

Сибирский государственный университет путей сообщения

НИЛ "Геотехника, тоннели и метрополитены"



vk.com/geotun

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



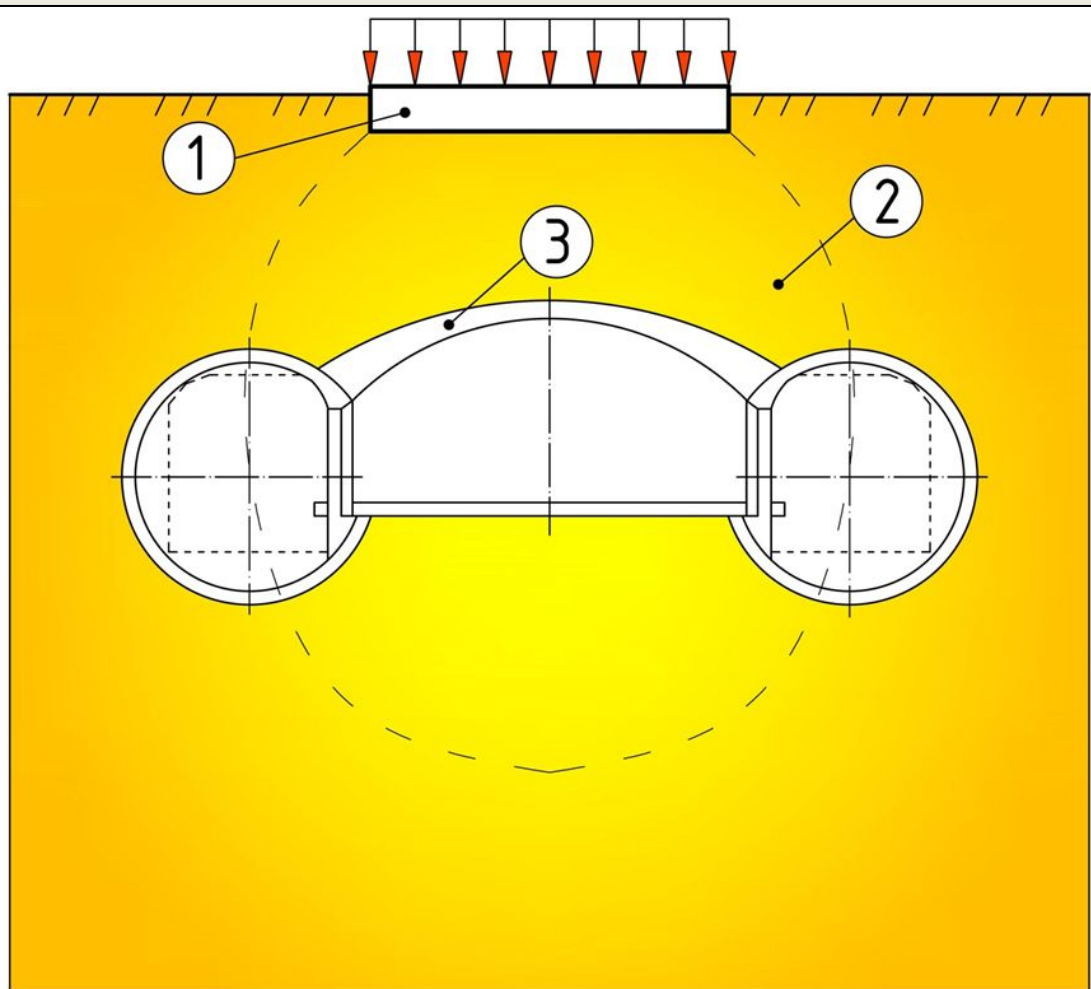
ДОКЛАД НА ТЕМУ:
**«НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ С
УЧЕТОМ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ»**

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

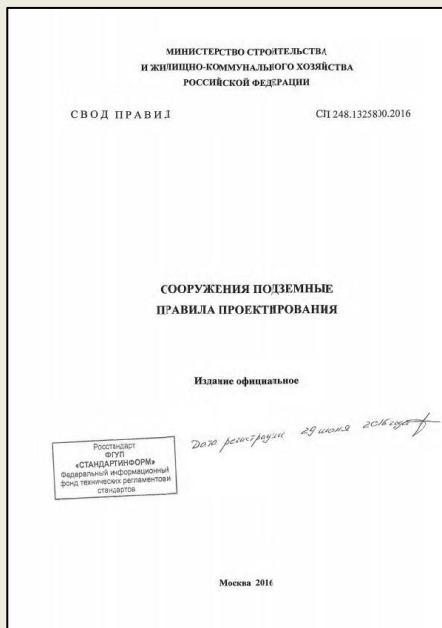
Новое
строительство

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.

$$\sigma(x, z)$$

$$\alpha(x, z)$$

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

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

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

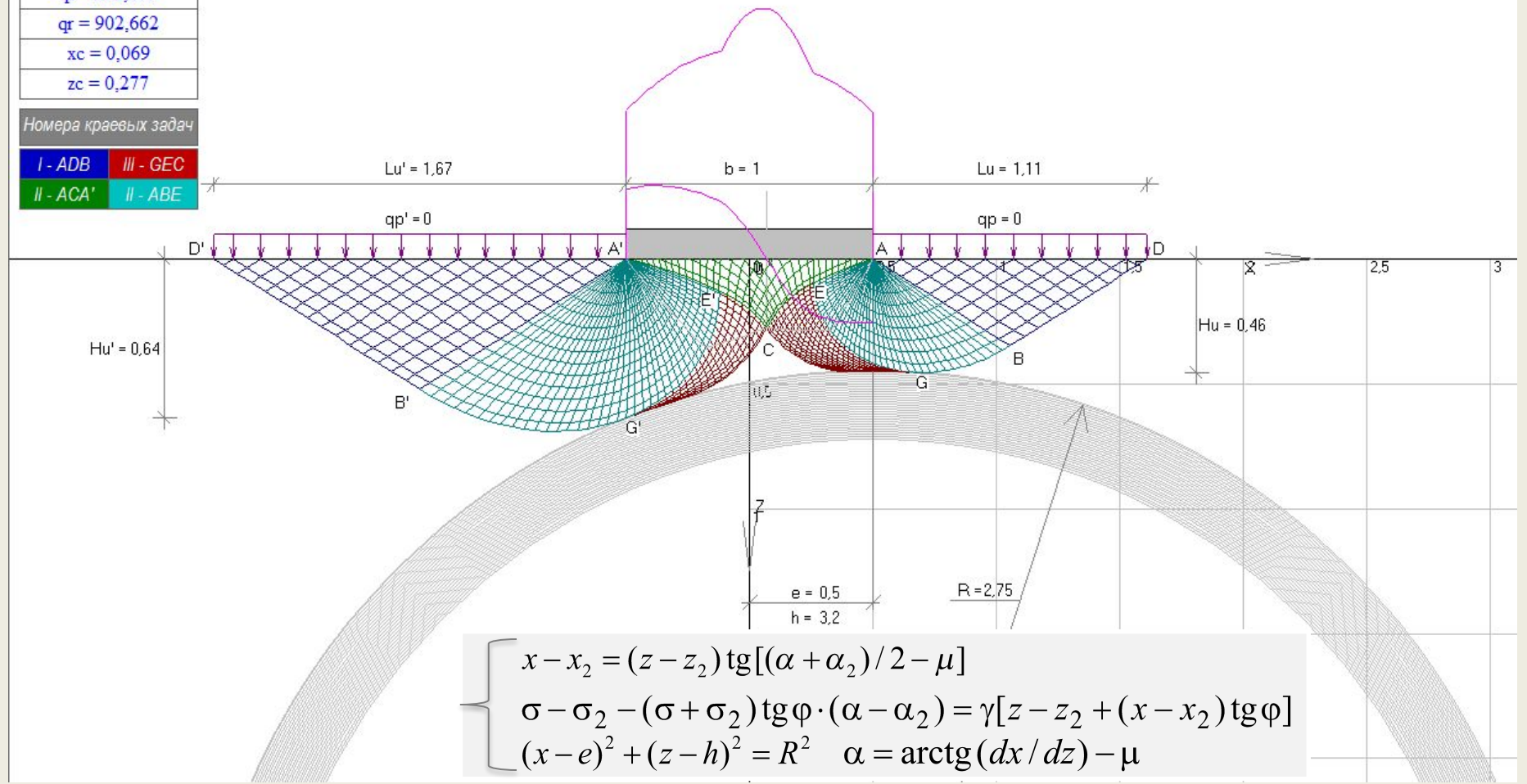
Пример расчета методами ТПРГ

| γ | φ | 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

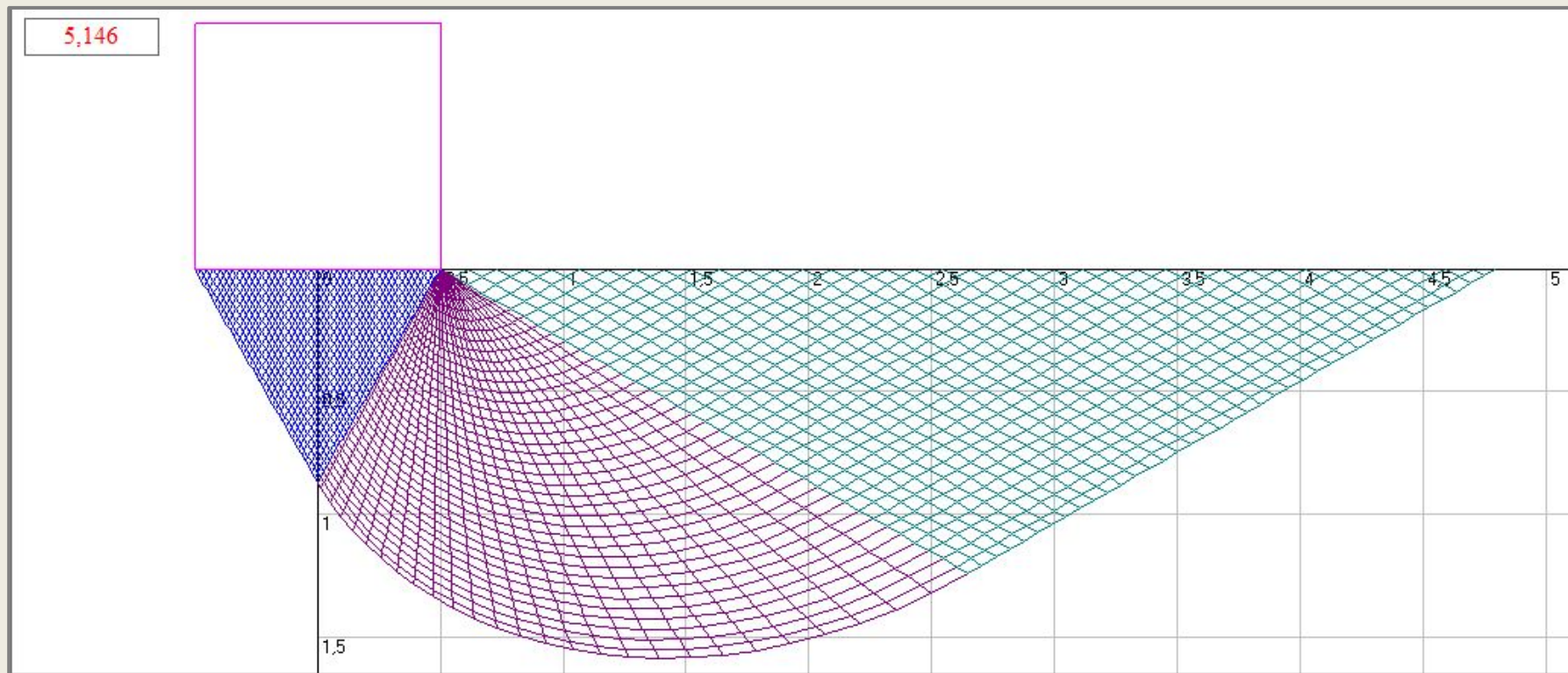
| | |
|-----------|-----------|
| I - ADB | III - GEC |
| II - ACA' | IV - ABE |



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

Вдавливание штампа в идеально-упругопластическую среду

6

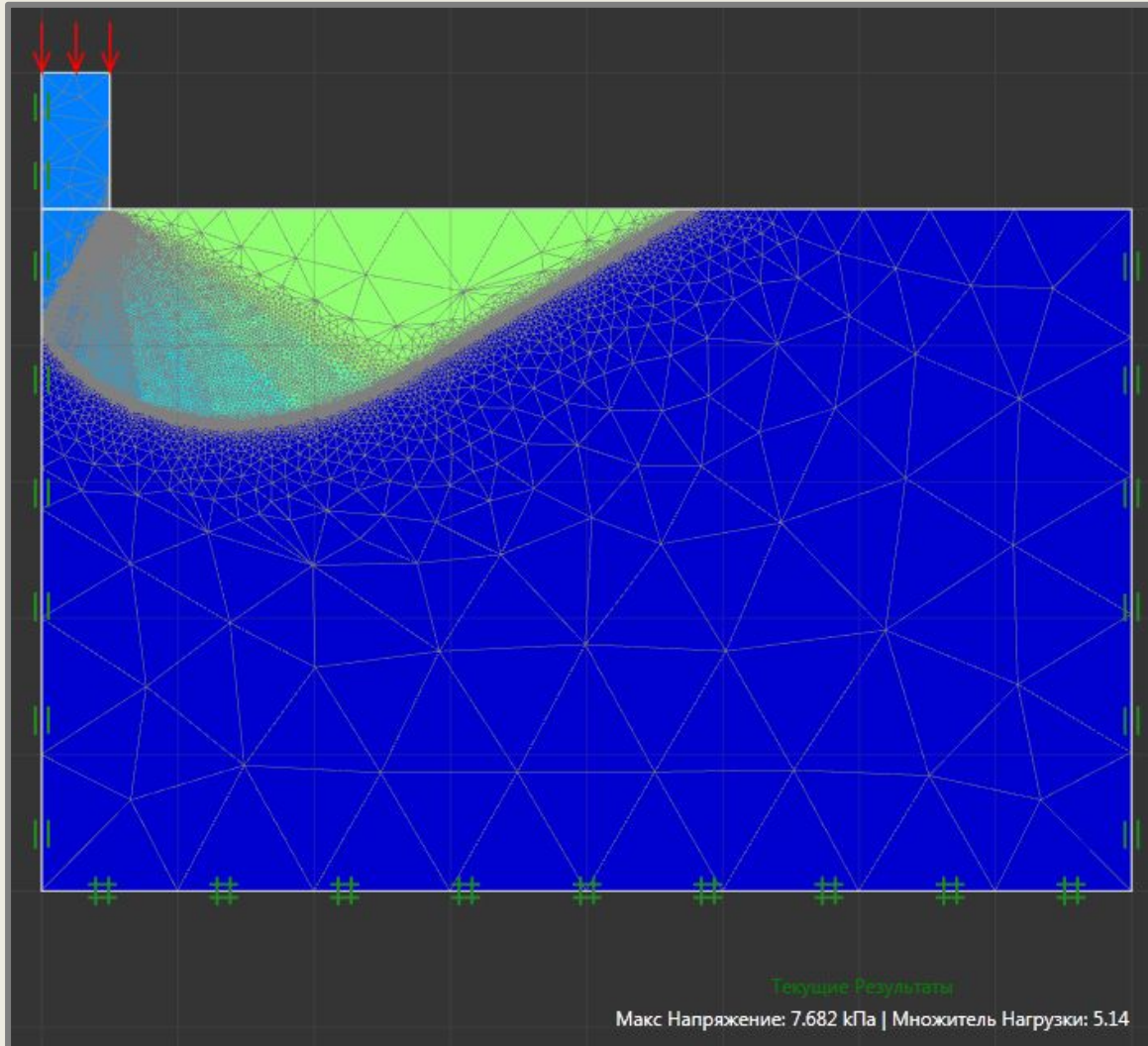


Исходные данные:

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

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.

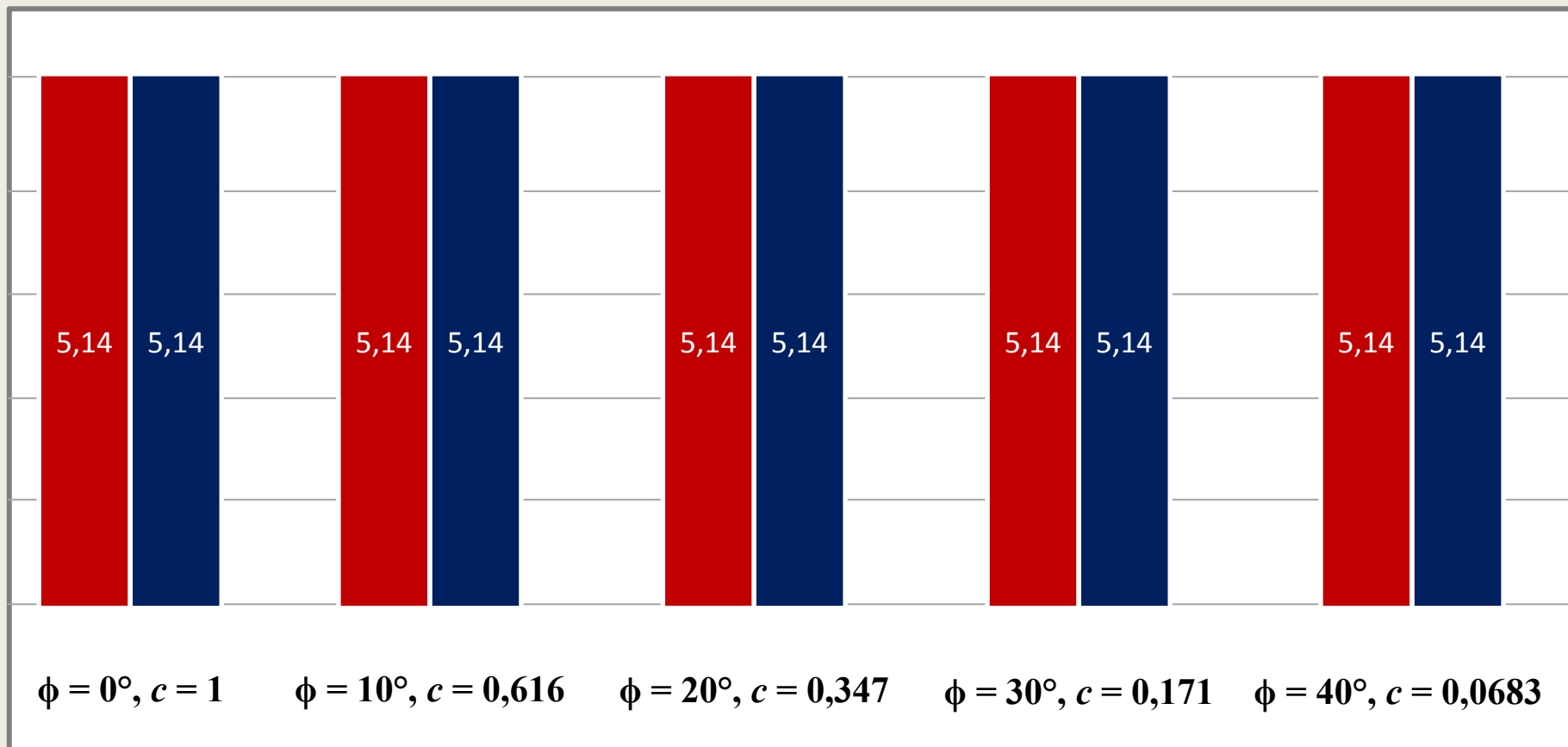
Модель материала
грунт – Кулона-Мора

Тип расчета
Finite Element Limit Analysis

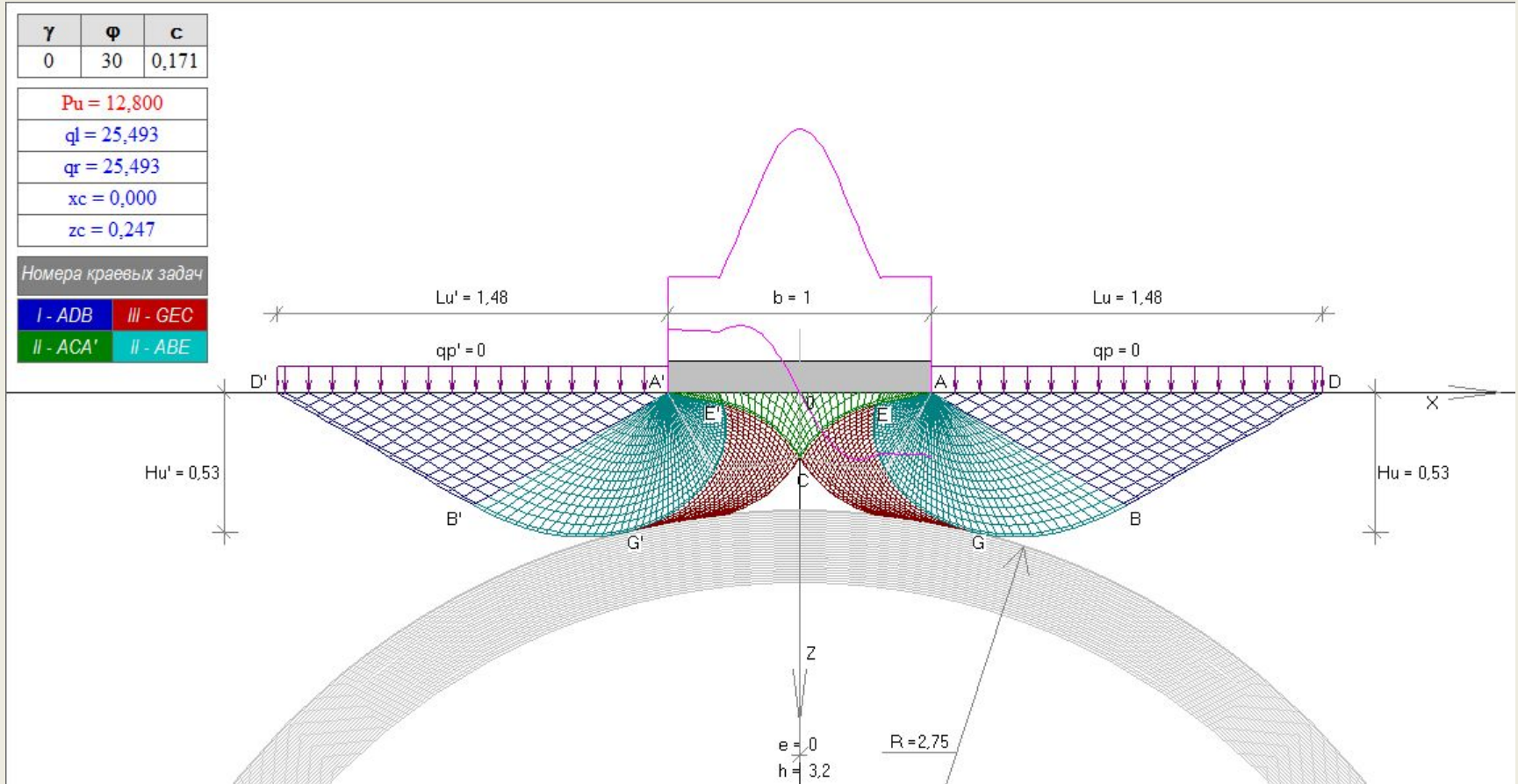
Исходные данные: $E = 1000$; $\nu = 0,3$; $\gamma = 0$;

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

Сравнение ТПРГ с МКЭ



Предельная нагрузка с учетом подземного сооружения. ТПРГ

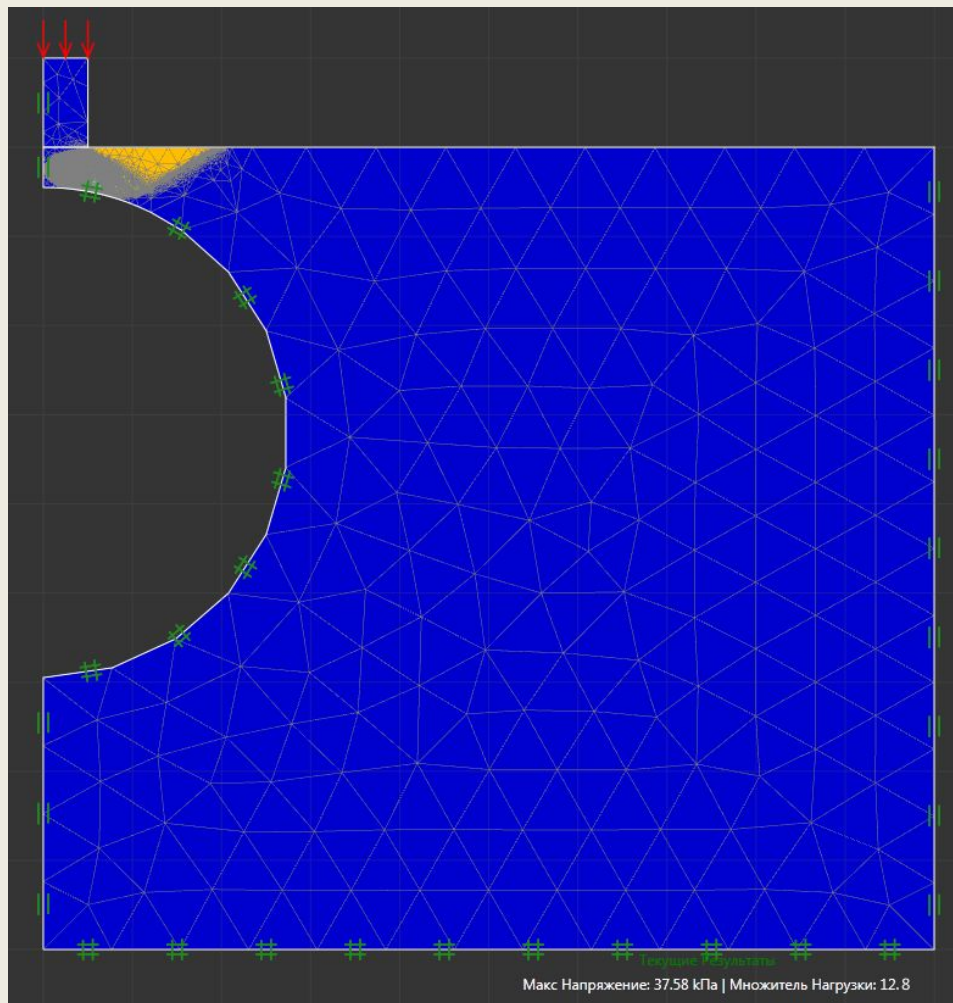


Исходные данные:

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

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

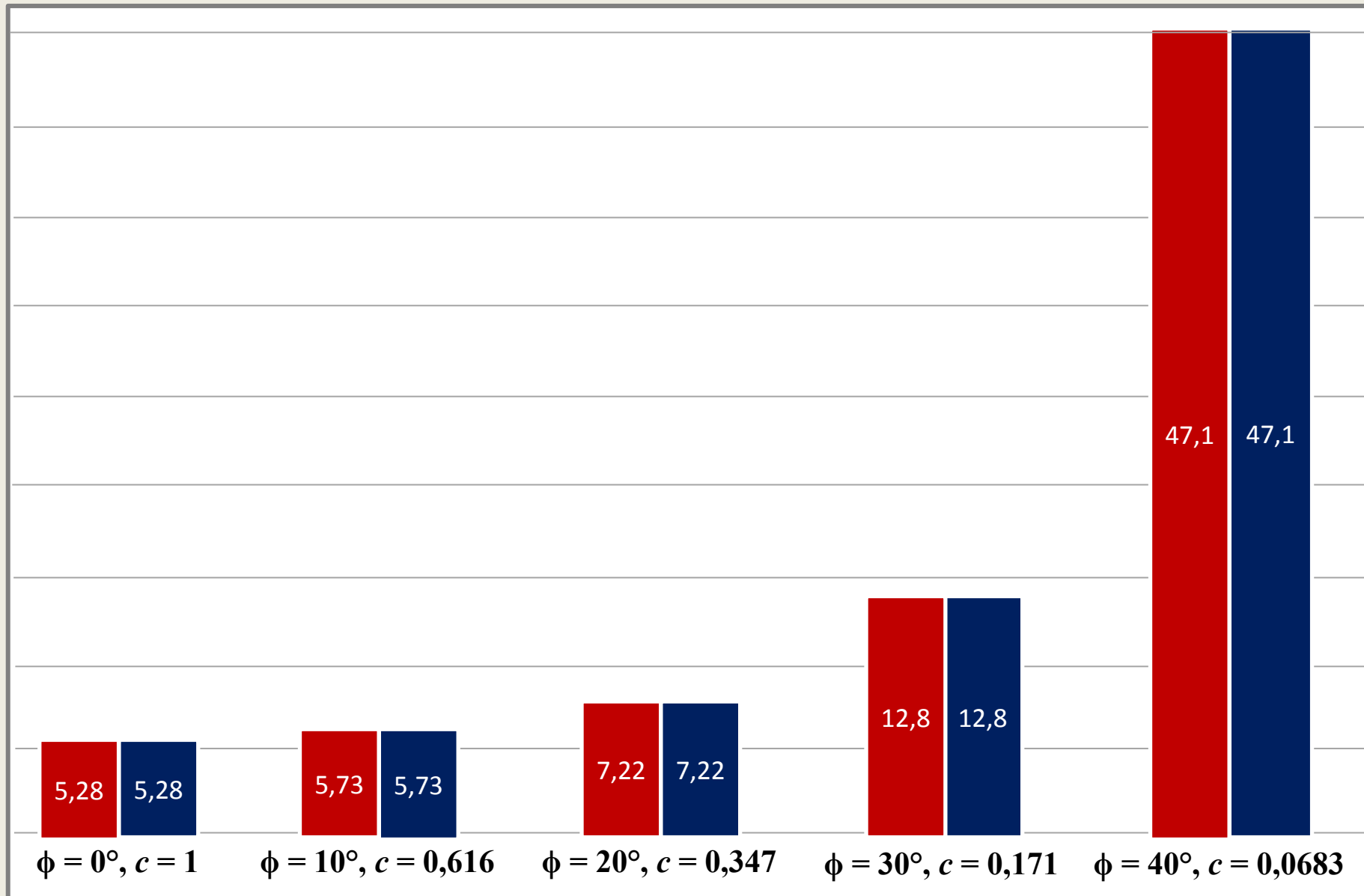
Тип расчета
Finite Element Limit Analysis

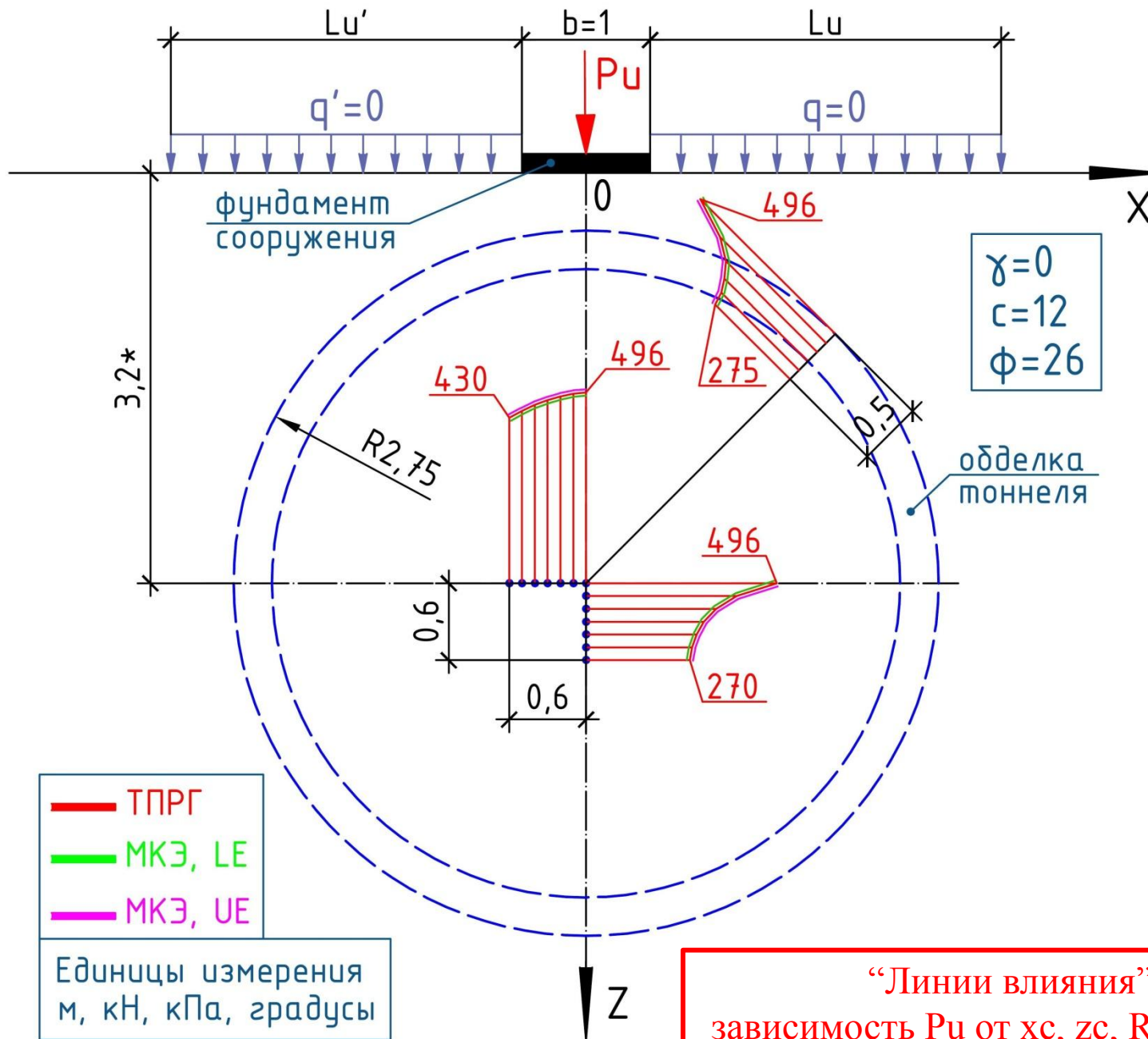
Исходные данные: $E = 1000$; $\nu = 0,3$; $\gamma = 0$;

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

Сравнение ТПРГ с МКЭ

11



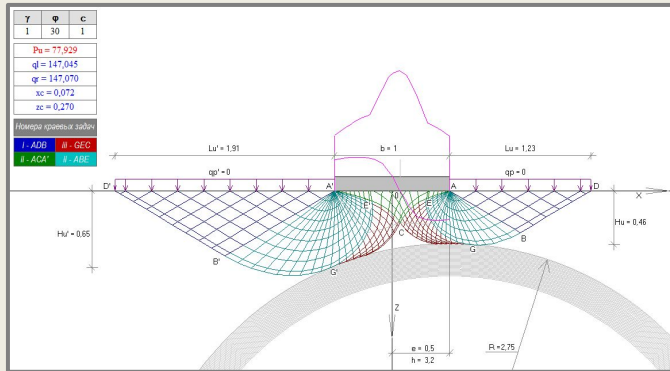


“Линии влияния”:
зависимость P_u от x_c , z_c , R .

Пример
расчета с
реальной
геологией и
геометрией.

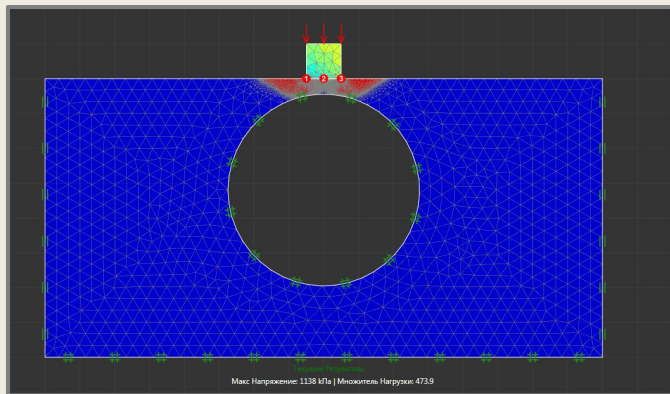
Три подхода к определению предельной нагрузки

13



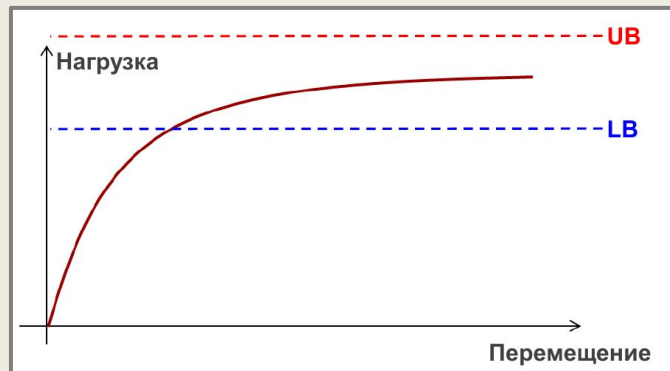
Определение предельной нагрузки методами теории предельного равновесия грунтов

1



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

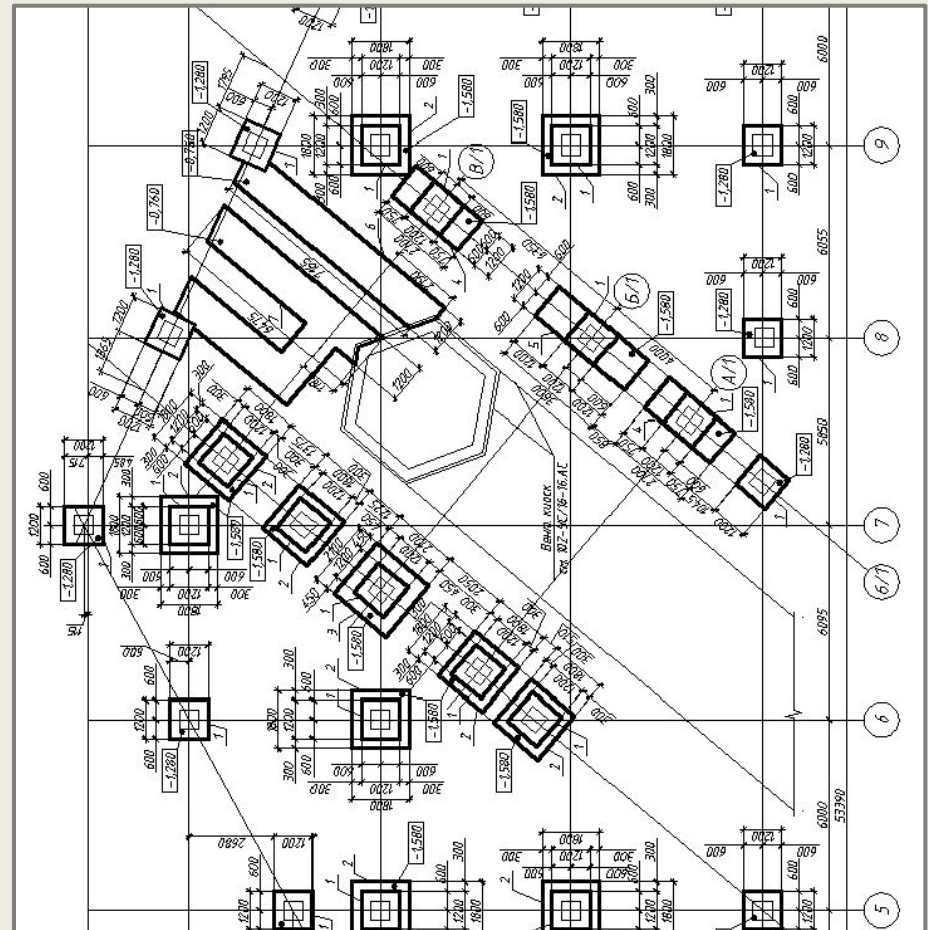
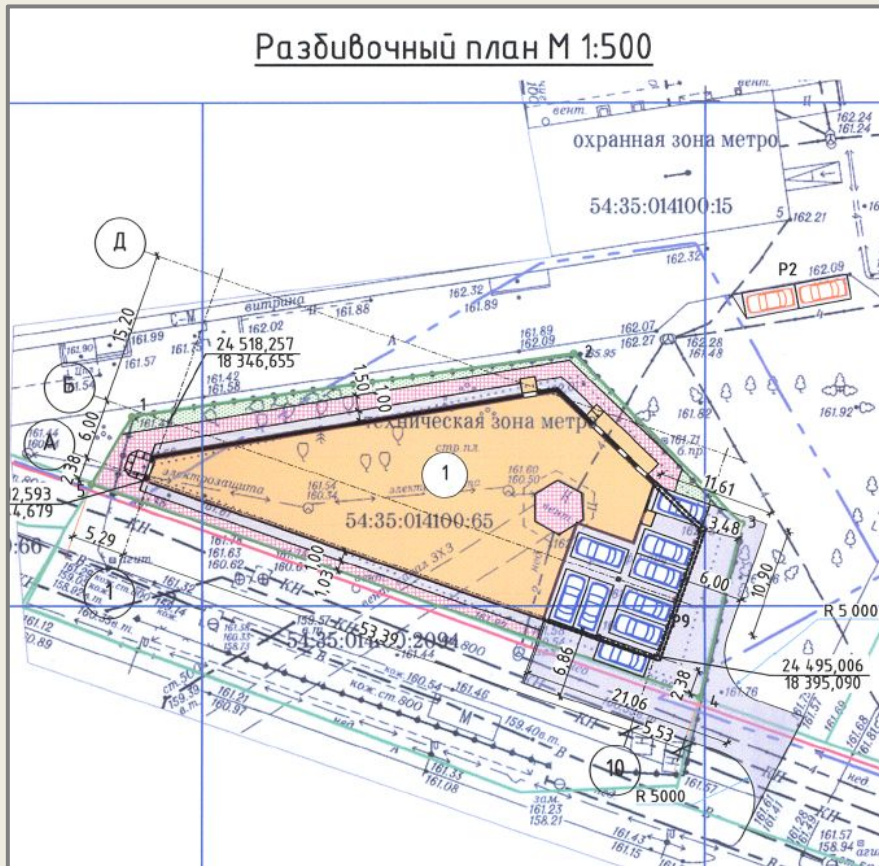
2



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

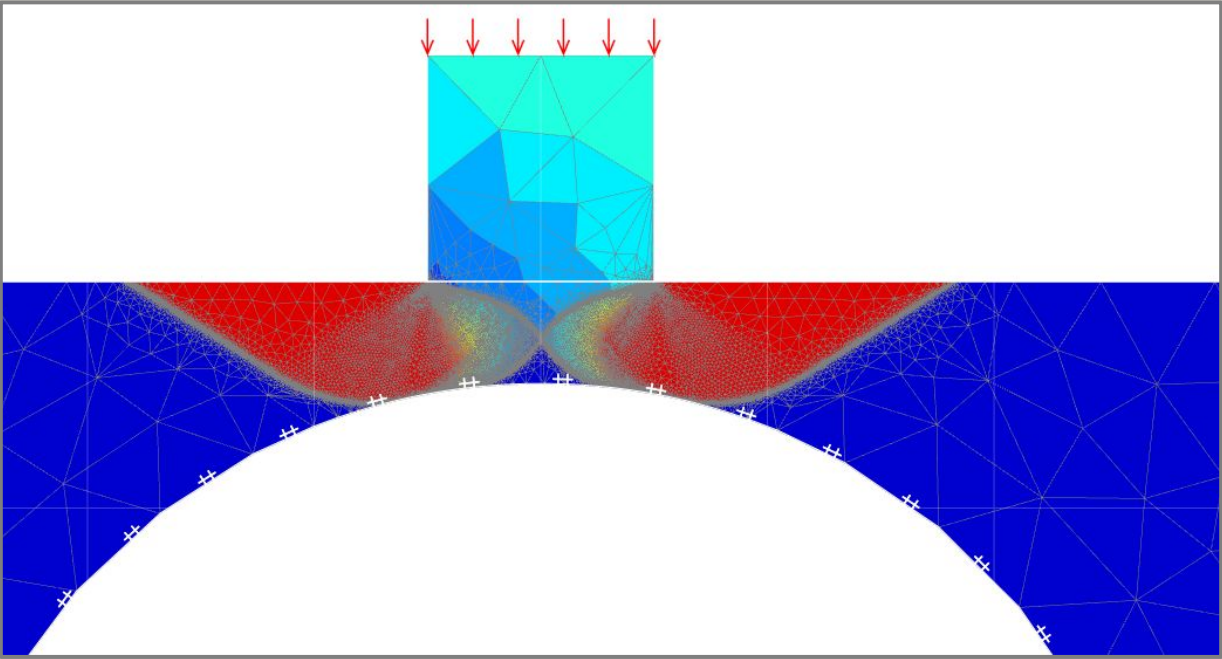
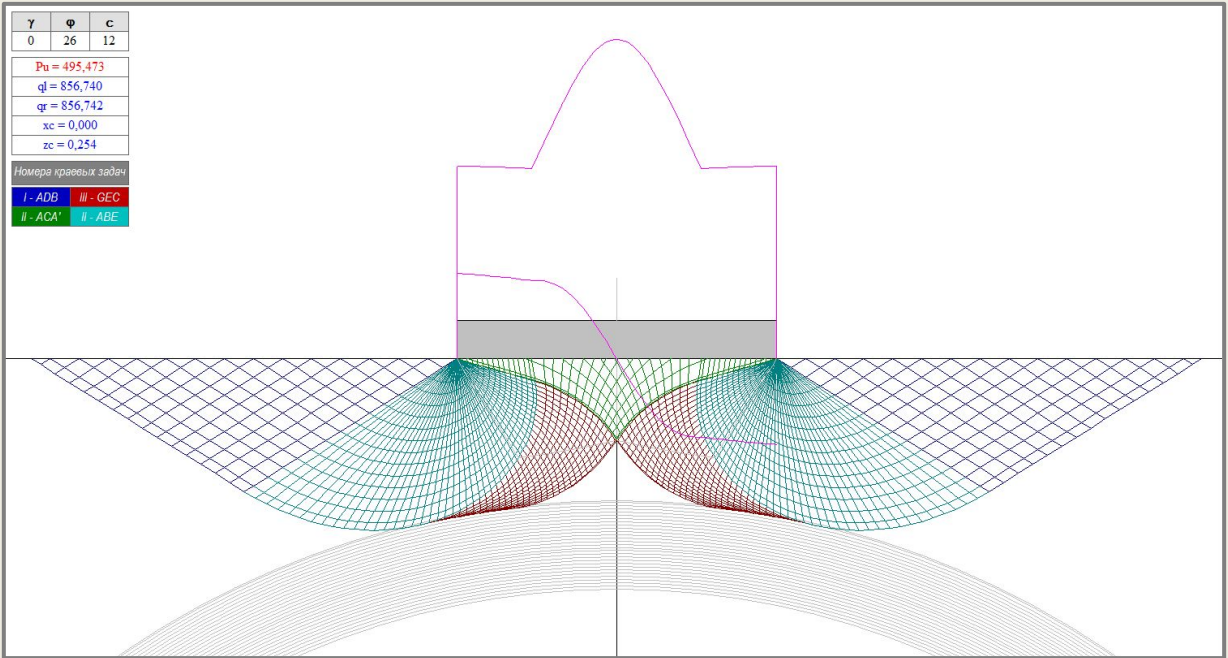


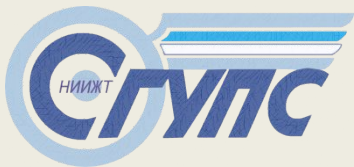
Выводы

- 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:

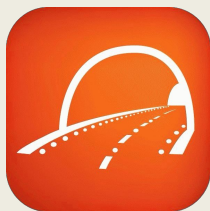
Оценка снизу (МКЭ, LB) \leq ТПРГ $<$ Оценка сверху (МКЭ, UB).

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





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



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; / 913-737-21-12, 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*.