



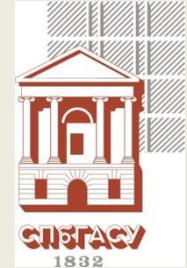
**Сибирский государственный университет путей сообщения**

**НИЛ "Геотехника, тоннели и метрополитены"**



[vk.com/geotun](https://vk.com/geotun)

Инженерно-геотехнические изыскания,  
проектирование и строительство оснований,  
фундаментов и подземных сооружений



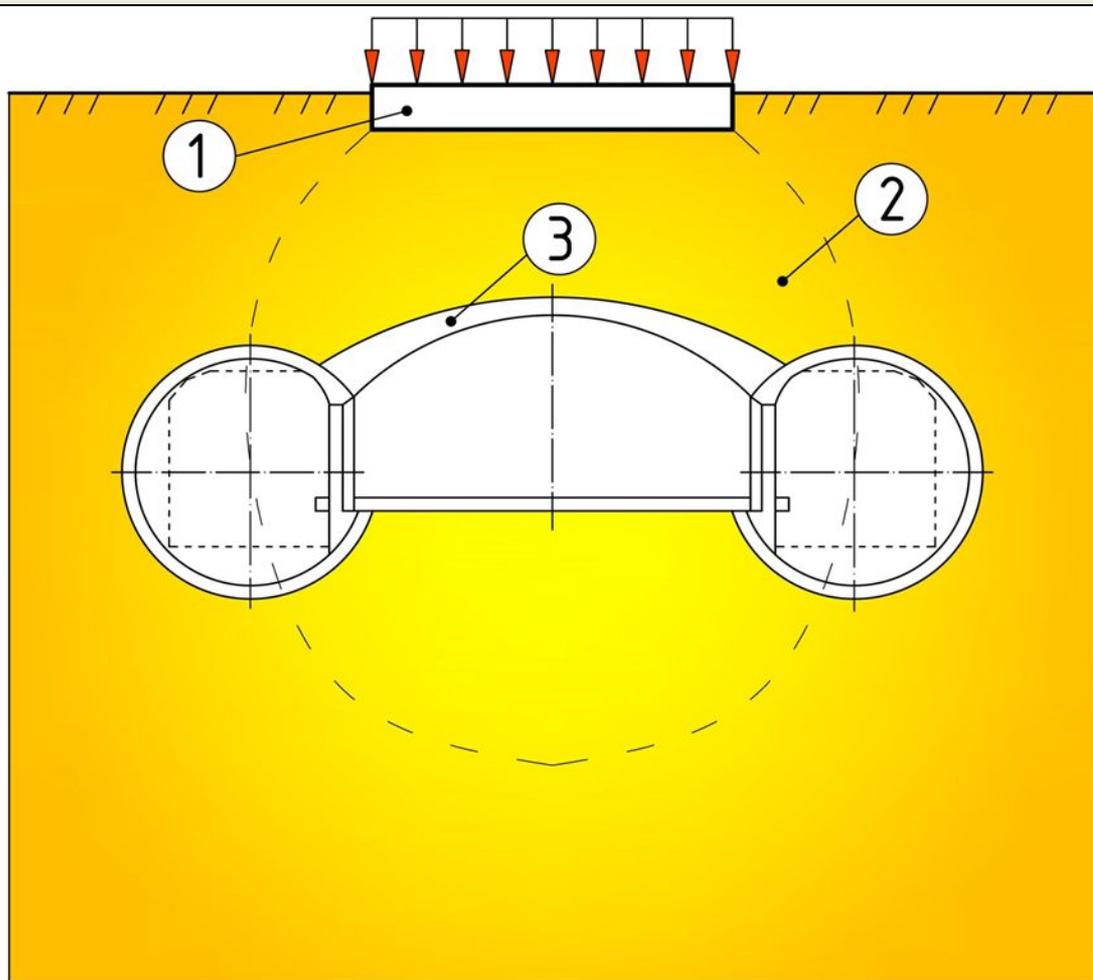
**ДОКЛАД НА ТЕМУ:  
«НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ С  
УЧЕТОМ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ»**

**Карян Геворг Гарникович  
Полянкин Геннадий Николаевич**

**Новосибирск – Санкт-Петербург  
2017 г.**

# Решаемая задача / Актуальность

2



Элементы системы «фундамент – основание – подземное сооружение»: 1 – фундамент сооружения; 2 – основание сооружения; 3 – подземное сооружение

Проектные  
ситуации

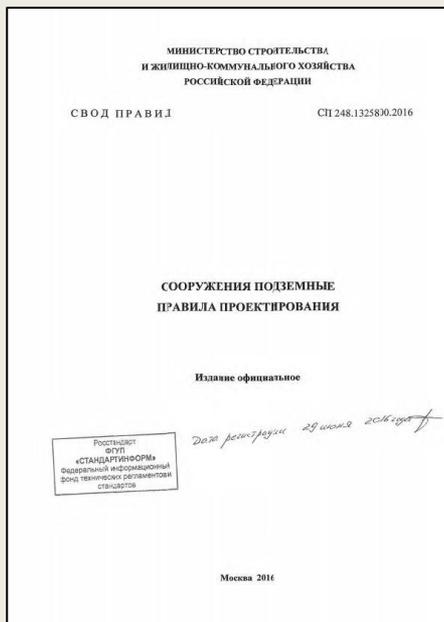
Новое  
строительство

Подработка  
территорий

# Метод решения / Нормативная база

3

СП 248.1325800.2016



СП 22.13330.2011



ГОСТ 27751-2014



- + Расчет оснований по несущей способности в общем случае следует выполнять методами теории предельного равновесия грунтов (ТПРГ).
- + Для совместного расчета сооружения и основания может быть использован метод конечных элементов (МКЭ).
- + Необходимость проведения параллельных расчетов по альтернативным методикам с использованием независимо разработанных САЕ-программ.

# Основные используемые уравнения ТПРГ

4

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = X,$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = Z,$$

Исходная замкнутая система дифференциальных уравнений первого порядка в частных производных.

$$\sigma_x = \sigma_x(x, z)$$

$$\sigma_z = \sigma_z(x, z)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{xz}(x, z)$$

$$\sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2} = (\sigma_x + \sigma_z + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi) \sin \varphi.$$

$$dx = dz \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \mu),$$

$$dx = dz \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \mu),$$

$$d\sigma + 2\sigma \operatorname{tg} \varphi \cdot d\alpha = \gamma(dz - dx \cdot \operatorname{tg} \varphi),$$

$$d\sigma - 2\sigma \operatorname{tg} \varphi \cdot d\alpha = \gamma(dz + dx \cdot \operatorname{tg} \varphi).$$

Каноническая система дифференциальных уравнений.

$$\sigma(x, z)$$

$$\alpha(x, z)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi \quad \operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\tau_{xz}}{\sigma_z - \sigma_x}$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x \\ \sigma_z \end{array} \right\} = \sigma(1 \mp \sin \varphi \cos 2\alpha) - c \cdot \operatorname{ctg} \varphi,$$

$$\tau_{xz} = \sigma \sin \varphi \sin 2\alpha.$$

# Пример расчета методами ТПРГ

$\gamma$	$\varphi$	$c$
18	26	12

$P_u = 551,704$

$q_l = 902,079$

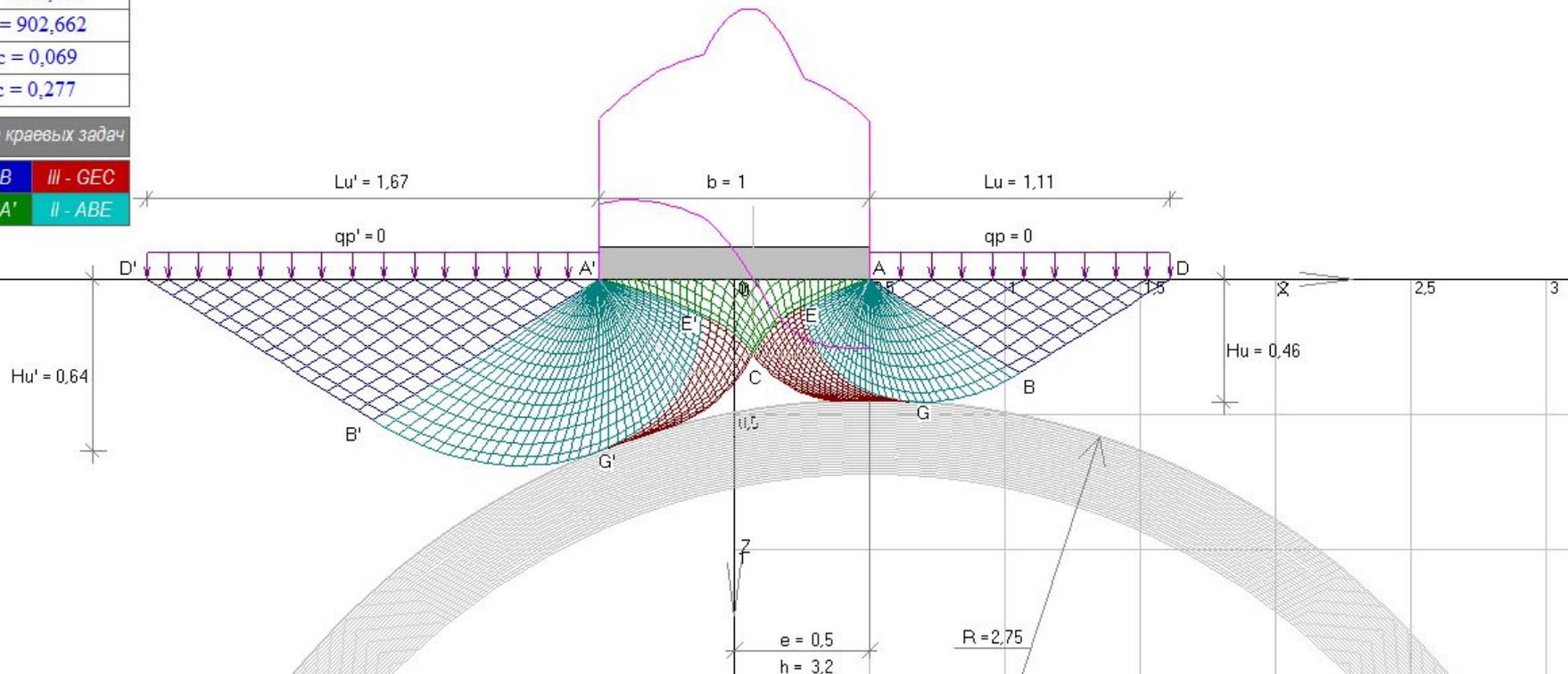
$q_r = 902,662$

$x_c = 0,069$

$z_c = 0,277$

Номера краевых задач

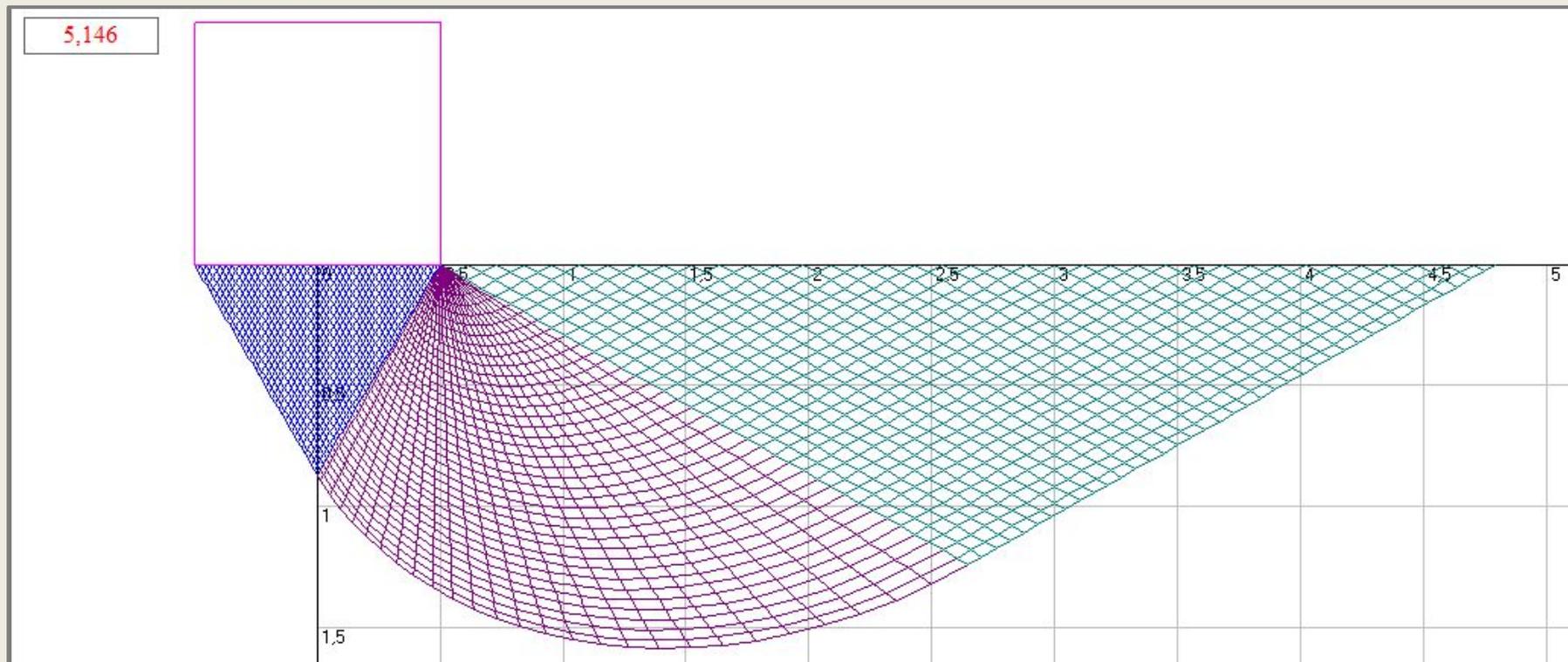
I - ADB	III - GEC
II - ACA'	IV - ABE



$$\left\{ \begin{array}{l} x - x_2 = (z - z_2) \operatorname{tg}[(\alpha + \alpha_2) / 2 - \mu] \\ \sigma - \sigma_2 - (\sigma + \sigma_2) \operatorname{tg} \varphi \cdot (\alpha - \alpha_2) = \gamma [z - z_2 + (x - x_2) \operatorname{tg} \varphi] \\ (x - e)^2 + (z - h)^2 = R^2 \quad \alpha = \operatorname{arctg}(dx / dz) - \mu \end{array} \right.$$

# Вдавливание штампа в идеально-упругопластическую среду

6

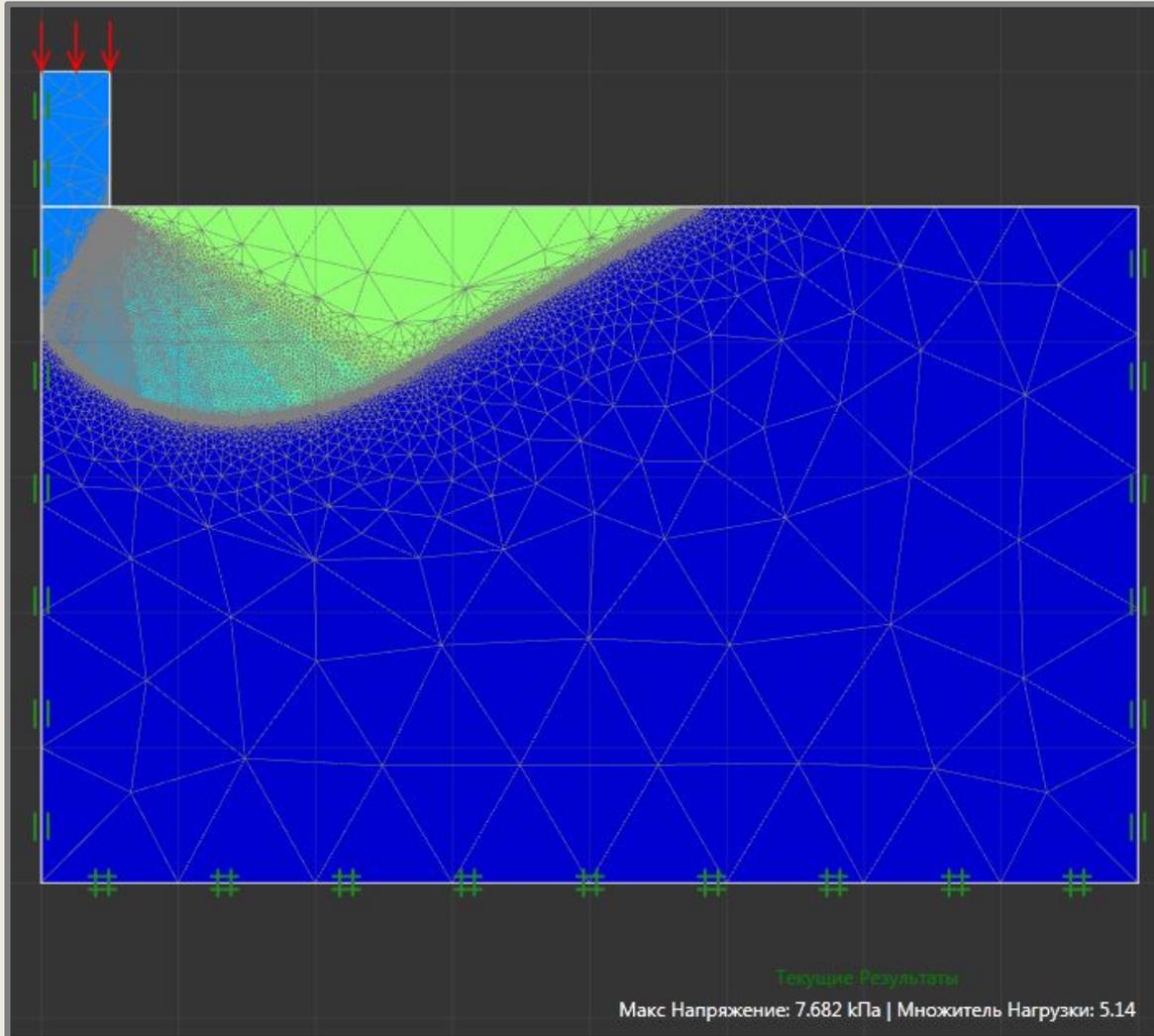


**Исходные данные:**

$\phi = 0^\circ, c = 1; \phi = 10^\circ, c = 0,616; \phi = 20^\circ, c = 0,347; \phi = 30^\circ, c = 0,171; \phi = 40^\circ, c = 0,0683.$

# Вдавливание штампа в идеально-упругопластическую среду

7



**OptumG2**

**Размеры расчетной области**  
8x5 м

**Конечно-элементная сетка**  
адаптивная  
количество итераций – 25  
начальное кол-во эл. – 50 тыс.

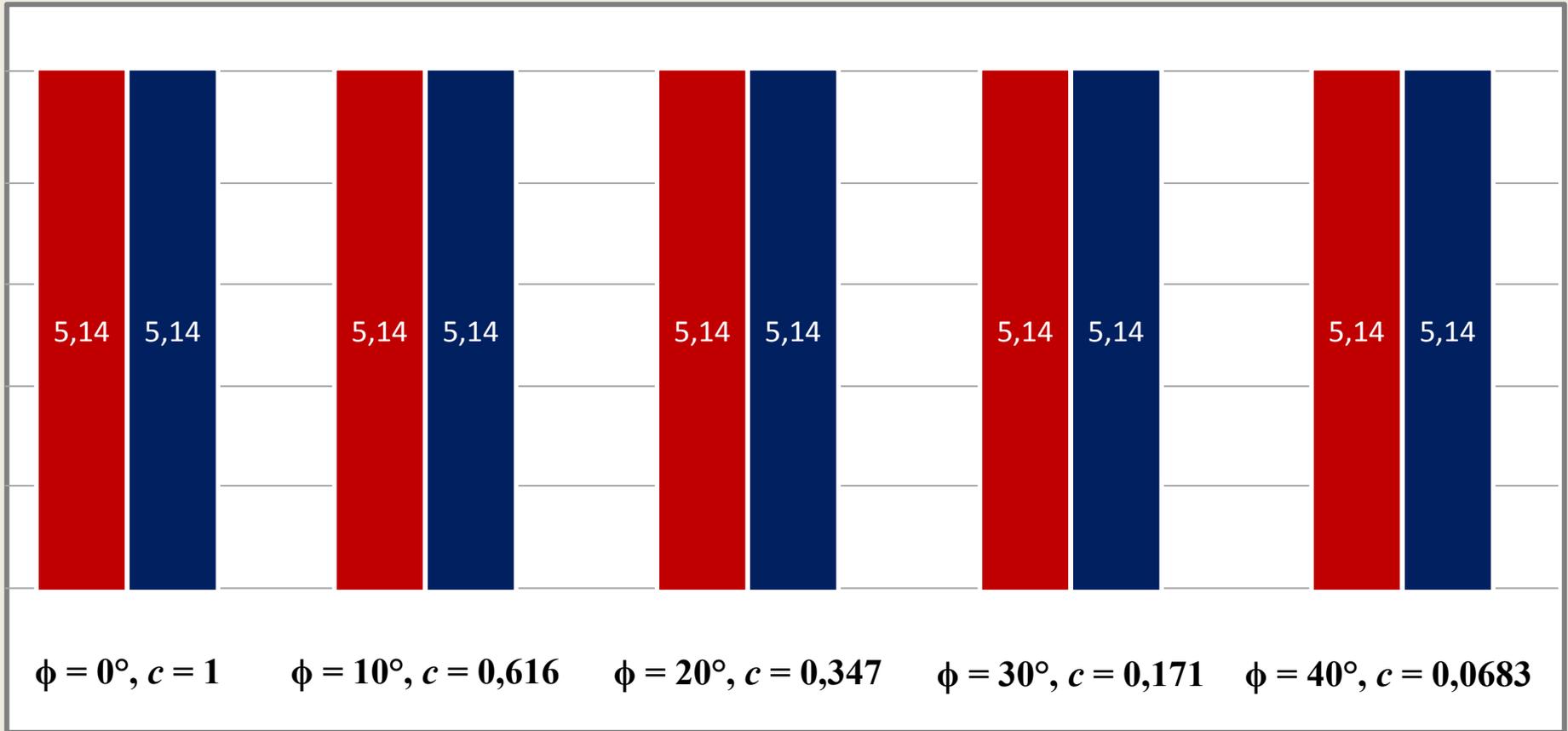
**Модель материала**  
грунт – Кулона-Мора

**Тип расчета**  
Finite Element Limit Analysis

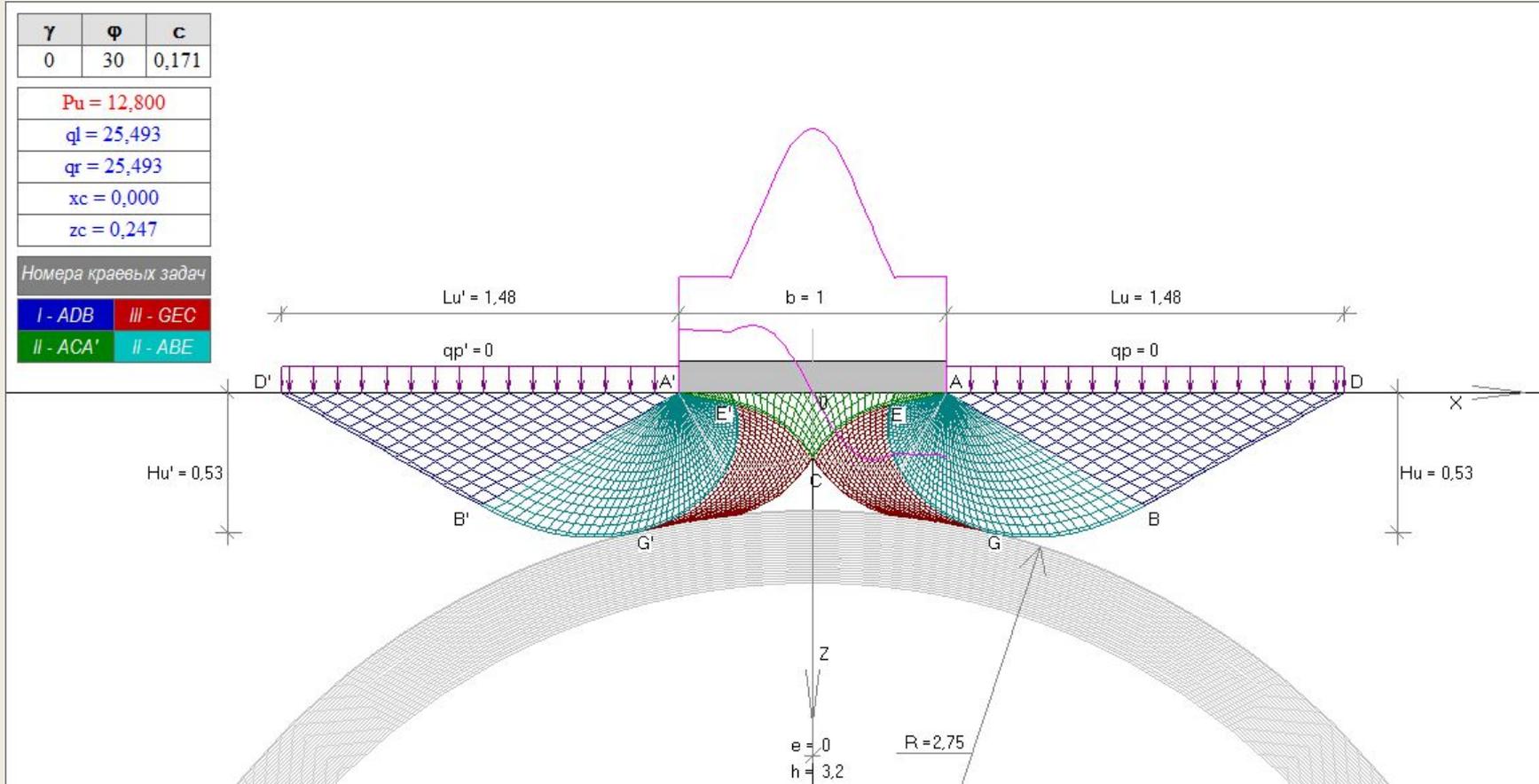
**Исходные данные:**  $E = 1000$ ;  $\nu = 0,3$ ;  $\gamma = 0$ ;

$\phi = 0^\circ, c = 1$ ;  $\phi = 10^\circ, c = 0,616$ ;  $\phi = 20^\circ, c = 0,347$ ;  $\phi = 30^\circ, c = 0,171$ ;  $\phi = 40^\circ, c = 0,0683$ .

# Сравнение ТПРГ с МКЭ



# Предельная нагрузка с учетом подземного сооружения. ТПРГ

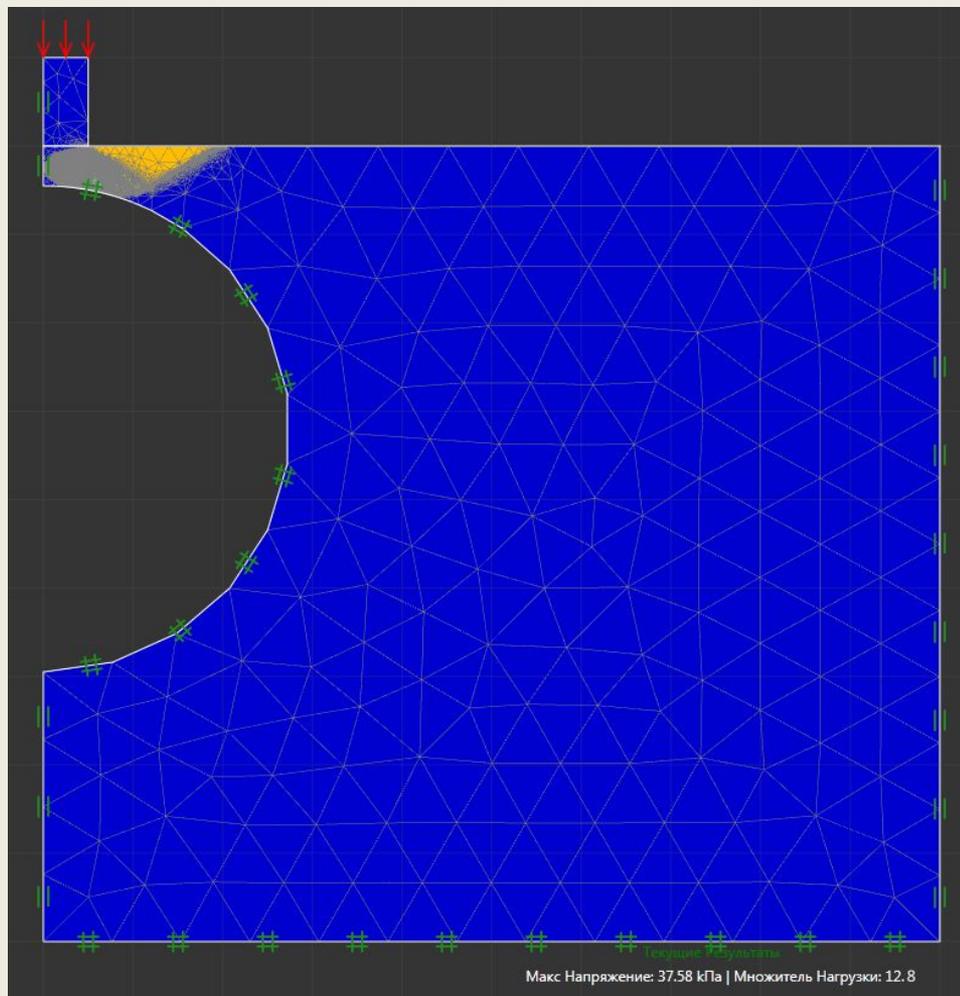


## Исходные данные:

$\phi = 0^\circ, c = 1$ ;  $\phi = 10^\circ, c = 0,616$ ;  $\phi = 20^\circ, c = 0,347$ ;  $\phi = 30^\circ, c = 0,171$ ;  $\phi = 40^\circ, c = 0,0683$ .

# Предельная нагрузка с учетом подземного сооружения. МКЭ

10



**OptumG2**

**Размеры расчетной области**  
10x9 м

**Конечно-элементная сетка**  
адаптивная  
количество итераций – 25  
начальное кол-во эл. – 80 тыс.

**Модель материала**  
грунт – Кулона-Мора

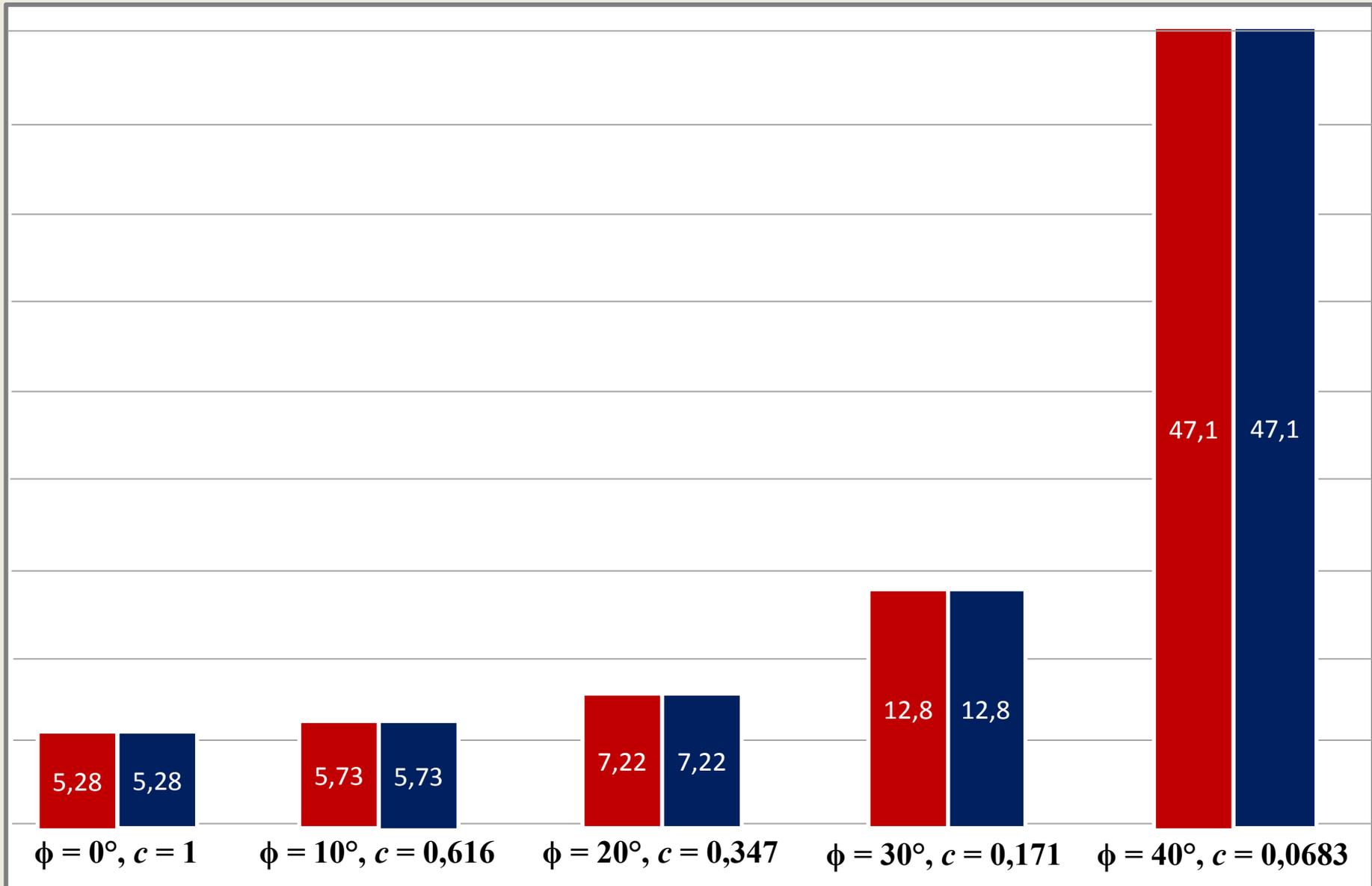
**Тип расчета**  
Finite Element Limit Analysis

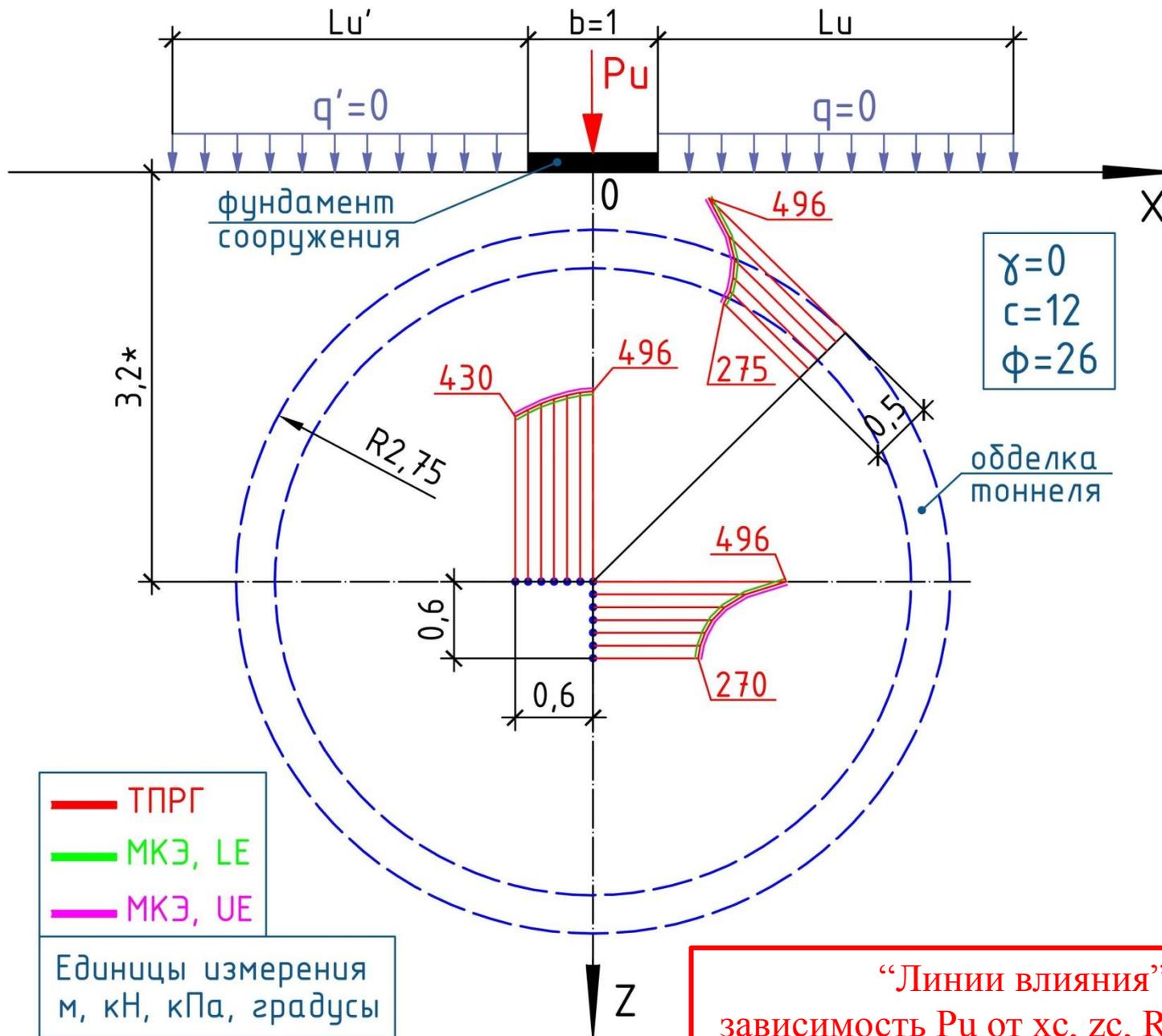
**Исходные данные:**  $E = 1000$ ;  $\nu = 0,3$ ;  $\gamma = 0$ ;

$\phi = 0^\circ$ ,  $c = 1$ ;  $\phi = 10^\circ$ ,  $c = 0,616$ ;  $\phi = 20^\circ$ ,  $c = 0,347$ ;  $\phi = 30^\circ$ ,  $c = 0,171$ ;  $\phi = 40^\circ$ ,  $c = 0,0683$ .

# Сравнение ТПРГ с МКЭ

11

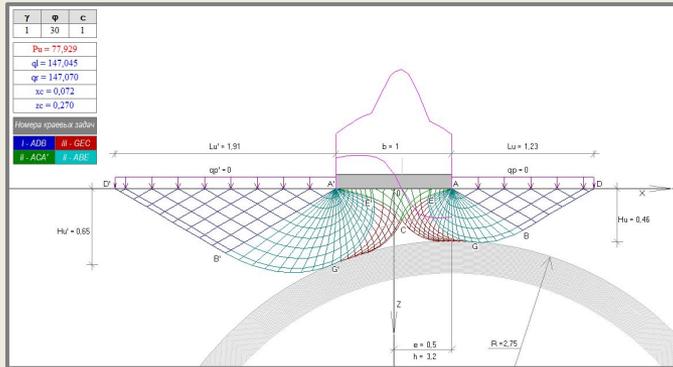




Пример  
расчета с  
реальной  
геологией и  
геометрией.

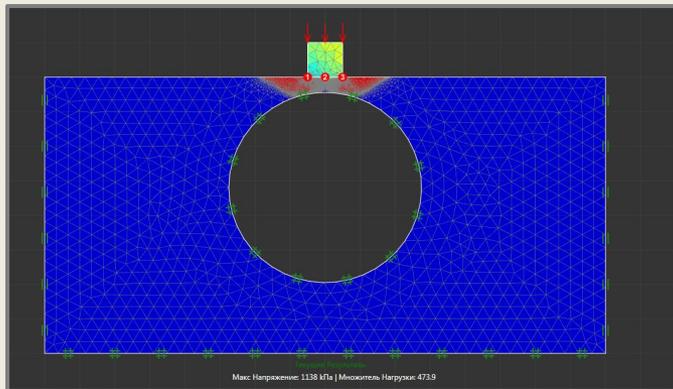
# Три подхода к определению предельной нагрузки

13



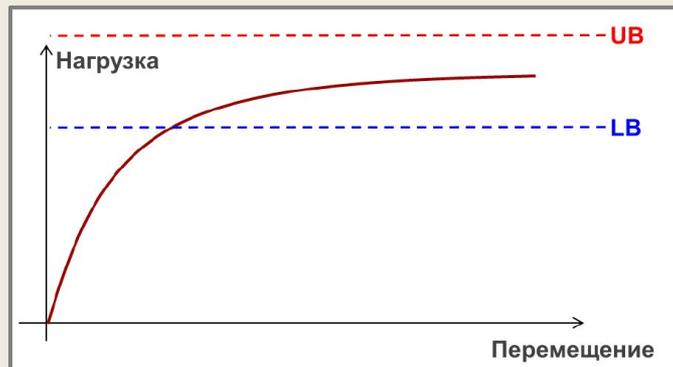
Определение предельной нагрузки методами теории предельного равновесия грунтов

1



Определение предельной нагрузки напрямую в OptumG2 посредством Finite Element Limit Analysis.

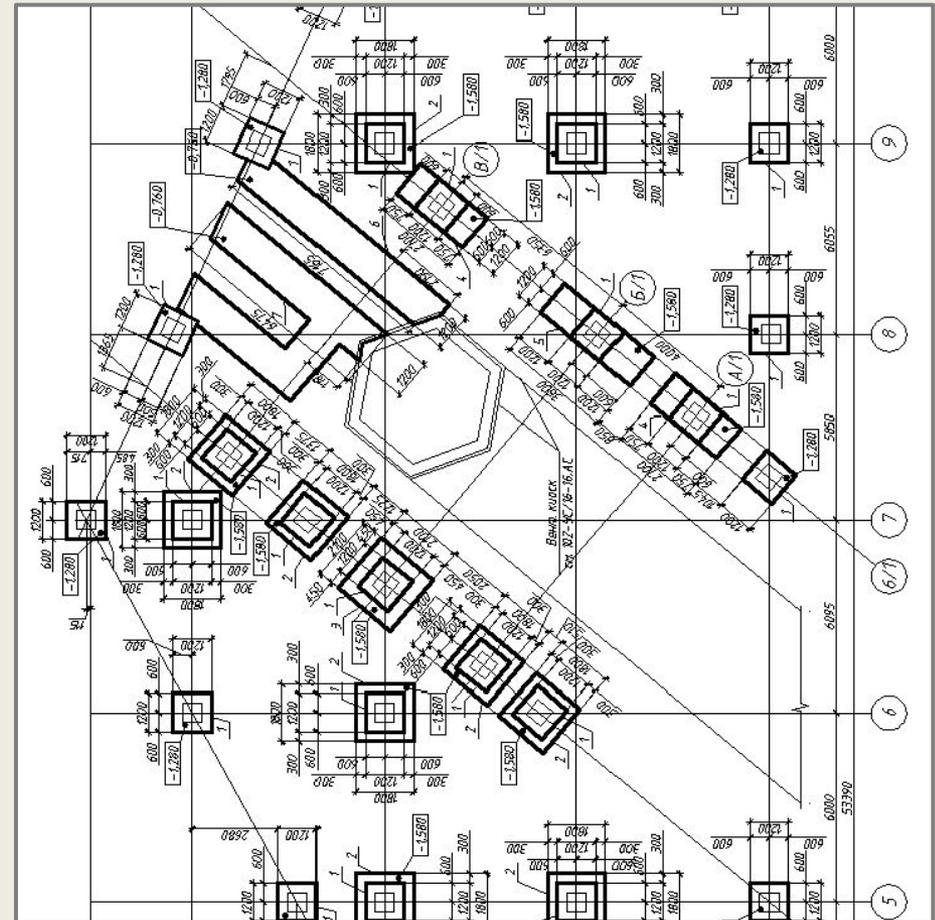
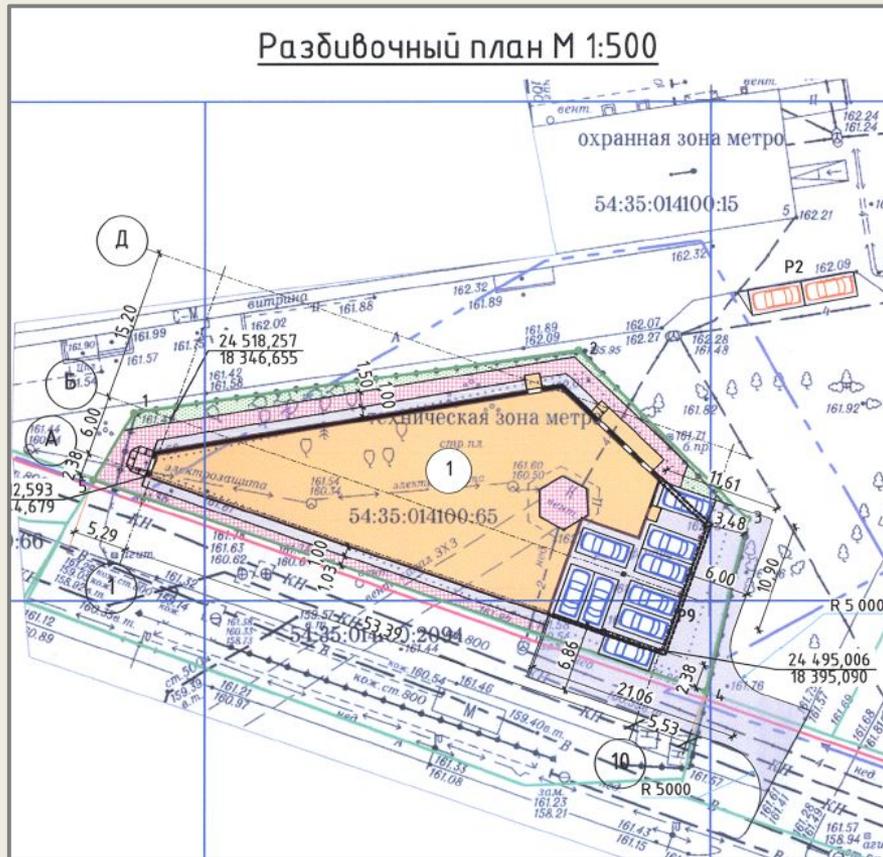
2



Определение предельной нагрузки путем анализа графика «нагрузка-перемещение» а также развития зон пластических деформаций.

3

# Геотехнический прогноз с оценкой влияния строительства здания на сооружения ст. «Березовая роща» в Новосибирске

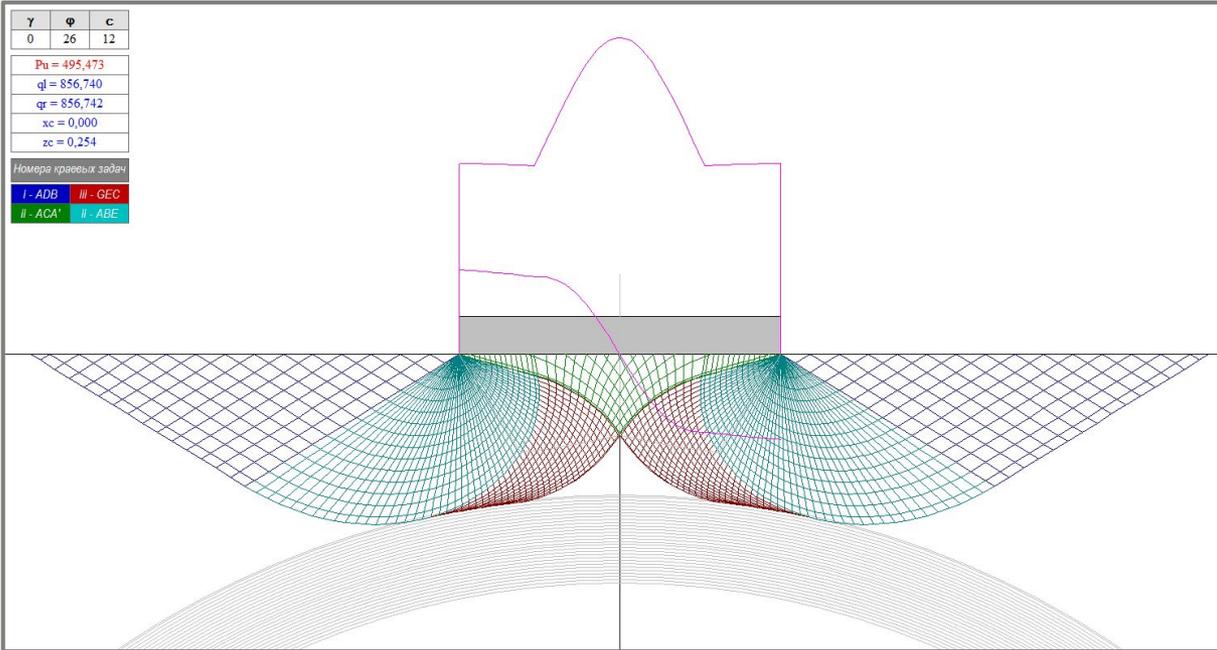


# Выводы

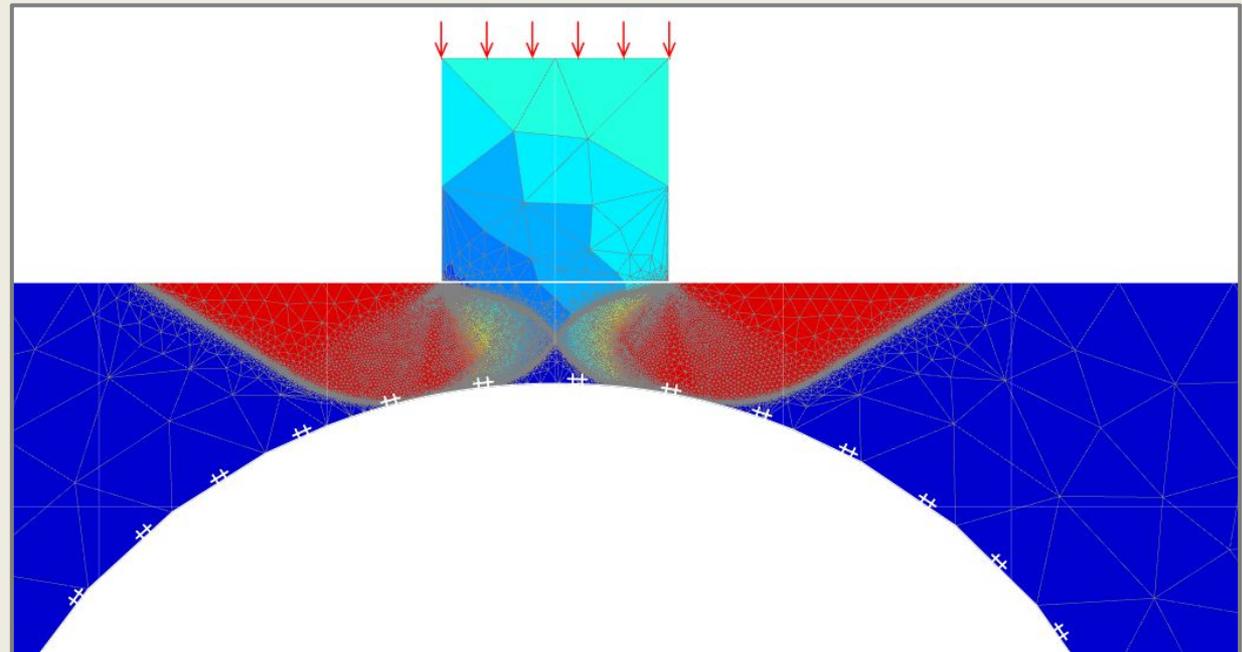
- Получено строгое статическое решение ТПРГ задачи о несущей способности основания с учетом подземного сооружения.
- Проанализированы и сопоставлены факторы, влияющие на несущую способность основания: геометрия сооружений, физико-механические характеристики грунта и др.
- Выполнено сравнение полученного решения ТПРГ с расчетами МКЭ в реализации OptumG2 (Limit Analysis и упругопластический расчет).
- Установлена зависимость:

Оценка снизу (МКЭ, LB)  $\leq$  ТПРГ  $<$  Оценка сверху (МКЭ, UB).

- Расхождение результатов расчета ТПРГ и Limit Analysis применительно к решаемой задаче составило (0-0,5)%.



 **Optum**<sup>G2</sup>





Сибирский государственный университет путей сообщения  
НИЛ "Геотехника, тоннели и метрополитены"



[vk.com/geotun](https://vk.com/geotun)

Инженерно-геотехнические изыскания,  
проектирование и строительство оснований,  
фундаментов и подземных сооружений



***Благодарим за внимание!***

Карян Геворг Гарникович  
Полянкин Геннадий Николаевич

Наши контакты: 906-994-41-41, [k.00741@yandex.ru](mailto:k.00741@yandex.ru); / 913-737-21-12, [polyankin@mail.ru](mailto:polyankin@mail.ru).

### Теорема об Оценке Снизу:

Конструкция из упруго-пластического материала *не* подвергнется разрушению под действием поля напряжений удовлетворяющих:

- + Уравнениям равновесия
- + Граничным условиям для напряжений
- + Критерию пластичности

Следовательно, соответствующая нагрузка является *оценкой снизу*.

### Теорема об Оценке Сверху:

Для поля перемещений, удовлетворяющих:

- + Соотношениям деформация - перемещение
- + Ассоциированному режиму течения
- + Граничным условиям для перемещений

Соотношение внутренней и внешней работы превышает или равно работе сил при разрушении системы. Отсюда получаем *оценку сверху*.