



Преобразование слабых водонасыщенных оснований грунтовыми сваями

Руководитель НОЦ «Геотехника», к.т.н.

Тер-Мартиросян Армен Завенович

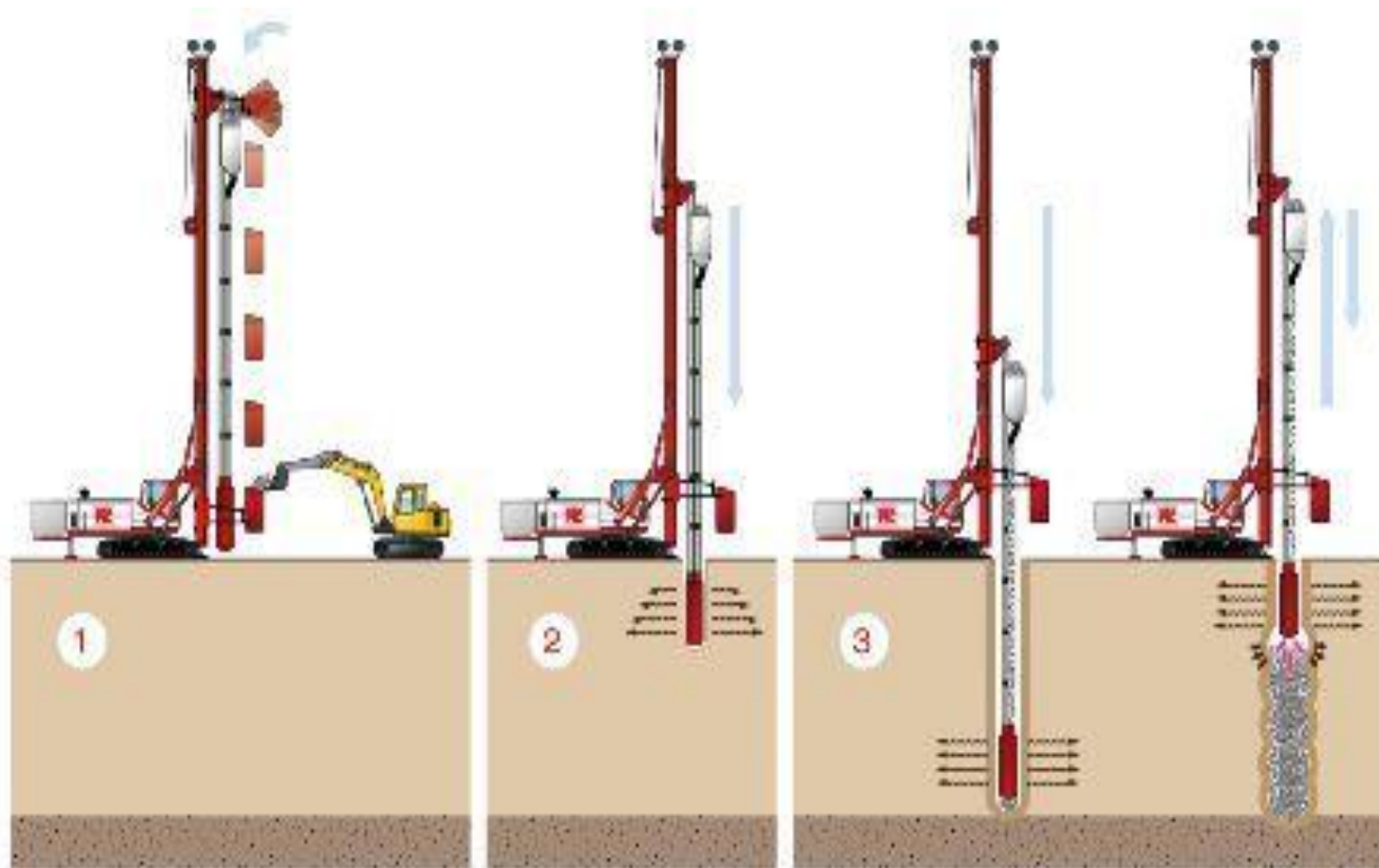
Научный сотрудник НОЦ «Геотехника», к.т.н.

Сидоров Виталий Валентинович

Проблема уплотнения слабых оснований и определения приведенных характеристик уплотненного композитного массива

1. Слабые основания, в том числе водонасыщенные, а также основания, содержащие слабые прослойки (торф, ил, глинистые грунты в текучей консистенции) могут быть уплотнены путем устройства в массиве колонн из более прочного и менее деформируемого материала (песок, щебень, грунтоцемент) с соответствующим его уплотнением.
2. При этом возможно как простое усиление массива грунта колоннами с определенным шагом (без изменения свойств окружающего их грунта), так и полное изменение свойств последнего путем создания больших **радиальных напряжений** в уплотняемом массиве.
3. Такие колонны могут быть устроены по различным технологиям: **виброфлотации**, послойного **втрамбовывания**, по технологии **струйной цементации** и т.п.
4. Для всех рассматриваемых случаев проектировщику необходимо значение приведенного модуля деформации преобразованного композитного основания для расчета осадки.

Устройство колонн уплотнения из щебня или песка путем втрамбовывания материала



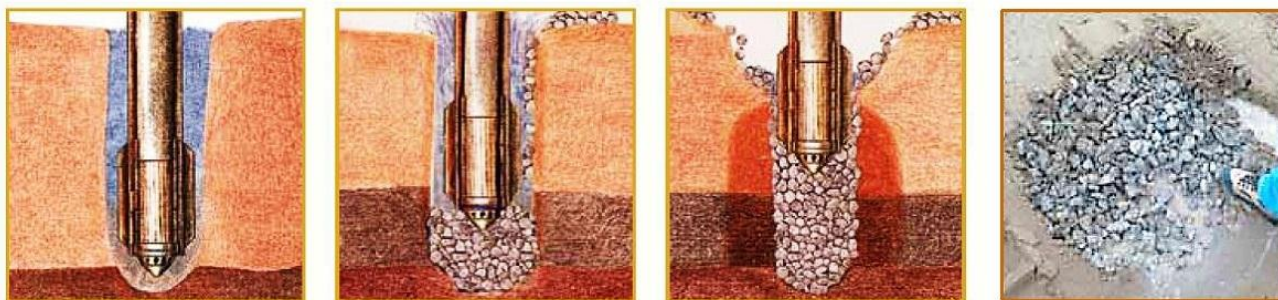
Подготовка ,
подача ПГС
щебня и бетона

Образование
скважины в грунте
путем сбрасывания
трамбовки

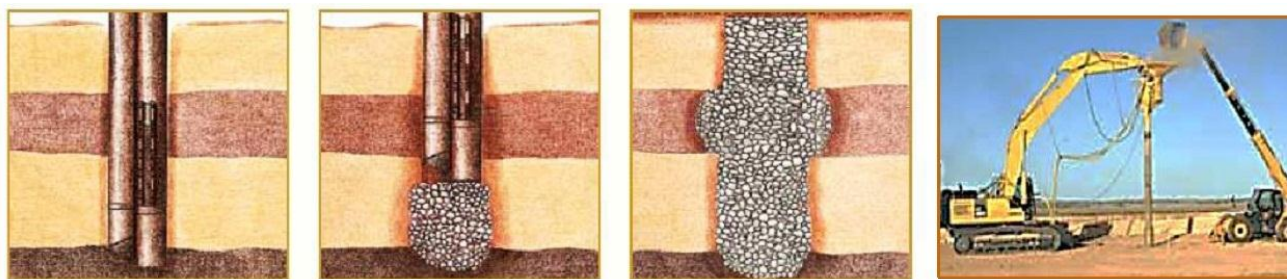
Подача ПГС, щебня или
бетона в скважину и
уплотнение грунта при
сбрасывании трамбовки

Устройство колонн уплотнения из щебня или песка методом виброфлотации

Устройство щебеночных свай с верхней подачей щебня



Устройство щебеночных свай с нижней подачей щебня

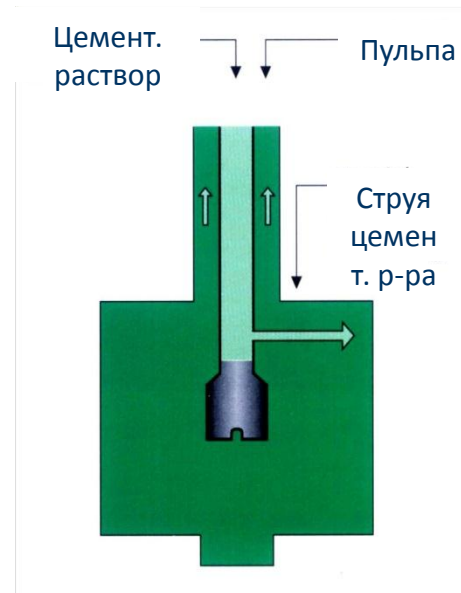


Установка с
рабочим
органом:
виброфлотом

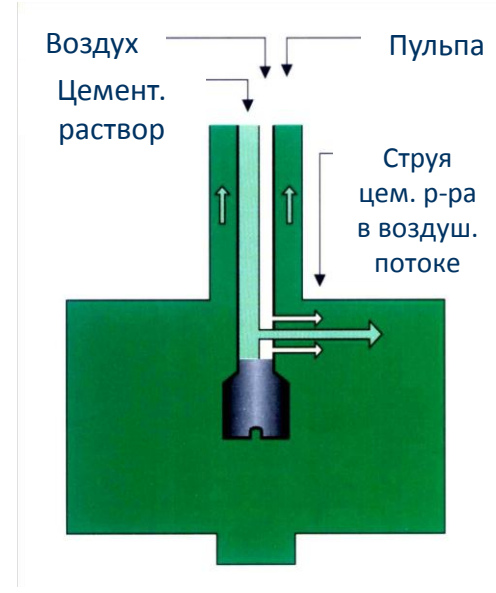
Устройство грунтоцементных колонн с помощью струйной технологии



Установка для устройства грунтоцементных свай по технологии **Jet grouting**



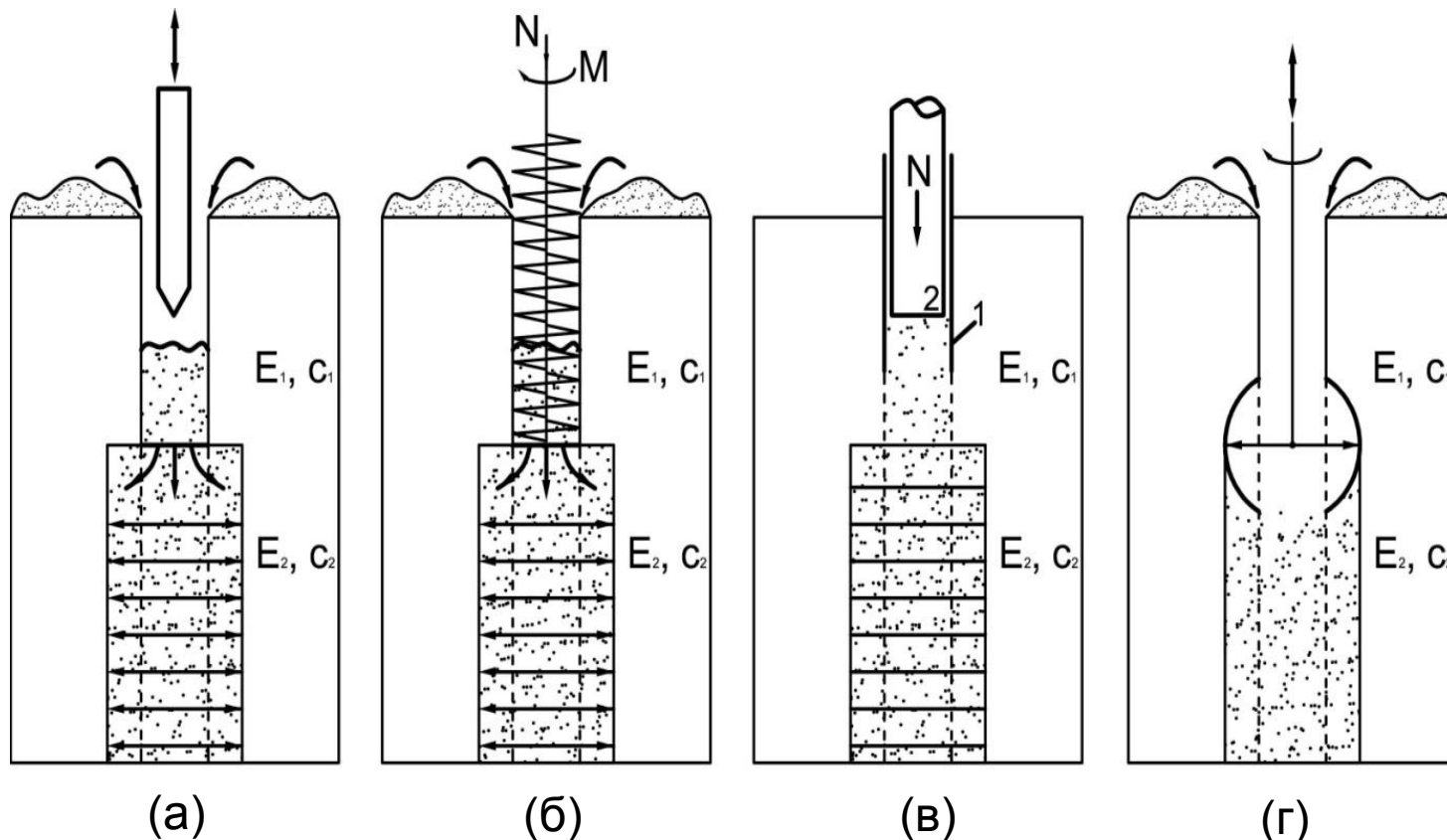
Принципиальная схема технологии **Jet 1**



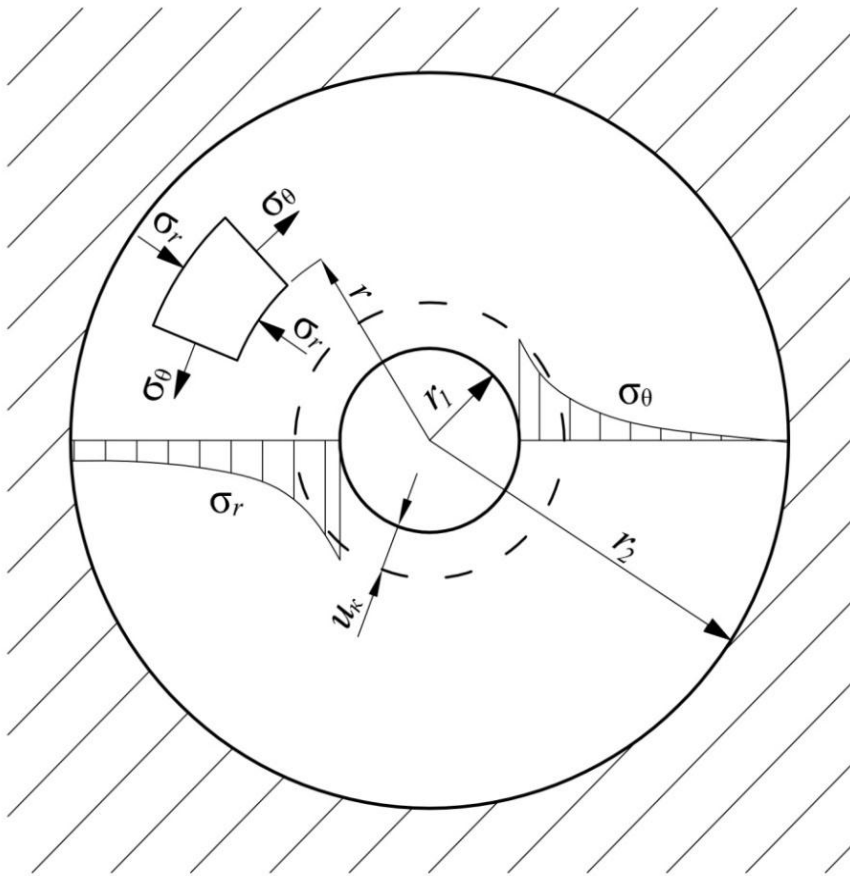
Принципиальная схема технологии **Jet 2**

Аналитические решения задач о НДС слабого грунта, преобразуемого сваями-дренами

Расширение лидирующей скважины в процессе изготовления свай для создания преднапряженного состояния



Схематическое представление глубинного уплотнения слабого водонасыщенного грунта и устройства песчано-гравелистой свай-дрены по различным технологиям: а - глубинной трамбовки; б - шнеком; в - задавливанием; г - ротором



Уравнение **равновесия** для элементарного объема записывается в виде:

$$\sigma_r - \sigma_\theta + r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0$$

где r – расстояние от оси симметрии скважины.

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0$$

где u – перемещение в радиальном направлении.

Зависимость между напряжениями и перемещениями:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{du}{dr} + \nu \frac{u}{r} \right) \quad \sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{u}{r} + \nu \frac{du}{dr} \right)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)$$

Схема расширения лидирующей скважины в процессе изготовления сваи

Общее решение уравнения (3.2)
записывается в виде:

$$u = Ar + \frac{B}{r}$$

где A, B – постоянные интегрирования,
определяемые из граничных условий:

$$\begin{cases} u(r = r_1) = u_k \\ u(r = r_2) = 0 \end{cases}$$

где r_1 – радиус скважины; r_2 – радиус зоны влияния; u_k – расширение радиуса скважины

$u_k = r_k - r_1$ r_k – радиус сваи после расширения скважины.

$$A = \frac{u_k r_1}{r_1^2 - r_2^2} \quad B = -\frac{u_k r_1 r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} \quad \longrightarrow \quad u(r) = \frac{u_k r_1}{r_1^2 - r_2^2} \left(r - \frac{r_2^2}{r} \right)$$

Используя (3.3), определим напряжения в грунтовом массиве:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r(r) &= \frac{E}{1-\nu^2} \frac{u_k r_1}{r_1^2 - r_2^2} \left[1 + \nu + \frac{r_2^2}{r^2} (1 - \nu) \right] \\ \sigma_\theta(r) &= \frac{E}{1-\nu^2} \frac{u_k r_1}{r_1^2 - r_2^2} \left[1 + \nu - \frac{r_2^2}{r^2} (1 - \nu) \right] \end{aligned} \right\} \quad \sigma_r(r) - \sigma_\theta(r) = \frac{4G \cdot u_k r_1 r_2^2}{(r_1^2 - r_2^2) r^2}$$

Ввиду того, что расширение радиуса скважины u_k соизмеримо с радиусом самой скважины r_1 необходимо рассчитать напряжения σ_r и σ_θ с помощью разбиения конечного перемещения u_k на n шагов. Таким образом, разбивая величину расширения скважины u_k на n шагов и совершая определенные преобразования, определим конечные напряжения на контакте свая–грунт в виде суммы напряжений каждого из последовательных шагов.

$$\sigma_r = \frac{E \cdot u_n}{1 - \nu^2} \sum_{i=1}^n \frac{r_{1,i}^2 (1 + \nu) + r_2^2 (1 - \nu)}{(r_{1,i}^2 - r_2^2) r_{1,i}}$$

$$\sigma_\theta = \frac{E \cdot u_n}{1 - \nu^2} \sum_{i=1}^n \frac{r_{1,i}^2 (1 + \nu) - r_2^2 (1 - \nu)}{(r_{1,i}^2 - r_2^2) r_{1,i}}$$

где n – количество шагов разбиения; $r_{1,i}$ – радиус скважины в i -ый шаг; u_n – расширение радиуса скважины за один шаг

$$u_n = \frac{u_k}{n}$$

Причем радиус скважины каждого последующего шага

$$r_{1,i+1} = r_{1,i} + u_n$$

Так при расширении скважины радиусом $r_1=0.2$ м на $u_k=0.06$ м при модуле деформации грунта $E=15$ МПа, коэффициенте Пуассона $\nu=0.3$ и радиусе влияния $r_2=1$ м согласно (3.4) и (3.5) на контакте свая-грунт возникают радиальные напряжения $\sigma_r=-3.33$ МПа и тангенциальные напряжения $\sigma_\theta=3.19$ МПа.

Учет упрочнения грунта в виде возрастания модуля деформации E на каждом шаге разбиения

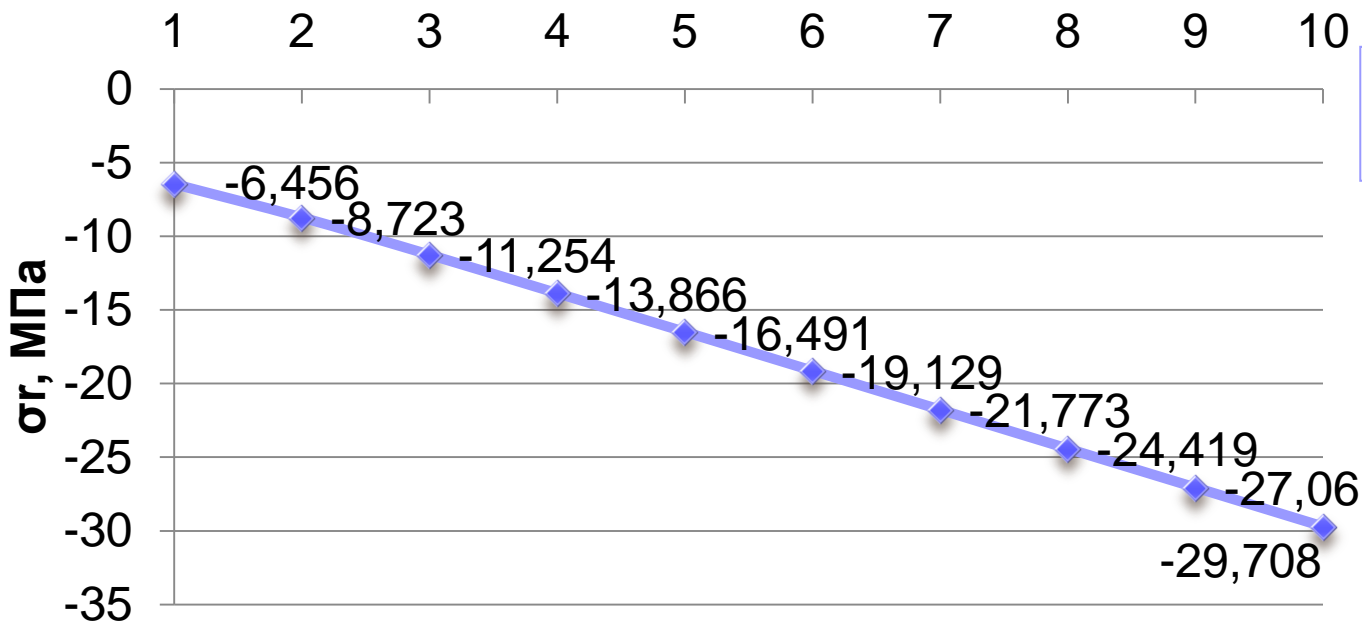
$$E_i = E \cdot i$$

$$\sigma_r = \frac{u_n}{1-\nu^2} \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot r_{1,i}^2 (1+\nu) + E_i \cdot r_2^2 (1-\nu)}{(r_{1,i}^2 - r_2^2) r_{1,i}}$$

$$\sigma_\theta = \frac{u_n}{1-\nu^2} \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot r_{1,i}^2 (1+\nu) - E_i \cdot r_2^2 (1-\nu)}{(r_{1,i}^2 - r_2^2) r_{1,i}}$$

$$\sigma_m = \frac{u_n}{1-\nu} \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot r_{1,i}}{(r_{1,i}^2 - r_2^2)}$$

Количество шагов разбиения, n

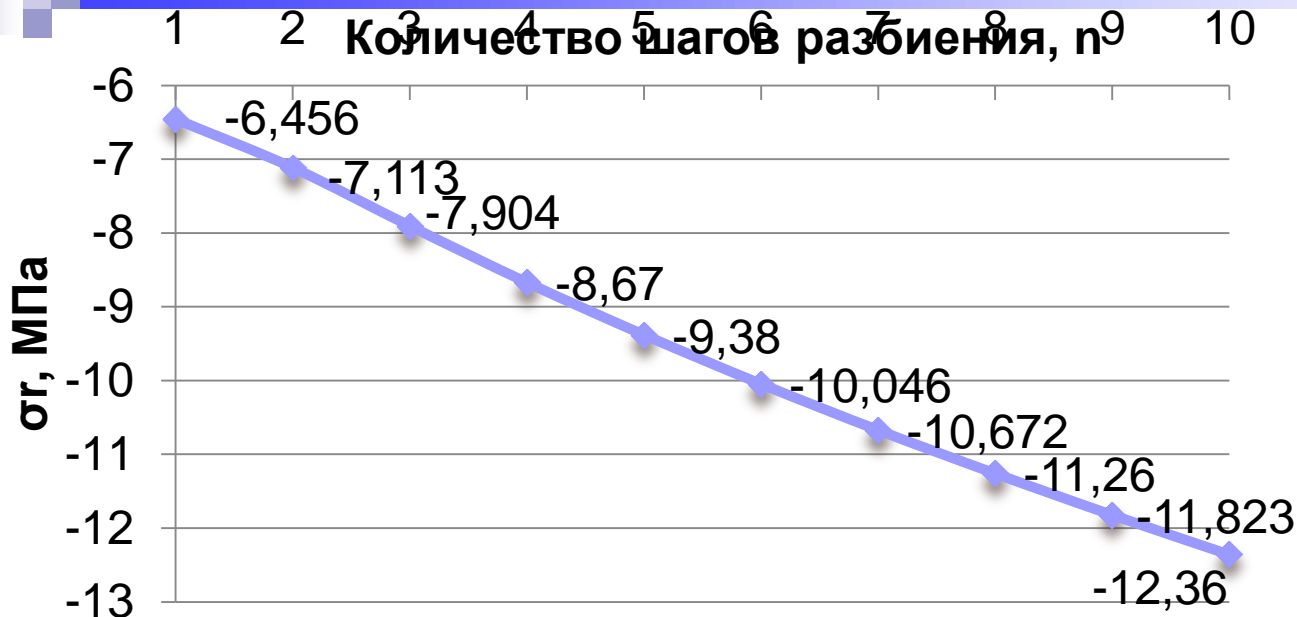


$$E_i = E \cdot i$$

График зависимости $\sigma_r = f(n)$ при возрастании E



График зависимости $\sigma_m = f(n)$ при возрастании E



$$E_i = E \cdot \sqrt{i}$$

График зависимости $\sigma_r = f(n)$ при возрастании E

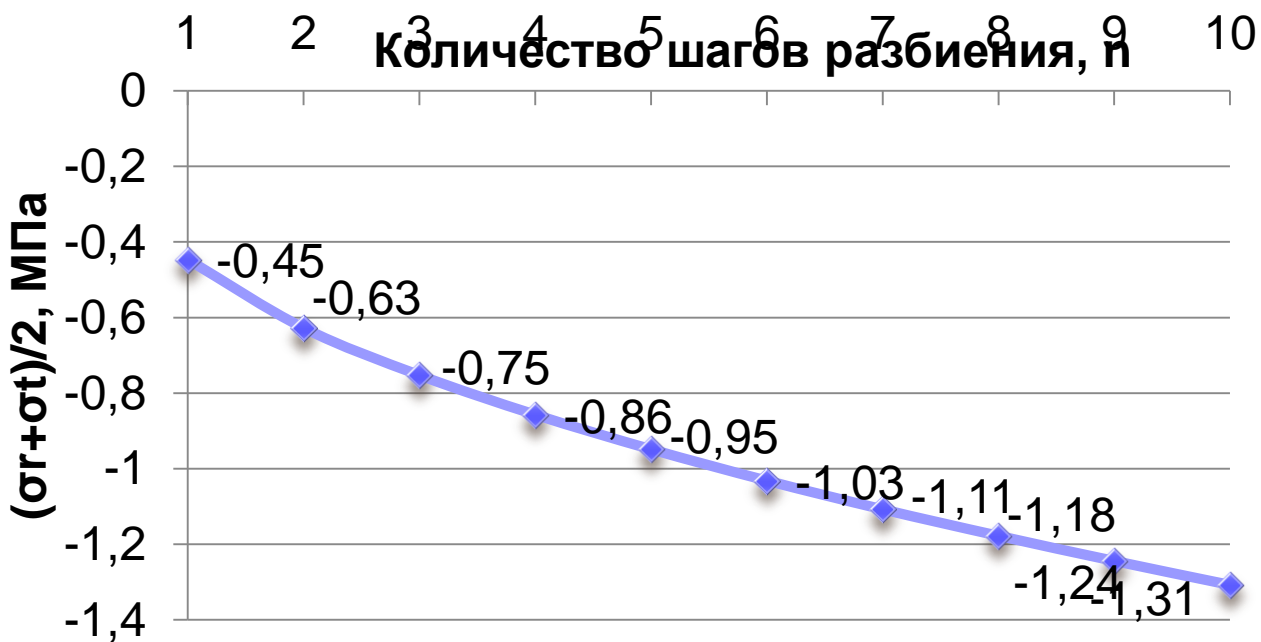


График зависимости $\sigma_m = f(n)$ при возрастании E

НДС сваи и окружающего грунта в составе свайно-плитного фундамента с учетом роста диаметра сваи ($\sigma_z \neq const$)

Физические уравнения:

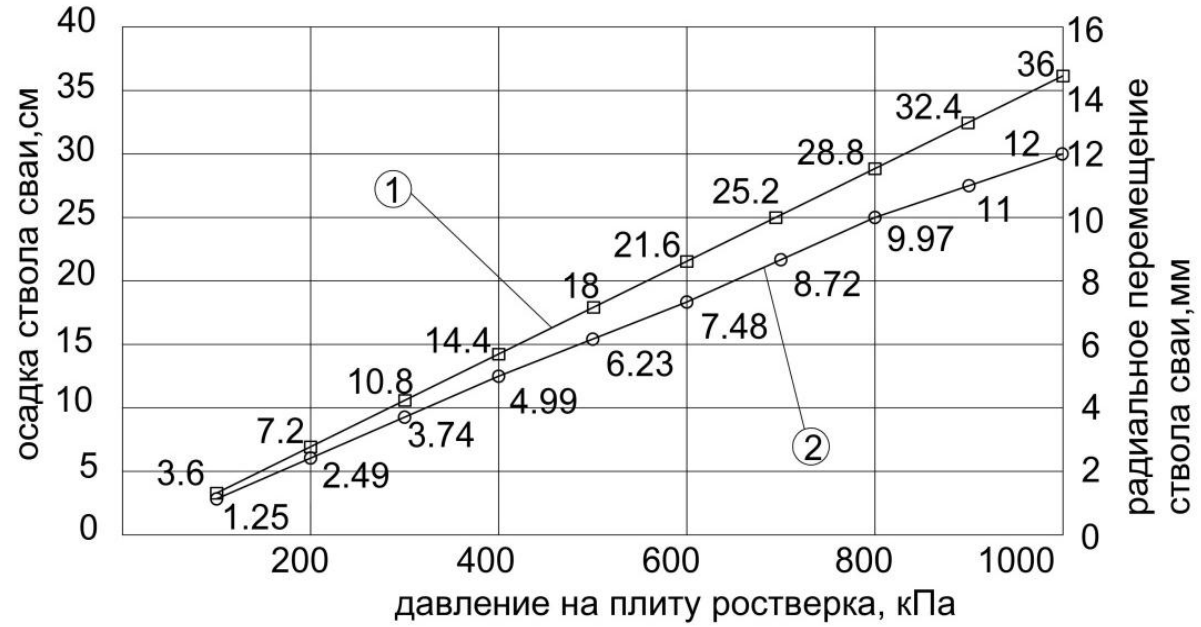
$$\sigma_r = 2G \left(\frac{du}{dr} + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \varepsilon_v \right) \quad \sigma_\theta = 2G \left(\frac{u}{r} + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \varepsilon_v \right) \quad \sigma_z = 2G \left(\frac{dw}{dz} + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \varepsilon_v \right)$$

Геометрические уравнения:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}; \quad \varepsilon_z = \frac{dw}{dz}$$

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} = \frac{u}{r^2}$$

$$u_1 \left(\frac{I}{K} + \frac{H}{F} \right) = p \left(\frac{G}{F} + \frac{J}{K} \right)$$



$$F = \frac{1}{E_1} - \frac{2\nu_1 \cdot D}{E_1 \cdot C} + \frac{\omega}{(1-\omega) \cdot E_2} - \frac{\nu_2 \cdot 2 \cdot \omega \cdot \xi_2}{E_2 \cdot (1-\omega)(1+\nu_2) \cdot \nu_2'}$$

$$J = \frac{\nu_2 \cdot r_2}{(1-\omega) \cdot E_2} - \frac{r_2 \cdot \xi_2}{E_2(1+\nu_2) \cdot \nu_2'(1-\omega)} - \frac{\xi_2 \cdot \nu_2 \cdot r_2}{(1+\nu_2) \cdot \nu_2' \cdot E_2}$$

$$G = \frac{1}{(1-\omega) \cdot E_2} - \frac{2 \cdot \nu_1 \cdot E}{E_1 \cdot C} - \frac{\nu_2 \cdot 2 \cdot \xi_2}{E_2 \cdot (1-\omega)(1+\nu_2)}$$

$$I = \frac{r_2 \cdot r_1 \cdot 2 \cdot \xi_2}{(1+\nu_2) \cdot \nu_2'(r_1^2 - r_2^2)} + \frac{r_1 \cdot 2 \cdot \nu_2 \cdot r_2}{(1+\nu_2) \cdot \nu_2' \cdot (r_1^2 - r_2^2)}$$

$$H = \frac{\nu_2}{E_2} \left(\frac{2 \cdot E_2 \cdot r_1}{(r_1^2 - r_2^2) \cdot \nu_2'} + \frac{2 \cdot E_2 \cdot r_1 \cdot \xi_2}{(r_1^2 - r_2^2) \cdot \nu_2'} \right)$$

$$K = \frac{\omega \cdot \xi_2 \cdot \nu_2 \cdot r_2}{(1+\nu_2) \nu_2' \cdot E_2} + \frac{\omega \cdot r_2 \cdot \xi_2}{E_2 \cdot (1+\nu_2) \cdot \nu_2' \cdot (1-\omega)} - \frac{\omega \cdot r_2 \cdot \nu_2}{(1-\omega) E_2}$$

Учет релаксации напряжений грунтов после расширения скважины

Для описания процесса релаксации в диссертации используется уравнение **Максвелла** в виде:

$$\dot{\gamma}_i = \frac{\tau_i}{\eta(t)} + \frac{\dot{\tau}_i}{G}$$

$$\dot{\gamma}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} (\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta) \quad \tau_i = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\sqrt{3}} = \frac{4}{\sqrt{3}} Gu_k \sum_{i=1}^n \frac{r_2^2}{(r_{1,i}^2 - r_2^2) r_{1,i}}$$

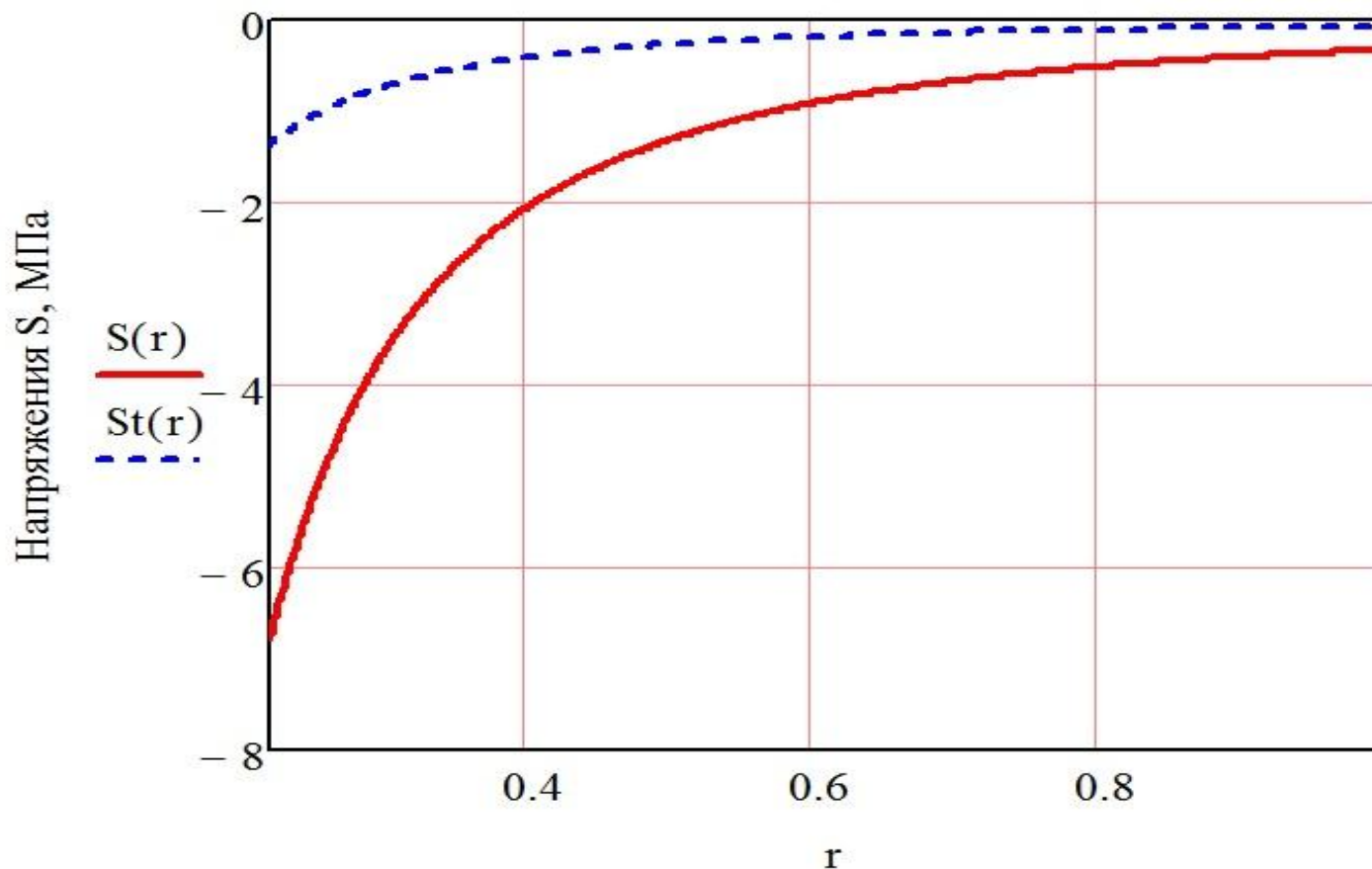
Учитывая, что $u = \text{const}$, и $\sigma_r - \sigma_\theta = S$ получаем уравнение вида:

$$\frac{S}{\eta(t)} + \frac{\dot{S}}{G} = 0$$

$\eta(t) = \eta_0 e^{\alpha t}$ где α – параметр упрочнения.

$$S(t) = S_0 \exp \left\{ \frac{G}{\eta_0 \alpha} (e^{-\alpha t} - 1) \right\}$$

$$S_0 = \sigma_{r0} - \sigma_{\theta0}$$



Расстояние от поверхности сваи, r

График зависимости $S(r)$ – напряжения в начальный момент времени после расширения скважины, $St(r)$ – остаточные напряжения после релаксации

При принудительном расширении лидирующей скважины в окружающем водонасыщенном грунте возникает избыточное поровое давление:

$$\sigma_m = ((\sigma_z + \sigma_\Theta)(1 + \nu_u))/3 \quad u_w(r, 0) = \sigma_m(0)\beta_0$$

Это избыточное поровое давление будет рассеиваться во времени в соответствии с уравнением осесимметричной консолидации в условиях плоской деформации

$$\frac{\partial \bar{u}_w}{\partial t} = c_r \left(\frac{\partial u_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial 2u_w}{\partial r^2} \right)$$

Решение этого уравнения при $\beta_0=1$ получено Р.А. Барроном и имеет вид:

$$u_w(r, t) = \frac{p}{f(n_1)} e^{\frac{-2T_r}{f(n_1)}} \left(\ln \frac{r}{r_1} - \frac{1}{2n_1^2} \left(\frac{r^2}{r_1^2} - 1 \right) \right)$$

$$n_1 = \frac{r_1}{r_2}; \quad T_r = \frac{c_r t}{4r_2^2}; \quad f(n_1) = \frac{n_1^2}{n_1^2 - 1} \ln n_1 - \frac{3n_1^2 - 1}{4n_1^2}; \quad c_r = \frac{k_r}{\gamma_w m_v}$$

На основе решения Баррона Р.А. получено решение влияния скорости нагружения уплотняемого слоя $p(t)$:

$$p(t) = p[1 - \exp(-\alpha_1 t)]$$

$$u_w(r, t) = \frac{p\alpha_1}{(\omega - \alpha_1)f(n_1)} \left\{ \ln \frac{r}{r_1} - \frac{1}{2n_1^2} \left(\frac{r^2}{r_1^2} - 1 \right) \right\} (\exp[-\omega t] - \exp[-\alpha_1 t]) \quad (3.10)$$

$$\omega = \frac{2}{Fc_{n_1}} \cdot \frac{c_r}{r_2^2}$$

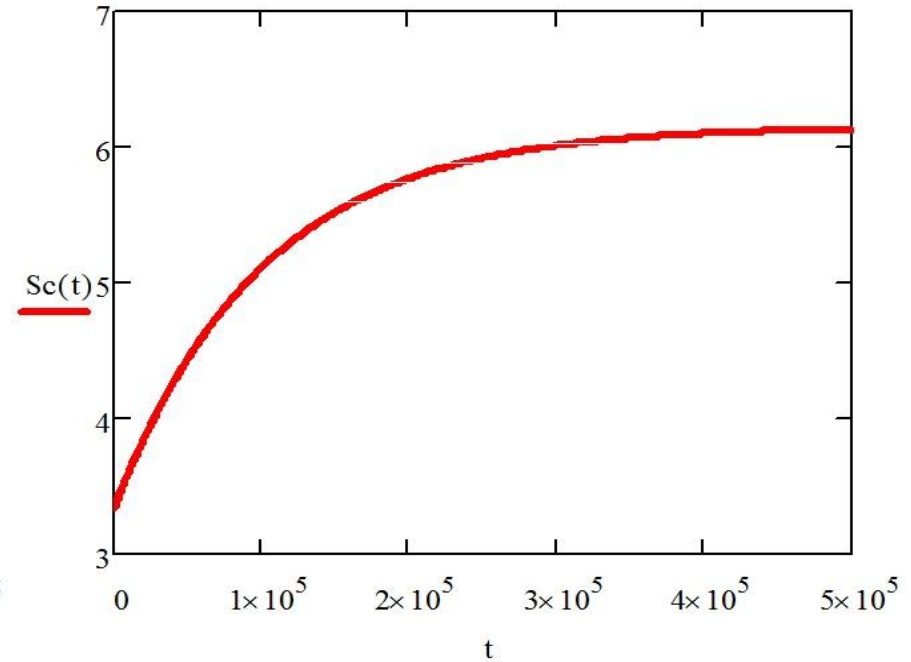
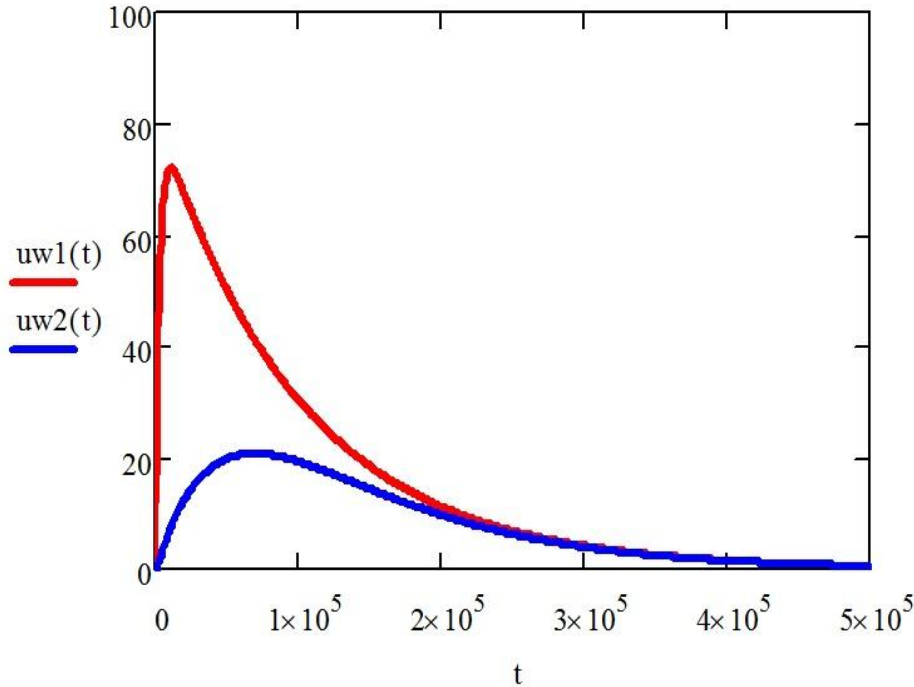
Из этого решения следует, что при начальном значении порового давления $u_w(0, r) = 0$ и при заданном росте $p(t)$ с затухающей скоростью согласно (3.9) получаем экстремальное развитие избыточного порового давления во времени (3.10). Причем при $\alpha \ll \omega$ не возникает избыточное поровое давление, т.е. $u_w(0, r) \rightarrow 0$

Тогда осадку сваи можно определить по формуле:

$$S_c(t) = \sigma_c(t)m_c l = \left[\frac{p}{\omega} - \sigma_2^* (1 - e^{-\alpha t}) \frac{1 - \omega}{\omega} \right] m_c l$$

Графики изменения порового давления в окружающем грунте на радиусе $r=r_2$ при $\sigma_2(t) = \sigma_2 = \text{const}$ $\sigma_2(t) = \sigma_2^* (1 - e^{-\alpha t})$

а также изменение осадки ростверка во времени.



Изменение порового давления в окружающем грунте на радиусе $r=r_2$ при

$$\sigma_2(t) = \sigma_2(0) = \text{const} \quad (1)$$

$$\sigma_2(t) = \sigma_2^* (1 - e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

Изменение осадки ростверка во времени с учетом переменности нагрузки на окружающий грунт $\sigma_2(t)$, на сваю $\sigma_c(t)$

Методика определения приведенного модуля деформации усиленного композитного основания

1. При нагружении композитного основания, состоящего из колонн уплотнения и уплотненного грунта вокруг них, преобразованный массив будет работать **совместно**.
2. Осадка колонны уплотнения может быть **больше**, чем окружающего грунта на уровне нижнего конца колонн. То есть может происходить так называемое **продавливание нижнего слоя**, величина которого зависит от деформационных характеристик массива грунта под подошвой колонн.
3. Колонна относительно **сжимаема** и на уровень ее подошвы передается максимум 20% от нагрузки на оголовке (**эффект падения напряжения в стволе** свай в зависимости от жесткости и длины давно известен в России и за рубежом, подтвержден многочисленными опытными данными и имеет теоретическое обоснование).

Расчет модуля деформации E щебеночной колонны и определение приведенного модуля деформации композитного преобразованного основания (ячейки)

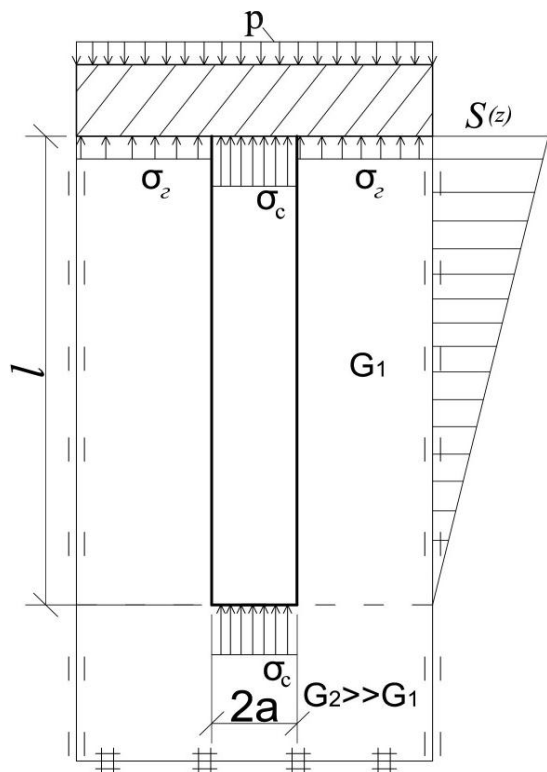


Рис.7 Расчетная схема для определения приведенного модуля ячейки уплотненного слоя грунта толщиной

$$l = l_c$$

при $G_2 \gg G_1$

$$G_2 \gg G_1$$

где G_2 - модуль сдвига грунта под подошвой щебеночной колонны;

G_1 - модуль сдвига грунта над подошвой щебеночной колонны;

В соответствии с представленной схемой можно записать основные уравнения, описывающие связь напряжений и перемещений в расчетной ячейке между собой:

а) уравнение равновесия:

$$p = \sigma_c \cdot \frac{a^2}{b^2} + \sigma_2 \cdot \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)$$

где σ_c - напряжение в стволе щебеночной колонны, кПа;

σ_2 - напряжение в грунте на уровне подошвы колонны, кПа;

p - внешняя равномерно-распределенная нагрузка на штамп, кПа;

б) осадка грунта:

$$S_2 = \sigma_2 \cdot m_2 \cdot l$$

где m_2 - коэффициент относительной сжимаемости грунта, кПа^{-1} ;

$$m_2 = \frac{\beta}{E_2}$$

в) осадка щебеночной колонны:

$$S_c = \sigma_c \cdot m_c \cdot l$$

где m_2 - коэффициент относительной сжимаемости щебеночной колонны, кПа⁻¹;

г) равенство вертикальных перемещений на уровне подошвы плиты:

$$S_c = S_2 = S_m$$

S_m - вертикальное перемещение расчетной ячейки в целом на уровне низа плиты ростверка.

Используя данные выражения и произведя необходимые преобразования, получим выражение для определения коэффициента относительной сжимаемости расчетной ячейки в целом:

$$\bar{m} = \frac{m_c \cdot m_2}{m_2 \cdot \lambda + m_c(1 - \lambda)} \quad \text{где} \quad \lambda = \frac{a^2}{b^2}$$

Исходя из выражения (8.7) можно определить приведенный модуль деформации всей расчетной ячейки (композитного массива, состоящего из щебеночной колонны и окружающего грунта):

$$\bar{E} = \beta / \bar{m} \quad \bar{E} = \omega E_c + (1 - \omega) E_2$$

Также из полученного решения можно записать выражения для нахождения напряжений в стволе колонны и в окружающем грунте:

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot m_c}{m_2 \cdot \lambda + m_c(1 - \lambda)}$$

$$\sigma_c = \frac{p \cdot m_2}{m_2 \cdot \lambda + m_c(1 - \lambda)}$$

Учет упругопластических свойств грунтовой колонны

Из анализа (5.9) и решения НДС ячейки следует, что грунтовая колонна несет значительную часть нагрузки от ростверка. Следовательно, возникает необходимость определения его НДС с учетом упруго-пластических свойств аналитическим методом.

В условиях трехосного сжатия, в котором находится грунтовая колонна, нелинейную продольную деформацию ее можно определить на основе уравнения **Генки**, т.е. имеем:

$$\varepsilon_{z1} = \chi(\sigma_{z1} - \sigma_m) + \varepsilon_m$$

ε_m σ_m - средняя объемная деформация и среднее напряжение, соответственно, причем:

$$\chi = \gamma_i / 2\tau_i \quad \varepsilon_m = \sigma_m / K$$

В качестве расчетной для описания упруго-пластической деформации примем модифицированное уравнение Тимошенко в виде:

$$\gamma_i = \frac{\tau_i}{G^e} \frac{\tau_i^*}{\tau_i^* - \tau_i}$$

τ_i τ_i^* интенсивности действующих касательных напряжений и её предельное значение, соответственно.

$$\tau_i^* = \sigma_m \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + c_i$$

$$\tau_i = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sqrt{3}} \qquad \sigma_m = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$$

Из (5.13) можно определить:

$$\chi = \frac{1}{2G^e} \frac{\tau_i^*}{\tau_i^* - \tau_i}$$

$$\sigma_{r2} = \sigma_3 \longrightarrow \tau_i = \frac{\sigma_{z1}}{\sqrt{3}} - \frac{E_2 \cdot A \cdot 2}{(1 + \nu_2) \cdot \nu_2'} + \frac{\sigma_{z2} \cdot \xi_2}{(1 + \nu_2) \cdot \nu_2'}$$

Деформацию окружающего грунта определим исходя из линейной зависимости:

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{p}{1 - \omega} - \sigma_{z1} \frac{\omega}{1 - \omega} \right) m_2$$

С другой стороны:

$$\varepsilon_{z1} = \frac{1}{G^e} \frac{\tau_i^*}{\tau_i^* - \tau_i} (\sigma_{z1} - \sigma_m) + \frac{\sigma_m}{K}$$

$$\frac{1}{G^e} \frac{\tau_i^*}{\tau_i^* - \tau_i} (\sigma_{z1} - \sigma_m) + \frac{\sigma_m}{K} = (p - \sigma_{z1}) \frac{\omega}{1 - \omega} m_2$$

В случае когда материал грунтовой сваи обладает только трением ($c = 0$) и когда в состоянии близком к предельному можно пренебречь объемными деформациями:

$$\frac{1}{G^e} \frac{\tau_i^*}{\tau_i^* - \tau_i} (\sigma_{z1} - \sigma_m) + \sigma_{z1} \cdot \frac{\omega}{1 - \omega} m_2 = p \frac{\omega}{1 - \omega} m_2$$

Нагрузка p (кН/м²)

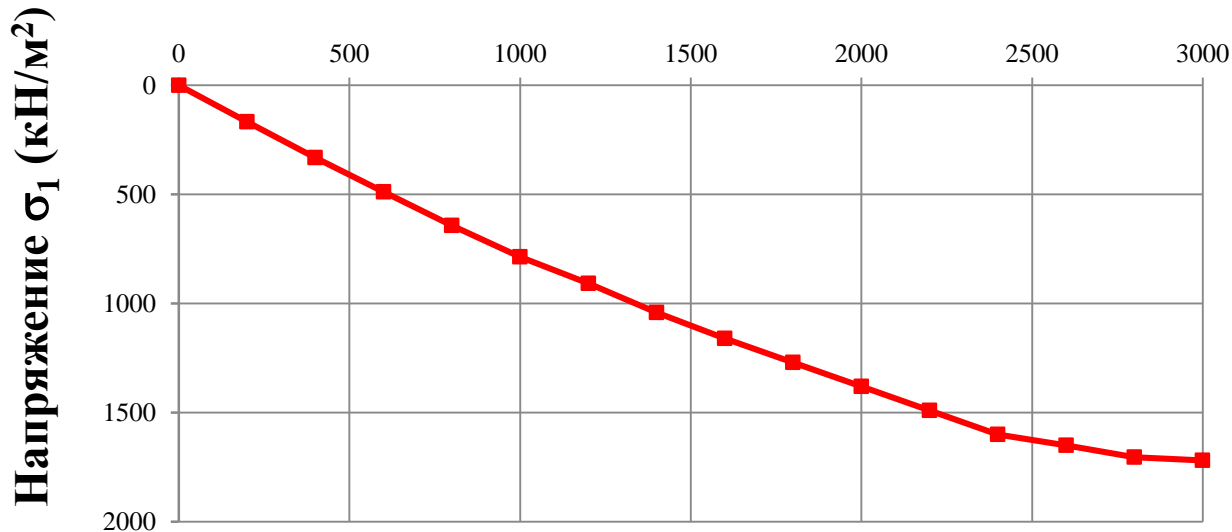


График зависимости вертикальных напряжений от нагрузки p

Нагрузка p (кН/м²)

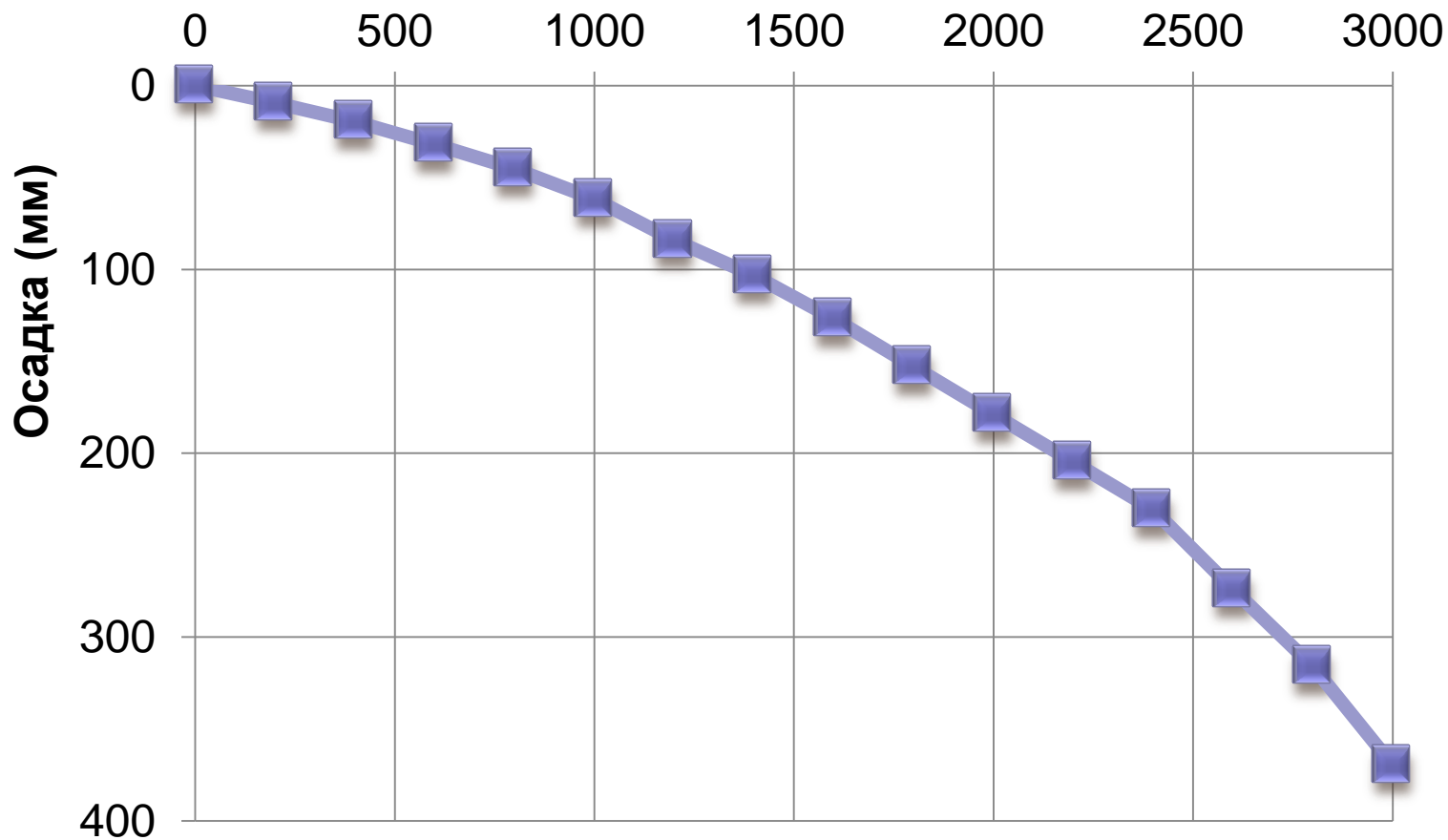
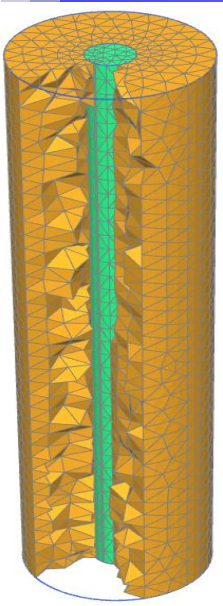
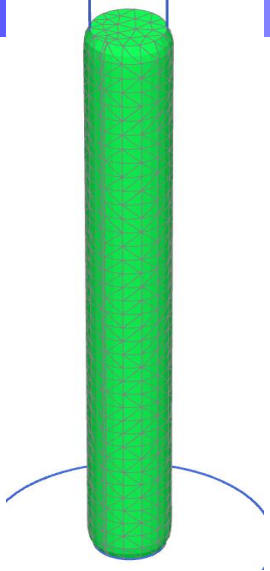


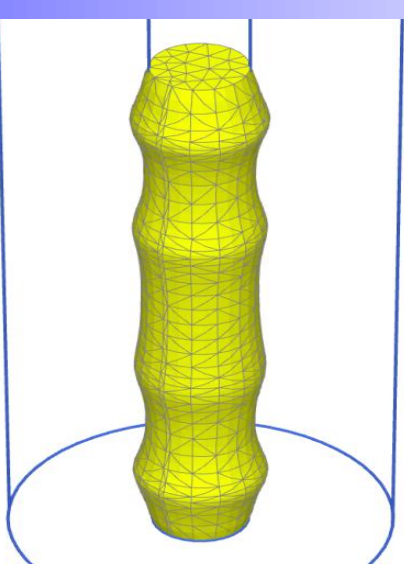
График зависимости осадки от нагрузки p



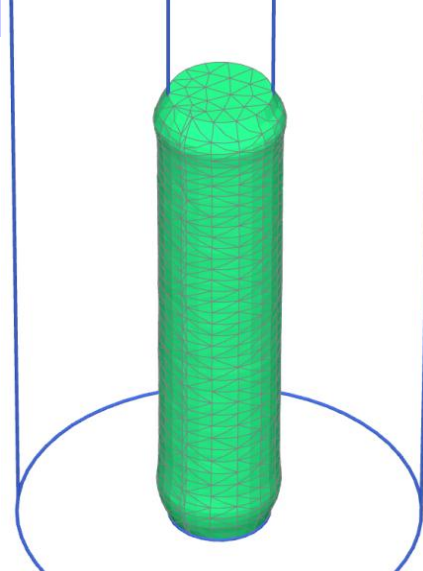
(а)



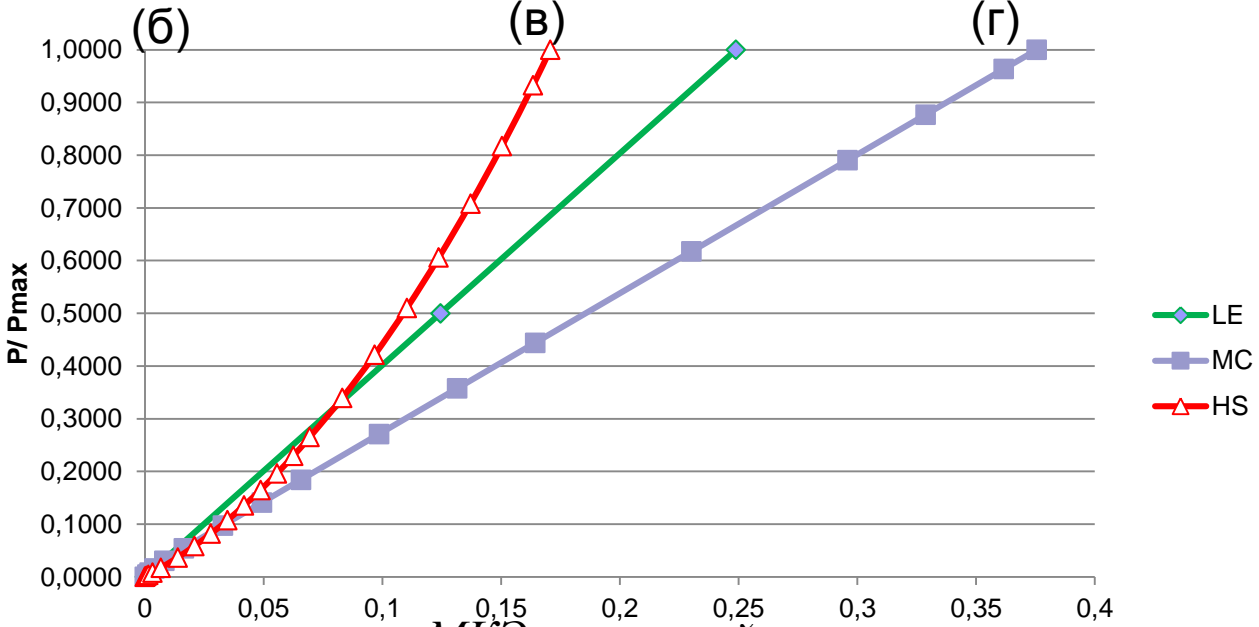
(б)



(в)

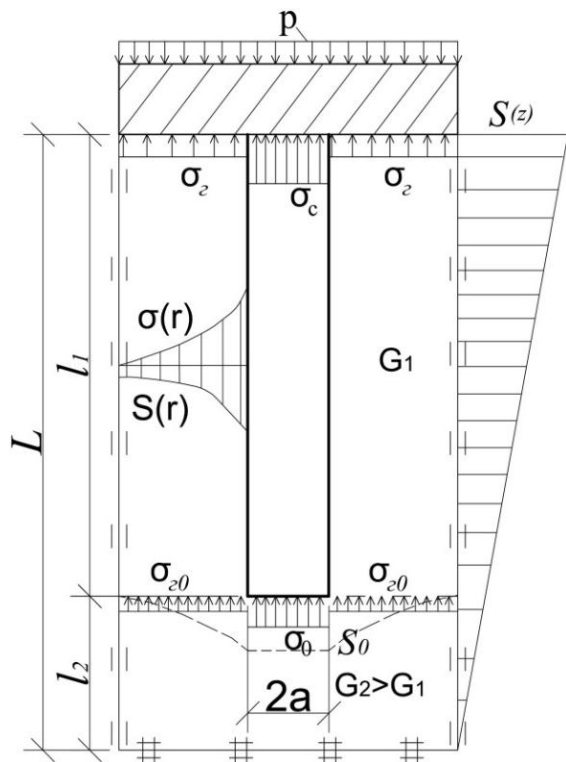


(г)



Результаты численного расчета МКЭ грунтовой колонны с учетом взаимодействия с окружающим грунтом в линейной (б) и нелинейной (в, г) постановках; д) – кривые «относительная нагрузка – деформация»

Определение приведенного модуля деформации композитного преобразованного основания с возможностью продавливания основания под подошвой щебеночной колонны



Расчетная схема для определения приведенного модуля ячейки уплотненного слоя грунта толщиной $l=L$ при $G_2 > G_1$

$$G_2 > G_1$$

Изменение касательного напряжения по радиусу расчетной ячейки носит нелинейный характер и может быть представлен выражением:

$$\tau(r) = \tau_a \cdot \frac{(b-r)^2}{(b-a)^2}$$

Перемещение от сдвиговой деформации и сдвиговая деформация связаны следующим соотношением:

$$\frac{dS(r)}{dr} = -\gamma(r) \rightarrow \frac{dS(r)}{dr} = -\frac{\tau(r)}{G}$$

Максимальное перемещение имеет место на контакте колонны и уплотняемого грунта при $r=a$:

$$S(r)^{\max} = S(a) = \frac{\tau \cdot a \cdot (b-r)^3}{3G_1(b-a)^2} \Big|_a^b = \frac{\tau_a(b-a)}{3G_1}$$

Отсюда максимальное касательное напряжение:

$$\tau_a = \frac{S(a) \cdot 3G_1}{(b-a)}$$

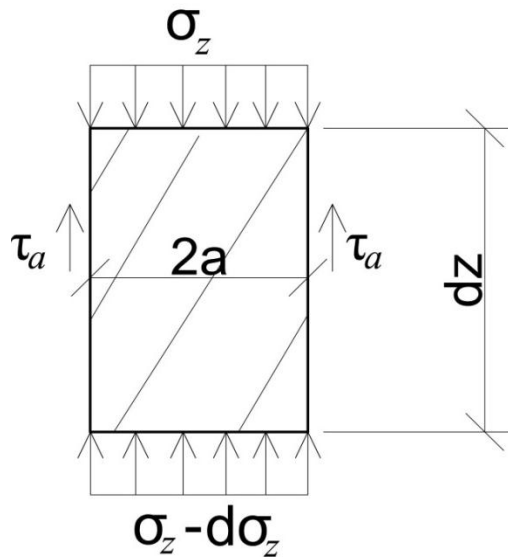


Схема распределения напряжений вдоль элементарного объема колонны длиной dz

$$\tau_a = \frac{a}{2} \frac{d\sigma_z}{dz} \rightarrow \frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{2}{a} \cdot \tau_a = \frac{2}{a} \frac{S(a) \cdot 3G_1}{(b-a)}$$

$$\sigma_z = E_c \cdot \frac{dS}{dz} \rightarrow \frac{d\sigma_z}{dz} = E_c \cdot \frac{d^2 S}{dz^2}$$

$$\frac{d^2 S}{dz^2} - \omega^2 S = 0 \quad \omega^2 = \frac{6G_1}{a(b-a)E_c}$$

Решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$S(z) = C_1 \cdot e^{\omega z} + C_2 \cdot e^{-\omega z}$$

Для нахождения констант C_1 и C_2 используются граничные условия:

1) При $z=0$ $S(z) = S_0 = \sigma_0 \cdot \frac{\pi a(1-\nu_2)}{4G_2} = \sigma_0 \cdot K_0$ Также $S_0 = C_1 + C_2$

2) При $z=l$ $\frac{dS}{dz} = \frac{\sigma_c}{E_c}$ $\frac{\sigma_c}{E_c} = \omega(C_1 \cdot e^{\omega l} - C_2 \cdot e^{-\omega l})$

$$C_1 = \left(\frac{\sigma_c}{\omega E_c} + \sigma_0 \cdot K_0 \cdot e^{-\omega l} \right) \cdot \frac{1}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}}$$

$$C_2 = \left(\sigma_0 \cdot K_0 \cdot e^{\omega l} - \frac{\sigma_c}{\omega \cdot E_c} \right) \cdot \frac{1}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}}$$

$$S(z) = \frac{\sigma_c}{\omega E_c} \left(\frac{e^{\omega z} - e^{-\omega z}}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}} \right) + \sigma_0 \cdot K_0 \left(\frac{e^{-\omega l} \cdot e^{\omega z} + e^{\omega l} \cdot e^{-\omega z}}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}} \right)$$

$$\sigma_c(z) = E_c \cdot \frac{dS}{dz} = \sigma_c \cdot \frac{(e^{\omega z} + e^{-\omega z})}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}} + \frac{\sigma_0 \cdot K_0 \cdot \omega \cdot E_c (e^{-\omega l} \cdot e^{\omega z} - e^{\omega l} \cdot e^{-\omega z})}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}}$$

$$\sigma_0 = \frac{2 \cdot \sigma_c}{e^{\omega l} + e^{-\omega l} + E_c \cdot K_0 \cdot \omega (e^{-\omega l} - e^{\omega l})} \rightarrow \sigma_0 = \sigma_c \cdot A$$

$$A = \frac{2}{e^{\omega l} + e^{-\omega l} + E_c \cdot K_0 \cdot \omega (e^{-\omega l} - e^{\omega l})}$$

На уровне верха щебеночной колонны имеет место равенство перемещений грунта под штампом и колонны, т.е.

$$S_c(l) = \frac{\sigma_c}{\omega E_c} \cdot \frac{e^{\omega l} - e^{-\omega l}}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}} + \sigma_0 K_0 \cdot \frac{2}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}}$$

$$S_2(l) = m_2 \left(pl - \frac{\lambda}{1 - \lambda} \left(\frac{\sigma_c}{\omega} \cdot \frac{e^{\omega l} - e^{-\omega l}}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}} + \sigma_0 \cdot K_0 \left(\frac{2}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}} - 1 \right) \right) \right)$$

$$E = \frac{e^{\omega l} - e^{-\omega l}}{\omega E_c (e^{\omega l} + e^{-\omega l})} + \frac{A \cdot K_0 \cdot 2}{(e^{\omega l} + e^{-\omega l})}$$

$$D = \frac{m_2 \cdot l \cdot \omega}{B + A \cdot \omega \cdot K_0 \cdot C}$$

Приведенный
коэффициент
относительной
сжимаемости:

$$\bar{m} = \frac{D \cdot E}{l}$$

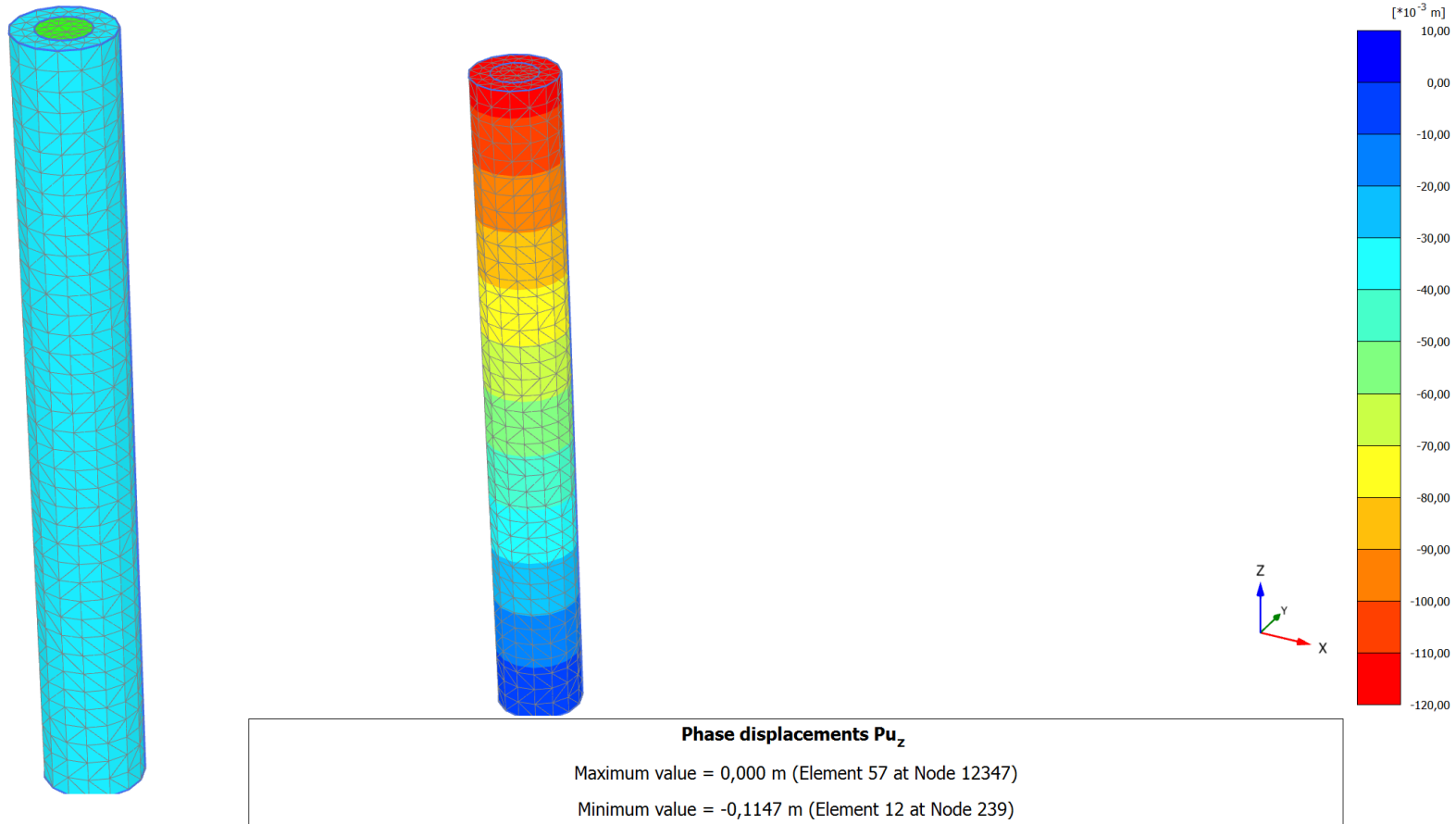
$$B = \frac{1}{E_c} \cdot \frac{e^{\omega l} - e^{-\omega l}}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}} + \frac{m_2 \cdot \lambda}{1 - \lambda} \cdot \frac{e^{\omega l} - e^{-\omega l}}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}}$$

$$C = \frac{2}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}} + \frac{m_2 \cdot \lambda}{1 - \lambda} \cdot \frac{(2 - e^{\omega l} - e^{-\omega l})}{e^{\omega l} + e^{-\omega l}}$$

Численное моделирование уплотнения основания

Расчетная
схема

Изополю вертикальных перемещений массива грунта составной ячейки, $S_{\max}=114.7$ мм

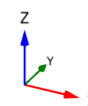
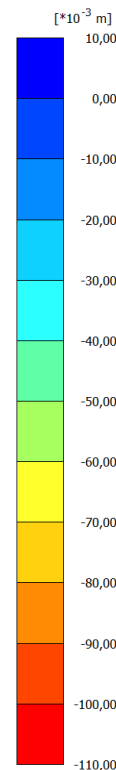
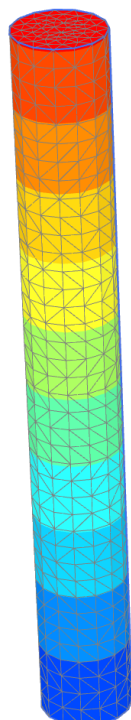
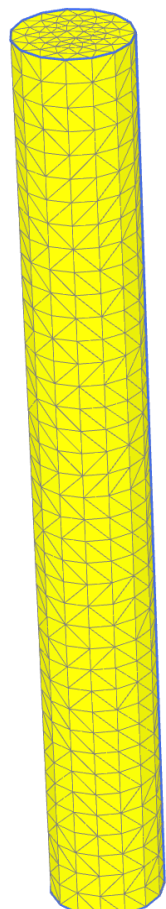


Конечно-элементная схема и изополю вертикальных перемещений
расчетной ячейки

Численное моделирование уплотнения основания

Расчетная
схема

Изополя вертикальных перемещений массива грунта приведенной ячейки с $E=40$ МПа, $S_{\max}=100.4$ мм

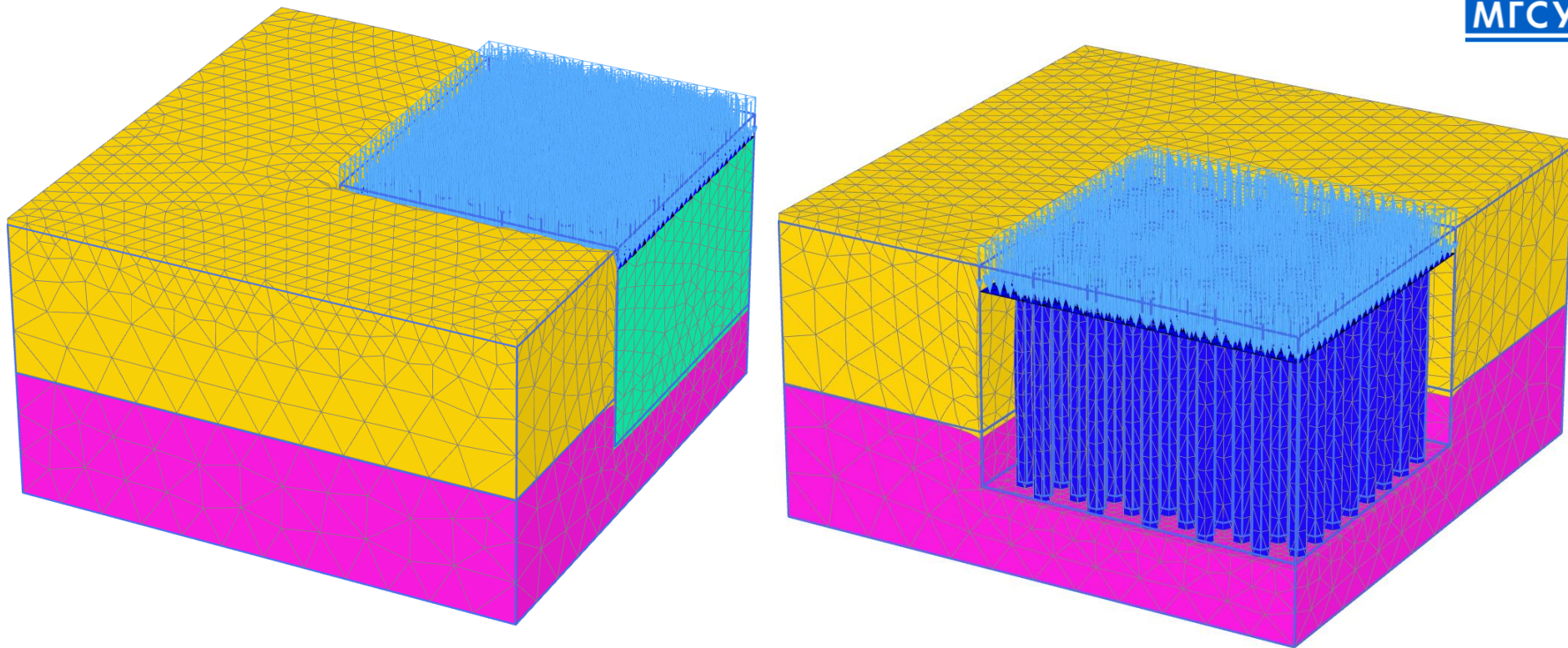


Phase displacements Pu_z

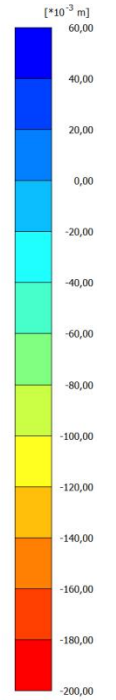
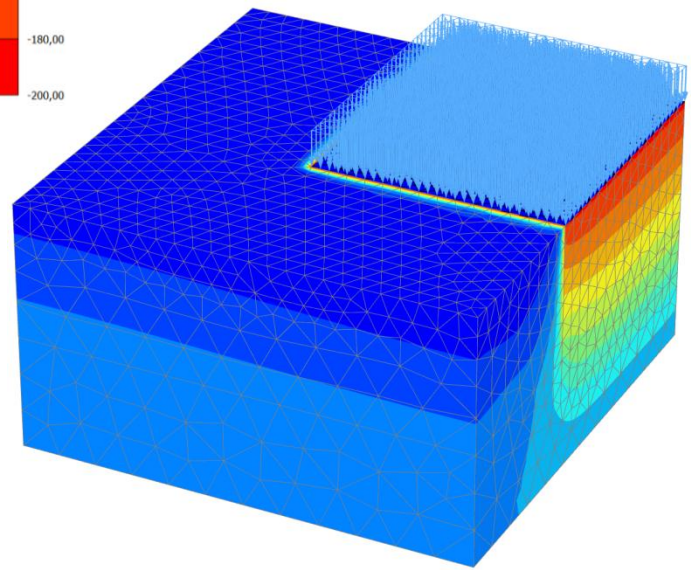
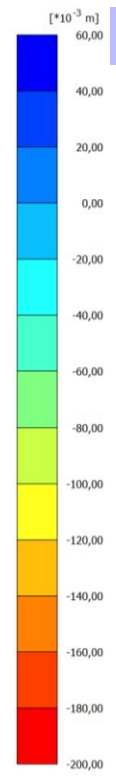
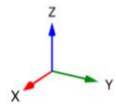
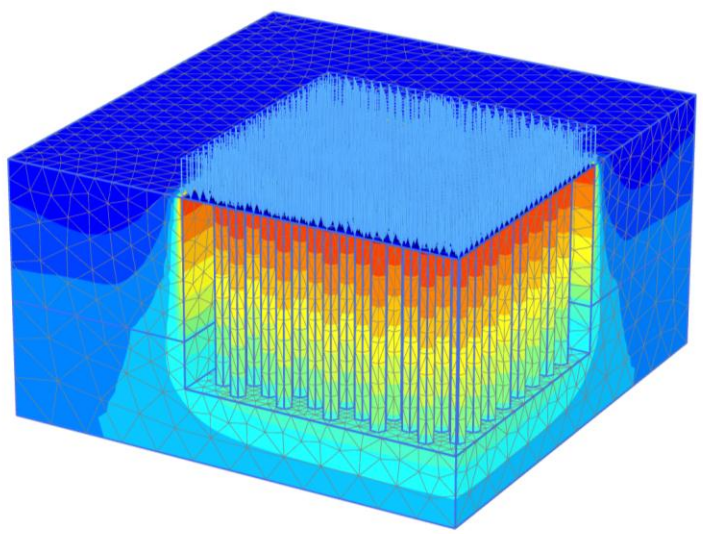
Maximum value = 0,000 m (Element 57 at Node 12347)

Minimum value = -0,1004 m (Element 5696 at Node 10)

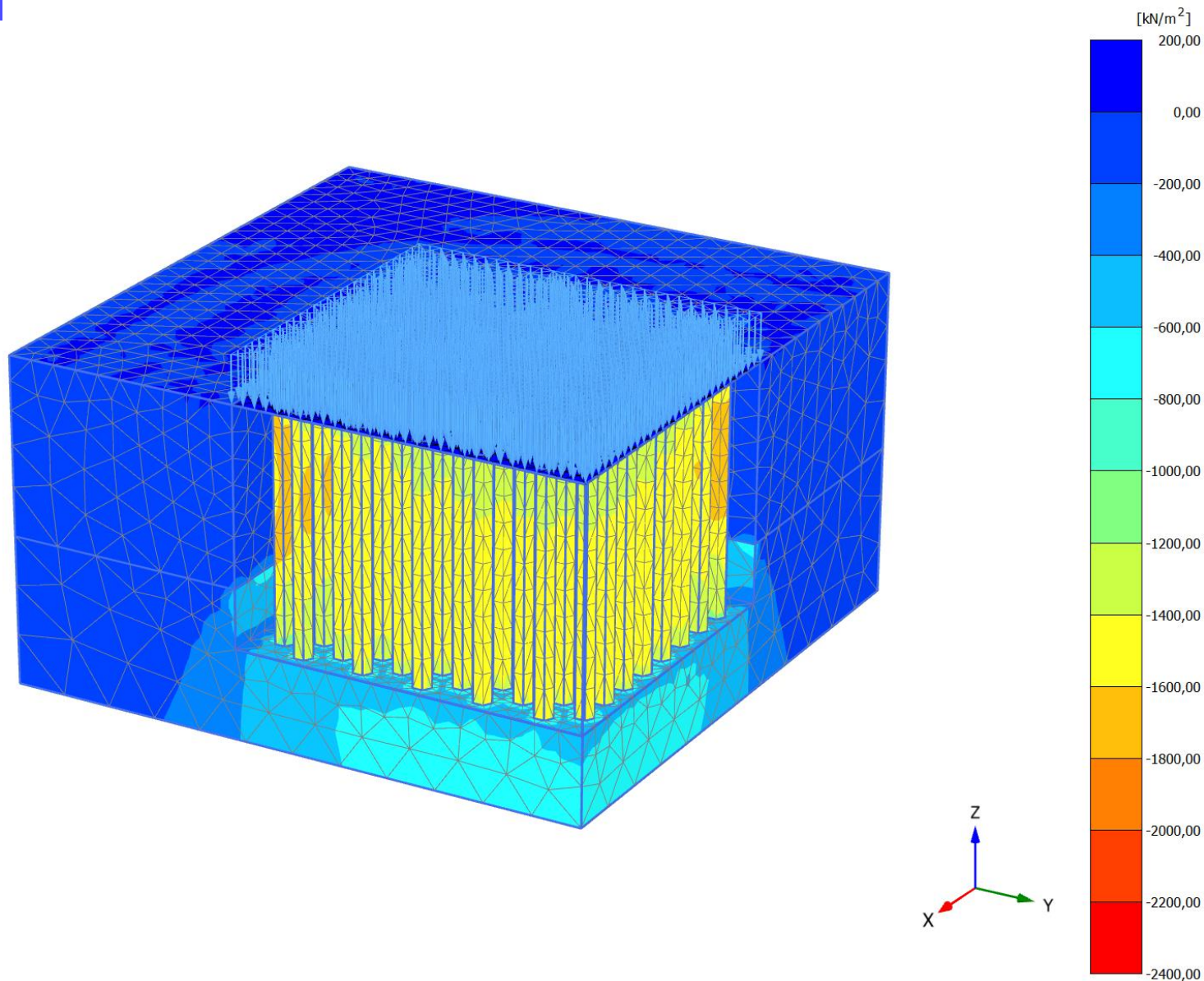
Конечно-элементная схема и изополя вертикальных перемещений
приведенного массива



Расчетная схема для определения осадки преобразованного массива
грунта колоннами уплотнения



Изополя вертикальных перемещений преобразованного массива под нагрузкой (композитное основание и приведенный массив)

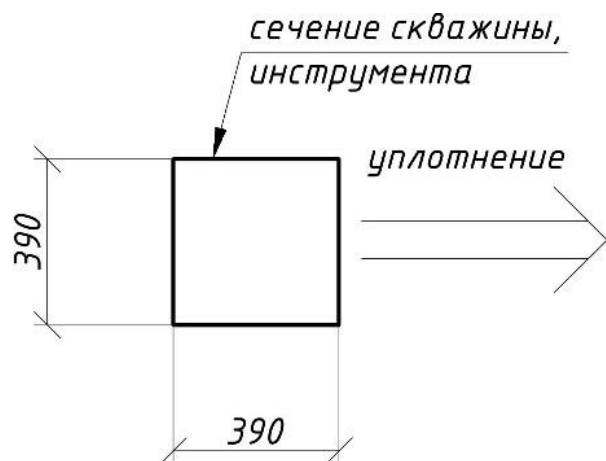
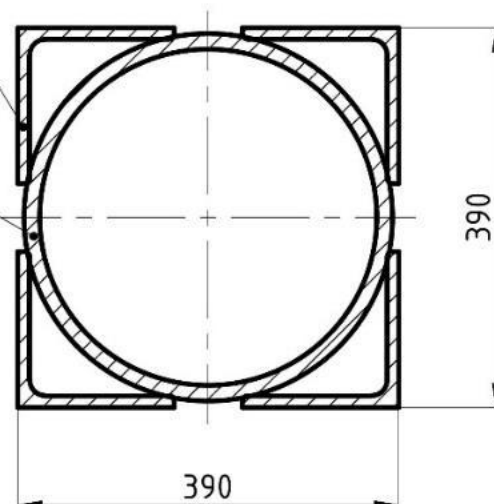


Изополя вертикальных напряжений преобразованного массива под нагрузкой

Моделирование различий в форме поперечного сечения

Уголок $\frac{160 \times 160 \times 12 \text{ ГОСТ } 8509-93}{\text{СмЗсп-1 ГОСТ } 535-2005}$

Труба $\frac{377 \times 16 \text{ ГОСТ } 8732-78}{\text{Б } 20 \text{ ГОСТ } 8731-74}$



1) $S_{\text{инстр.}} = 0,152 \text{ м}^2$

2) $V_{\text{неупл.}} = 1,6 * 0,152 = 0,243 \text{ м}^3$



3) $V_{\text{упл.}} = 0,243 / 1,05 = 0,23 \text{ м}^3$

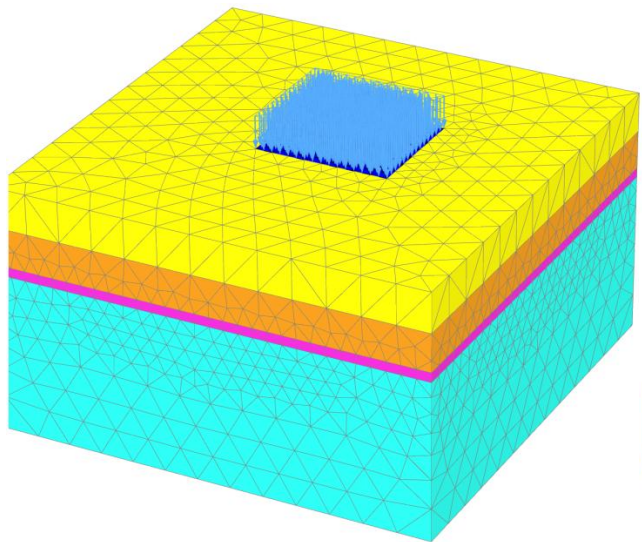
4) $S = 0,23 / 1 = 0,23 \text{ м}^2$



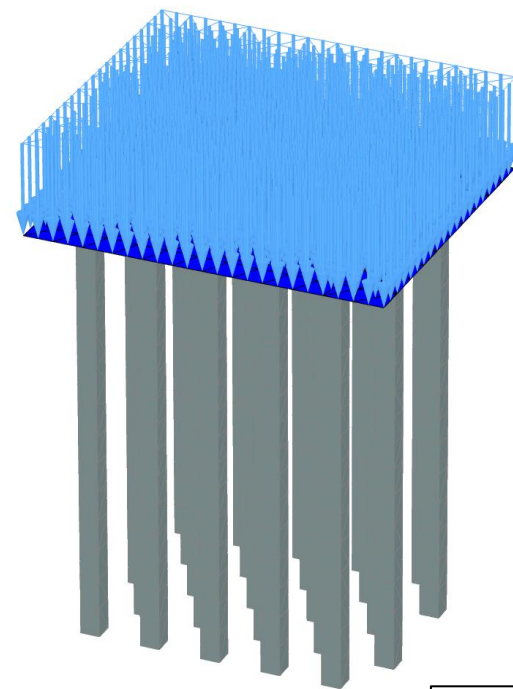
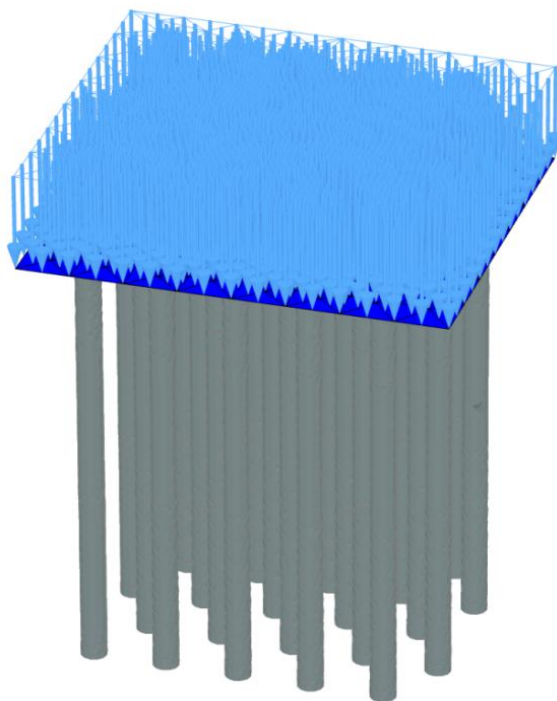
5) $S = 0,23 \text{ м}^2$

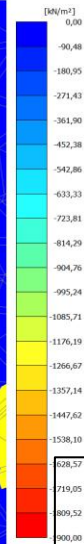
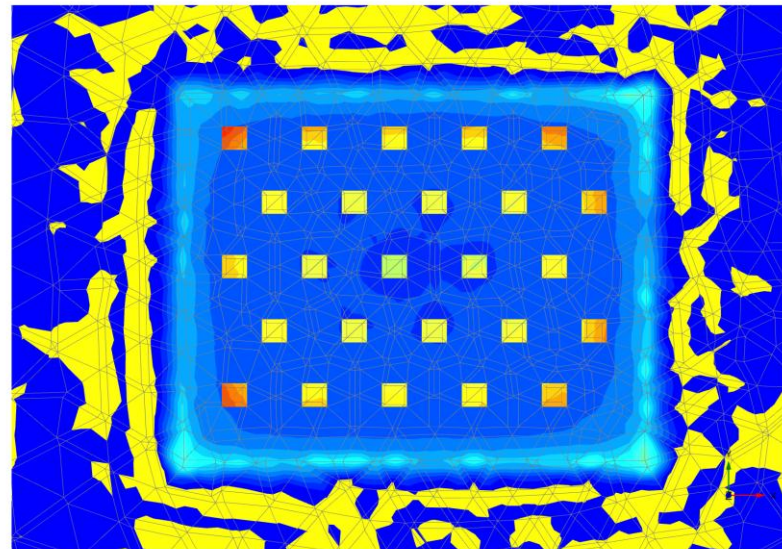
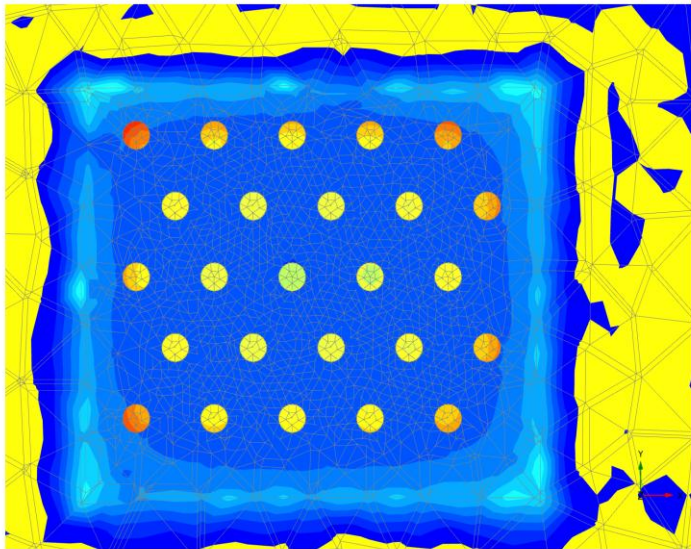
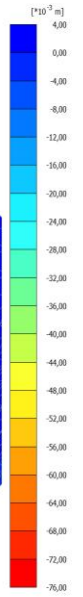
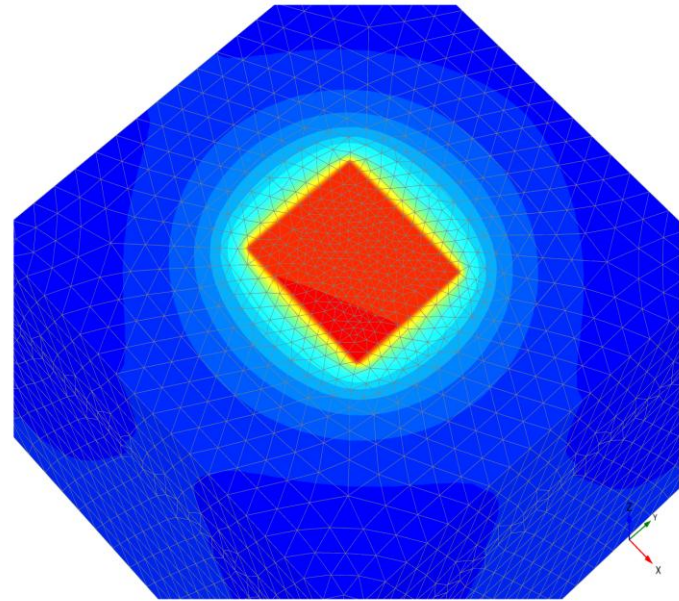
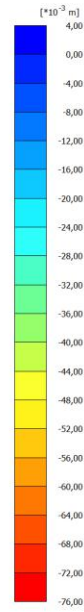
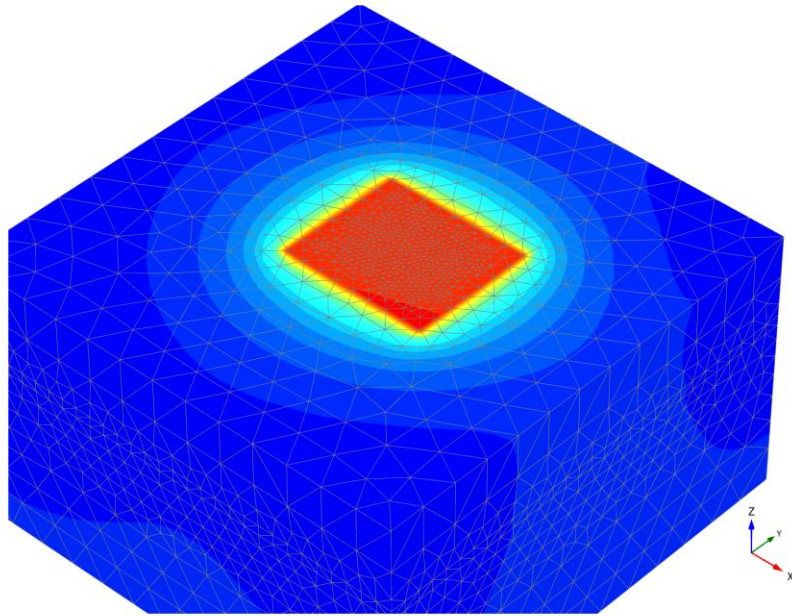
6) $r_2 = \sqrt{0,23 / \pi} = 0,27 \text{ м}$

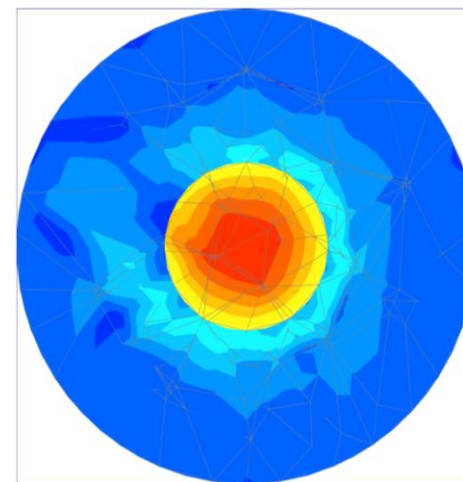
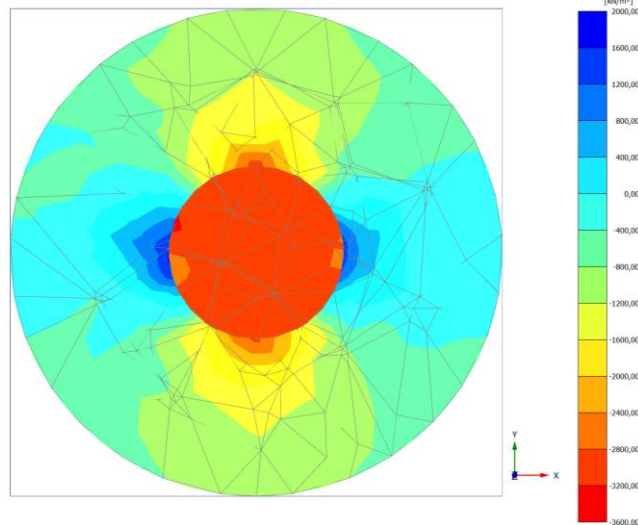
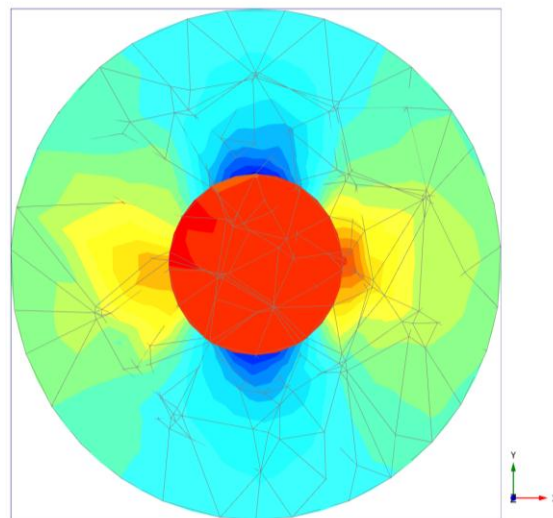
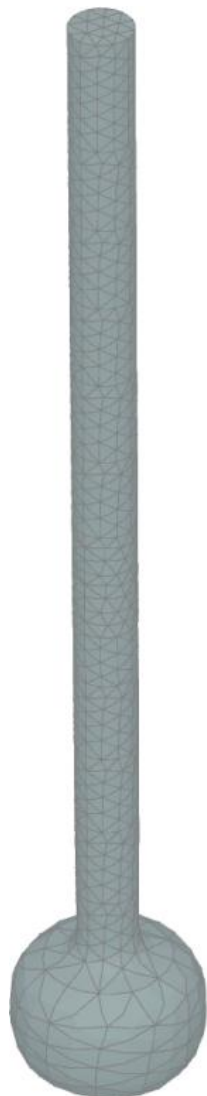
Сравнение конечно-элементных расчетов для щебеночных колонн уплотнения **круглого** и **квадратного** сечения одинаковой площади поперечного сечения



	Колонны круглого сечения	Колонны квадратного сечения
Осадка, мм	72	73





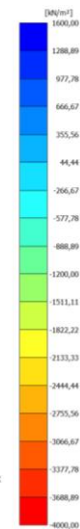
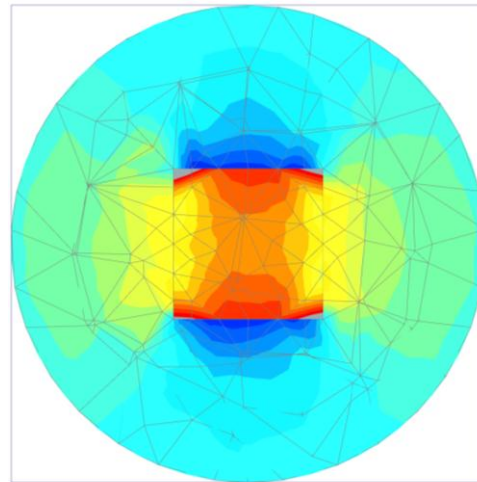
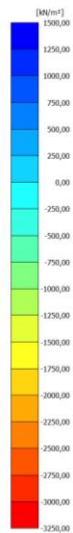
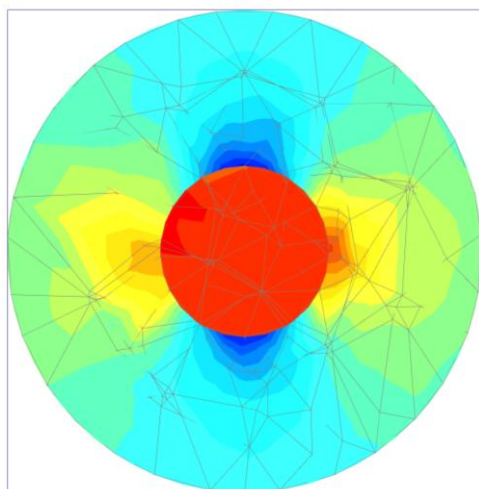


Распределение горизонтальных напряжений

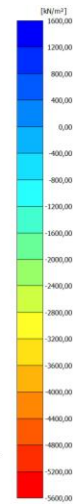
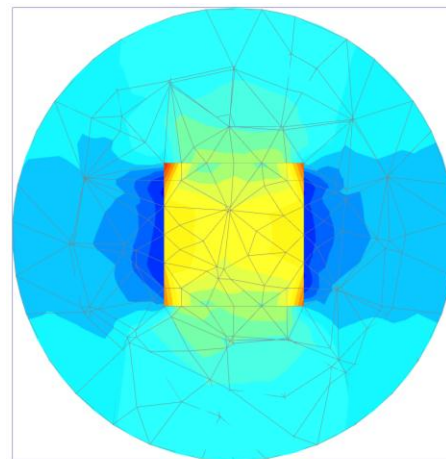
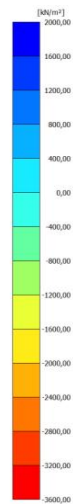
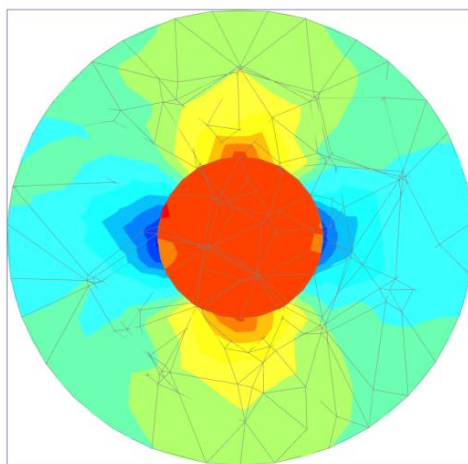
Распределение
вертикальных
напряжений

Моделирование процесса расширения скважины численными
методами

Напряжения по X

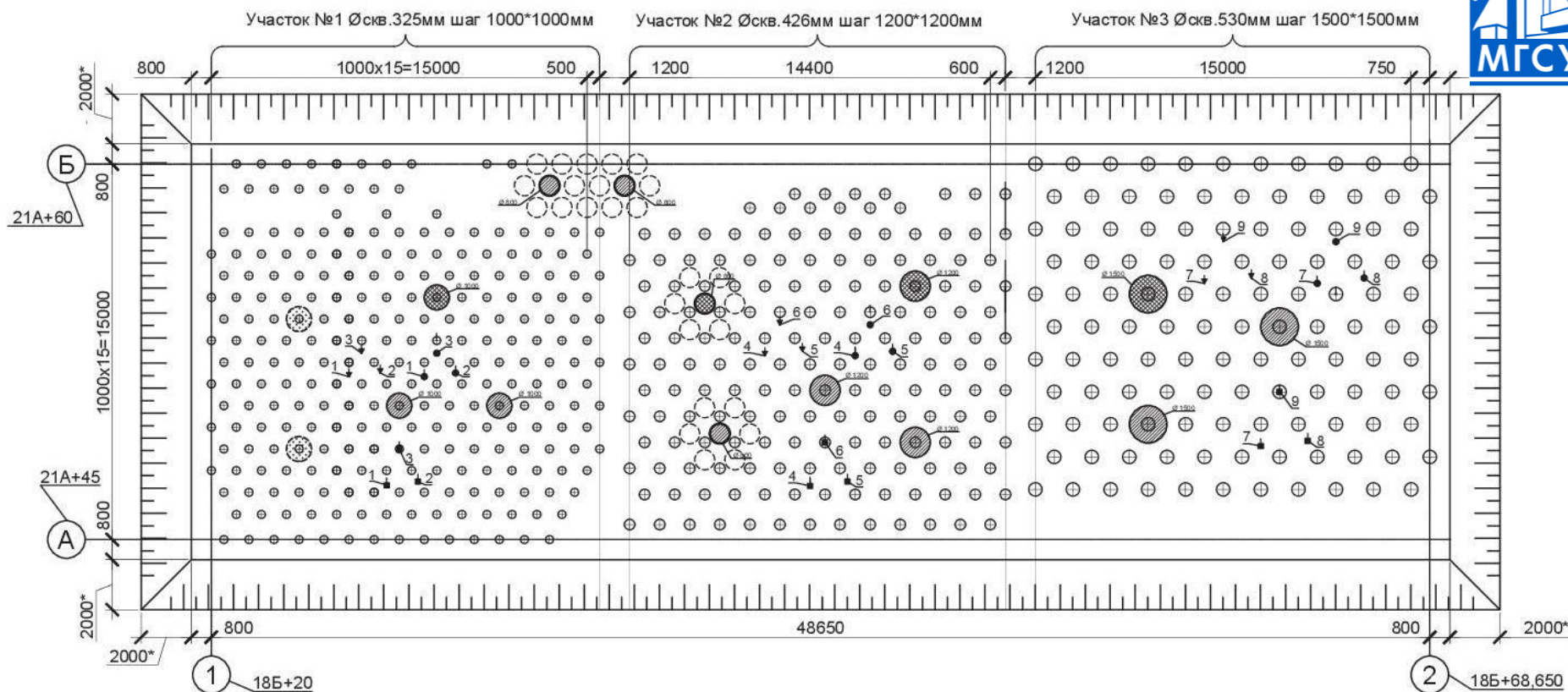


Напряжения по Y



Опытная площадка уплотнения

План опытного котлована



1. Модуль деформации для неукрепленных текучепластичных суглинков составил **$E=4.651$ МПа.**

2. После уплотнения щебеночными колоннами модуль деформации текучепластичных суглинков увеличился до **$E=21.7$ МПа.**

Изменение физико-механических параметров грунта

Стратиграфический индекс	ИГЭ	Наименование грунта по ГОСТ 25100-2011	Наименование участка	Плотность грунта, г/см ³	Плотность сухого грунта $\rho_{\text{д}}$, г/см ³	Коэффициент пористости e , д. ед.	Показатель текучести I_L , д. ед.	Угол внутреннего трения φ , °		Удельное сцепление C , кПа		Модуль деформации E , МПа		
								По результатам статического зондирования	По результатам лабораторных испытаний	По результатам статического зондирования	По результатам лабораторных испытаний	По результатам статического зондирования	По результатам лабораторных испытаний	По результатам штамповых испытаний
bQ _{IV}	26	Глина	Естественное залегание	1,62	0,99	1,637	0,99	15	14	27	28	5	2	-
			Участок 1	1,81	1,37	0,977	0,40	17	17	32	47	11	-	-
			Участок 2	1,50	1,01	1,698	0,73	15	25	28	10	6	-	-
	2в	Суглинок	Естественное залегание	1,80	1,36	0,958	0,76	17	28	16	4	5	8	-
			Участок 1	1,79*	1,24	1,170*	0,38	21	-	23	-	14	-	-
			Участок 2	1,79	1,31	1,045	0,71	16	-	14	-	4	-	-
a st Q _{IV}	5а	Глина	Естественное залегание	1,87	1,43	0,893	0,28	20	21	41	49	22	17	-
			Участок 1	не вскрыт										
			Участок 2	не вскрыт										
	5в	Суглинок	Естественное залегание	1,72	1,22	1,181	0,39	20	19	20	148	11	12	4
			Участок 1	1,75	1,27	1,113	0,20	25	36	39	37	32	15	-
			Участок 2	1,75	1,24	1,152	0,47	23	-	30	-	22	17	-
	5г	Суглинок	Естественное залегание	1,90	1,45	0,856	0,86	16	21	14	26	4	9	4
			Участок 1	2,03	1,68	0,602	0,26	23	26	30	24	22	31	10
			Участок 2	1,93	1,50	0,790	0,58	21	21	22	31	13	15	13
	5д	Супесь	Естественное залегание	2,07	1,70	0,584	0,74	19	32	18	22	9	27	3
			Участок 1	2,11	1,79	0,488	0,08	23	-	31	-	24	-	-
			Участок 2	не вскрыт										
K _{2S}	22	Глина	Естественное залегание	1,73	1,24	1,115	0,15	25	34	53	17	39	-	-
			Участок 1	не вскрыт										
			Участок 2	1,72	1,22	1,200	0,18	-	-	-	-	-	29	-

Значения отмеченные * - средние по двум образцам

Таблица 1 – Результаты сопоставления нормативных значений физико-механических свойств грунтов по данным компании-подрядчика

Изменение физико-механических параметров грунта

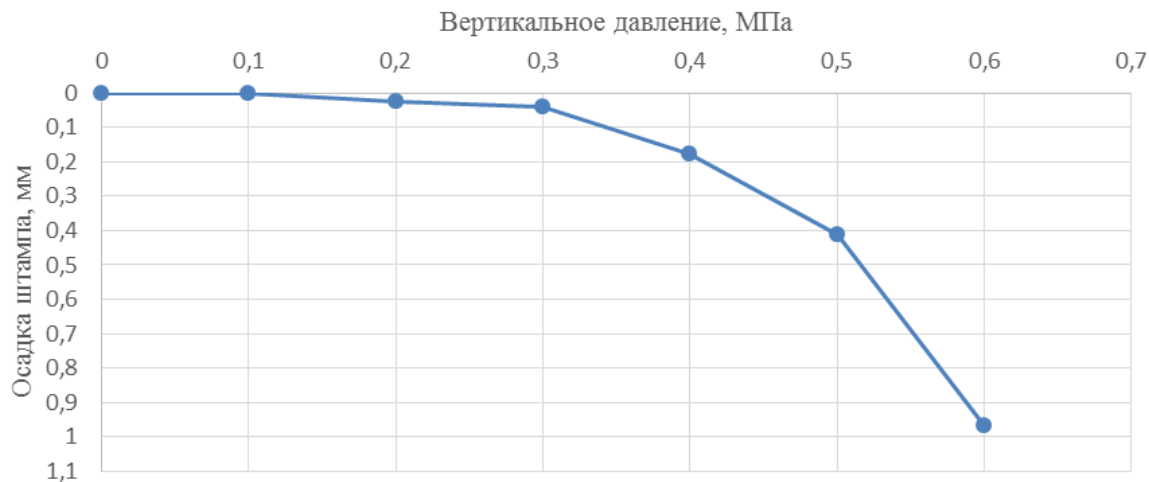
Уровень глубины от поверхности, м	Наименование участка	Влажность, д.е.	Плотность грунта, г/см ³	Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³	Коэффициент пористости е, д. ед.	Угол внутреннего трения φ , °		Удельное сцепление с, кПа		Модуль деформации E, МПа	
						По результатам трехосных испытаний	По результатам одноплоскостного среза	По результатам трехосных испытаний	По результатам одноплоскостного среза	По результатам трехосных испытаний	По результатам компрессионных испытаний
6	До уплотнения	0,557	1,88	1,21	1,228	-	18,26	-	1,42	8,22	-
	После уплотнения	0,444	1,79	1,24	1,170	20,7	15,51	47,5	39,49	12,58	4,11
8	До уплотнения	0,246	1,96	1,57	0,710	-	19,85	-	28,56	7,47	-
	После уплотнения	0,27	1,9	1,50	0,798	29,3	20,3	51,7	21,91	17,49	3,53
10	До уплотнения	0,358	1,81	1,33	1,018	-	19,37	-	23,3	22,06	-
	После уплотнения	0,237	1,97	1,59	0,689	31,5	24,48	40,76	14,58	26,05	5,55
12	До уплотнения	0,408	1,65	1,17	1,295	-	18,82	-	52,86	6,91	-
	После уплотнения	0,293	1,88	1,45	0,850	30,7	17,78	58,4	159,43	24,6	3,52
Среднее*	До уплотнения	0,425	1,86	1,31	1,061	-	19,2	-	23,76	10,57	-
	После уплотнения (норм)	0,316	1,89	1,44	0,873	28,45	19,29	49,47	63,0	21,91	3,99
	После уплотнения ($\alpha=0,85$)	-	-	-	-	16,34	11,29	28,41	36,89	19,1	3,6
	После уплотнения ($\alpha=0,95$)	-	-	-	-	15,39	10,49	26,76	34,25	17,31	3,32

*- средние значения параметров прочности получены путем обработки всех экспериментальных данных как единой совокупности по ГОСТ 20522-2012

Таблица 2 – Результаты сопоставления нормативных значений физико-механических свойств грунтов по данным НОЦ «Геотехника» НИУ МГСУ

Деформационные характеристики колонн уплотнения на площадке

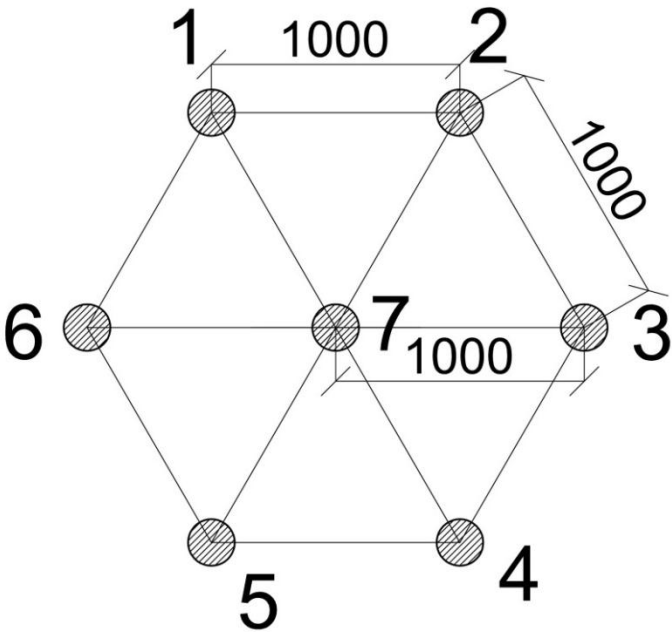
График зависимости осадки от давления $S=f(p)$



Штамповые испытания щебня грунтовых свай плоским штампом площадью 600 см² в теле свай на глубине семь метров, на абсолютной отметке 144,00.

Глубина проведения опыта h, м	Наименование грунта	Значение модуля деформации E, МПа	Среднее значение модуля деформации E, МПа
7,0	Щебень грунтовой свай	120,5	140,52
7,0		106,92	
7,0		104,3	
7,0		146,7	
7,0		158,15	
7,0		206,57	

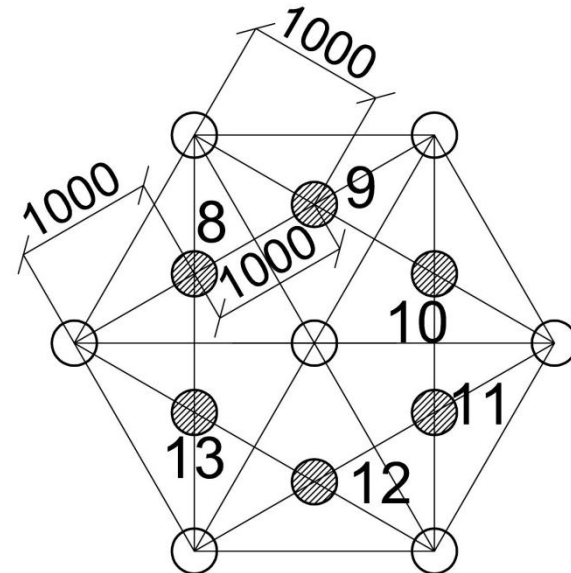
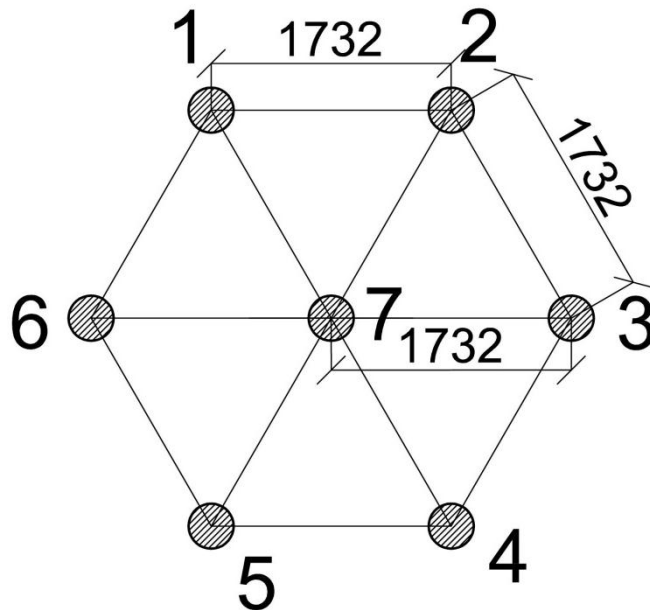
Технологические и геометрические параметры уплотнения



Геометрические параметры уплотнения:

1. Диаметр колонн (конечный)
2. Шаг колонн.
3. Длина колонн.
4. Последовательность выполнения

Типовые схемы расположения колонн уплотнения и последовательность их выполнения



Технологические и геометрические параметры уплотнения

Технологические параметры уплотнения:

Объем лидерной скважины :

$$V_1 = \pi \cdot r_1^2 \cdot H$$

Коэффициент пористости
уплотненного грунта:

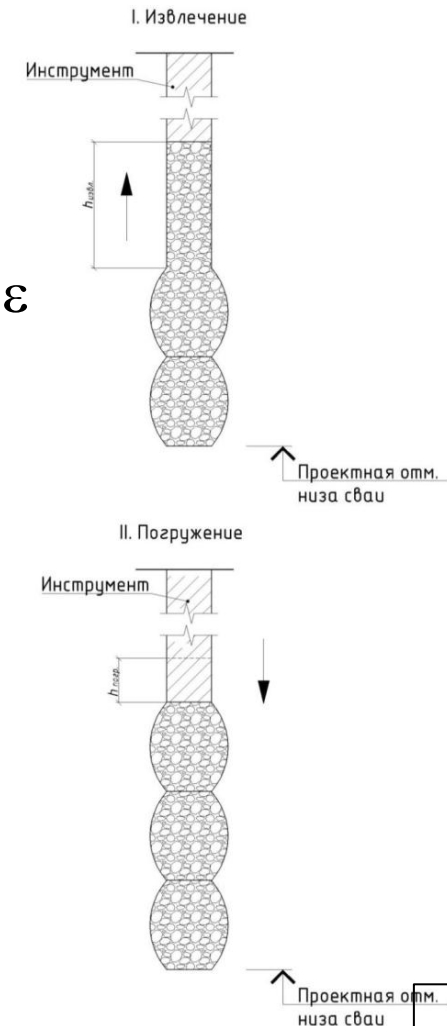
$$e = e_0 - (1 + e_0) \cdot \varepsilon$$

Радиус колонны после расширения: $r_2 = \sqrt{R^2 \cdot \varepsilon}$

Расчетный ход уплотняющего органа машины:

Максимальный шаг отсыпки материала
по высоте

5. Циклы подъема инструмента
(извлечение-погружение)



Технологические и геометрические параметры уплотнения

Технологические параметры уплотнения:

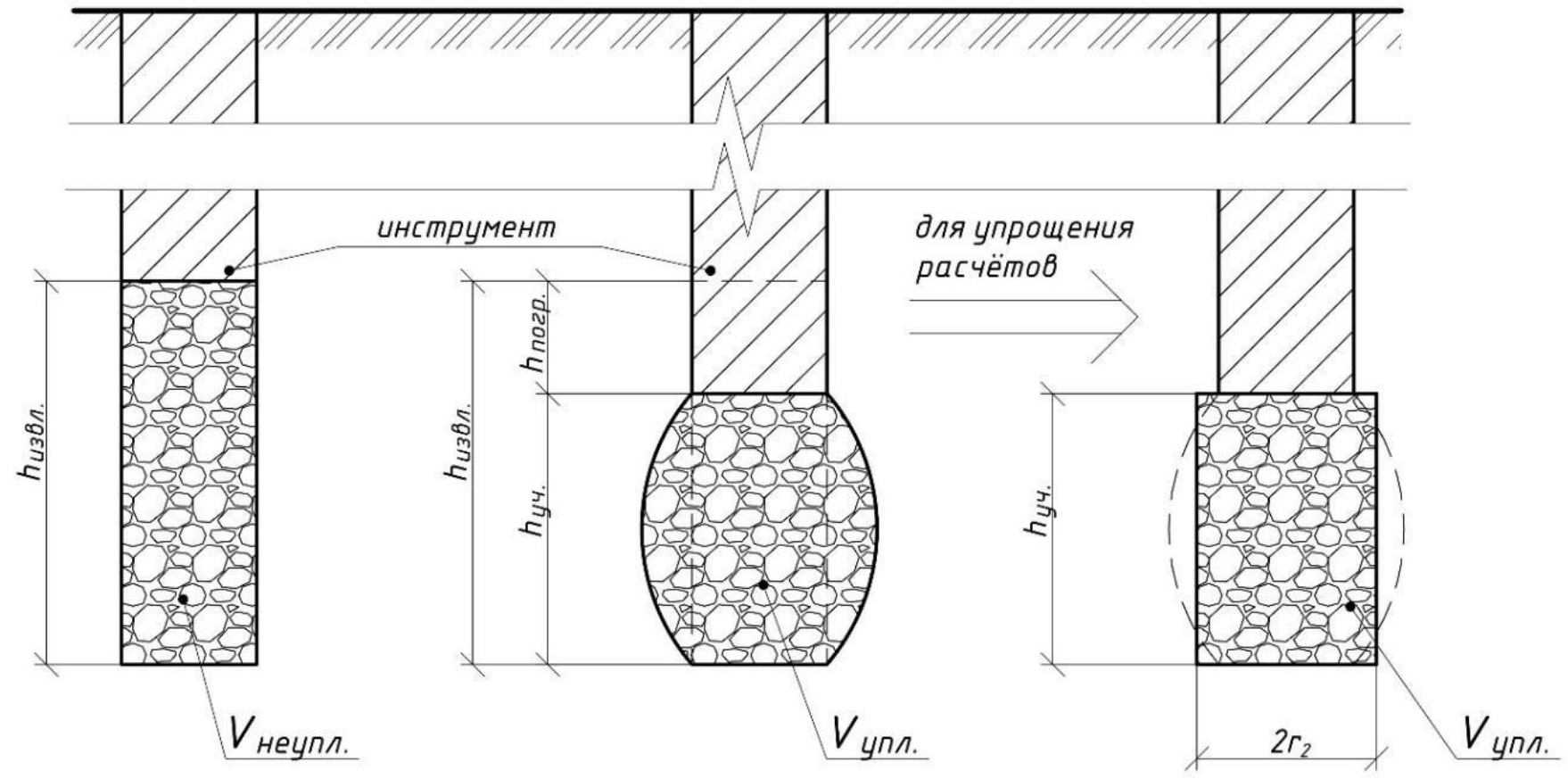
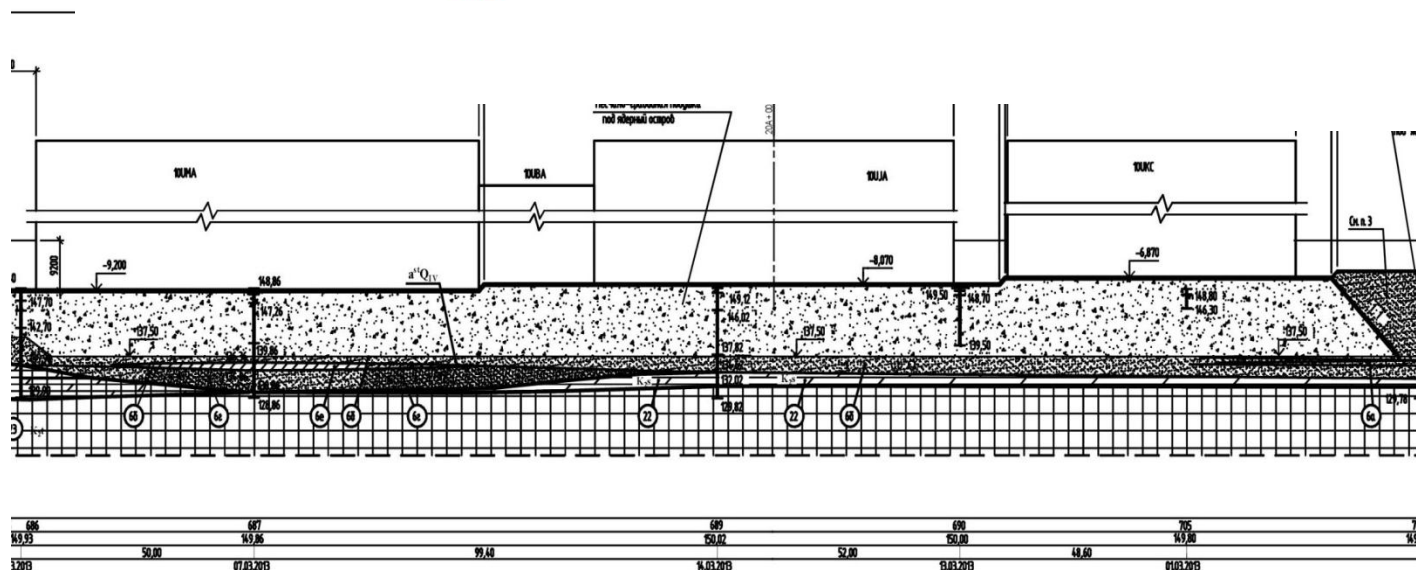
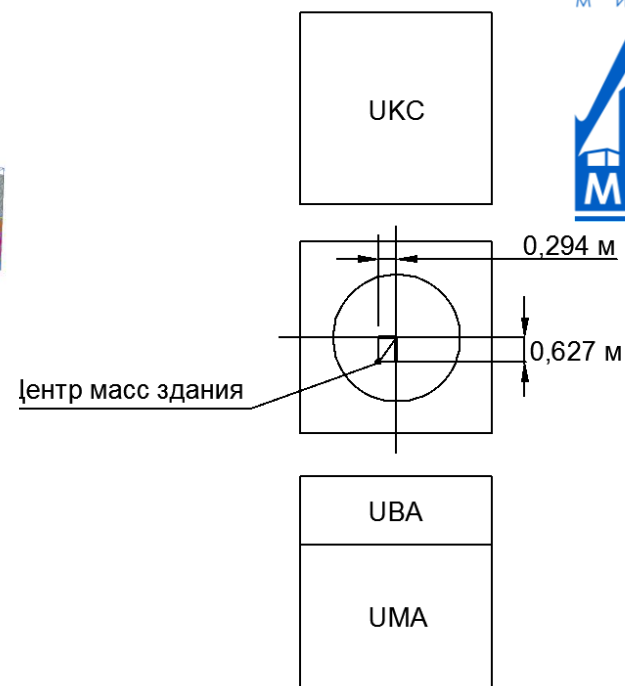
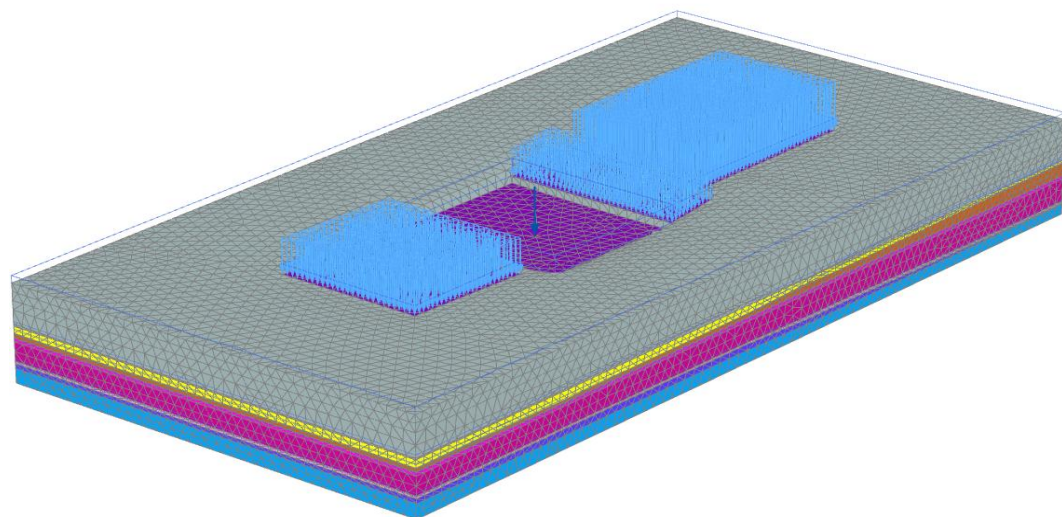
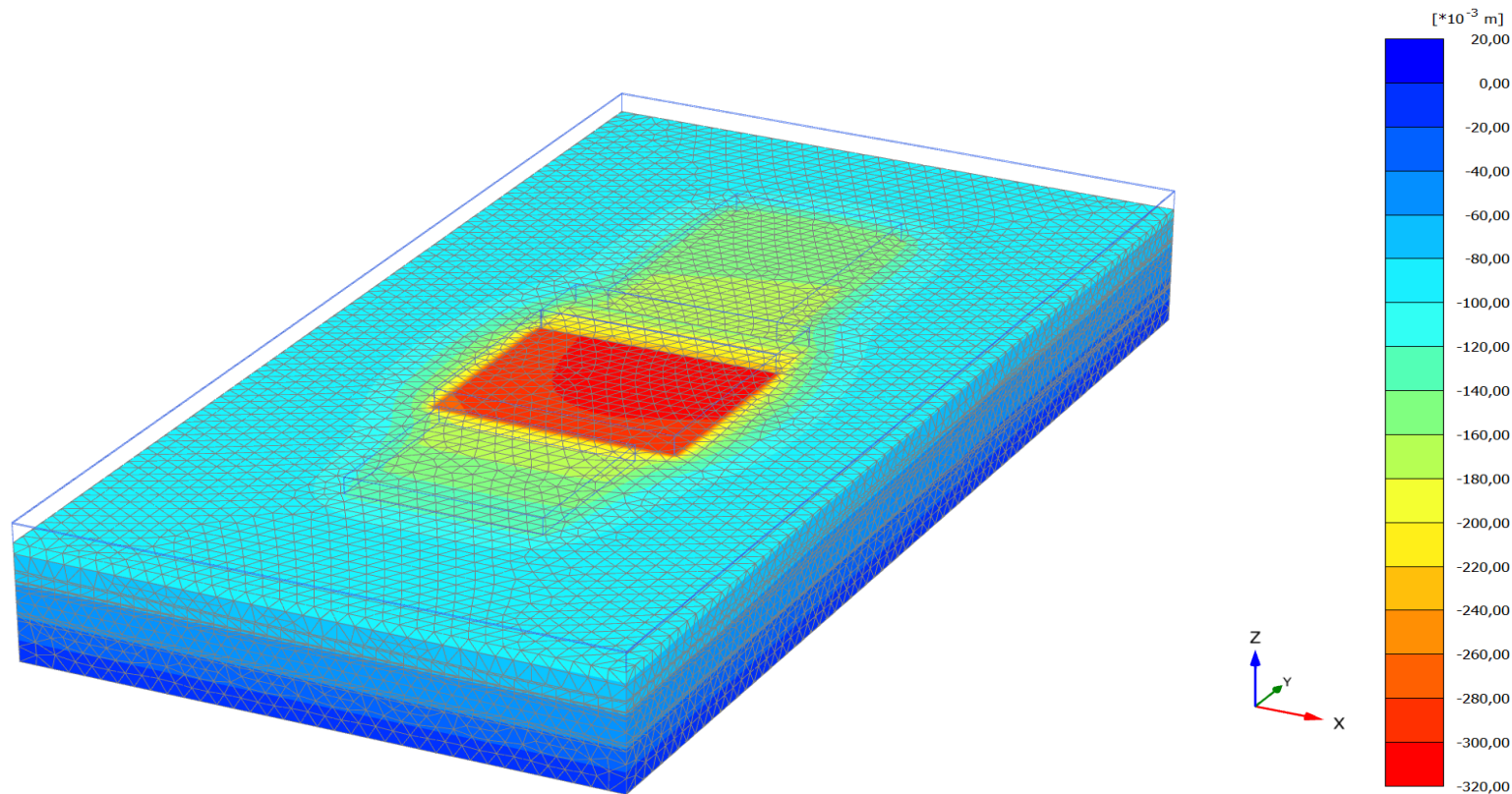


Схема расчета технологических параметров



Расчетная конечно-элементная схема, схема расположения сооружений объекта, схема песчаной подушки

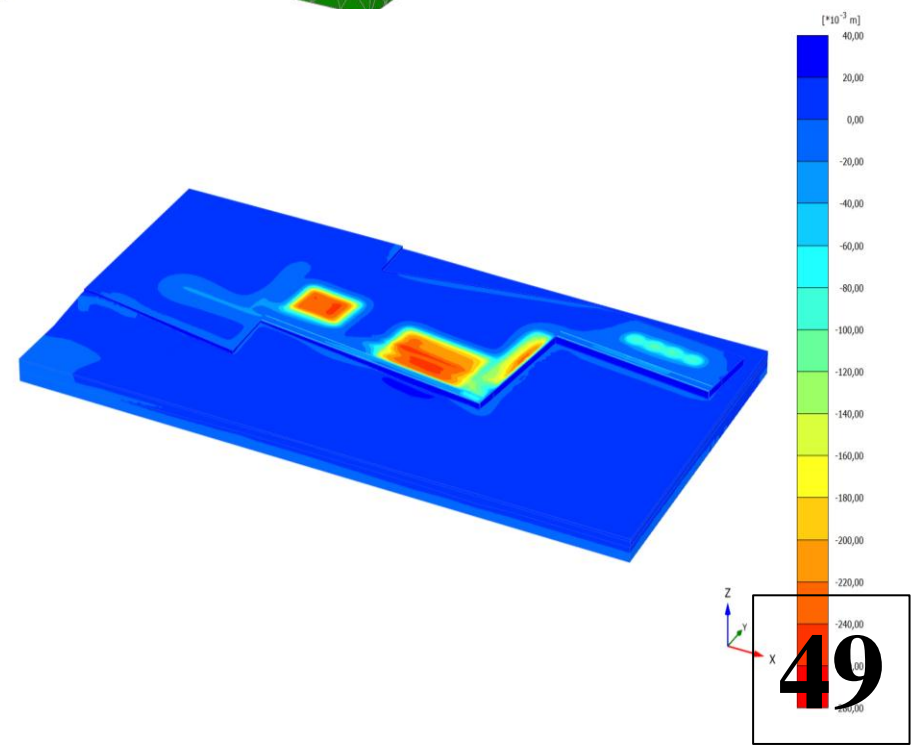
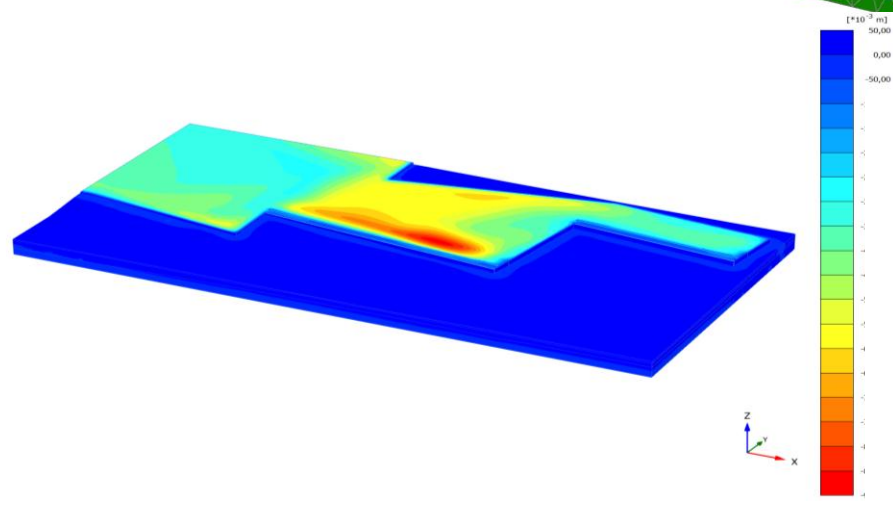
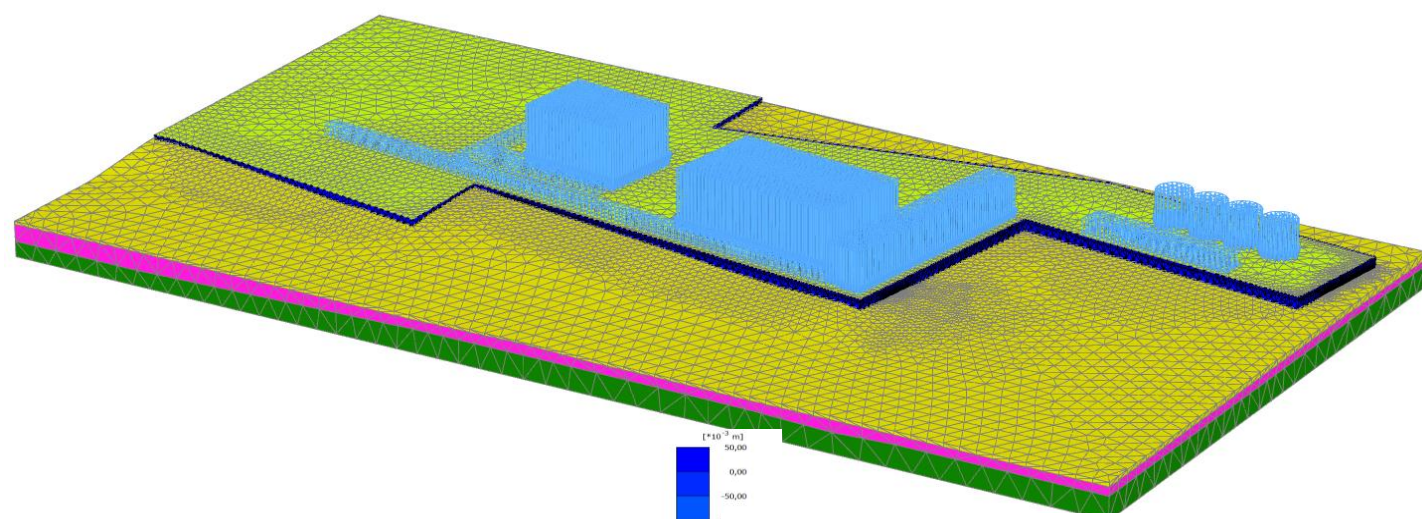


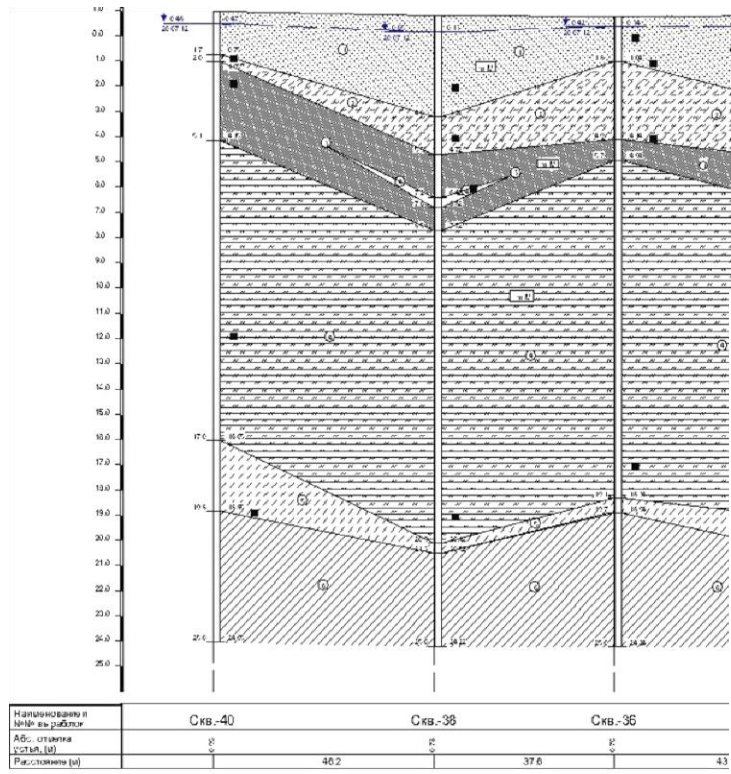
Total displacements u_z

Maximum value = 0,000 m (Element 85338 at Node 17810)

Minimum value = -0,3102 m (Element 293101 at Node 220764)

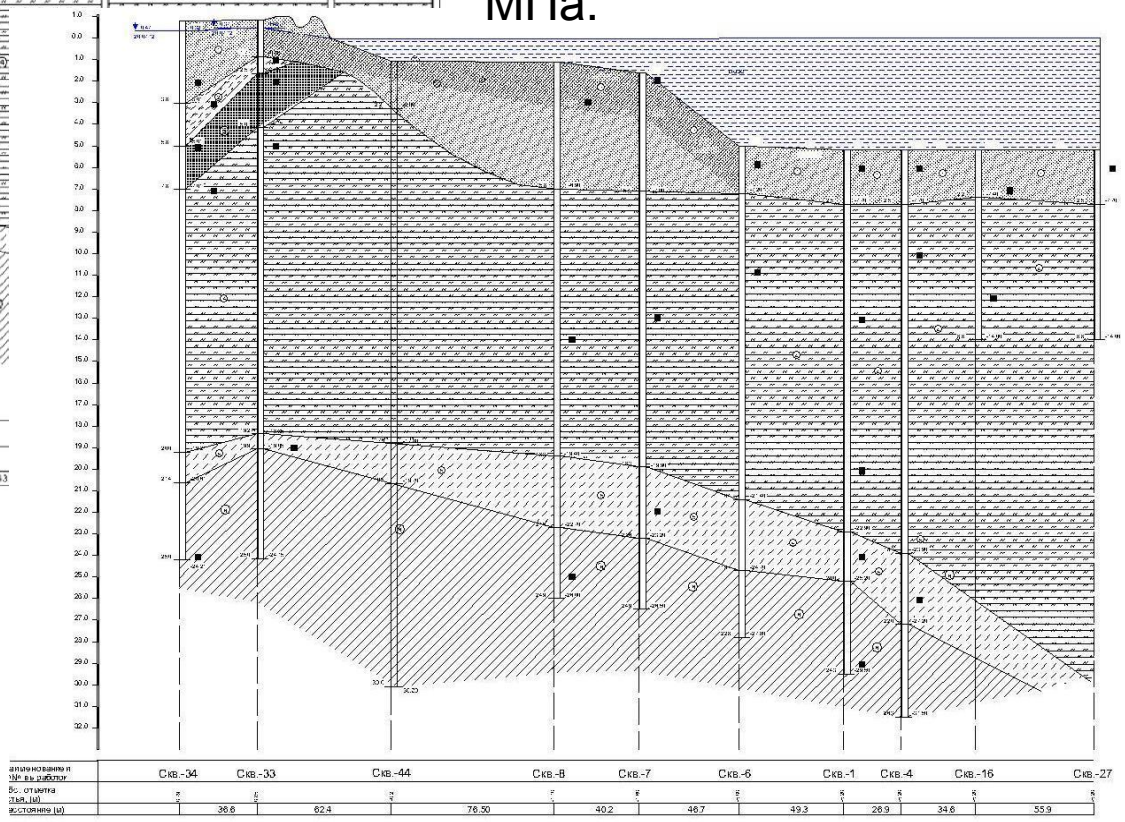
Изополю вертикальных перемещений массива грунта на стадии полного завершения строительства зданий с учетом технологической нагрузки на отметке планировки, равной 10 кПа, мм



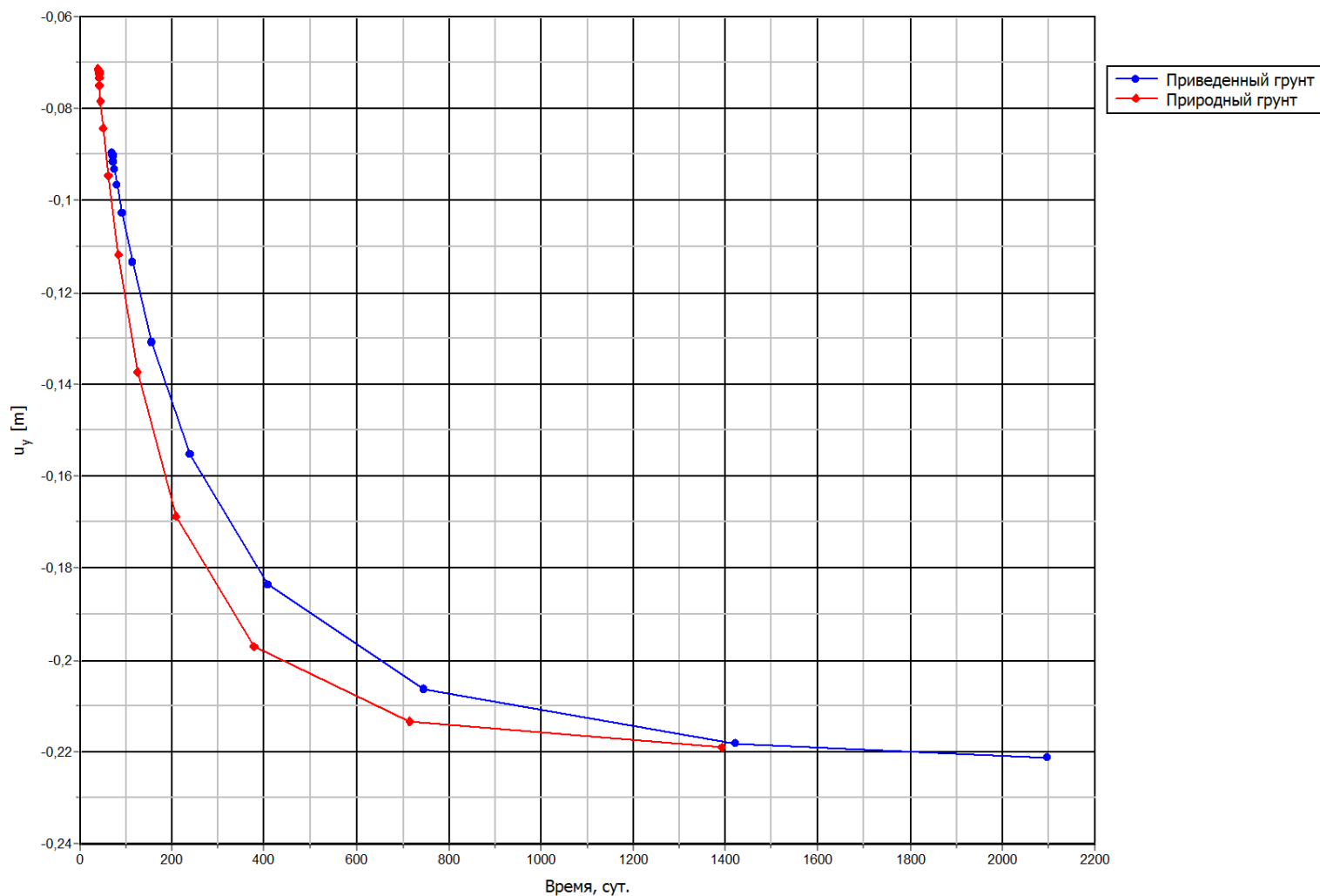


$C_{H} = 20 \text{ кПа}; \quad C_{II} = 14 \text{ кПа};$
 $C_{I} = 11 \text{ кПа.}$
 $\varphi_{H} = 10^{\circ}; \quad \varphi_{II} = 7^{\circ}; \quad \varphi_{I} = 7,14^{\circ}$

0,0 – 0,05 МПа равен **0,88**
 МПа;
 0,0 - 0,10 МПа равен **1,5**
 МПа;
 0,0 – 0,20 МПа равен **2,36**
 МПа.

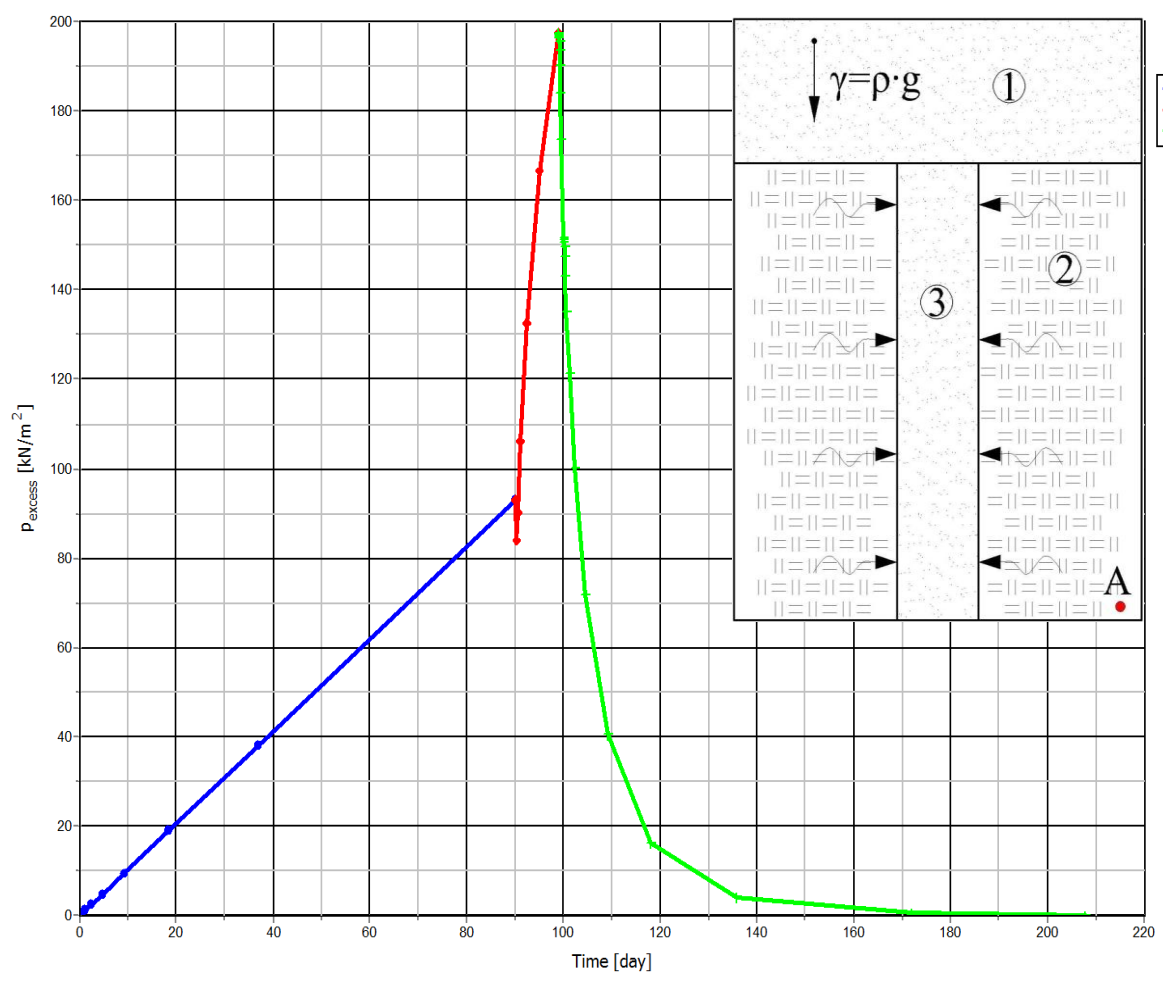
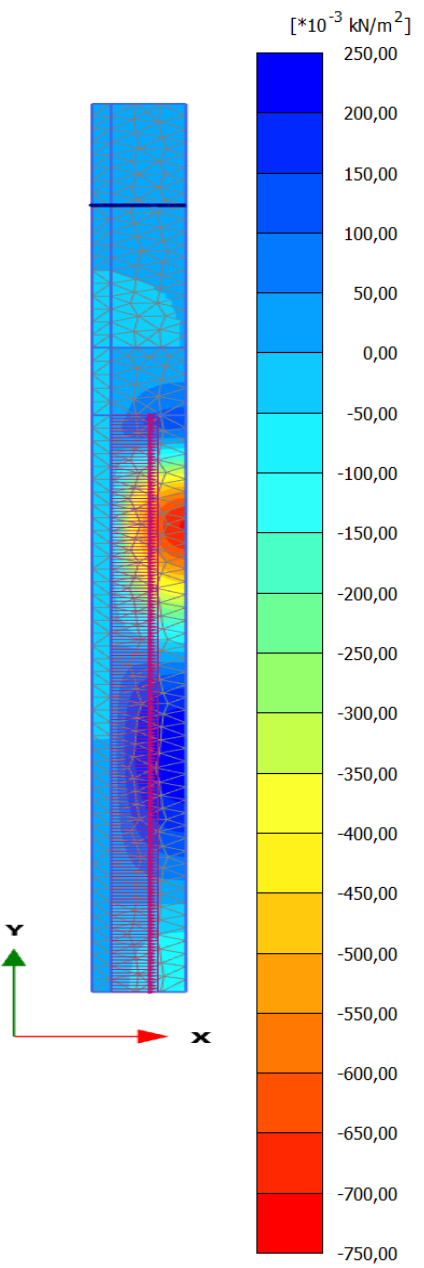


Инженерно-геологические условия морского порта



Принципиальный вид кривых зависимости вертикальных перемещений (м) от времени (сут.) системы "дрена - окружающий слабый грунт" без учёта (1) и с учётом (2) преобразования слоя слабого грунта полученные с помощью численного моделирования консолидации

Моделирование процесса консолидации колонны



Изополя избыточного порового давления на этапе окончания консолидации после устройства песчаной насыпи и свай-дрен

Моделирование процесса консолидации колонны

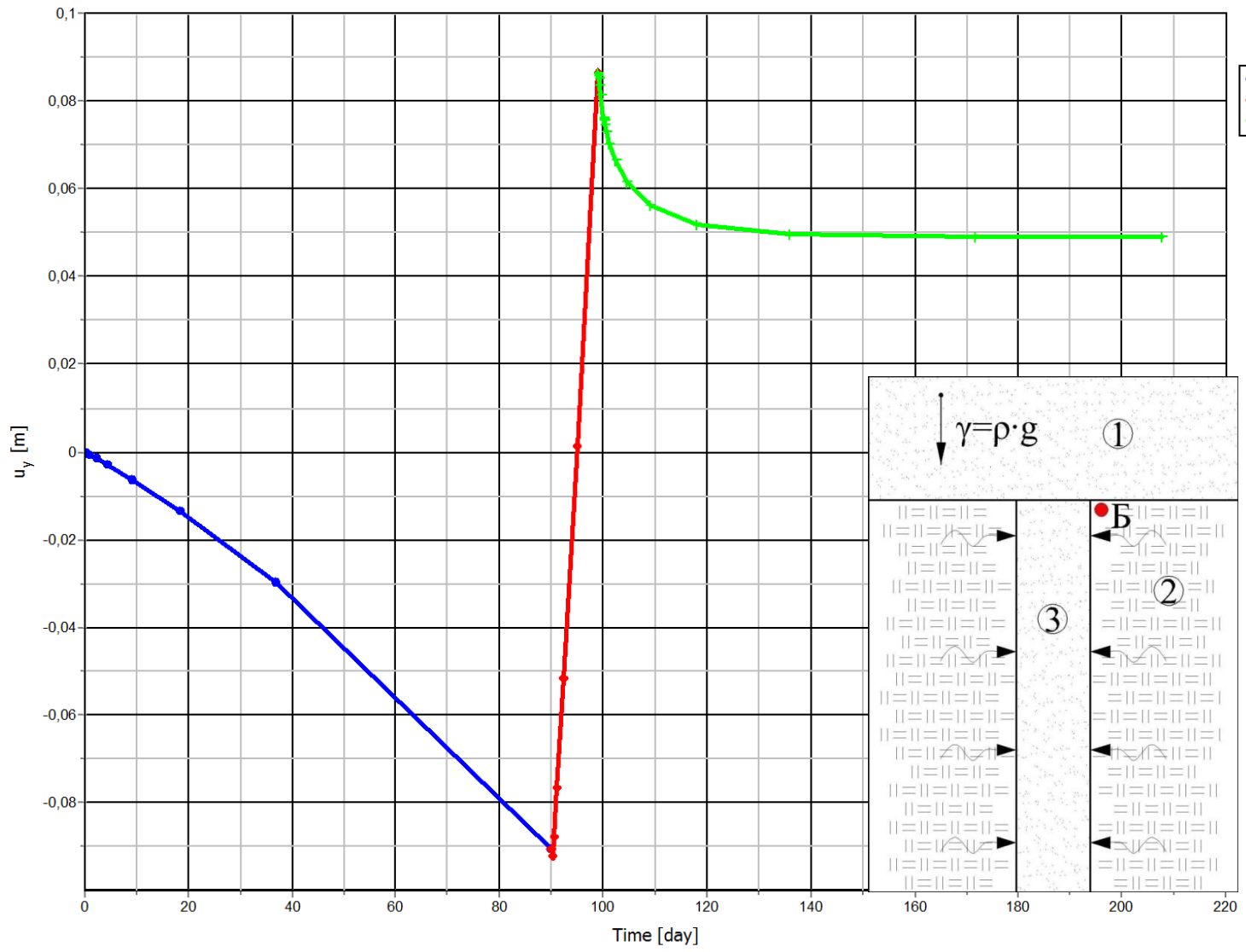
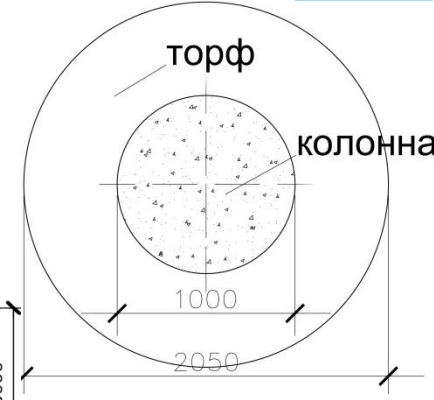
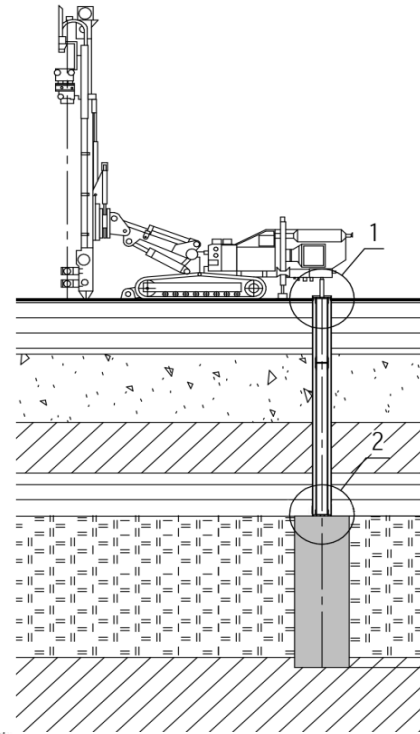
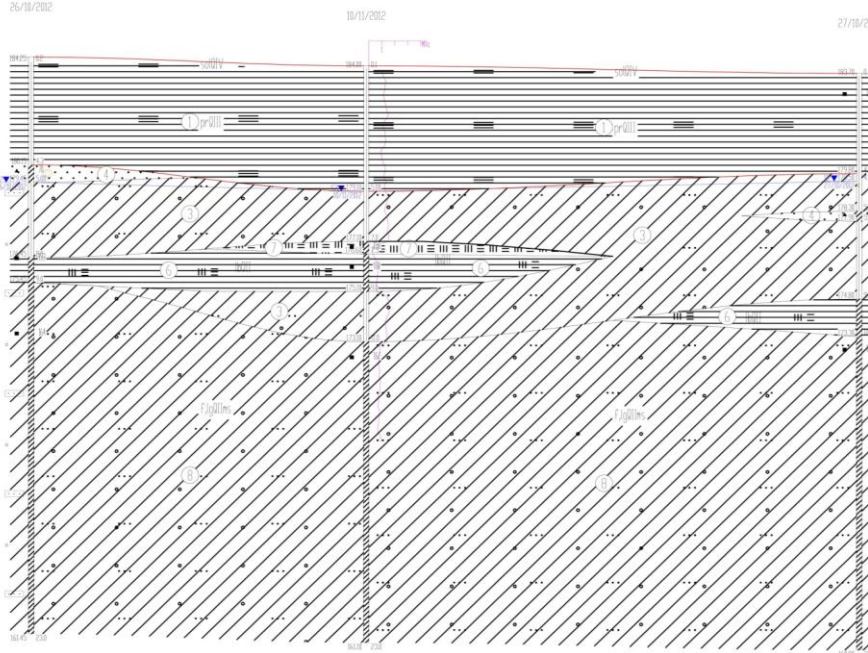


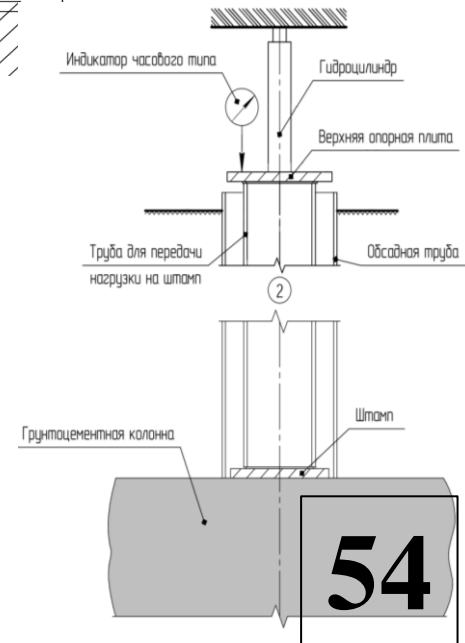
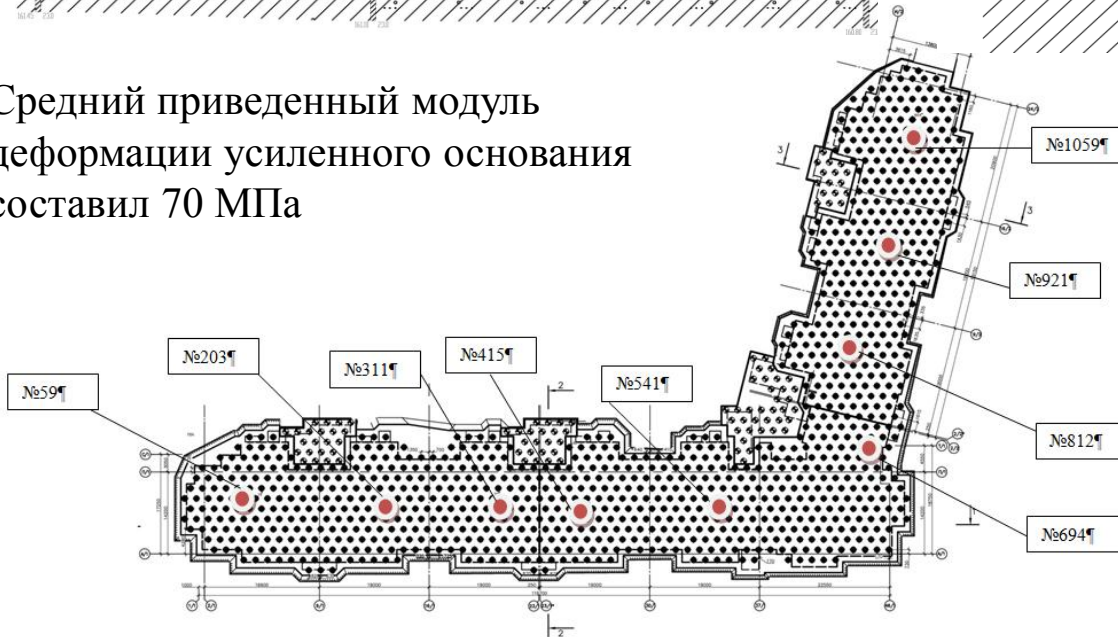
График зависимости осадки (м) во времени (сут.) в точке Б. 1-песчаная насыпь, 2-слабый слой глинистого грунта, 3-песчаная свая-дрена

7. Применение в практике проектирования

Инженерно-геологический разрез по линии VII-VII



Средний приведенный модуль деформации усиленного основания составил 70 МПа



$$\sigma_c \cdot m_c = \sigma_2 \cdot m_2 = \sigma \cdot \bar{m}$$

- Исходные предпосылки

$$N = N_c + N_2$$

$$N = \sigma \cdot \pi \cdot R_2^2 \quad \text{- сосредоточенная сила нагружения}$$

$$N_c = \sigma_c \cdot \pi \cdot R_c^2 \quad \text{- нагрузка, передающаяся на колонну}$$

$$N_2 = \sigma_2 \cdot \pi \cdot R_2^2 \quad \text{- нагрузка на грунт между колоннами.}$$

Совместное решение представленных выше уравнений дает следующее соотношение для приведенного относительного коэффициента сжимаемости расчетной ячейки:

$$\bar{m} = \frac{m_2 \cdot m_c}{\lambda \cdot m_2 + m_c (1 - \lambda)}$$

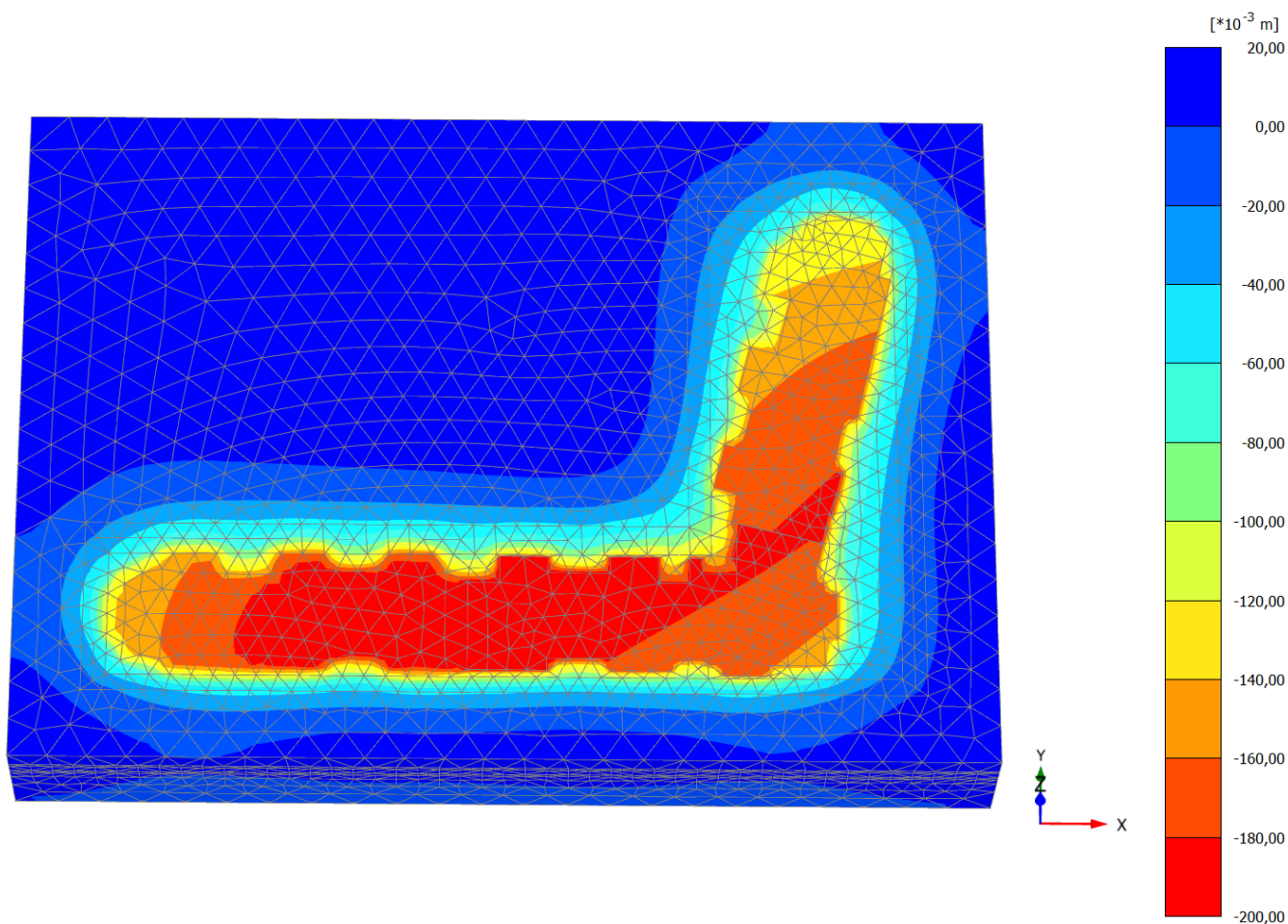
$$\lambda = \frac{R_c^2}{R_2^2} = \frac{0,6^2}{1,025^2} = 0,3427 \quad m_2 = \frac{0.8}{4} = 0.2 \text{ (1/МПа)}, \quad m_c = \frac{0.8}{263} = 0.00304 \text{ (1/МПа)},$$

$$\bar{m} = \frac{0.2 \cdot 0.00304}{0.3427 \cdot 0.2 + 0.00304 \cdot (1 - 0.3427)} = \frac{0.000608}{0.07154} = 0.00849 \text{ (1/МПа)},$$

$$E_{прив} = \frac{0.8}{0.00849} = 94.23 \text{ (МПа)}, \quad \text{- среднее значение приведенного модуля деформации основания, усиленного грунтоцементными сваями.}$$



Наблюдаемые величины осадок корпуса №16 на момент окончания строительства, см



Phase displacements Pu_z

Maximum value = 0,01301 m (Element 6882 at Node 12901)

Minimum value = -0,1980 m (Element 6102 at Node 50415)

Изополя вертикальных перемещений фундаментной плиты с учетом закрепления слоя слабого грунта, мм



Тер-Мартirosян Армен Заенович
*кандидат технических наук,
доцент кафедры МГиГ НИУ МГСУ,
Руководитель НОЦ «Геотехника» НИУ МГСУ,
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,
e-mail: gic-mgsu@mail.ru*

