



НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ,  
ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЙ  
И КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ОСНОВАНИЙ И ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ  
ИМЕНИ Н.М.ГЕРСЕВАНОВА

RESEARCH INSTITUTE OF BASES  
AND UNDERGROUND STRUCTURES (NIIOSP)  
NAMED AFTER N.M.GERSEVANOV



**НИЦ строительство**  
научно-исследовательский центр

RESEARCH CENTER OF CONSTRUCTION  
Joint Stock Company

В.Г.Федоровский (НИИОСП)

## **Численные методы расчета по предельным состояниям в геотехнике**

1. Расчет несущей способности фундаментов мелкого заложения МКЭ
2. Прочие численные методы
3. Взаимодействие сооружений с грунтовыми основаниями

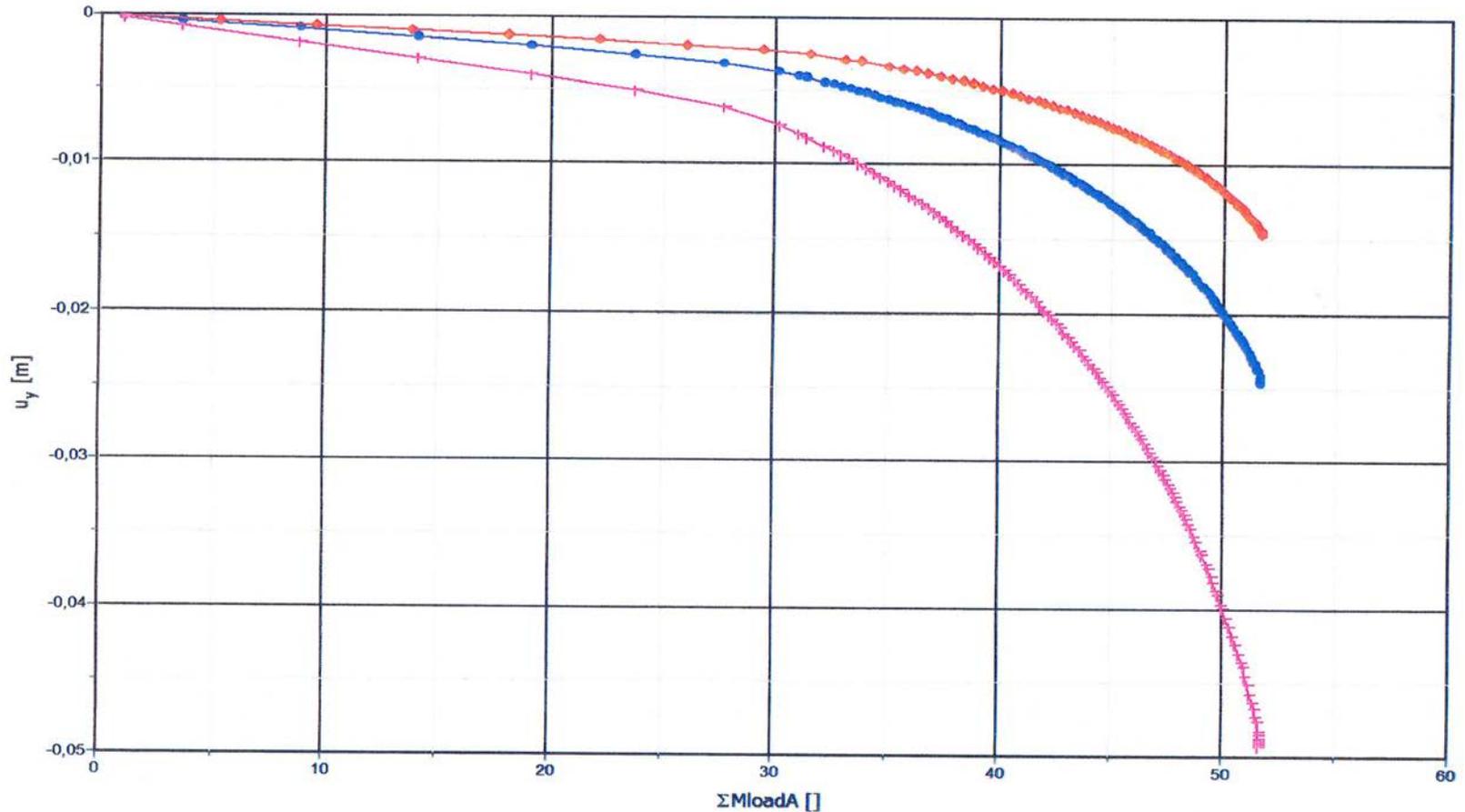
- Not very long ago I asked Skem what he thought was the most significant development in our subject over his career. Without significant pause for thought he said, “numerical analysis”. When you think about it, this is self-evident.
- Professor P.R.VAUGHAN
- March 2003



## Дополнительная литература по теме данного доклада

1. D.M.Potts, L.Zdravkovic Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory. London: Thomas Telford. 1999
2. D.M.Potts, L.Zdravkovic Finite element analysis in geotechnical engineering: Application. London: Thomas Telford. 2001
3. В.М.Улицкий, А.Г.Шашкин, К.Г.Шашкин, В.А.Шашкин Основы совместных расчетов зданий и оснований. Издательство института «Геореконструкция», Санкт-Петербург, 2014. .

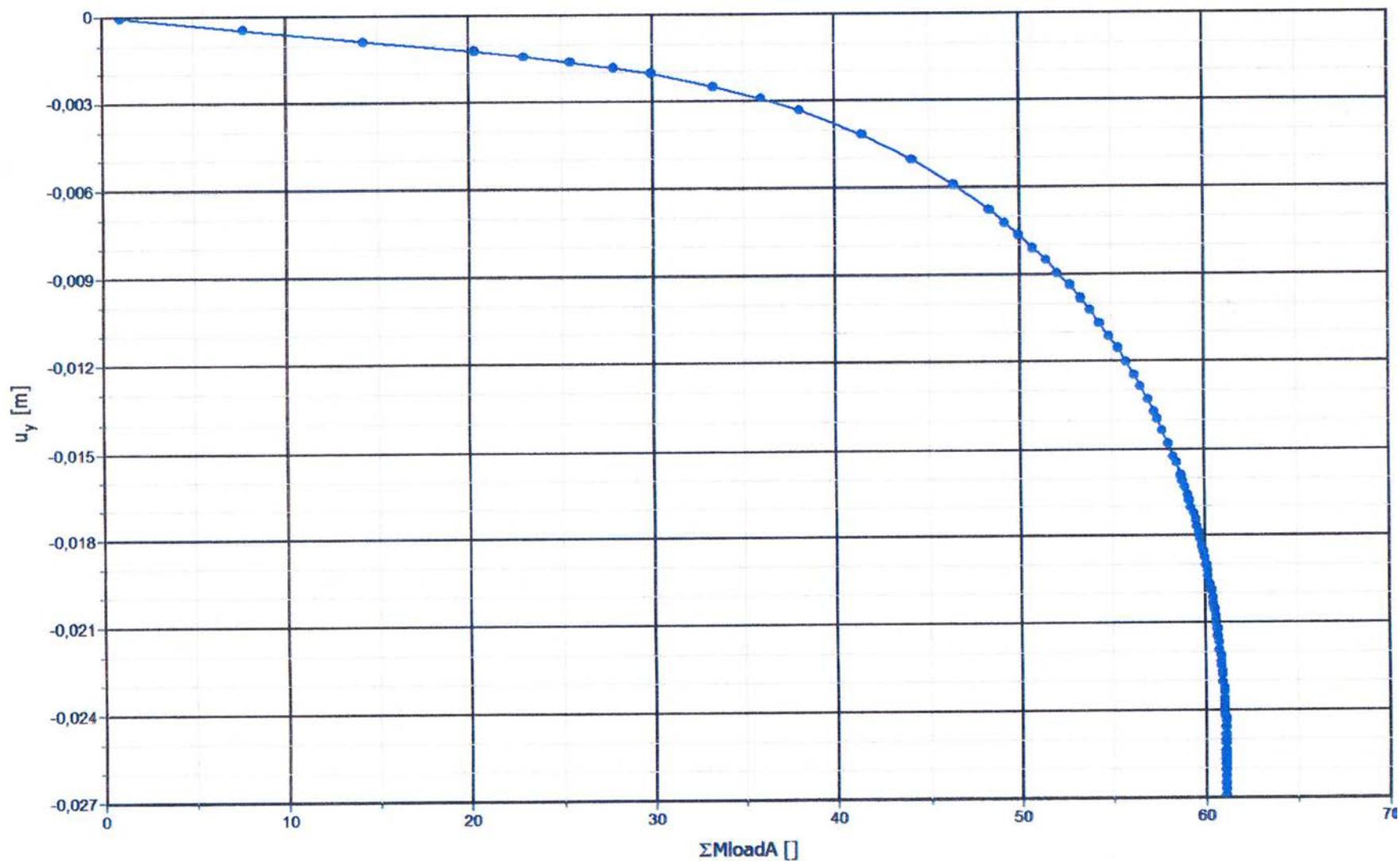
# Графики нагрузка-осадка для штампов на поверхности. Статическое нагружение



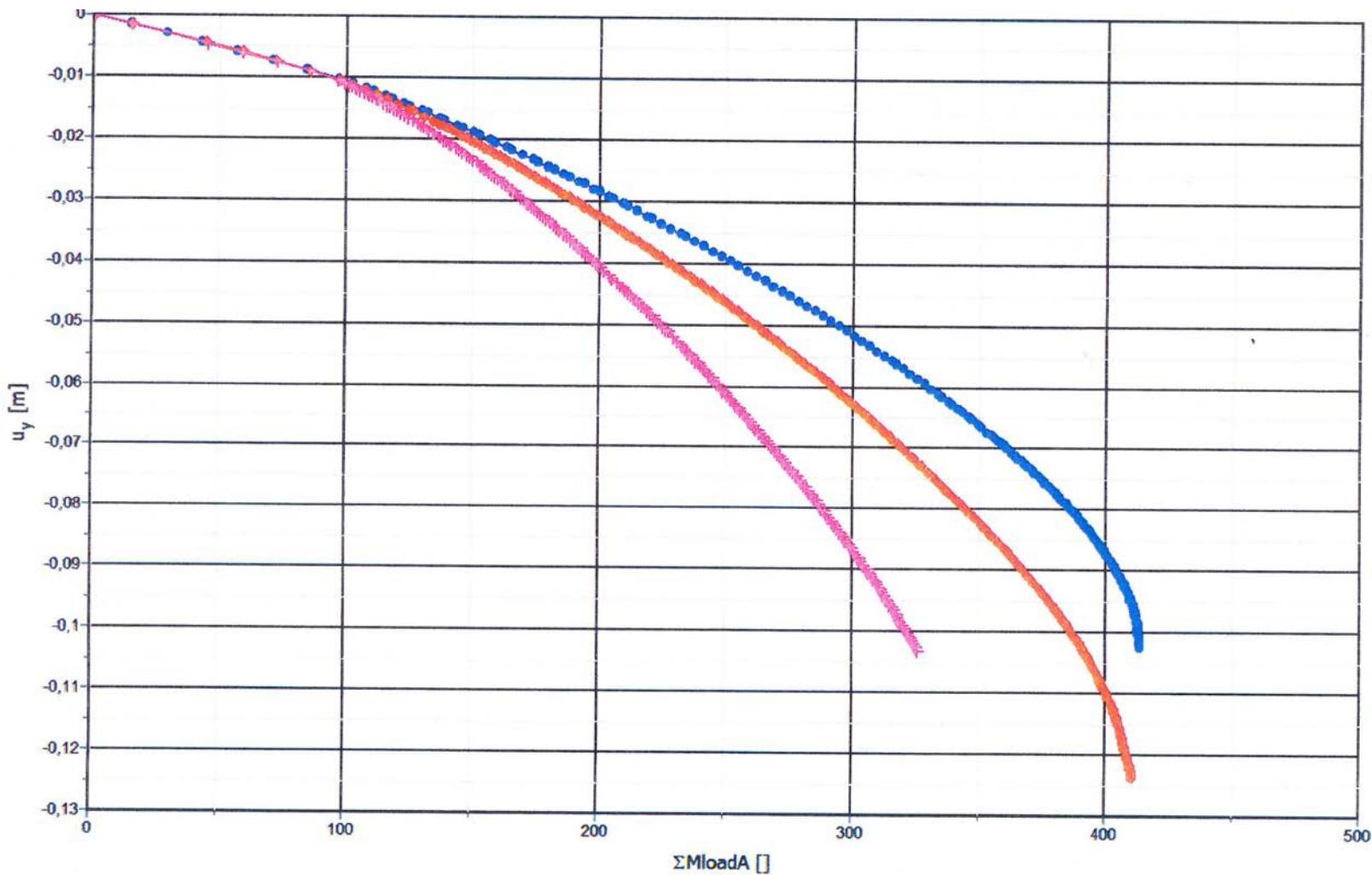
Плоская задача.  $\varphi = 0$ .

Различные упругие характеристики

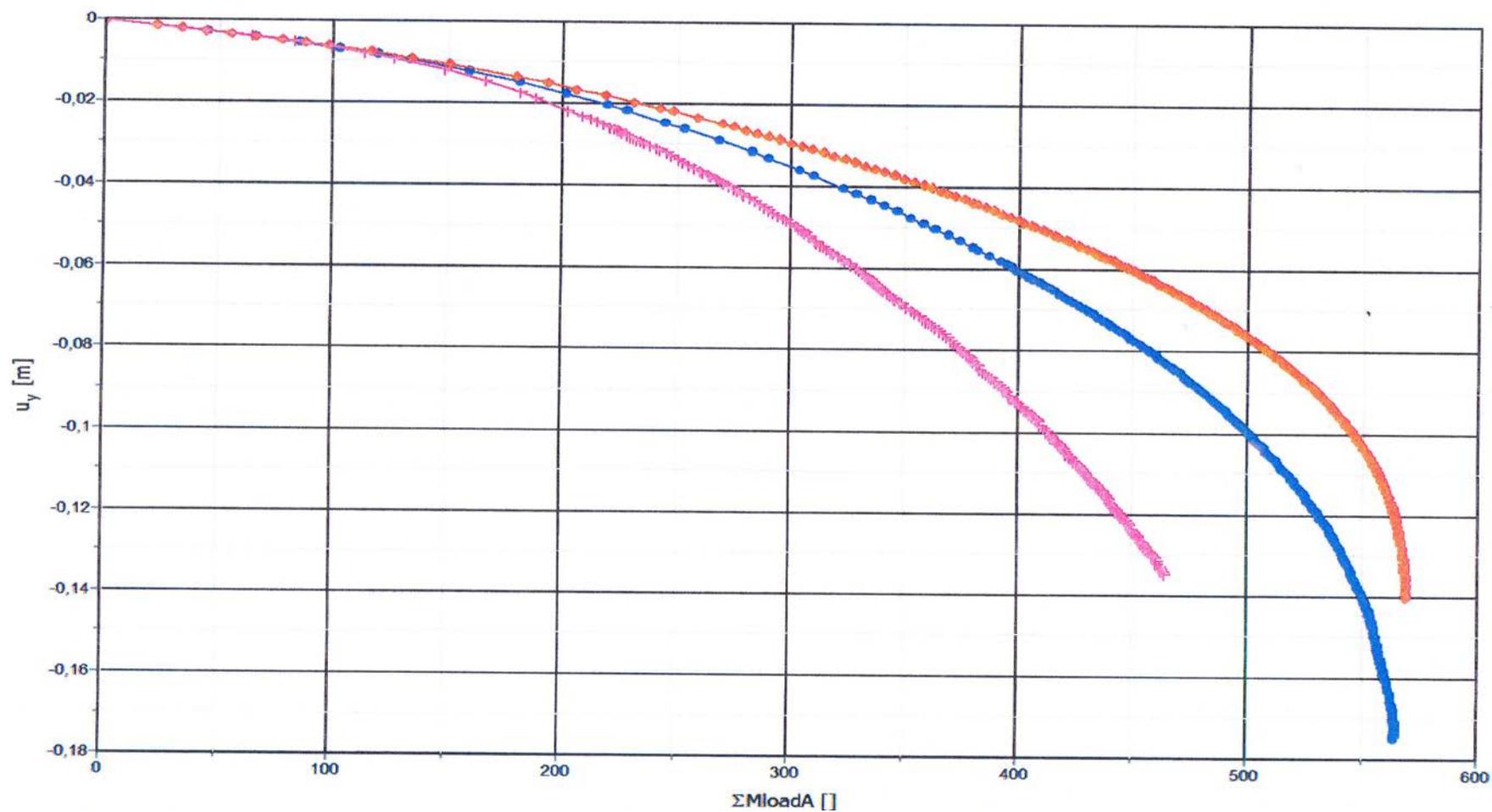
# То же. Осесимметричная задача. Шероховатый штамп



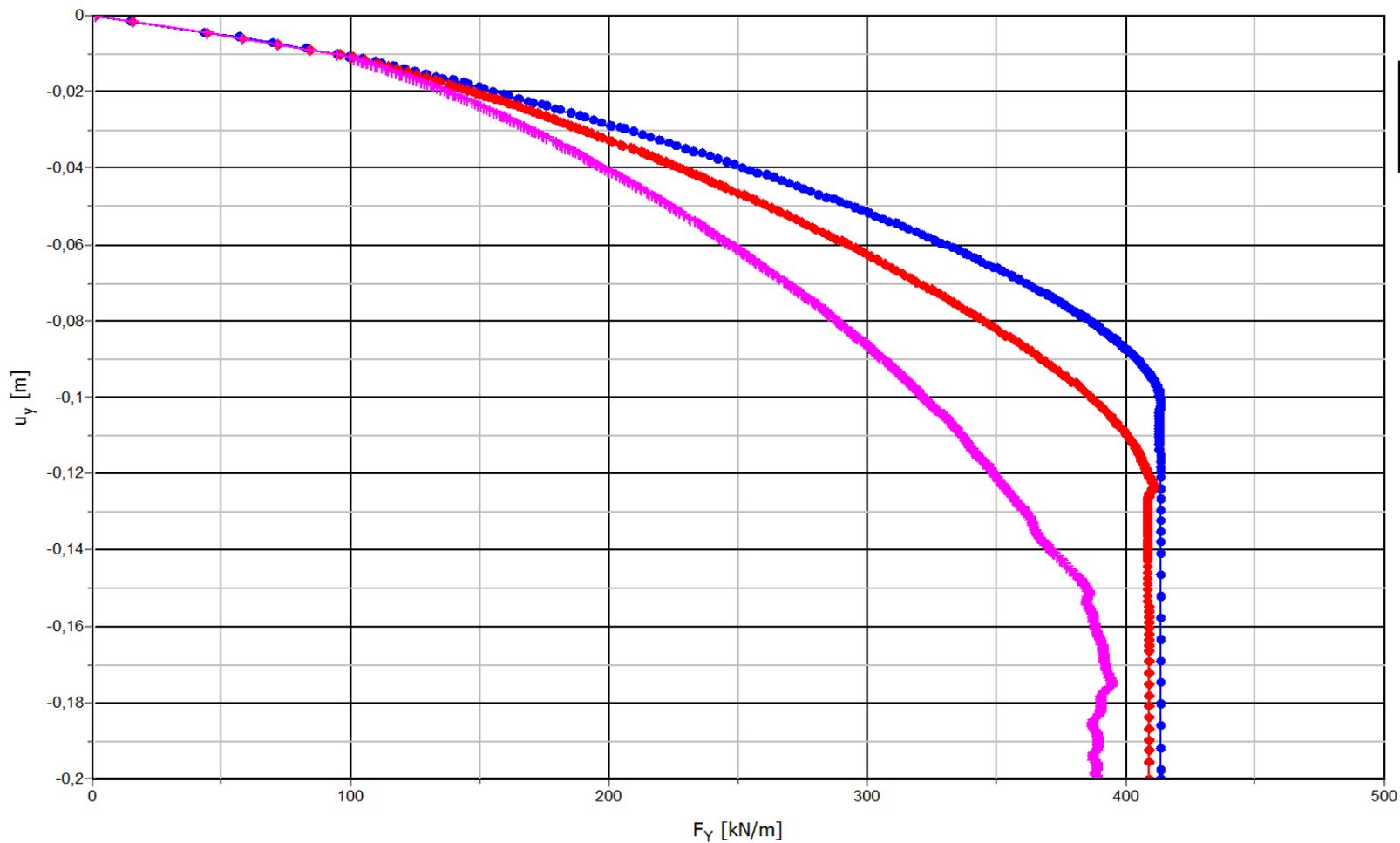
Ленточный штамп.  $\varphi = 20^\circ$   $c = 20$  кПа  $\gamma = 20$  кН/м<sup>3</sup>  
Угол дилатансии  $\psi = 0; 10^\circ; 20^\circ$



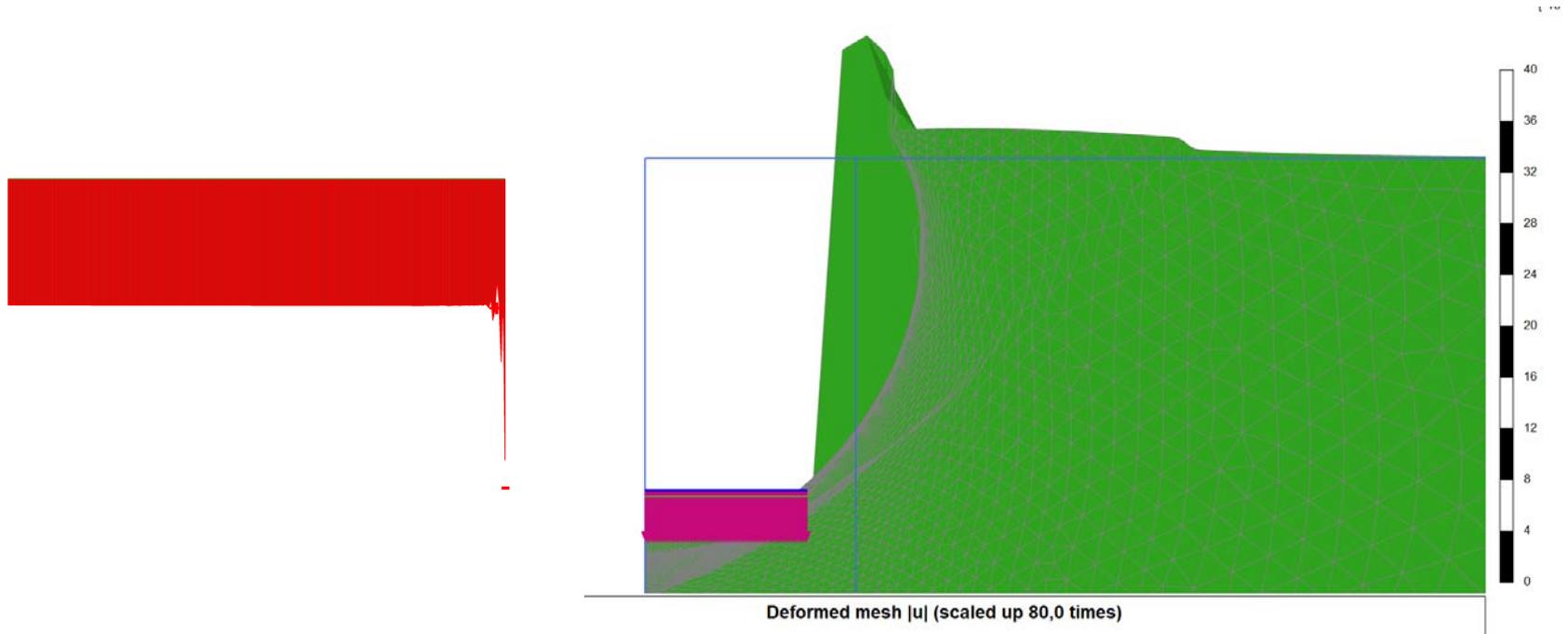
# То же. Круглый штамп



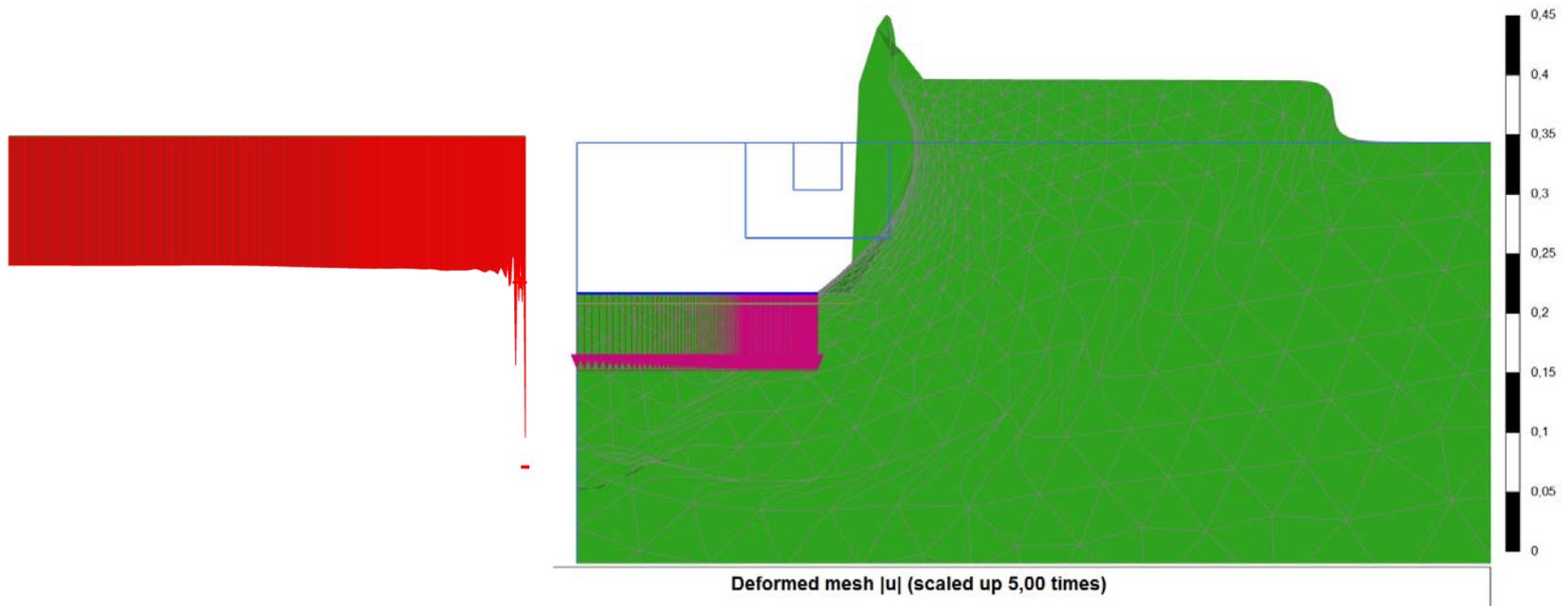
# Ленточный штамп. Кинематическое нагружение



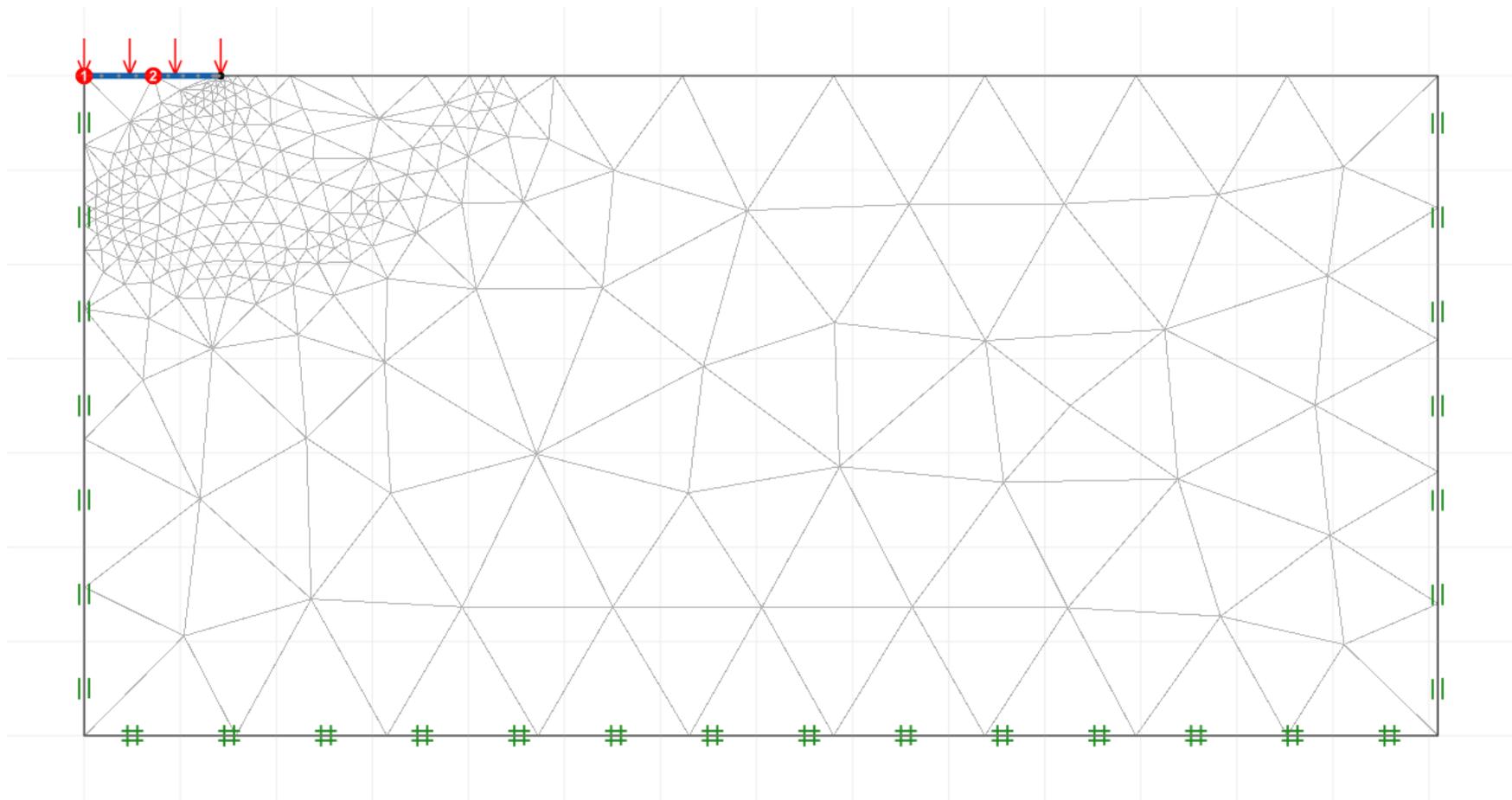
# Задача Прандтля. Эпюра контактных давлений и деформированная сетка при разрушении



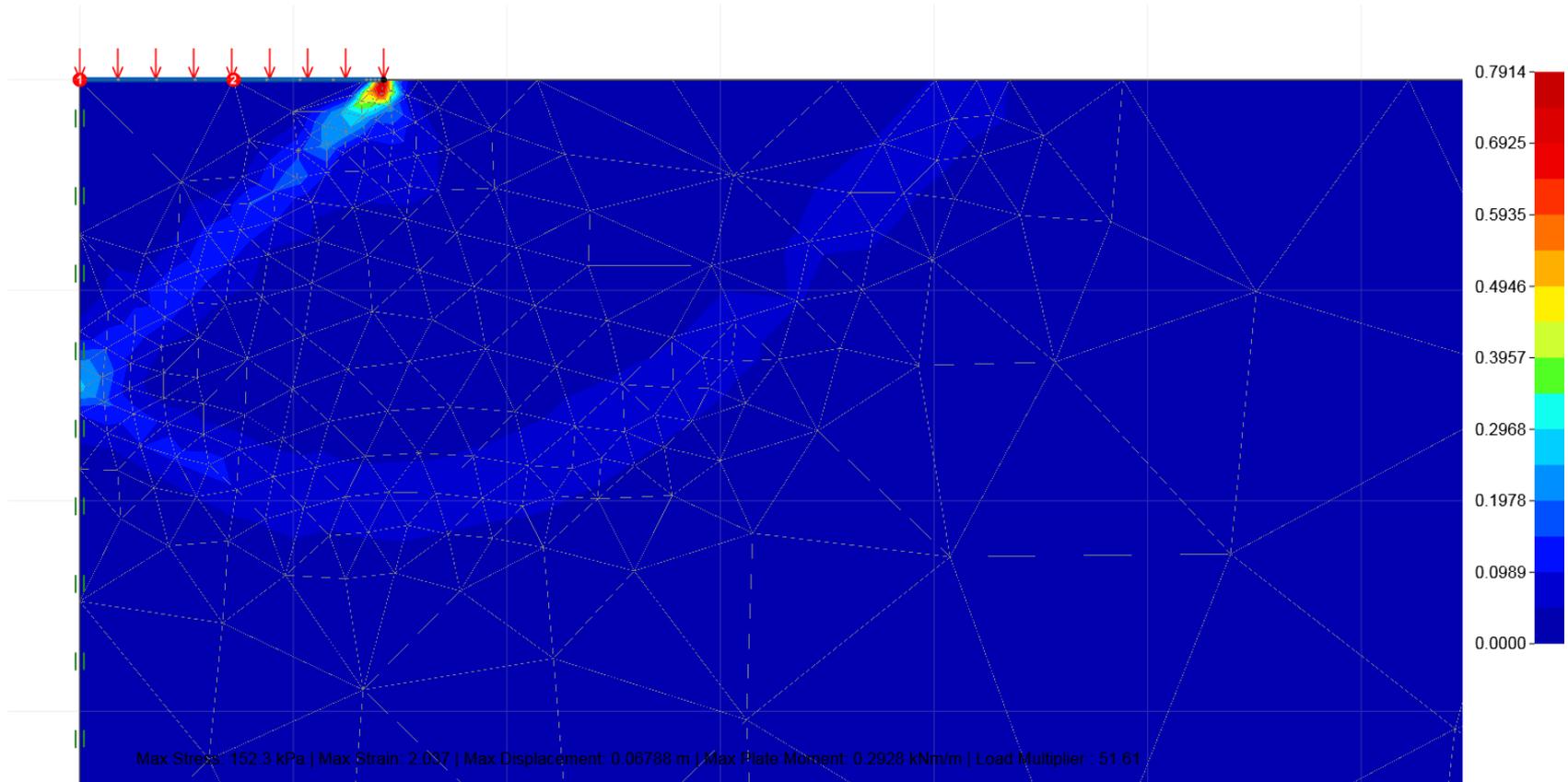
То же самое при другой схеме сгущения сетки



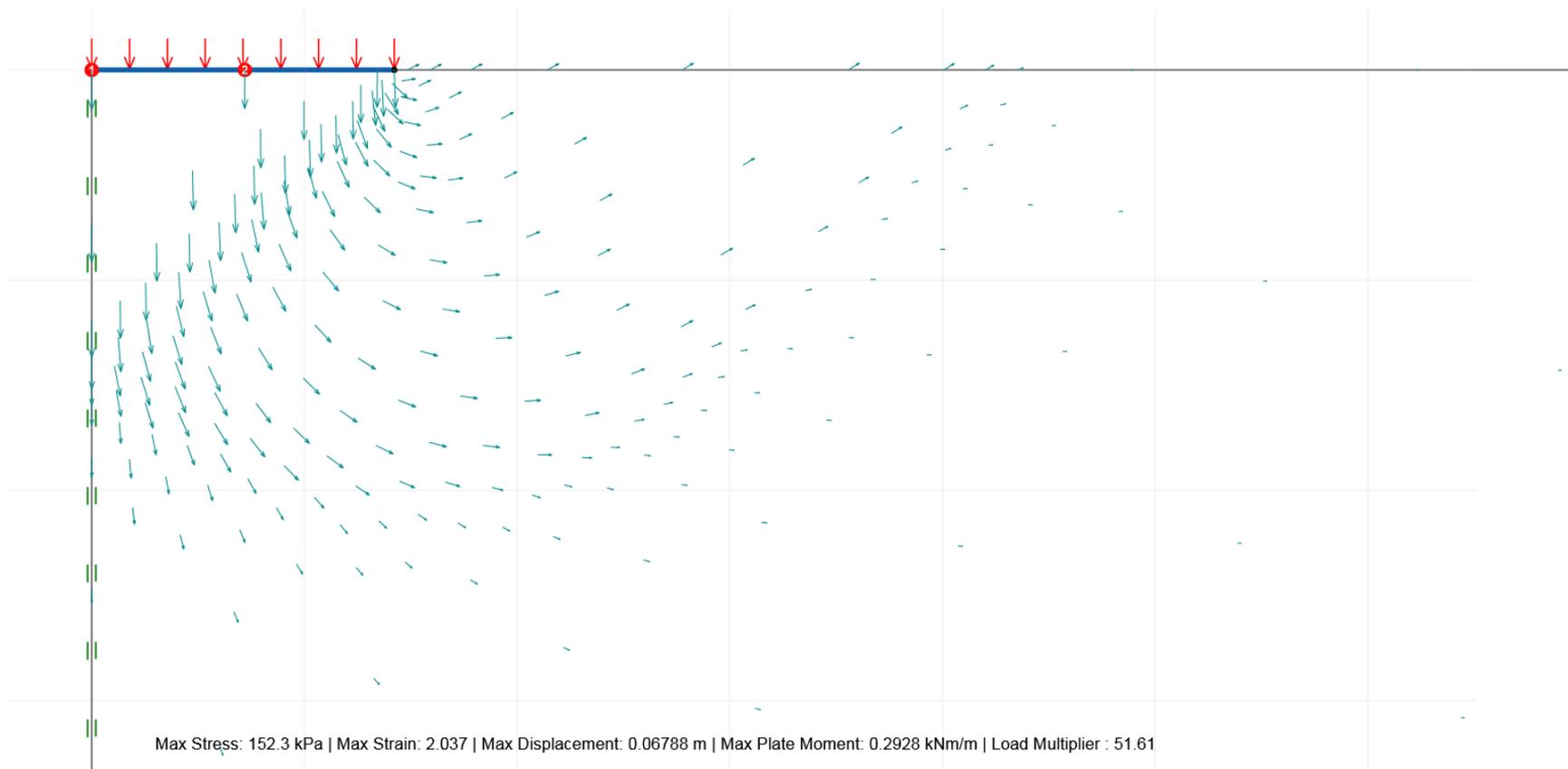
# Сетка КЭ после перестройки (адаптации). Программа OPTUM



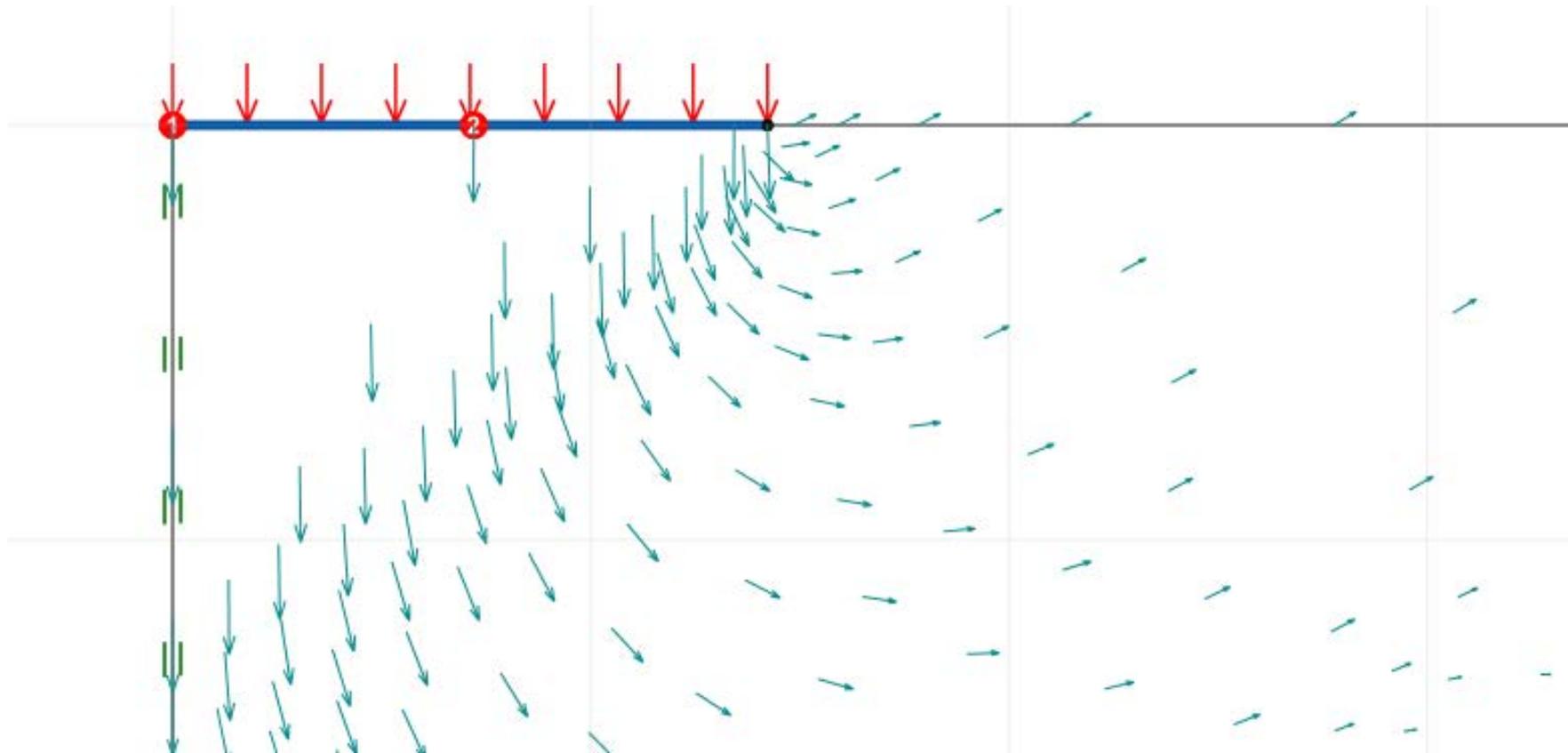
# Диссипация энергии при сдвиге

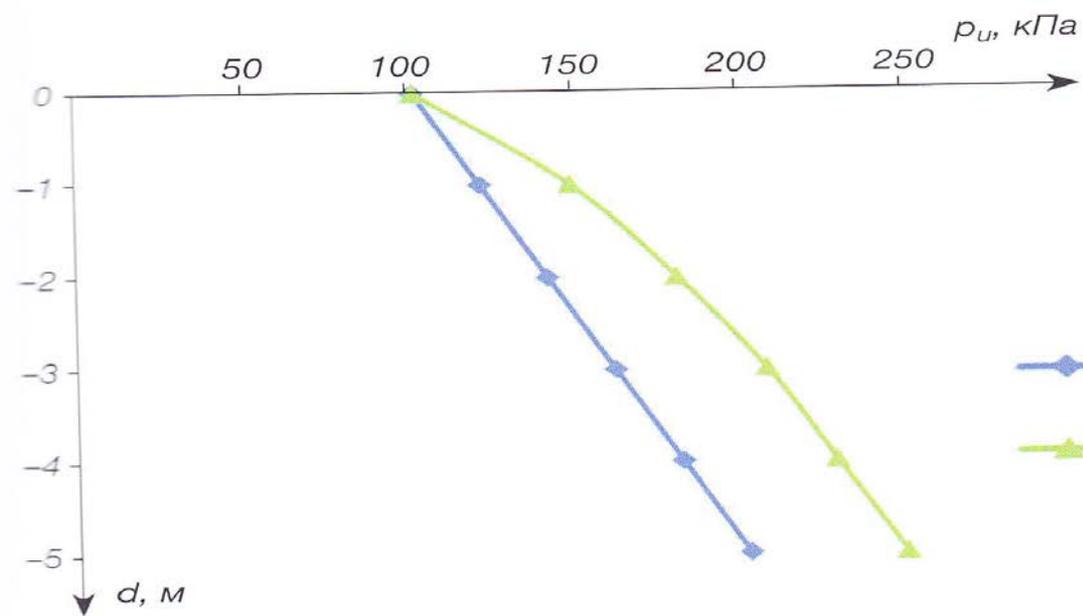


# Поле скоростей при разрушении основания

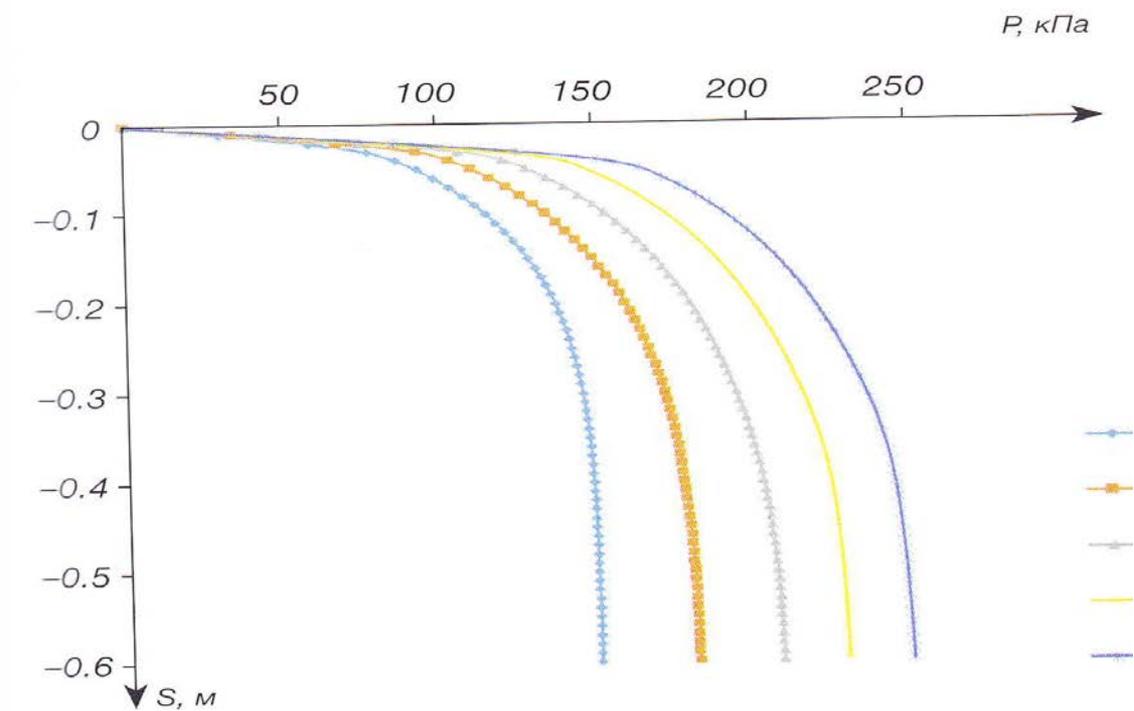


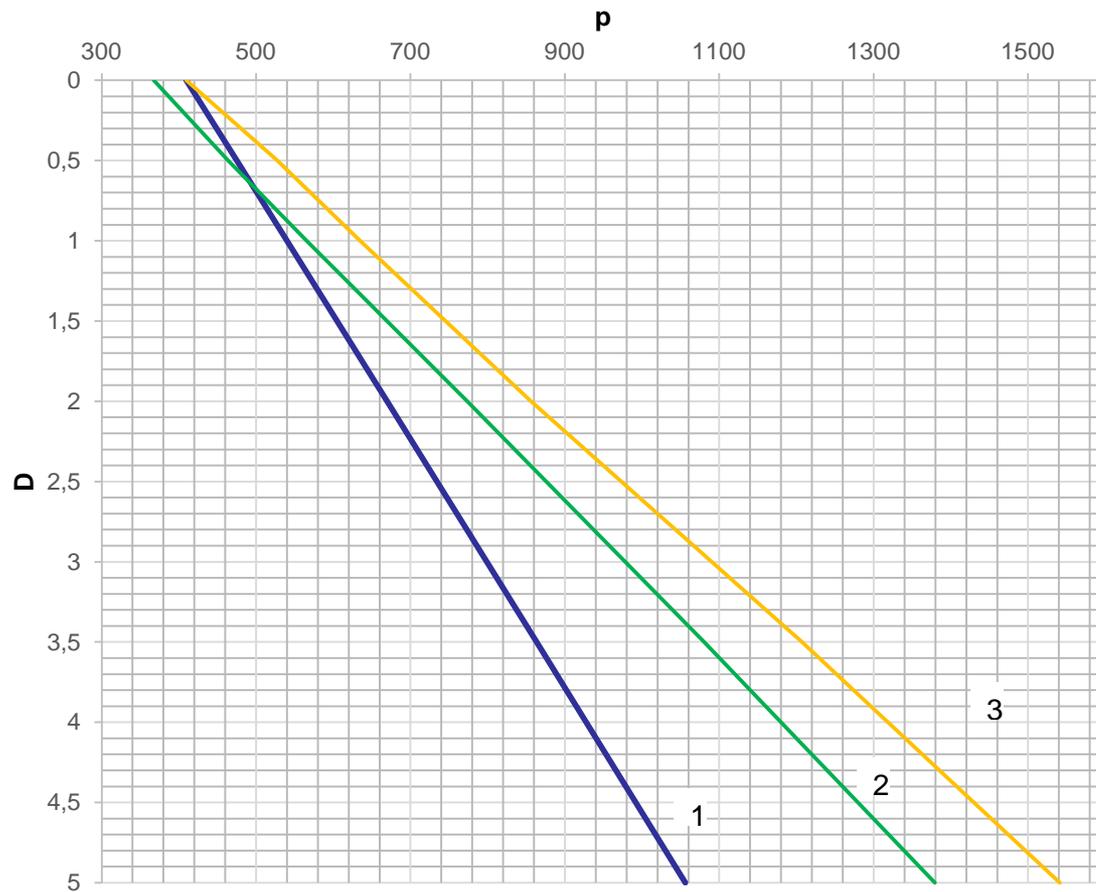
То же в увеличенном масштабе





Влияние глубины  
заложения на  
несущую  
способность.  
Ленточный штамп  $\varphi = 0$   
(по Улицкому и др.)



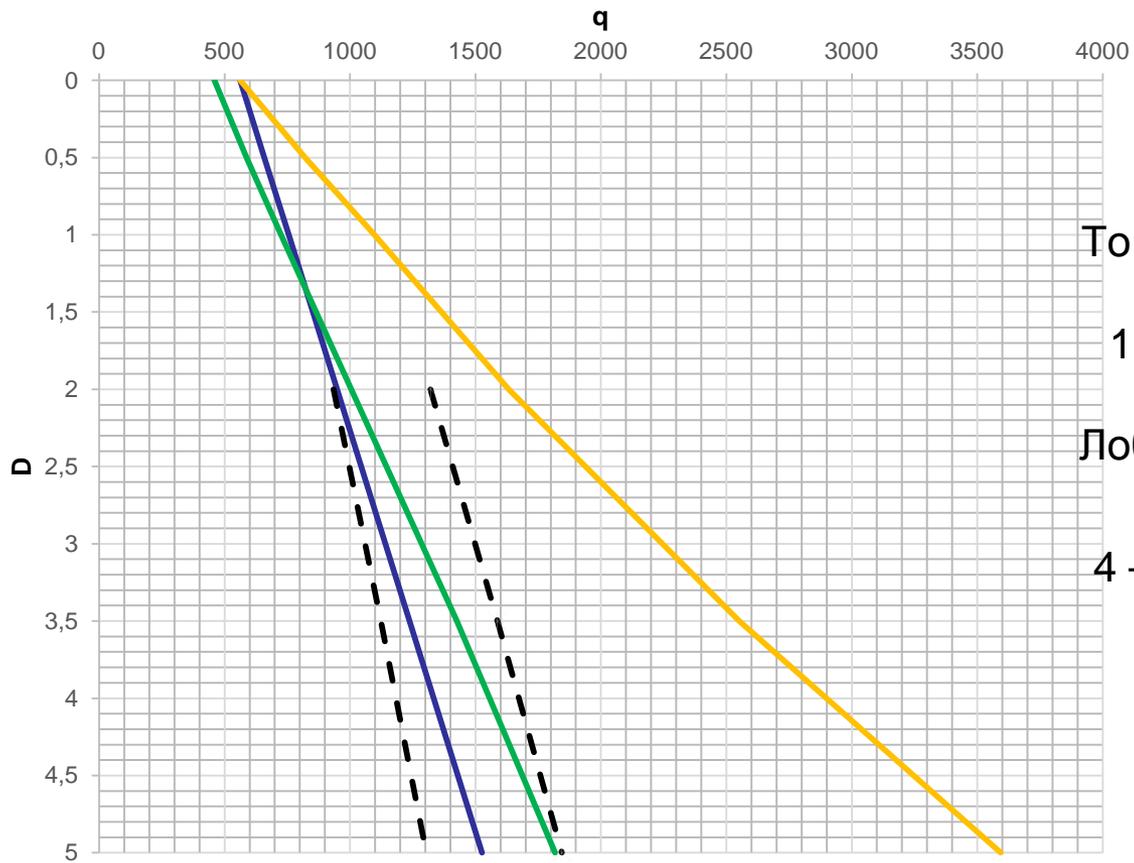


$\varphi = 20^\circ$   $c = 20$  кПа  $\gamma = 20$  кН/м<sup>3</sup>

Плоская задача,  $b = 2$  м

1 – заглубление как пригрузка;

2 – Brinch Hansen; 3 - Plaxis

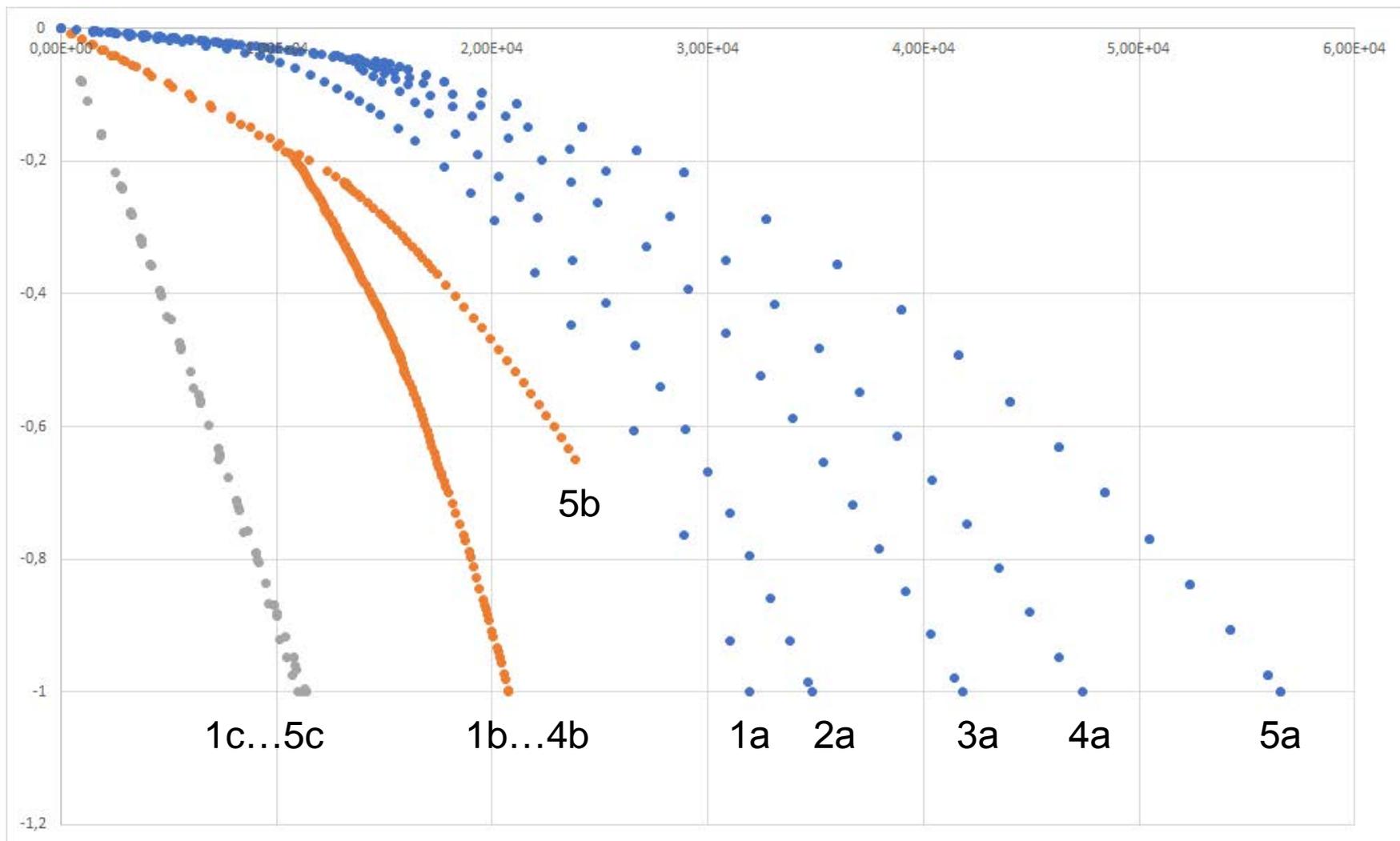


То же. Осесимметричная задача,  
 $d = 2$  м

1 – заглубление как пригрузка;  
 2 – Brinch Hansen; 3 – Plaxis

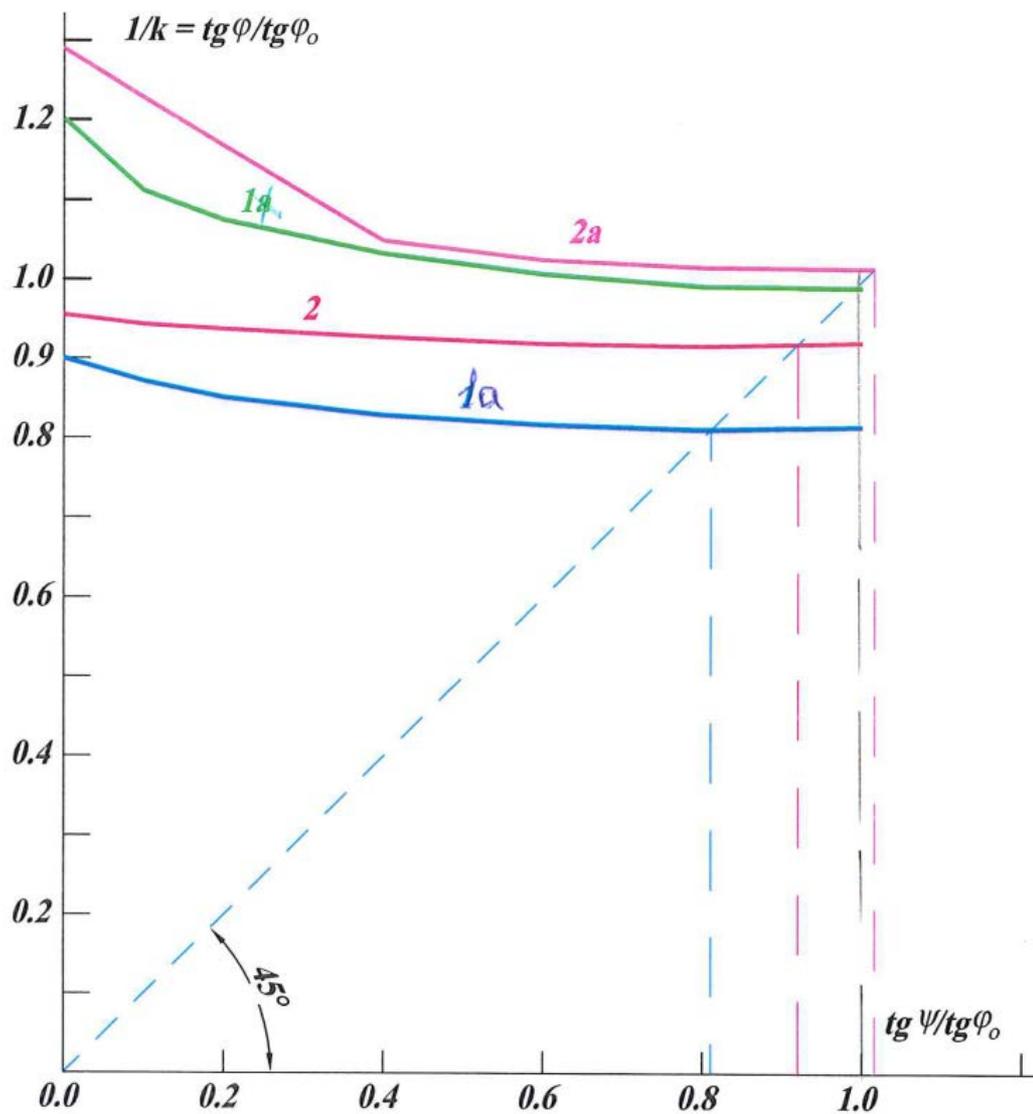
Лобовое сопротивление зонда по  
 Гревцеву-Федоровскому:

4 – при  $E = 25$  Мпа; 5 – 100 МПа



Осадки сваи: а) одиночной; б) в поле; с) в плотном поле

$\varphi = 35^\circ$  Угол дилатансии  $\psi = 1^\circ; 2^\circ; 3^\circ; 5^\circ; 35^\circ$



Влияние дилатансии на устойчивость откоса.

# Ульяновский Областной Суд

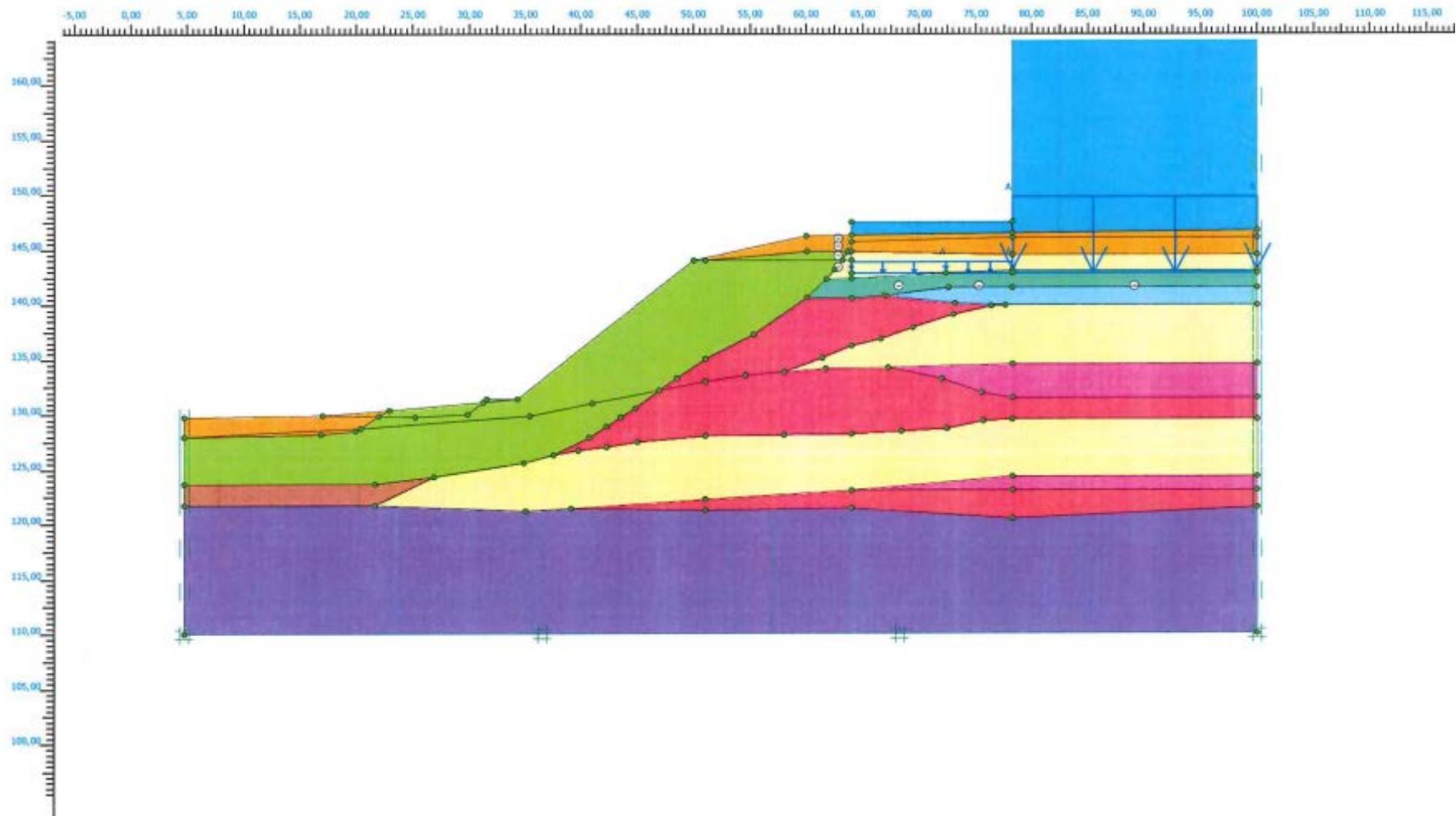


Рис. 1. Расчетная схема

# Вариант 1

( $\varphi_0 = 35^\circ$ ,  $c = 1.0$  кПа)

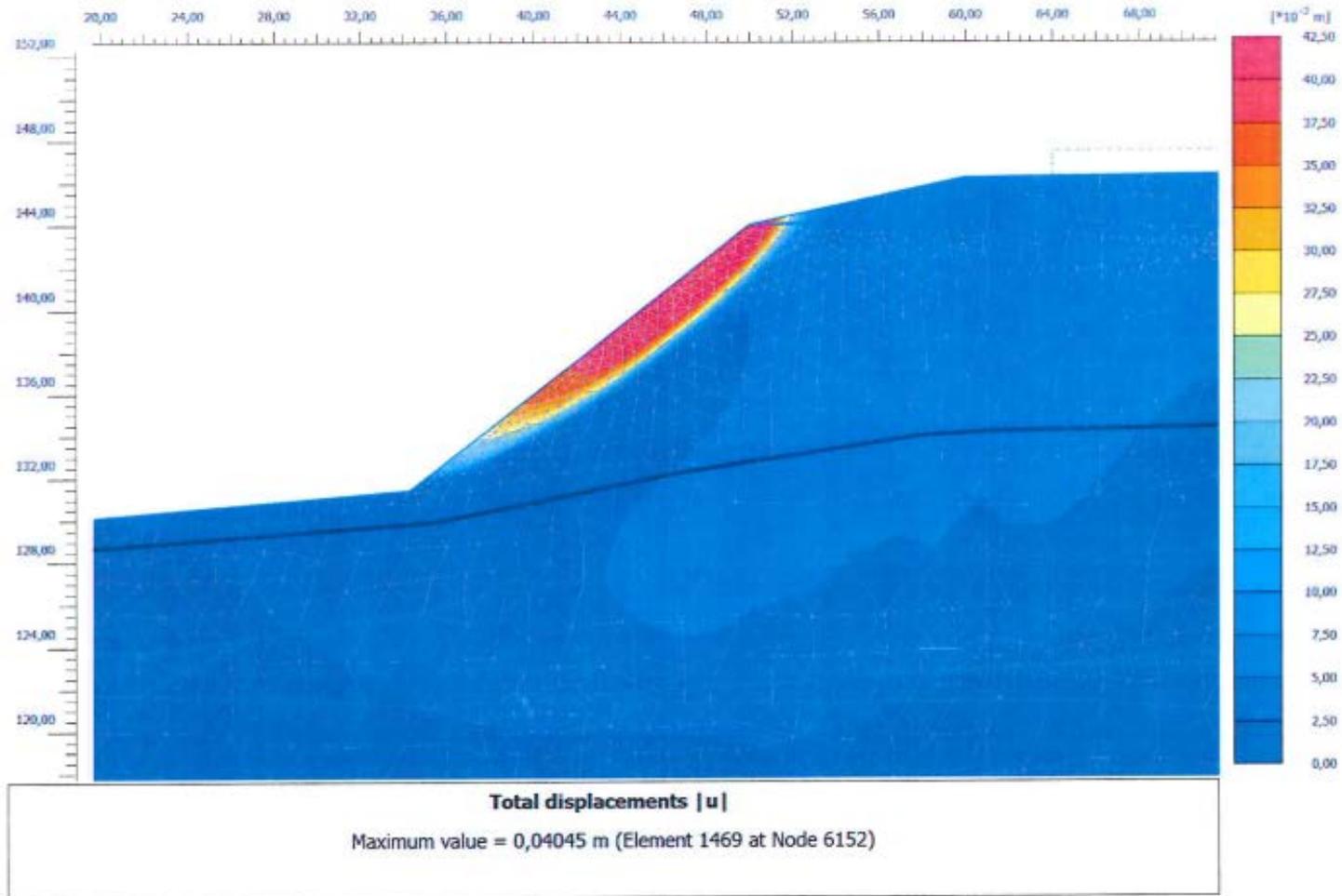


Рис. 2. Схема разрушения.  $\psi = 0.00^\circ$  ( $\text{tg}\psi = 0.00$ ),  $k = 0.832$

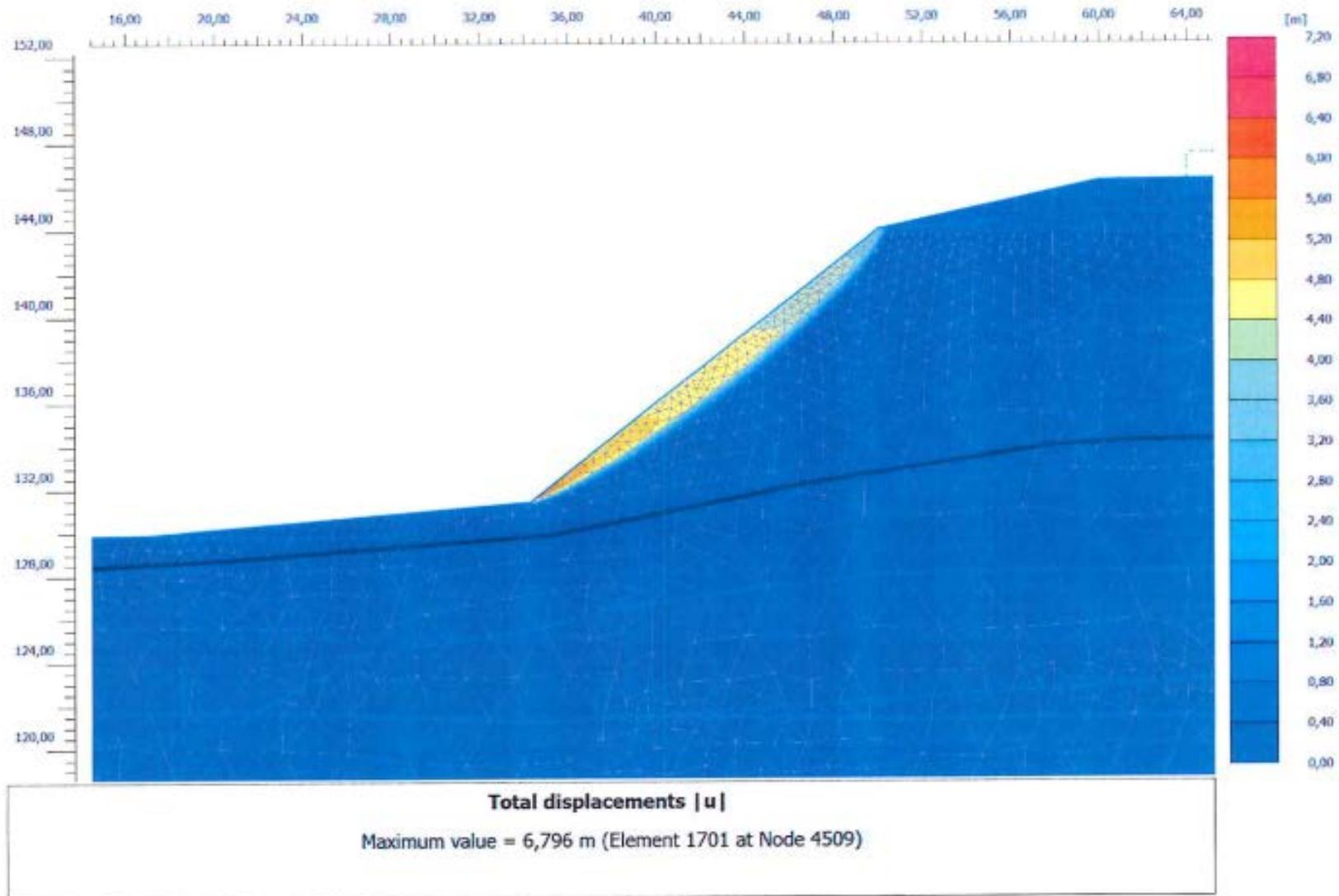
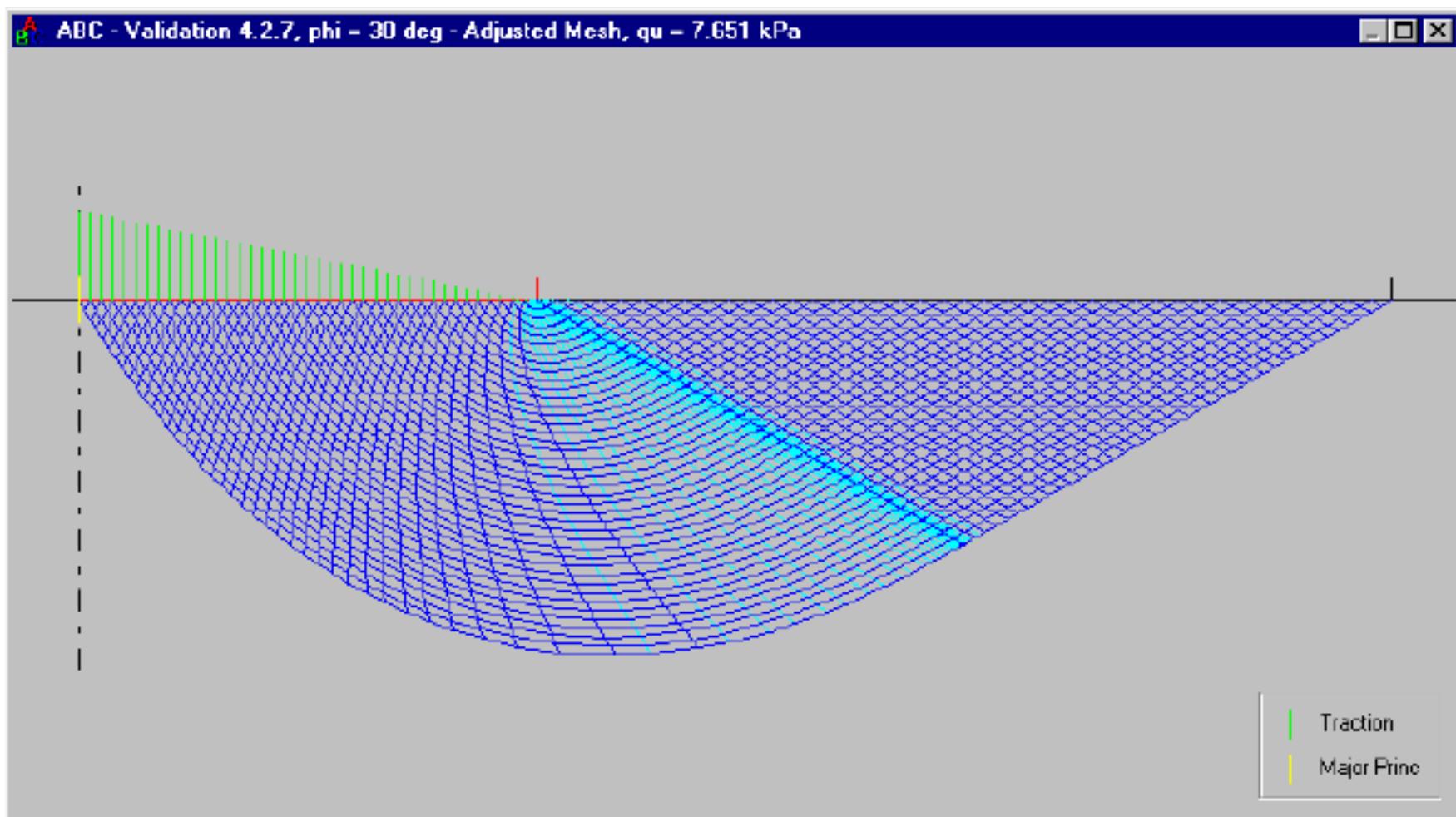
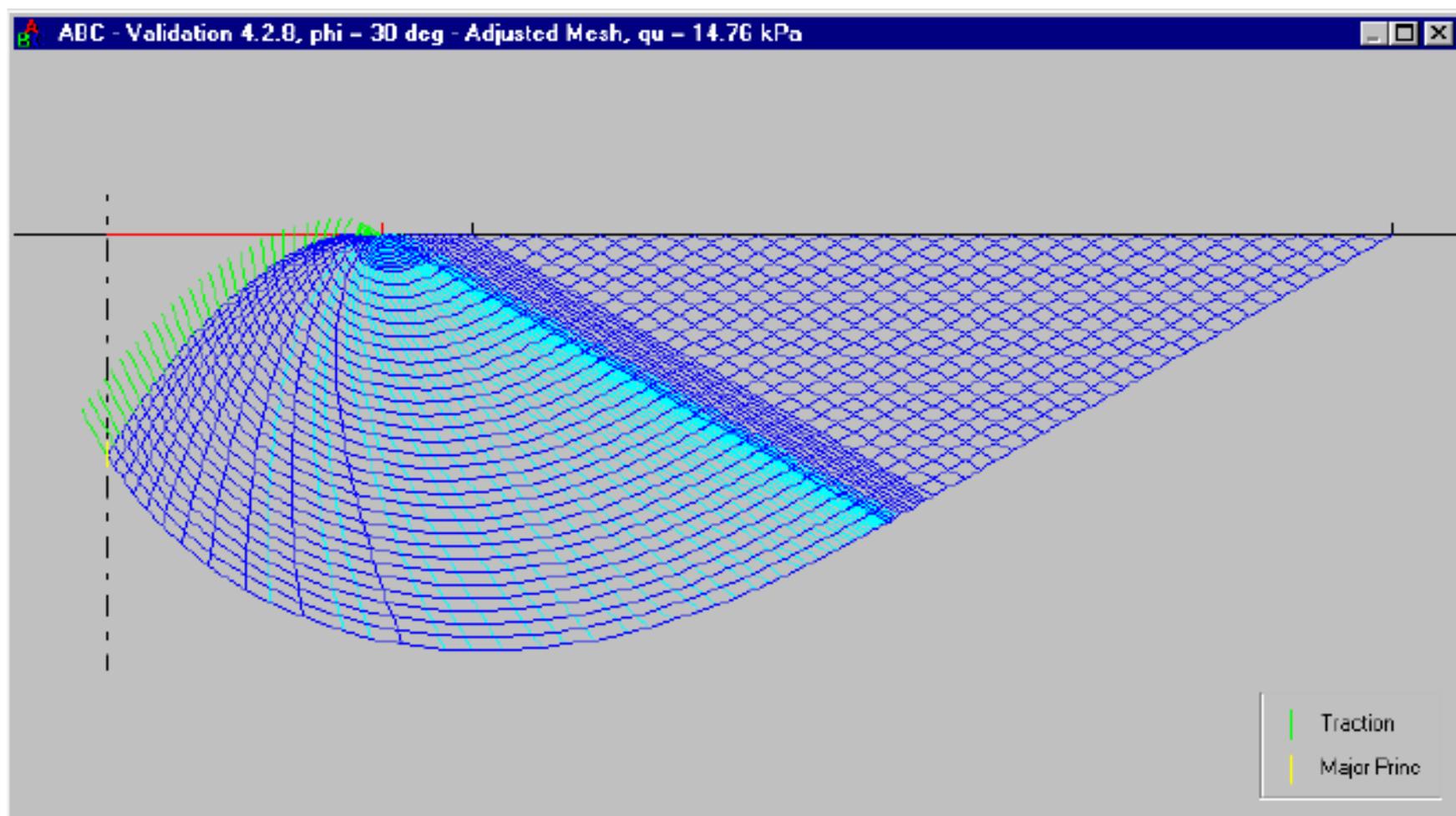


Рис. 3. Схема разрушения.  $\psi = 35.00^\circ$  ( $\text{tg}\psi = 0.70$ ),  $k = 1.01$

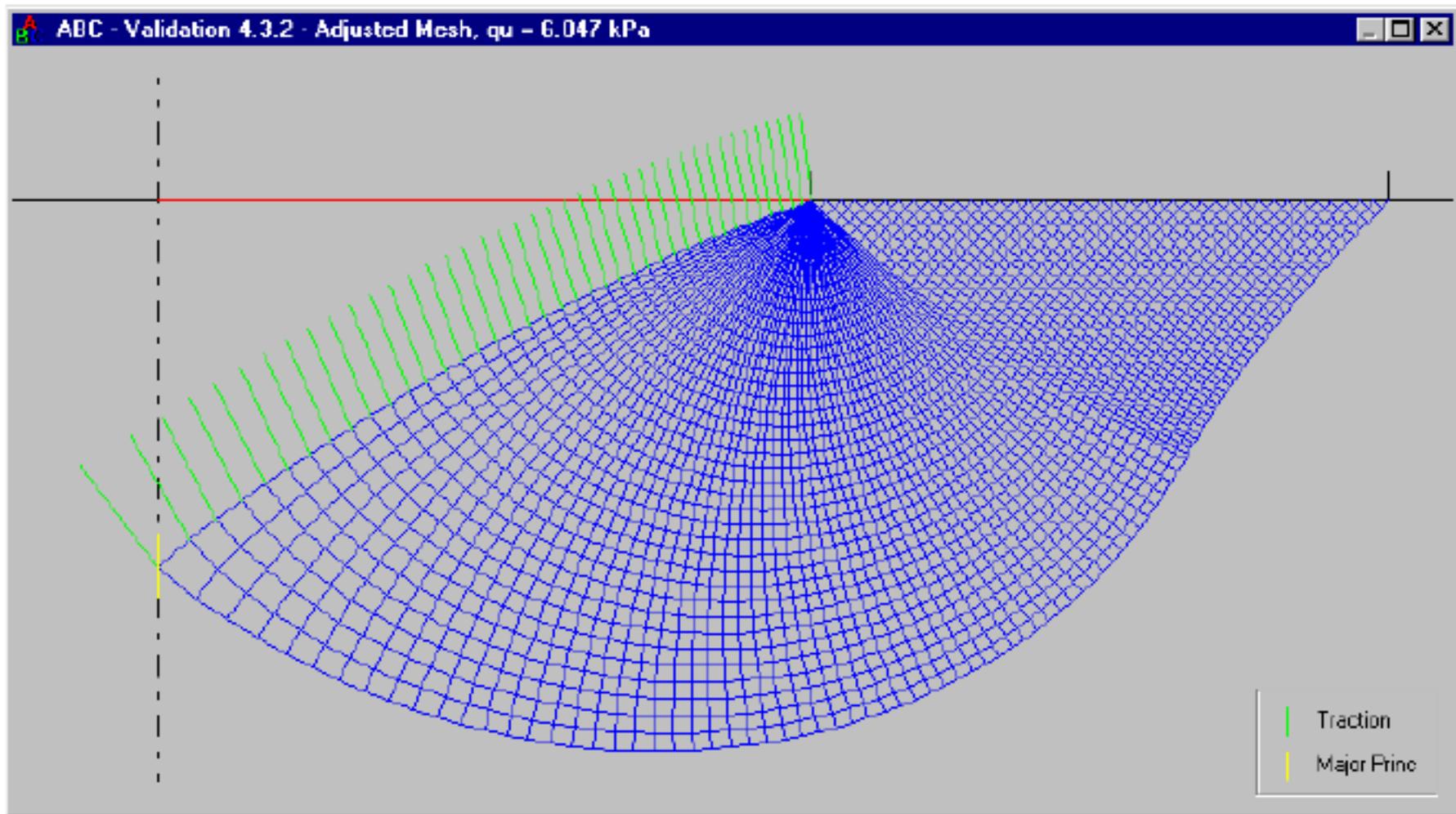
# Прочие методы расчета. Метод характеристик (по С. Мартин ) Ленточный гладкий штамп.



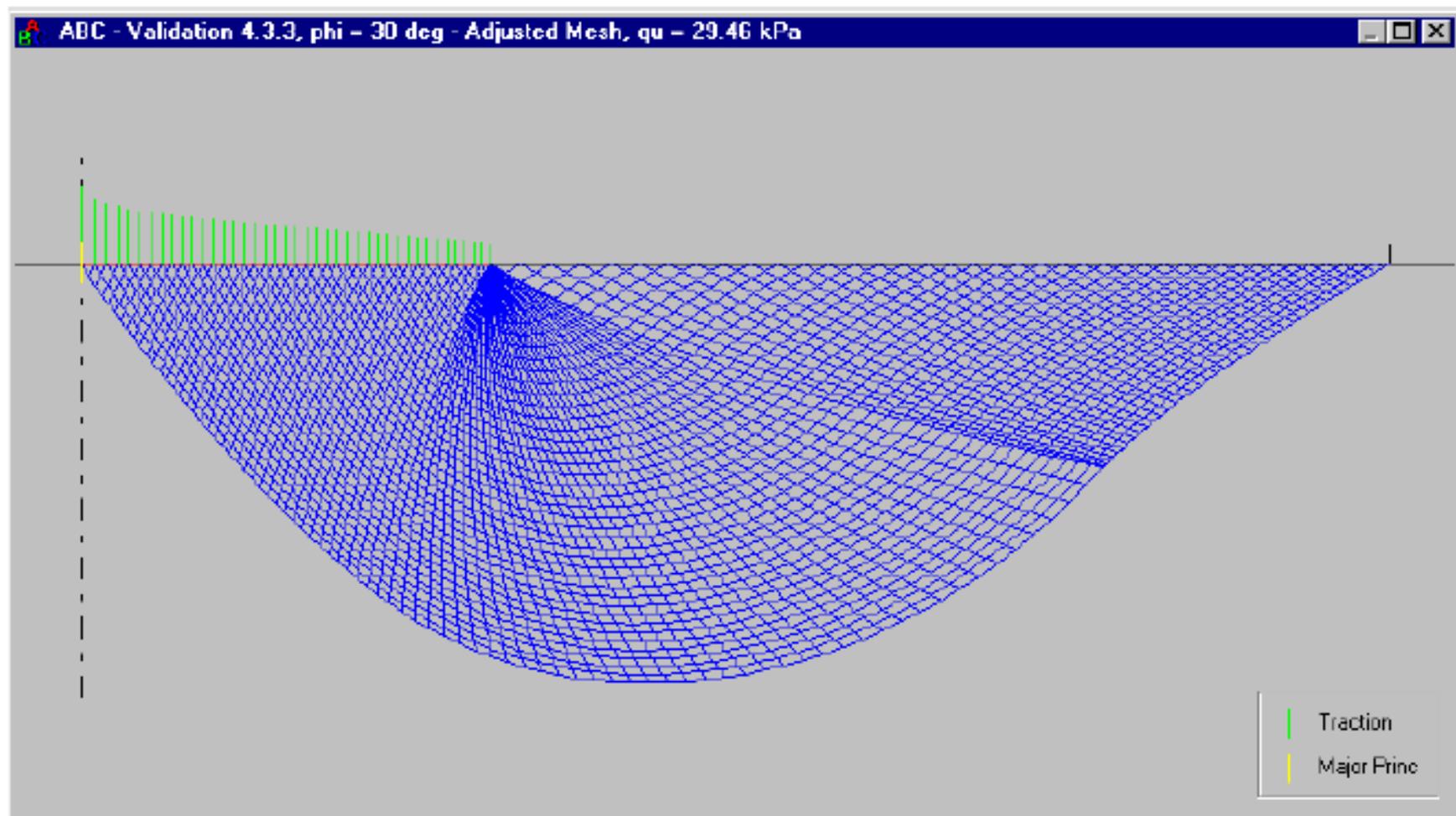
То же. Ленточный шероховатый штамп.



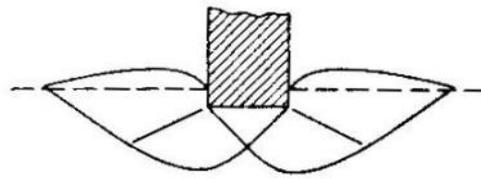
То же. Круглый шероховатый штамп.



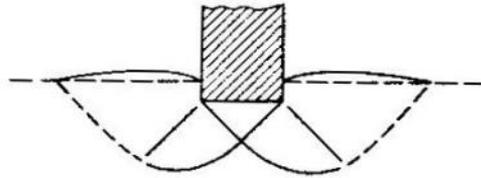
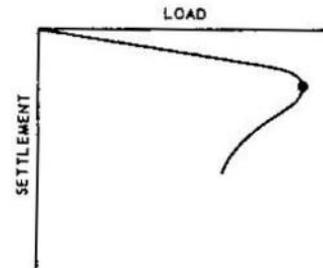
То же. Круглый гладкий штамп.



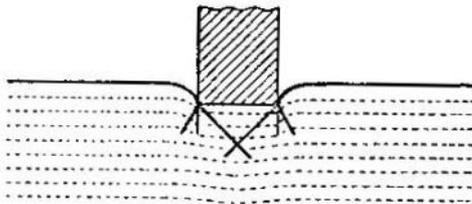
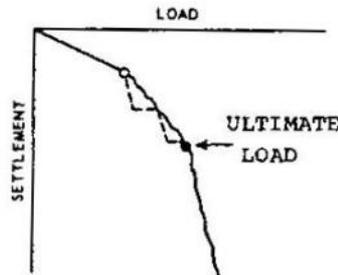
# Формы предельных состояний песчаного основания по A.Vesic



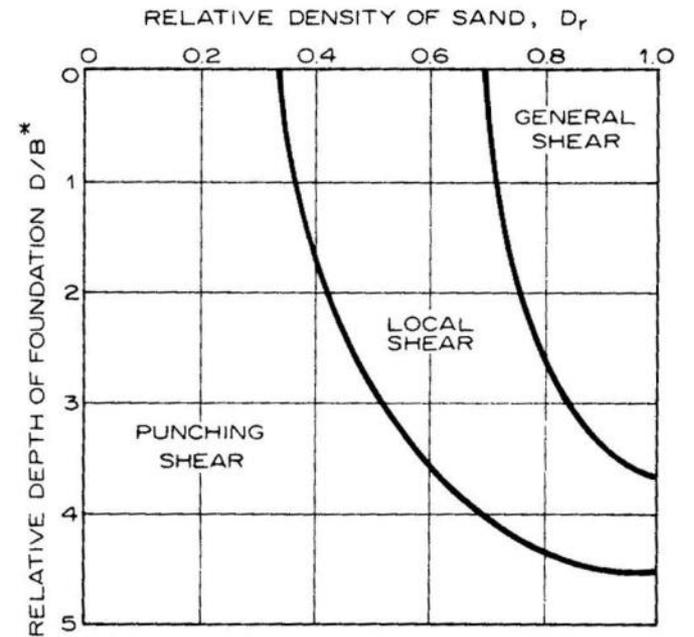
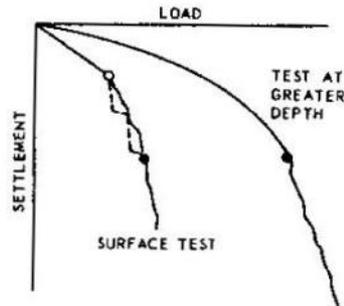
A) GENERAL SHEAR



B) LOCAL SHEAR

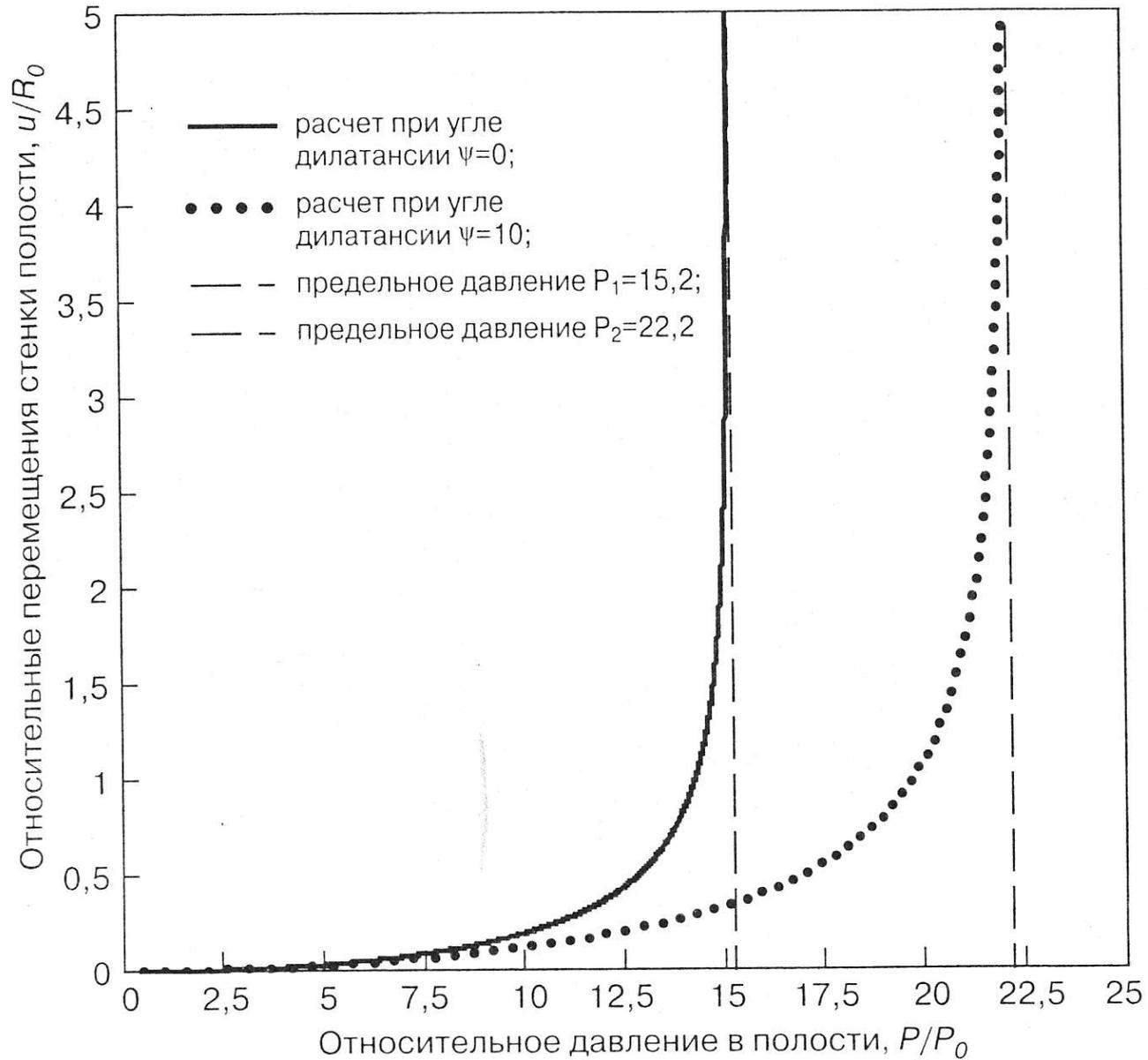


c) PUNCHING SHEAR



$B^* = B$  FOR A SQUARE OR CIRCULAR FOOTING.  
 $B^* = 2BL / (B+L)$  FOR A RECTANGULAR FOOTING.

# Предельное давление расширения полости.



Формулы для определения предельного давления расширения полостей:

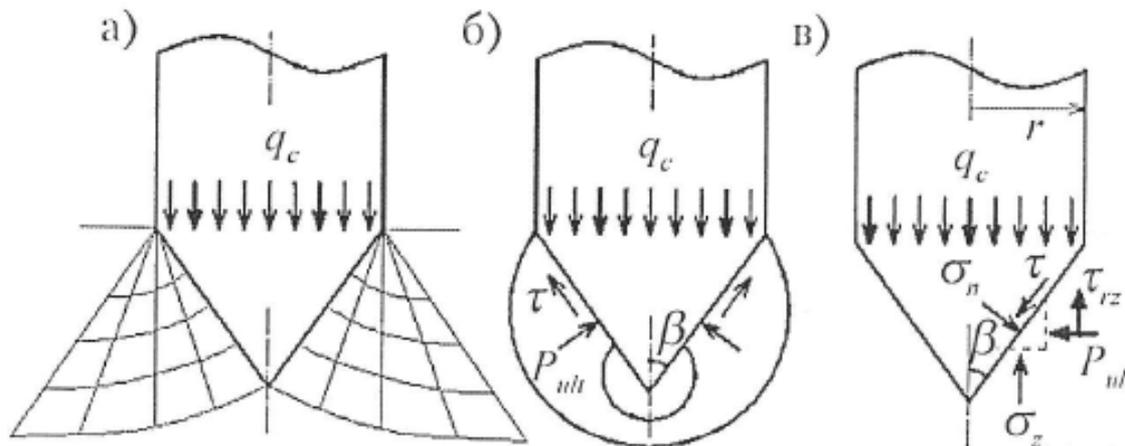
-сферической

$$P_{ult} = (p_0 + H) \left[ 1,3 \left( \frac{E^*}{p_0 + H} \right)^{n_s(\varphi)} + (\beta - 1)k_s \right] - H$$

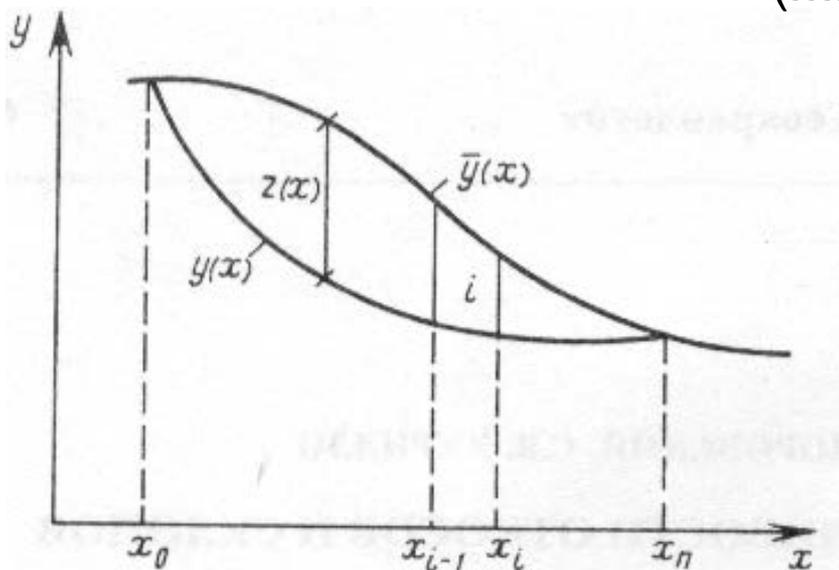
-цилиндрической

$$P_{ult} = (p_0 + H) \left[ 1,25 \left( \frac{E^*}{p_0 + H} \right)^{n_c(\varphi)} + (\beta - 1)k_c \right] - H$$

Схемы определения лобового сопротивления свай и зондов



# Метод переменной степени мобилизации сопротивления сдвигу (МПСМ).

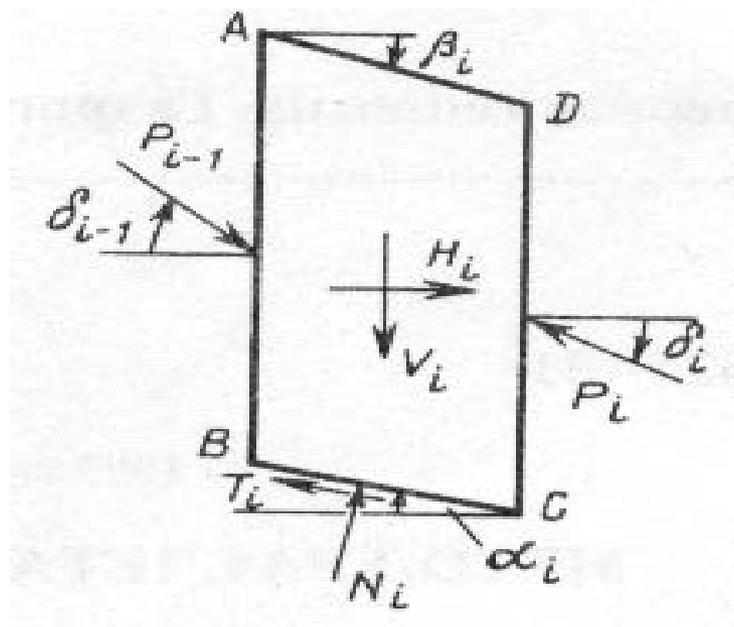


$$E_i = P_i \cos \delta_i \quad S_i = P_i \sin \delta_i$$

$$\Sigma X = H_i + E_{i-1} - E_i + N_i \sin \alpha_i - T_i \cos \alpha_i = 0$$

$$\Sigma Y = -V_i - S_{i-1} + S_i + N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i = 0$$

$$T_i = (N_i \overline{\tan \varphi_i} + \overline{c_i} l_i) / f \quad S = \zeta (E \overline{\tan \varphi} + \overline{c} z) / f$$

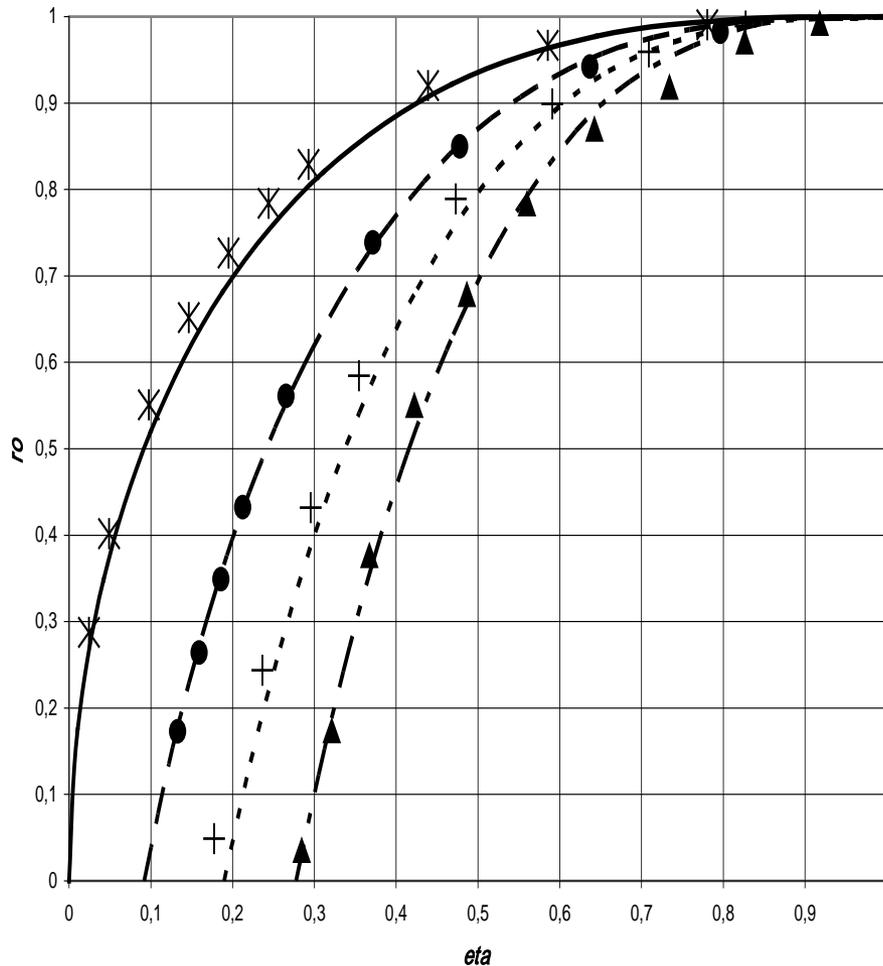


$$\zeta = \frac{\kappa}{1 + |\kappa|}$$

$$\kappa = z \frac{d^2 y}{dx^2} = (\overline{y} - y) \frac{d^2 y}{dx^2}$$

$$E_n(f) = 0$$

# Взаимодействие грунта с противоположной стеной, выполненной в виде ряда свай. Эффект непродавливания.



$$\eta = a / a_{Pr}; \quad \rho = p_{Pr} / p_u$$

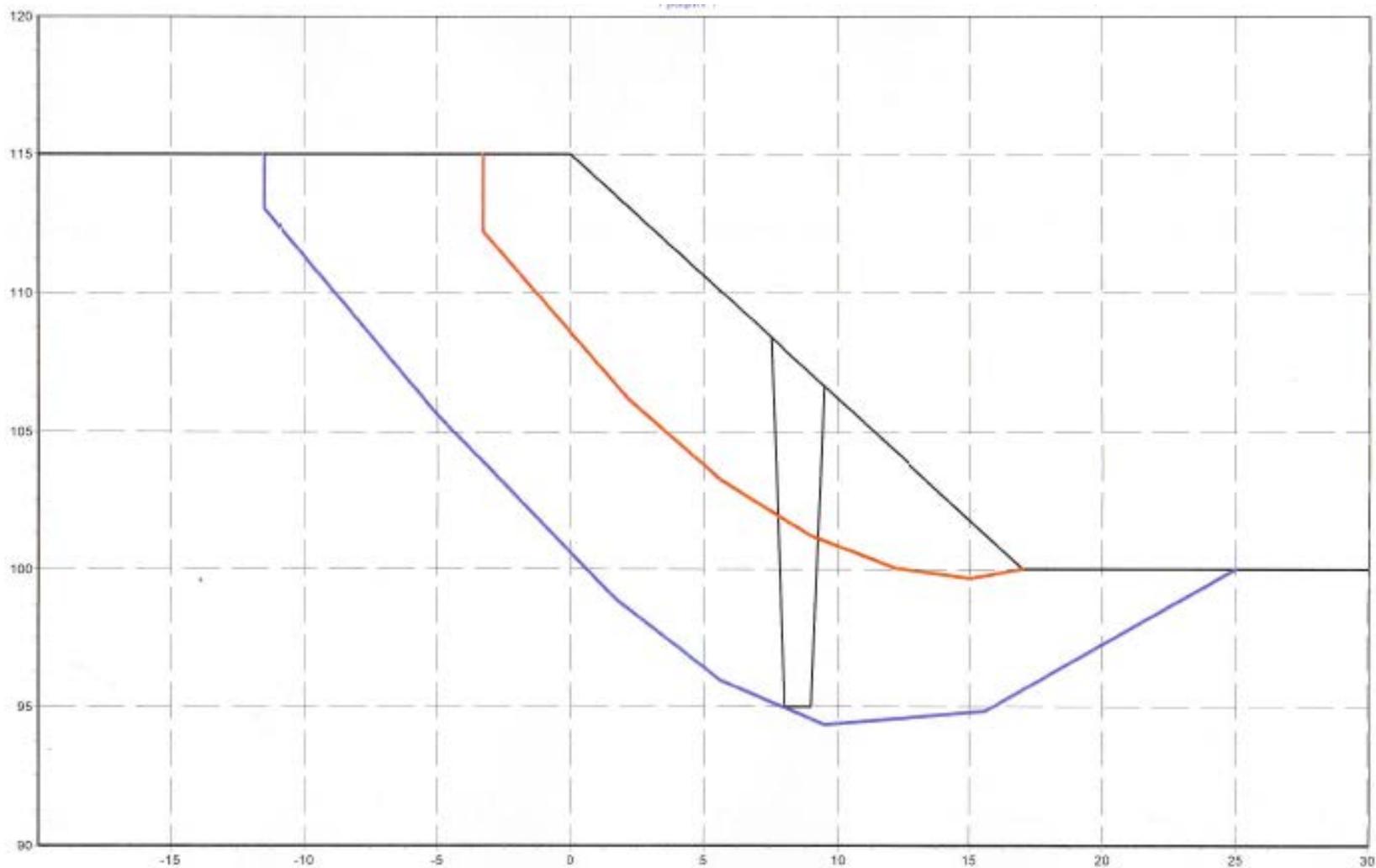
$$(1 - \eta)^3 + \left( \frac{\rho + \rho_0}{1 + \rho_0} \right)^2 = 1$$

$$p_{Pr} = \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{\pi \tan \varphi} - 1 \right) c \cot \varphi \equiv N_c c;$$

$$a_{Pr} = b e^{\frac{\pi}{2} \tan \varphi} \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

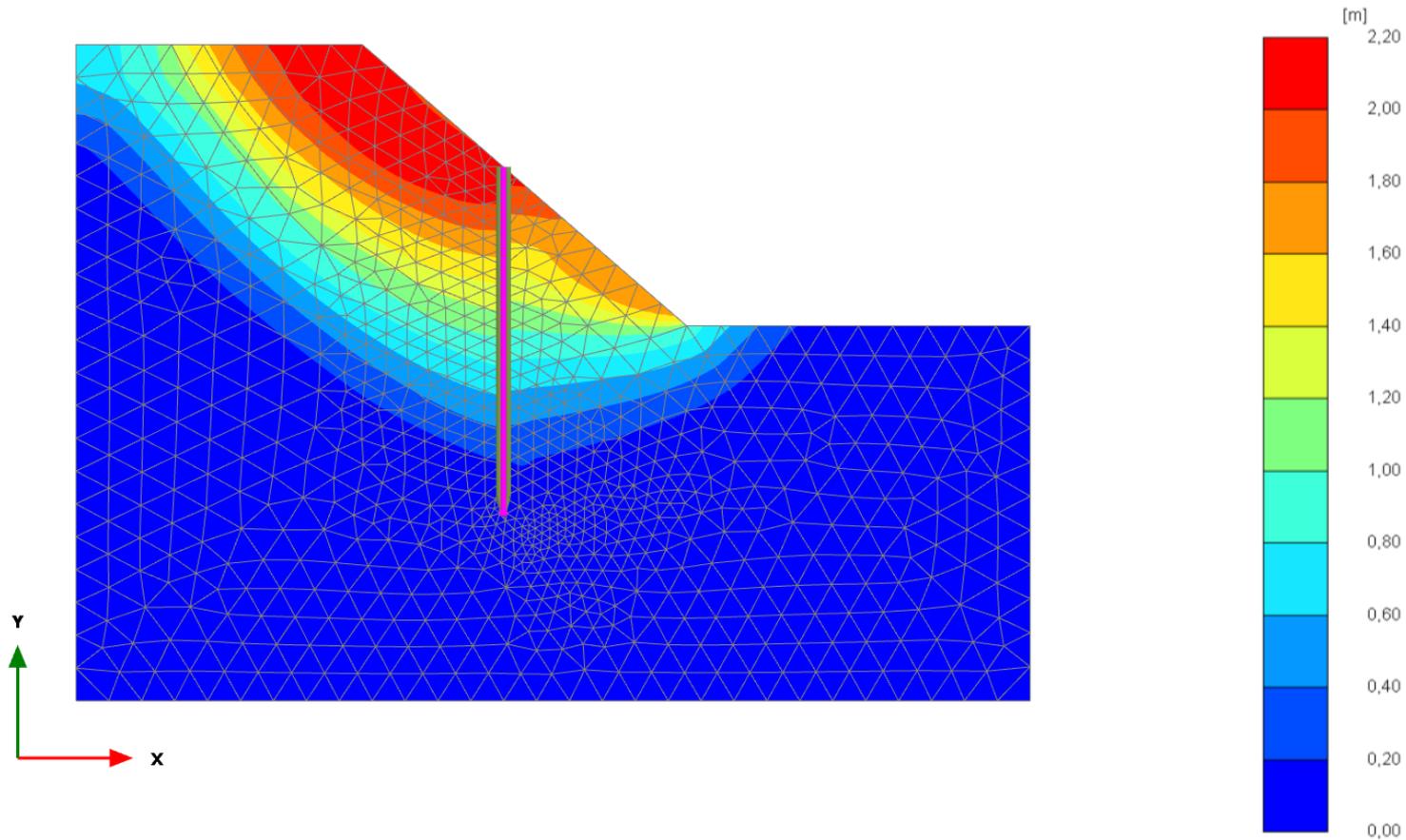
$$\rho_0 = 3,75 \tan \varphi$$

# Противооползневая стенка. Расчет по МПСП.



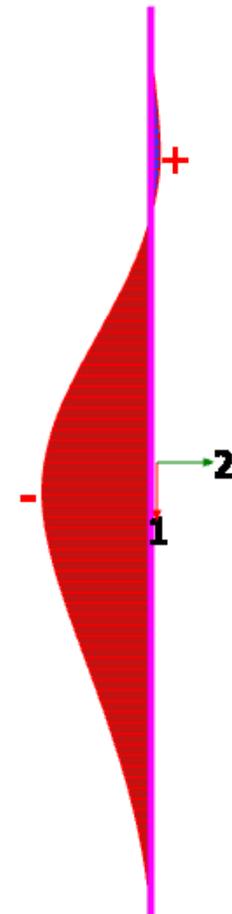
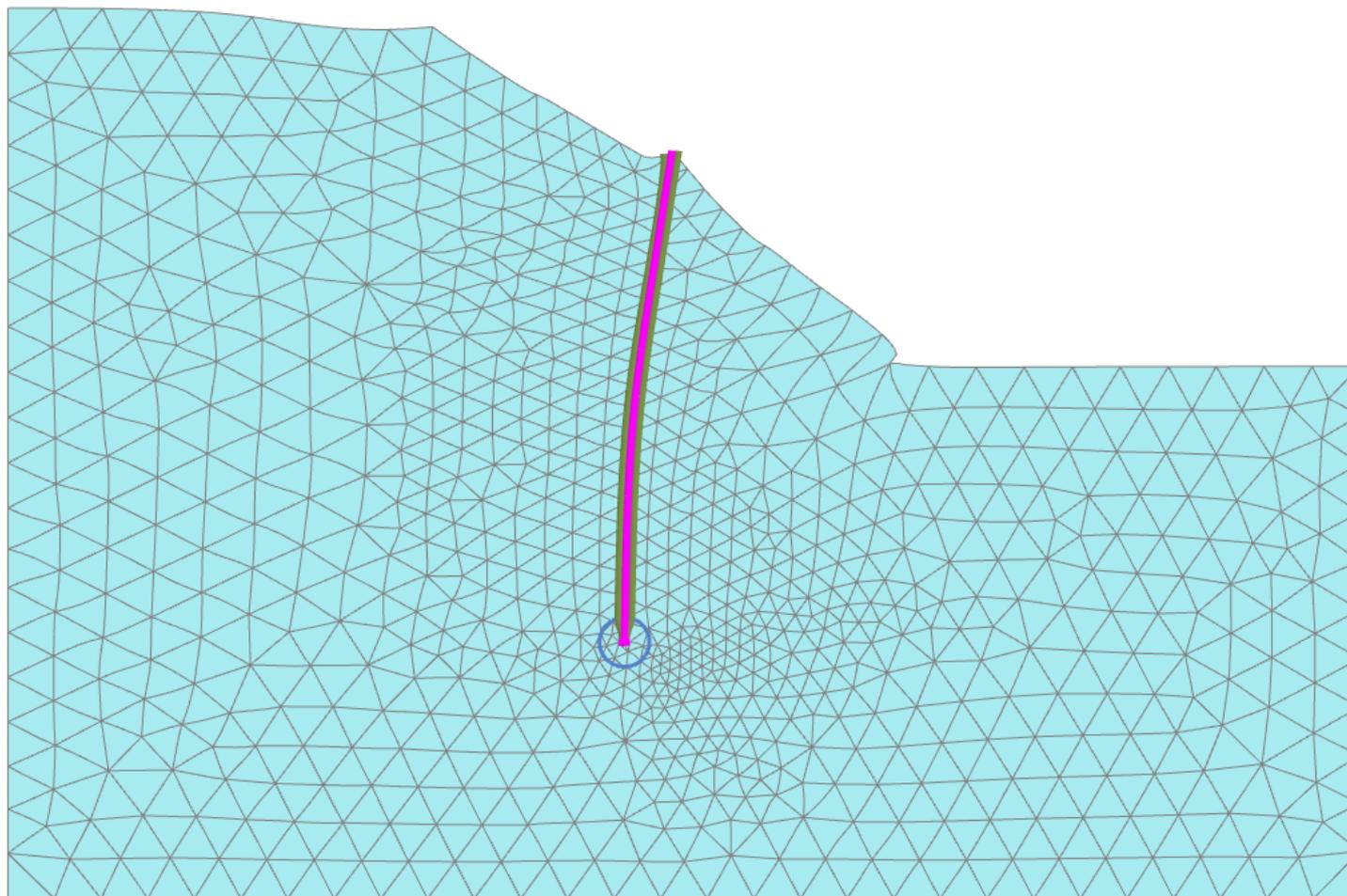
Отметка низа стенки, м	Коэффициент запаса
Без стенки	1,031
100	1,076
95	1,321
90	1,630

# То же. Расчет МКЭ.

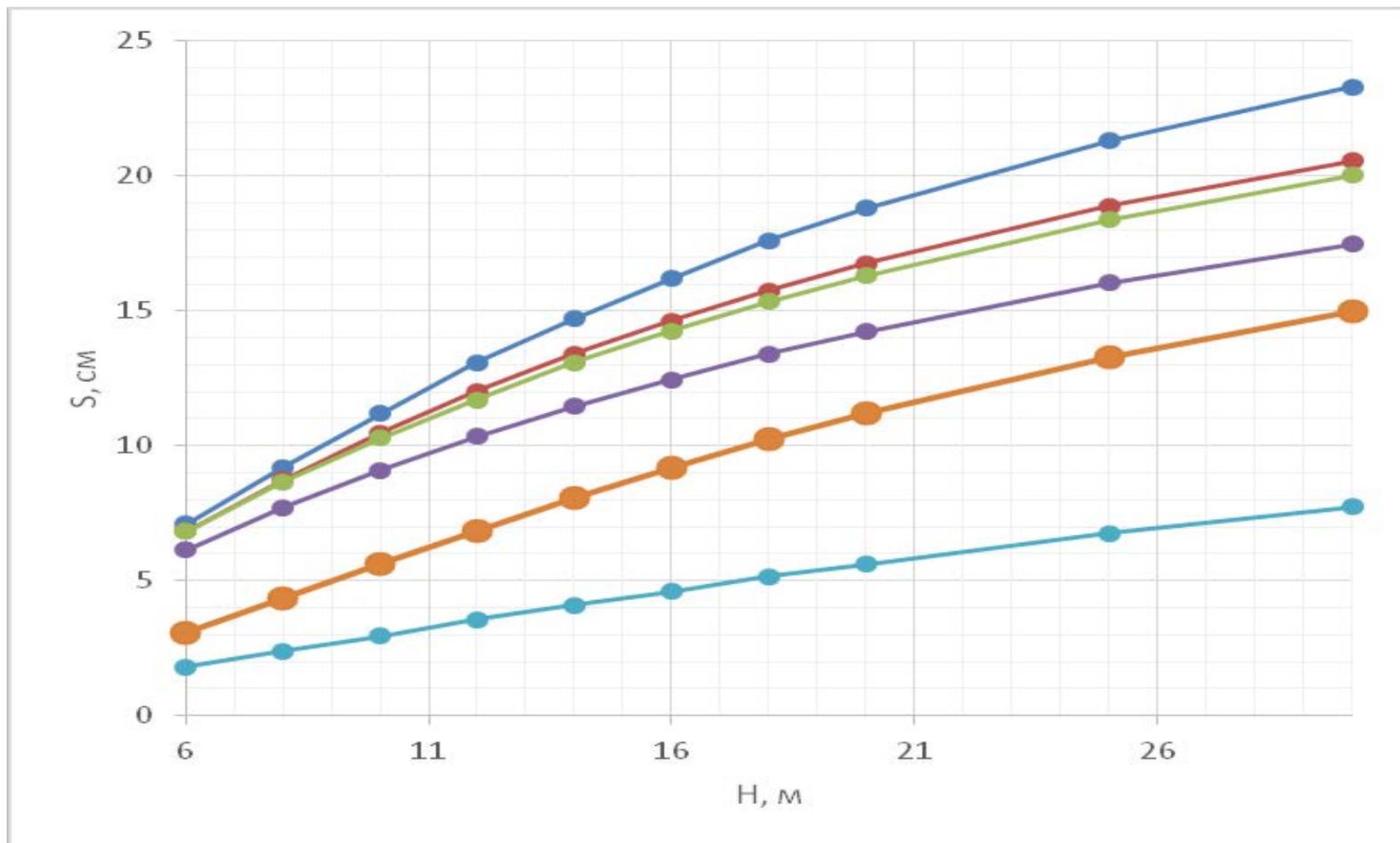


Коэффициент запаса общей устойчивости 1,369.

Прочностной расчет конструкции МКЭ при снижении прочностных характеристик грунта в 1,2 раза.



Расчет осадок методом послойного суммирования в сравнении с расчетом МКЭ для конечного слоя. Фундамент 20 x 40 м.  
Послойное суммирование: 1, 3, 6 – равномерная нагрузка 0,3 МПа;  
4 – жесткий штамп. МКЭ: 2 –  $\nu = 0,2$ ; 5 -  $\nu = 0,5$

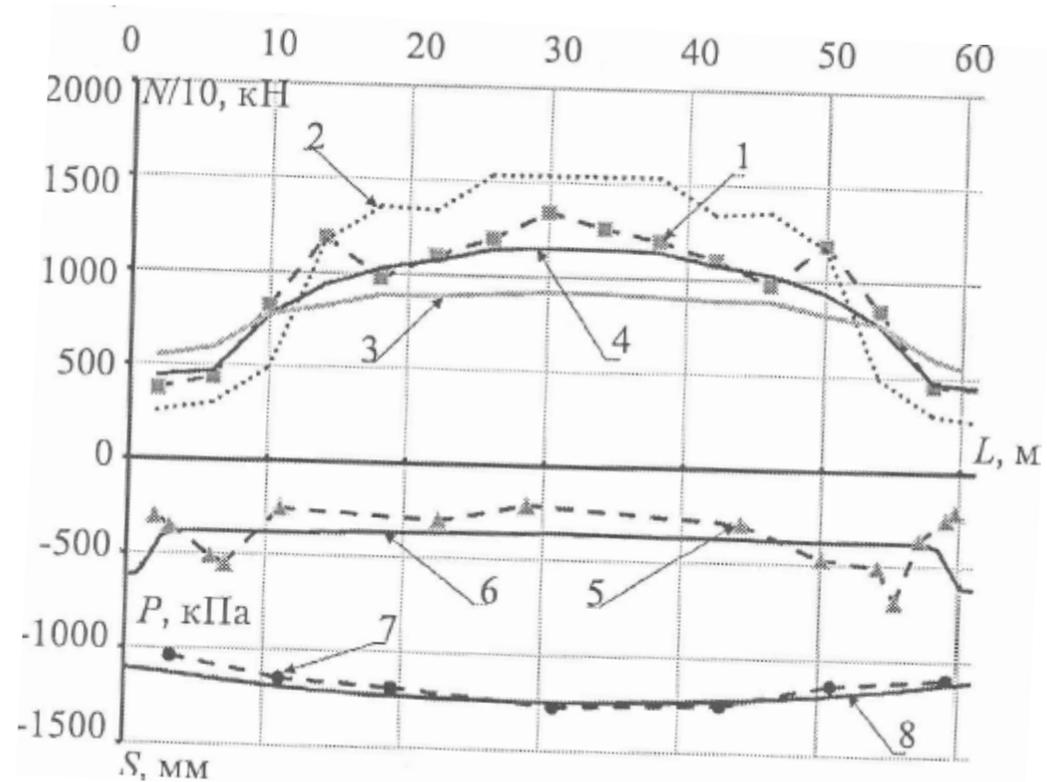


# Сравнение расчетных осадок фундаментной плиты и усилий в конструкции для гостиницы «Украина».

График усилий в колоннах каркаса ( $N$ , кН) по оси «Н», реактивного давления под подошвой фундаментной плиты ( $P$ , кПа) и осадок фундамента ( $S$ , мм).

Продольный разрез:

Усилия в колоннах: 1- результаты измерений (последний цикл 16.12.1954 г.); 2-усиления по методу грузовых площадей; 3- «мгновенное» возведение конструкций; 4-учет монтажа конструкций; контактное давление; 5-результаты измерений (последний цикл 15.12.1953 г.); 6- упругий расчет; осадка фундамента: 7-результаты измерений (последний цикл 04.04.1964 г); 8-расчет с учетом монтажа конструкций



## Выводы

1. Численные методы расчета эффективно используются в геотехнике и будут использоваться еще более широко.
2. Применение численных методов предполагает гораздо более глубокое знание механики грунтов и механизмов взаимодействия сооружения с основанием.
3. Помимо усовершенствования моделей грунтов необходимо развивать модели конструкций и конструкционных материалов.
4. При этом необходимо развивать нормативную базу проектирования с учетом открывающихся возможностей расчета конструкций и грунтов.

Докладчик выражает искреннюю признательность И.А. Бокову, Г.А.Бобырь, Д.Д. Жданову, С.В. Ильину и А.И. Харичкину за помощь в подготовке доклада.