

# ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

## BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2023. Т. 25. № 2. С. 183–190.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2023; 25 (2): 183–190.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

### НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.151.5

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-183-190

### О НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ГРУНТА НА ЗАБОЕ ВЫРАБОТКИ

**Владимир Евгеньевич Козловский<sup>1</sup>, Светлана Сергеевна Колмогорова<sup>1</sup>,  
Сергей Гаврилович Колмогоров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Выбор оптимальной формы инструмента для резки грунта является актуальной задачей для горнопроходческих отраслей строительства, поиска и добычи полезных ископаемых, а также в сфере почвообработки для сельского хозяйства. Форма забоя выработки при имеющейся нагрузке определяет момент наступления предельного состояния грунта и глубину его развития в призабойной области. Изменяя контур зоны обработки грунта, можно повысить эффективность проходки, снизить усилие подачи и износ инструмента.

Целью работы является создание алгоритма расчета забоя выработки сложной формы и определения напряженно-деформированного состояния массива грунта вблизи него при минимальном количестве граничных условий, отсутствии дискретизации всей области на элементы и аппроксимации между узлами. Требуется проиллюстрировать возможности предложенной методики тестовыми задачами для контура забоя и призабойной области.

Численная модель краевой задачи основана на интегральной формулировке задачи теории упругости Кельвина и использует метод потенциала в форме фиктивных нагрузок и разрывных смещений, что позволяет снизить размерность задачи, учесть симметрию, получить более компактную систему уравнений и иметь точные решения в любой точке области.

Проведена оценка напряженного состояния на контурах выработок различной формы и в призабойной зоне грунтового массива, дана последовательность оценки потери грунтом прочности по Мору – Кулону.

Предложенная методика решения краевой задачи рекомендована как экспресс-метод оценки напряженного состояния вблизи выработки произвольной формы в бесконечных областях с возможностью учета симметрии и реализации в среде Excel.

**Ключевые слова:** забой выработки, напряженно-деформированное состояние грунта, закон Кулона – Мора, метод фиктивных нагрузок

**Для цитирования:** Козловский В.Е., Колмогорова С.С., Колмогоров С.Г. О напряженном состоянии грунта на забое выработки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 2. С. 183–190. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-183-190.

## SOIL STRESS STATE AT THE ROADHEAD

Vladimir E. Kozlovskii<sup>1</sup>, Svetlana S. Kolmogorova<sup>1</sup>, Sergey G. Kolmogorov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract.** Choosing the optimum tool shape for soil cutting is an urgent task for shaft-sinking and tunnelling as well as in soil treatment for agriculture. The roadhead shape at the available load determines the stress-strain state of soil and development depth in the bottom-hole area. By changing the roadhead contour, the penetration efficiency can be increased, while the feed force and tool wear can be reduced.

**Purpose:** The aim of the work is to create the roadhead calculation algorithm and determine the stress-strain state of soil near it with a minimum number of boundary conditions, no discretization of the entire region into elements and approximation between nodes.

**Design/methodology:** Test tasks for the proposed methodology for the roadhead and the bottom-hole area. The numerical model of the boundary conditions is based on the integral formulation of the Kelvin elasticity theory problem and uses the potential method as fictitious loads and discontinuous displacements, that makes it possible to minimize the problem with regard to symmetry, obtain a more compact system of equations and give accurate solutions at any domain point.

**Research findings:** The assessment of the stress state of the roadhead of various shape and the bottom-hole zone of soil; loss of soil strength calculated according to the Mohr–Coulomb theory.

**Originality/value:** The proposed method for solving the boundary value problem is recommended as an express method for estimating the roadhead stress state of an arbitrary shape in infinite regions with regard to the symmetry and implementation in Excel.

**Keywords:** roadhead, stress-strain state, Mohr–Coulomb theory, pseudo-load method

**For citation:** Kozlovskii V.E., Kolmogorova S.S., Kolmogorov S.G. Soil stress state at the roadhead. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (2): 183–190. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-183-190.

Выбор оптимальной формы инструмента для резки грунта является одной из важнейших задач как для горнопроходческих отраслей строительства, так и для строительства зданий и сооружений. Весомый вклад в теорию резки внесён отечественными учёными В.П. Горячкиным, А.Н. Зелениным, Ю.А. Ветровым, а также зарубежными исследователями Е. Динглингером и И. Ратье.

Решение вопроса о минимуме усилия для резки пласта почвы невозможно без привлечения основных положений механики, разработанных и развитых Ш. Кулоном, К. Терцаги, Н.М. и М.Н. Герсевановыми, Н.П. Пузыревским и др.

В настоящее время сопротивление грунта резанию положено в основу метода искиметрии, используемого для оценки свойств просадочных грунтов в полевых условиях.

Отдавая должное работам основоположников, следует отметить, что имеющиеся эмпирические и аналитические зависимости не могут охватить всё многообразие форм режущих наконечников. Малое изменение контура и угла атаки режущей кромки может вызвать существенное изменение требуемого усилия вдавливания режущего наконечника [1, 4].

В настоящей статье предлагается методика оценки напряженного состояния грунта как на контуре рабочего органа машины, так и в глубине массива вблизи забоя. Выработки сложных очертаний, как известно, требуют уже не аналитического, а численного подхода [2], что влечет за собой увеличение времени на подготовку исходных данных и тем самым усложняет решение.

Разработанная авторами программа [3], основанная на методе граничных элементов в форме фиктивных нагрузок, позволяет решить задачу о НДС забоя выработки при минимальном количестве подготавливаемой исходной информации. Поскольку рассматриваемая область грунтового массива, в отличие от метода конечных элементов, является бесконечной, оценить напряжения и деформации можно в любой ее точке.

### Численная реализация задачи

Последовательность определения напряженного состояния следующая:

– Разбивка области на  $N$  отрезков по контуру выработки и задание на них граничных условий.

– Решение системы из  $2N$  уравнений относительно неизвестных  $P_s^j$  и  $P_n^j$ :

$$\begin{aligned} x_n^i &= \sum_{j=1}^N C_{ns}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N C_{nn}^{ij} P_n^j; \\ x_s^i &= \sum_{j=1}^N C_{ss}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N C_{sn}^{ij} P_n^j, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_n^i$ ,  $x_s^i$  – значения нормальных и касательных напряжений на отрезках разбиения контура либо нормальных и касательных смещений этих отрезков, соответствующих граничным условиям;  $C_{ns}^{ij}$ ,  $C_{nn}^{ij}$ ,  $C_{ss}^{ij}$ ,  $C_{sn}^{ij}$  – коэффициенты влияния, полученные из рассмотрения задачи теории упругости о силе, действующей в плоскости (линии сил, действующей в пространстве).

– Решение системы (1) относительно неизвестных  $x_n^i$  и  $x_s^i$  с целью нахождения всех недостающих компонент напряжений и смещений на граничных отрезках контура выработки.

– Нахождение напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  в массиве грунта перед забоем, преимущественно в зонах их концентрации.

– Проверка растяжения в центральной части забоя путем сравнения полученных тангенциальных напряжений с пределом прочности грунта растяжению. Для глинистых грунтов сопротивление растяжению вычисляется по формуле

$$\sigma_p = 2C \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (2)$$

– Проверка сжатия в боковых свободных частях забоя путем сравнения полученных тангенциальных напряжений с пределом прочности грунта сжатию:

$$\sigma_c = 2C \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right). \quad (3)$$

– Проверка прочности грунта по Мору – Кулону в краевых участках забоя через неравенство

$$\sin \varphi \geq \frac{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}{\sigma_x + \sigma_y + 2C \cot \varphi}. \quad (4)$$

Из преимуществ метода можно отметить удобство решения «бесконечных» задач, значительное снижение объема исходных данных по сравнению с МКЭ в связи с понижением размерности задачи и возможность нахождения решений во всех точках области, а не только в узлах. Переход к «конечным» областям осуществляется изменением направления обхода контура при разбивке на элементы.

К недостаткам могут быть отнесены отсутствие ленточной структуры системы (1), сложность задания многослойных толщ грунтов и учета нелинейности их свойств.

### Результаты вычислений

#### Распределение тангенциальных напряжений на забое выработки.

Тангенциальными называются нормальные напряжения, действующие на площадках, нормальных к контуру забоя выработки. Рассмотрена плоская задача о выработке шириной 7 м в грунтах с модулем  $E = 20$  МПа и закреплёнными от смещений параллельными стенками. Выработка находится в поле напряжений, действующих вдоль её оси, с интенсивностью 300 кПа.

Забой открытый и свободен от нормальных и касательных напряжений. В табл. 1 приведены результаты расчета тангенциальных напряжений при различном наклоне забоя к оси выработки.

Растягивающие напряжения показаны положительными, сжимающие – отрицательными.

Таким образом, подтверждено, что наибольшую ширину зоны растяжения грунта на забое имеет выработка, имеющая плоский забой, нормальный к продольной оси выработки.

Таблица 1  
Тангенциальные напряжения на контуре забоя выработки

Table 1

## Tangential stresses in the roadhead

| Тип забоя (план)                  | График тангенциальных напряжений                                                |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Забой</p> <p>Ось выработки</p> | <p>Тангенциальные напряжения на забое, кПа</p> <p>Точки на полуширине забоя</p> |
| <p>Забой</p> <p>Ось выработки</p> | <p>Тангенциальные напряжения на забое, кПа</p> <p>Точки на полуширине забоя</p> |
| <p>Забой</p> <p>Ось выработки</p> | <p>Тангенциальные напряжения на забое, кПа</p> <p>Точки на полуширине забоя</p> |
| <p>Забой</p> <p>Ось выработки</p> | <p>Тангенциальные напряжения на забое, кПа</p> <p>Точки на полуширине забоя</p> |

**Глубина зоны растяжения перед забоем выработки.** Тангенциальные напряжения в центральной части забоя, как было показано выше, являются растягивающими при любой его форме. Актуальным является вопрос глубины распространения растягивающих нормальных напряжений в массиве грунта в центре забоя, действующих поперёк оси выработки.

Растягивающие напряжения положительны, сжимающие – отрицательны.

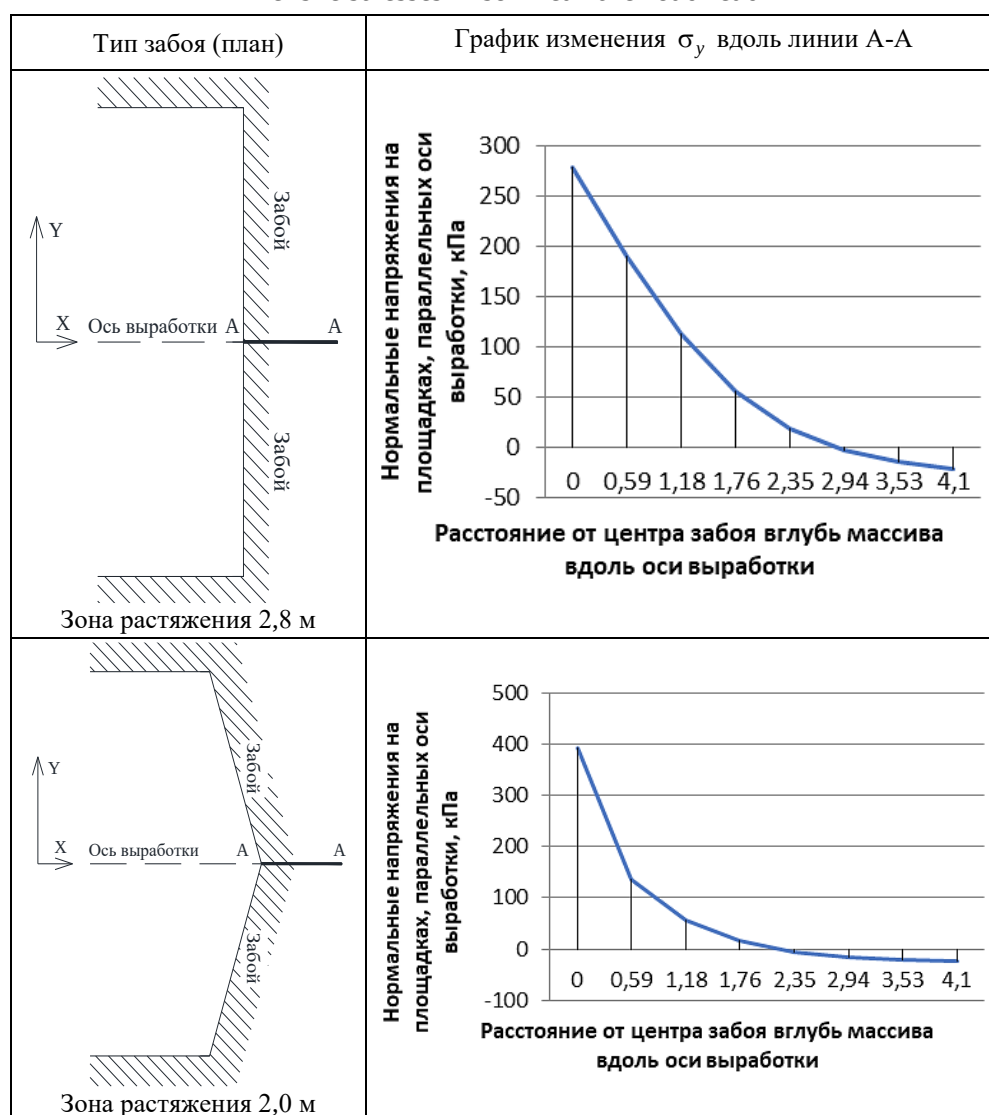
Результаты расчётов для ранее обозначенных исходных данных приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Графики развития растягивающих напряжений в массиве грунта перед забоем выработки**

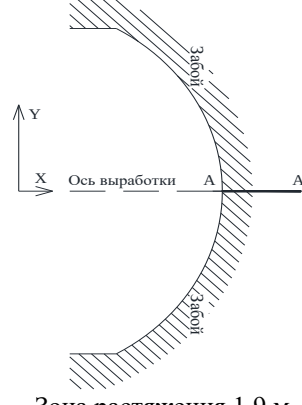
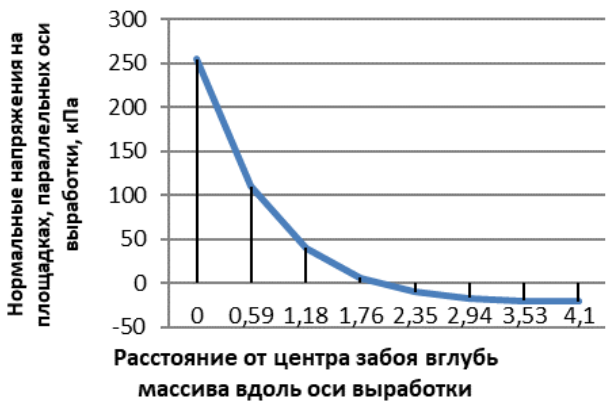
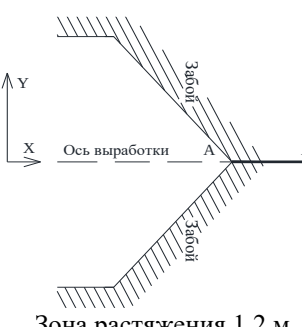
Table 2

**Tensile stresses in soil near the roadhead**



Окончание табл. 2

End of the table 2

| Тип забоя (план)                                                                                                | График изменения $\sigma_y$ вдоль линии А-А                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Зона растяжения 1,9 м</p>  |  <p>Нормальные напряжения на площадках, параллельных оси выработки, кПа</p> <p>Расстояние от центра забоя вглубь массива вдоль оси выработки</p>  |
|  <p>Зона растяжения 1,2 м</p> |  <p>Нормальные напряжения на площадках, параллельных оси выработки, кПа</p> <p>Расстояние от центра забоя вглубь массива вдоль оси выработки</p> |

Таким образом, при плоских торцах выработок глубина развития зон растяжения вглубь массива больше, чем при криволинейных.

Облегченный учет симметрии делает такой метод весьма эффективным при рассмотрении задач о продавливании грунта сквозь свайное поле. Подобные задачи могут быть предложены как для бесконечной грунтовой области, так и для выработки, стенки которой укреплены не соприкасающимися друг с другом стержнями любого сечения.

### Заключение

Предложенный расчетный процесс позволяет производить оценку НДС грунтового массива вблизи выработок различной конфигурации, а также вблизи рабочих органов землеройных машин сложной формы, в том числе с учетом симметрии относительно одной либо двух осей. Малый объем подготавливаемой к расчету информации делает его эффективным для ряда упругих задач геомеханики, и особенно для неограниченных областей. Изменение направления обхода контура позволяет рассматривать также ограниченные области с жесткими подстилающими слоями.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зеленин А.Н. Физические основы теории резания грунтов. Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1950. 354 с.
2. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твёрдого тела. Москва : Мир, 1987. 328 с.
3. Кавказский В.Н., Козловский В.Е. и др. Программа расчёта выработки методом граничных элементов. № свид. о гос. рег. RU2020663522 ; дата рег. 21.10.2020.
4. Безуйен А., Талмон А.М. Давление грунта на режущее колесо ЕРВ-щита / под ред. Ким, Бан. Сеул, Корея, 2014. С. 523–529.

## REFERENCES

1. Zelenin A.N. Physical foundations of soil cutting theory. Moscow, Leningrad, 1950. 354 p. (In Russian)
2. Crouch S.L., Starfield A.M. Boundary element methods in solid mechanics. Moscow: Mir, 1987. 328 p. (In Russian)
3. Kavkazsky V.N., Kozlovsky V.E., et al. Pit analysis by boundary element method. RF State Registration Certificate N RU2020663522, 2020. (In Russian)
4. Talmon A.M., Bezuijen A. Soil pressures at the cutting wheel and the pressure bulkhead of an EPB-shield. Seoul, Korea, 2014. Pp. 523–529.

## Сведения об авторах

Козловский Владимир Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Koslovskii@mail.ru

Колмогорова Светлана Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Kolmogorovass@yandex.ru

Колмогоров Сергей Гаврилович, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 196601, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Kolmogorovsg@list.ru

## Authors Details

Vladimir E. Kozlovskii, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Koslovskii@mail.ru

Svetlana S. Kolmogorova, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Kolmogorovass@yandex.ru

Sergey G. Kolmogorov, PhD, A/Professor, Saint-Petersburg State Agrarian University, 2, Peterburgskoe shosse, 196601, Pushkin, Saint-Petersburg, Russia, Kolmogorovsg@list.ru

## Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Authors contributions

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023  
Одобрена после рецензирования 08.02.2023  
Принята к публикации 20.03.2023

Submitted for publication 10.01.2023  
Approved after review 08.02.2023  
Accepted for publication 20.03.2023