

При оценке несущей способности слабых оснований силовое воздействие на него насыпи, например, трапециoidalного очертания представляется в виде давления с эпюрой нормальной компоненты, подобной контуру земляного полотна. Расчетное давление грунта характеризуется максимальной ординатой этой эпюры  $p$ , равной

$$p = \gamma_n h + \frac{P_v}{a + 2b}, \quad (1)$$

где  $\gamma_n$  – удельный вес грунта насыпи;  $h$  – высота насыпи;  $2b$  – ширина основной площадки;  $a$  – заложение откоса;  $P_v$  – погонная расчетная временная нагрузка, действующая по оси земляного полотна в уровне основной площадки.

Предельное давление насыпи на слабое основание определяется статическим методом теории предельного равновесия грунтов [3]. При этом находится эпюра предельного давления с трапециoidalной эпюрой нормальной компоненты, подобной классическому профилю насыпи. Отдельные решения этой задачи были выполнены Ю.И. Соловьевым и А.М. Карауловым [4, 5]. Особенность этих решений заключается в использовании при построении области предельного равновесия зоны без особой точки. Впоследствии решение в этой зоне было представлено комбинацией первой и третьей краевой задачи статики сыпучей среды [6].

Для несомого идеально связного основания существует замкнутое решение задачи о предельном давлении насыпи. На рис. 1 показана область предельного равновесия в основании от трапециoidalной разрушающей нагрузки с максимальной ординатой  $p_u$ .

Напряженное состояние в этой области отвечает основной системе уравнений теории предельного равновесия для несомой идеально связной среды:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} &= \gamma, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} &= 0, \\ (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4\tau_{zx}^2 &= 4c^2. \end{aligned} \quad (2)$$

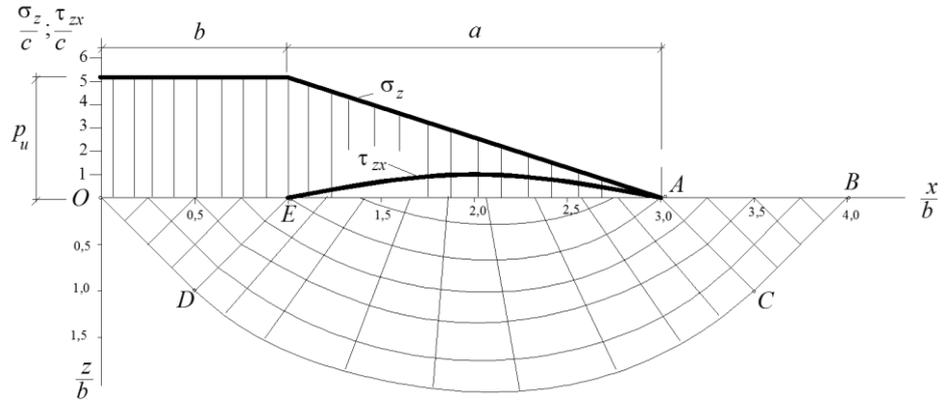


Рис. 1. Область предельного равновесия в весомом идеально связном основании насыпи

Система дифференциальных уравнений гиперболического типа (2) имеет два семейства характеристик (линий скольжения), определяемых канонической системой уравнений:

$$\begin{aligned} dx &= dz \operatorname{tg} \left( \alpha \pm \frac{\pi}{4} \right), \\ d\sigma \pm 2cd\alpha &= \gamma dx, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\sigma = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2}$  – среднее напряжение;  $\alpha$  – угол наклона  $\sigma_1$  к оси  $Oz$ .

Компоненты тензора предельных напряжений даются выражениями:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_z \\ \sigma_x \end{array} \right\} = \sigma \pm c \cos 2\alpha, \quad \tau_{zx} = c \sin 2\alpha. \quad (4)$$

В зоне максимального напряженного состояния  $ABC$  имеем

$$\alpha = \frac{\pi}{2}, \quad \sigma = c + \gamma z. \quad (5)$$

В переходной зоне без особой точки  $ACDE$  справедливы выражения:

$$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}, \quad \sigma = c(1 + \pi - 2\alpha) + \gamma z. \quad (6)$$

Наконец, в зоне минимального напряженного состояния  $ODE$  параметры  $\sigma$  и  $\alpha$  будут равны:

$$\alpha = 0, \quad \sigma = c(1 + \pi) + \gamma z. \quad (7)$$

Искомая величина – предельная нагрузка на основание – выражается известной формулой Прандтля, хотя и отвечает нагрузке трапецеидального очертания:

$$p_u = c(2 + \pi). \quad (8)$$

Для общего случая весомой сыпучей среды решение для предельной трапецеидальной нагрузки достигается численным интегрированием системы дифференциальных уравнений, каноническая форма которых имеет вид

$$dx = dz \operatorname{tg}(\alpha \pm \mu), \quad d\sigma \pm 2\sigma \operatorname{tg} \varphi d\alpha = \gamma(dz \mp dx \operatorname{tg} \varphi). \quad (9)$$

На рис. 2 показан пример сетки линий скольжения в области предельного равновесия, сформированной под действием разрушающей трапецидальной нагрузки.

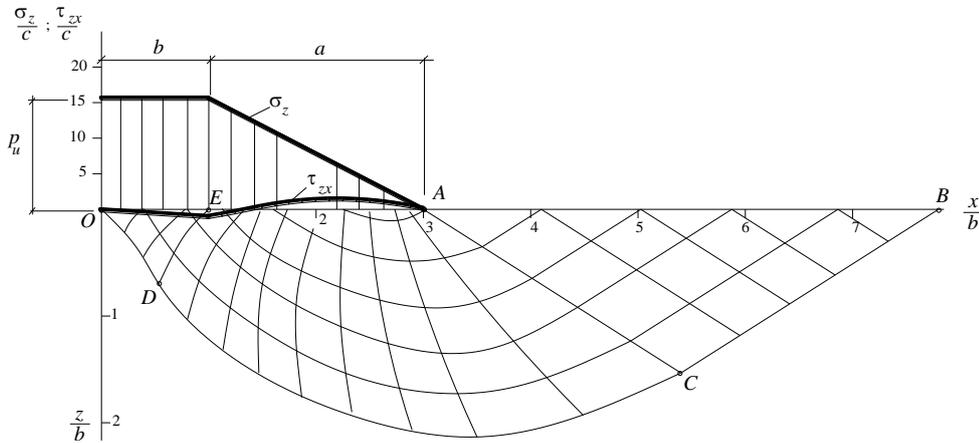


Рис. 2. Область предельного равновесия в весоном сыпучем основании насыпи  
 $\left( \varphi = 20^\circ; \frac{b}{a} = 0,5; \frac{c}{\gamma a} = 3 \right)$

Замкнутое решение имеет место лишь в зоне максимального напряженного состояния  $ABC$ :

$$\sigma = \frac{\gamma z + c \operatorname{ctg} \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad \alpha = \frac{\pi}{2}. \quad (10)$$

В переходной зоне без особой точки  $ACDE$  и зоне минимального напряженного состояния  $ODE$  выполнялось численное решение канонической системы уравнений (9) методом характеристик.

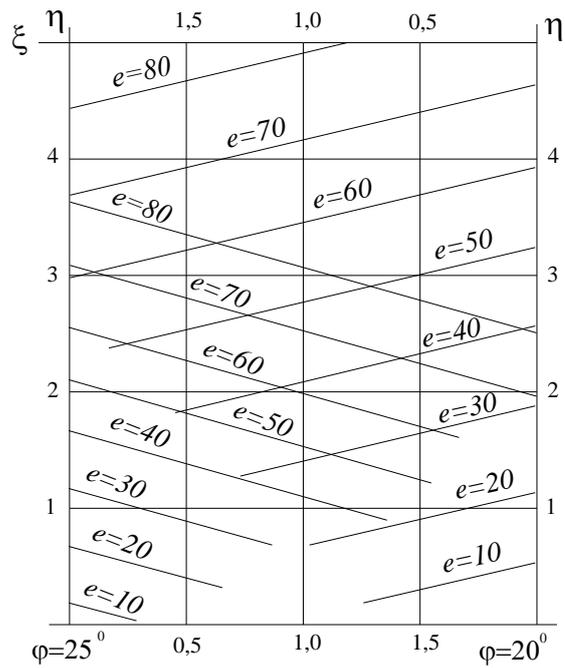
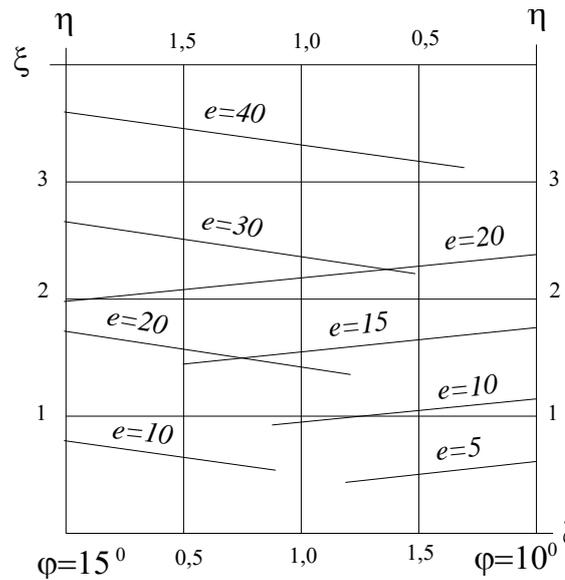
Рассмотрим результат решения, выражающийся в методе расчета максимальной ординаты трапецидальной эпюры нормальной компоненты предельного давления  $p_u$ . По результатам численных расчетов были построены номограммы для определения безразмерной характеристики предельного давления  $e$  в зависимости от параметров  $\eta = \frac{c}{\gamma a}$  и  $\xi = \frac{b}{a}$ . Эти номограммы для углов внутреннего трения  $\varphi = 10, 15, 20, 25^\circ$  представлены на рис. 3 и 4.

Абсолютное значение предельной нагрузки  $p_u$  дается формулой

$$p_u = \gamma a e. \quad (11)$$

Приведенные номограммы можно аппроксимировать зависимостями, удобными для практического применения:

$$p_u = \gamma b N_{\gamma b} + \gamma a N_{\gamma a} + c N_c. \quad (12)$$

Рис. 3. Номограмма для  $\varphi = 25^\circ$  и  $\varphi = 20^\circ$ Рис. 4. Номограмма для  $\varphi = 15^\circ$  и  $\varphi = 10^\circ$ 

Коэффициенты несущей способности слабого основания дорожной насыпи  $N_{\gamma_b}$ ,  $N_{\gamma_a}$ ,  $N_c$  определяются в зависимости от угла внутреннего трения слабого грунта основания. Значения этих коэффициентов приведены в таблице.

**Коэффициенты несущей способности слабого основания насыпи**

$\varphi^\circ$	$N_c$	$N_{\gamma b}$	$N_{\gamma a}$
0	5,14	0	0
5	6,49	0,545	0,197
10	8,30	1,41	0,587
15	10,7	3,46	1,42
20	14,2	7,15	3,17
25	20,3	11,7	6,94

Следует отметить, что расчет по формуле (12) выполняется при значениях  $\xi \leq \xi_{кр}$ . В случае  $\xi > \xi_{кр}$  принимается  $\xi = \xi_{кр}$  и предполагается неполное развитие областей предельного равновесия в основании насыпи. Критическое значение  $\xi_{кр}$  устанавливается по формуле

$$\xi_{кр} = 0,95\eta + 0,25. \tag{13}$$

Далее, представляет интерес случай слоя слабого грунта ограниченной толщины. Это упомянутая выше схема основания с жестким подстилающим слоем. Такие условия встречаются в болотистых местностях и в районах сезоннооттаивающих грунтов.

На рис. 5 показана расчетная схема насыпи на основании с жестким подстилающим слоем. Глубину залегания кровли жесткого подстилающего слоя обозначим символом  $l$ , ее относительную величину – параметром  $\bar{l} = \frac{l}{a}$ .

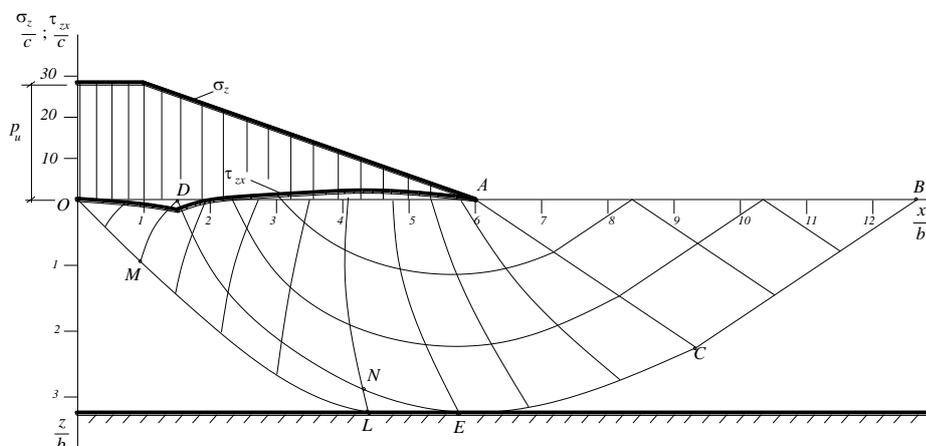


Рис. 5. Область предельного равновесия в весомом сыпучем основании с жестким под-

$$\text{стилающим слоем } \left( \varphi = 20^\circ; \xi = \frac{b}{a} = 0,2; \eta = \frac{c}{\gamma a} = 2; \bar{l} = \frac{l}{a} = 0,7 \right)$$

Жесткий подстилающий слой рассматривается как огибающая одного из семейств линий скольжения в основании – это дополнительное граничное условие при решении задачи определения предельного давления (на рис. 6 –

участок  $LE$ ). Решение в данном случае также достигается численным интегрированием канонической системы уравнений теории предельного равновесия. Замкнутое решение (10) имеет место только в зоне  $ABC$ . Зона  $ACLMO$  определяется численным решением.

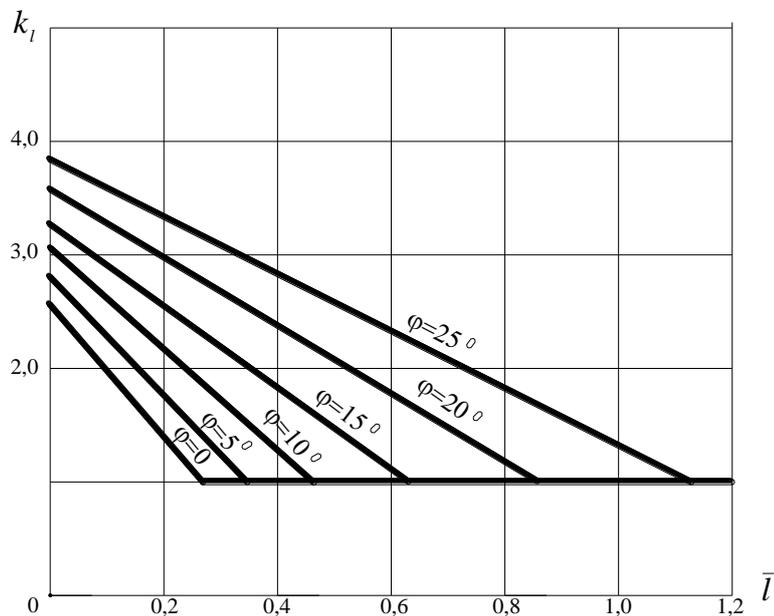


Рис. 6. Номограмма для определения коэффициента влияния жесткого подстилающего слоя  $k_l$

Пример сетки линий скольжения в основании с жестким подстилающим слоем показан на рис. 5 для случая трапецидального предельного давления.

Численные решения данной задачи были выполнены для широкого диапазона исходных данных: угла внутреннего трения  $\varphi$ , безразмерных параметров

$\xi = \frac{b}{a}$ ,  $\eta = \frac{c}{\gamma a}$ , а также безразмерной величины мощности слабого грунта

$\bar{l} = \frac{l}{a}$ . Сопоставлялись величины предельных нагрузок:  $p_{ul}$  — с учетом жесткого подстилающего слоя и  $p_u$  — для однородного основания.

Результаты численных решений этой задачи были проанализированы и приведены к виду

$$p_{ul} = k_l p_u. \quad (14)$$

Номограмма для определения коэффициента влияния жесткого подстилающего слоя  $k_l$  дана на рис. 6. Величина  $p_u$  дается формулой (12).

Расчет слабого основания насыпи по несущей способности заключается в проверке неравенства

$$p \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} p_u, \quad (15)$$

где  $\gamma_c$  – коэффициент условия работ;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности (например,  $\gamma_c = 1,1$ ;  $\gamma_n = 1,25$ ).

Предельное давление  $p_u$  может рассчитываться по приведенной в статье формуле (12) для однородного основания и по формуле (14) при наличии жесткого подстилающего слоя.

В заключение отметим, что применение теории предельного равновесия для оценки несущей способности оснований актуально на сегодняшний день и активно разрабатывается как в нашей стране, так и за рубежом [7, 8].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев, В.С. Влияние физико-механических характеристик грунта земляного полотна на образование деформаций дорожной одежды / В.С. Воробьев, Е.Л. Пак // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1. – С. 190–198.
2. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах (к СНиП 2.05.02–85). – М., 1989. – 144 с.
3. Соколовский, В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М. : Физматгиз, 1960. – 240 с.
4. Соловьев, Ю.И. Оценка несущей способности слабых оснований дорожных насыпей / Ю.И. Соловьев, А.М. Караулов // Транспортное строительство. – 1979. – № 9. – С. 41–42.
5. Караулов, А.М. Статическое решение задачи устойчивости оснований насыпей / А.М. Караулов // Тр. МИИТа. – М., 1978. – Вып. 613. – С. 5–9.
6. Королев, К.В. Плоская задача теории предельного равновесия грунтов / К.В. Королев. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. – 251 с.
7. Islam, M. Behaviour of Two Closely Spaced Strip Footings Placed on a Stiff Clay Bed under Cyclic Loading / M. Islam, C. Gnanendran // Geotechnical Testing Journal. – 2013. – 36 (2).
8. Krabbenhoft, S. Bearing Capacity of Strip Footings in Cohesionless Soil Subject to Eccentric and Inclined Loads / S. Krabbenhoft, L. Damkilde, K. Krabbenhoft // Int. J. Geomech. – 2014. – 14 (3). – 04014003.

#### REFERENCES

1. Vorobyev V.S., Pak E.L. Vliyanie fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik grunta zemlyanogo polotna na obrazovanie deformatsii dorozhnoi odezhdy [Mechanical-and-physical properties of subgrade soil and pavement deformation]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. V. 1. Pp. 190–198. (rus)
2. Posobie po proektirovaniyu zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog na slabykh gruntakh (k SNiP 2.05.02–85) [A manual for design of roadbed of highways on weak soils (SNiP 2.05.02-85)]. Moscow, 1989. 144 p. (rus)
3. Sokolovsky V.V. Statika sypuchei sredy [Statics of loose soils]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1960. 240 p.
4. Solov'ev Yu.I., Karaulov A.M. Otsenka nesushchei sposobnosti slabykh osnovanii dorozhnykh nasypei [Estimation of bearing capacity of weak soils of road embankments]. *Transportnoe stroitel'stvo*. 1979. No. 9. Pp.41–42. (rus)
5. Karaulov A.M. Stichesкое reshenie zadachi ustoychivosti osnovanii nasypei [Static problem solution of embankment stability]. Moscow: MIIT Publ., 1978. No. 613. Pp. 5–9. (rus)
6. Korolev K.V. Ploskaya zadacha teorii predel'nogo ravnovesiya gruntov [The plane problem of theory of soil limit equilibrium]. Novosibirsk: SGUPS Publ., 2010. 251 p.(rus)
7. Islam M., Gnanendran C. Behaviour of two closely spaced strip footings placed on a stiff clay bed under cyclic loading. *Geotechnical Testing Journal*. 2013. 36 (2).
8. Krabbenhoft S., Damkilde L., Krabbenhoft K. Bearing capacity of strip footings in cohesionless soil subject to eccentric and inclined loads. *Int. J. Geomech*. 2014. 14 (3). P. 04014003.