

О верификации расчетов фундаментов по данным статического зондирования грунтов

СТРОИТЕЛЬНЫЙ ФОРУМ «АРКТИКА»

Москва, 5-7 октября 2022

**Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I**

Козловский В.Е., к.т.н., доцент кафедры «Основания и фундаменты»

Санкт-Петербург 2022

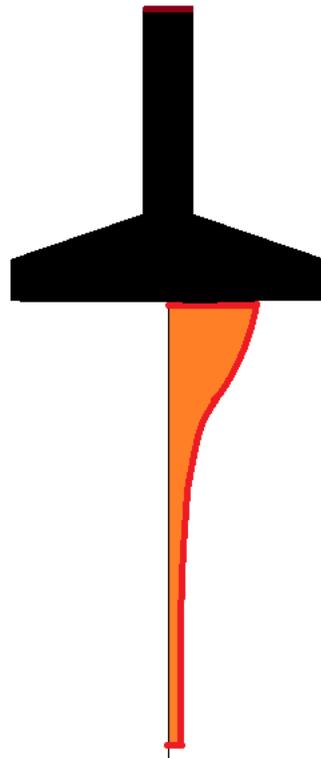
- Геологические изыскания являются трудоёмким и дорогостоящим процессом. При этом качество определения физических и механических свойств грунтов в лаборатории бывает низким вследствие нарушения структуры при отборе проб в сложных геологических условиях. Это влечет за собой неточности либо ошибки в расчетах, а следовательно, в проектных решениях. Необходим новый подход в использовании данных полевых испытаний грунтов.
- В настоящей работе предложен алгоритм использования данных полевых испытаний грунтов статическим зондированием к расчетам оснований и фундаментов опор ЛЭП по предельным состояниям. Возрастает достоверность расчетов, упрощается процесс принятия проектного решения. Облегчается процесс цифрового взаимодействия данных изысканий с расчетами оснований и конструкций. Возможно снижение трудозатрат на геологические изыскания.

Нормативные документы, регламентирующие полевые испытания грунтов статическим зондированием

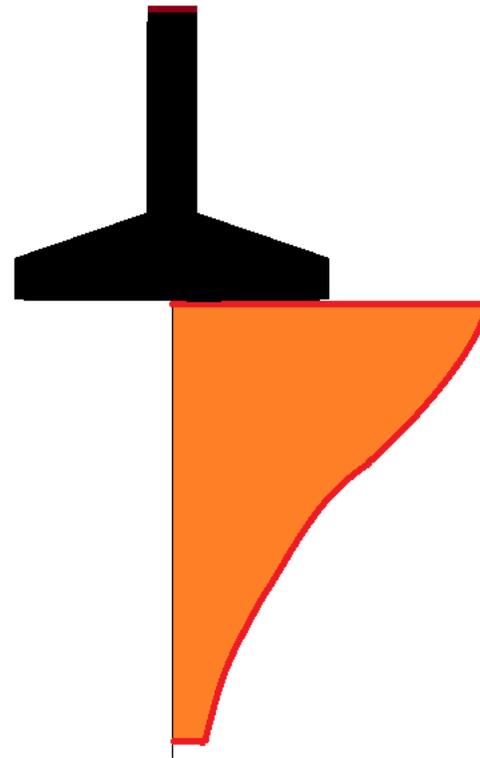
- **ГОСТ 19912-2001 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием**
- **СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты**
- **СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений**
- **СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства**
- **СП446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ**
- **СП493.1325800.2020 Инженерные изыскания для строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Общие требования**

Давления в грунте от фундаментов при малых и больших нагрузках

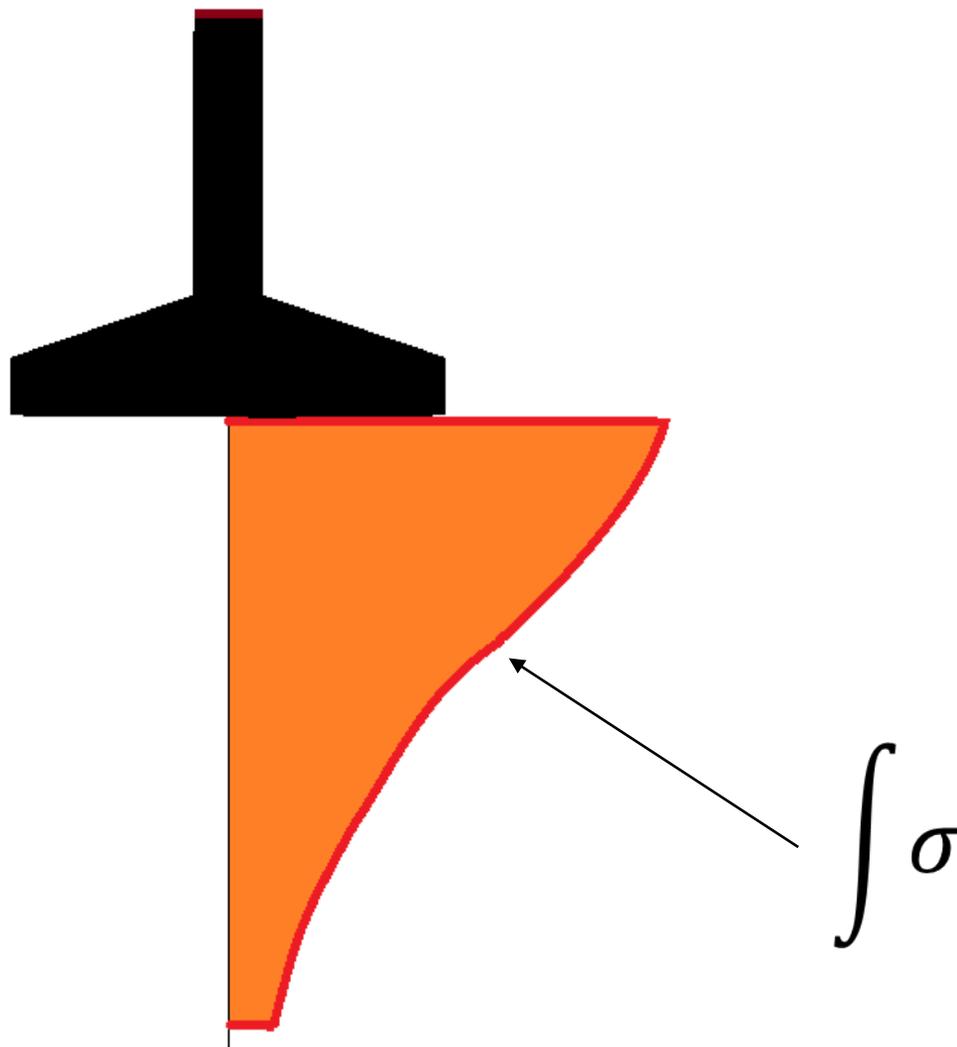
Мало
нагруженный



Сильно
нагруженный

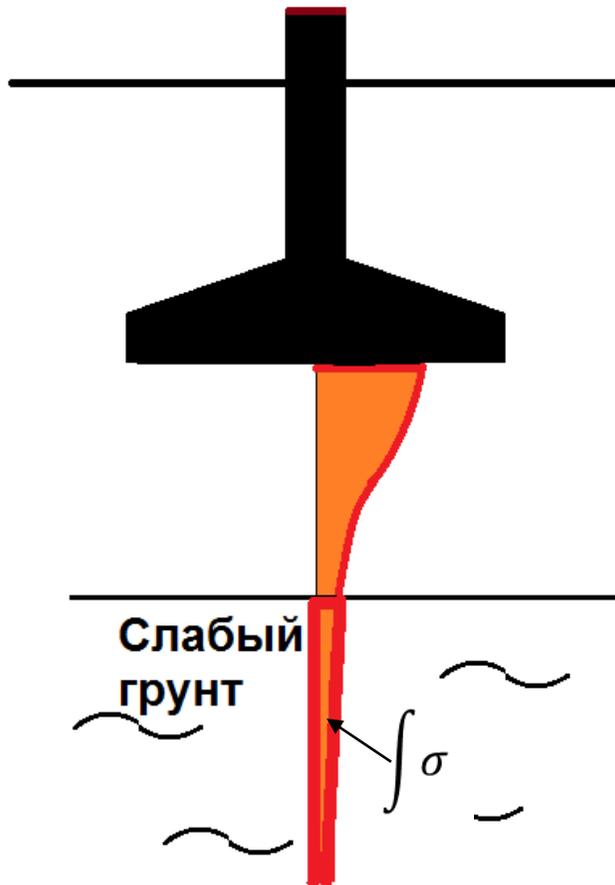


Чем больше площадь под графиком давления,
тем больше ожидаемая осадка фундамента

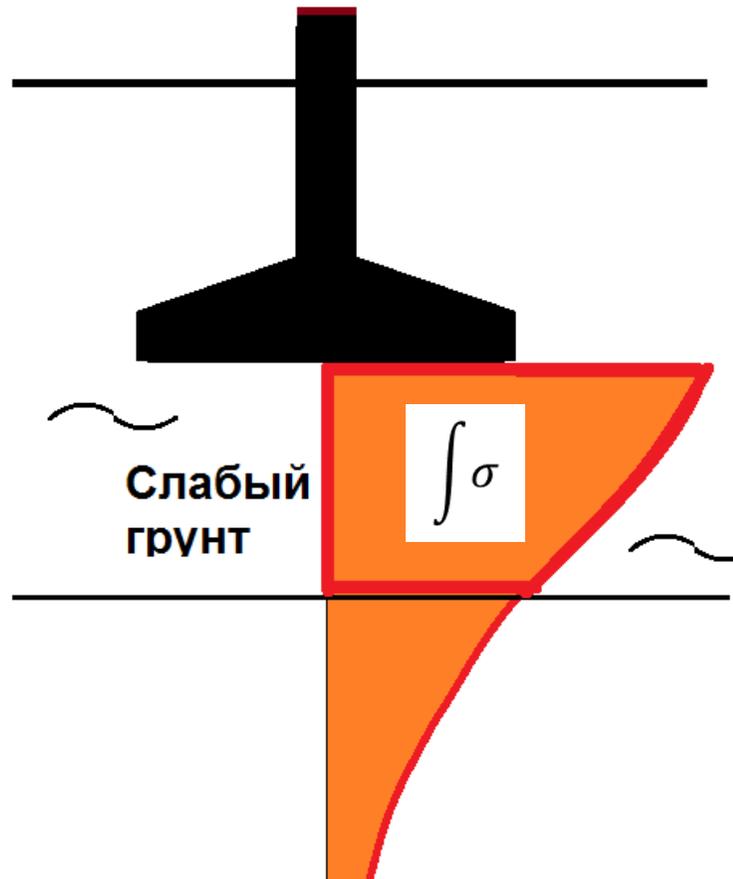


Ожидаемые осадки фундаментов

Малые осадки



Большие осадки



Статическое зондирование в расчетах осадок

Метод послойного суммирования:

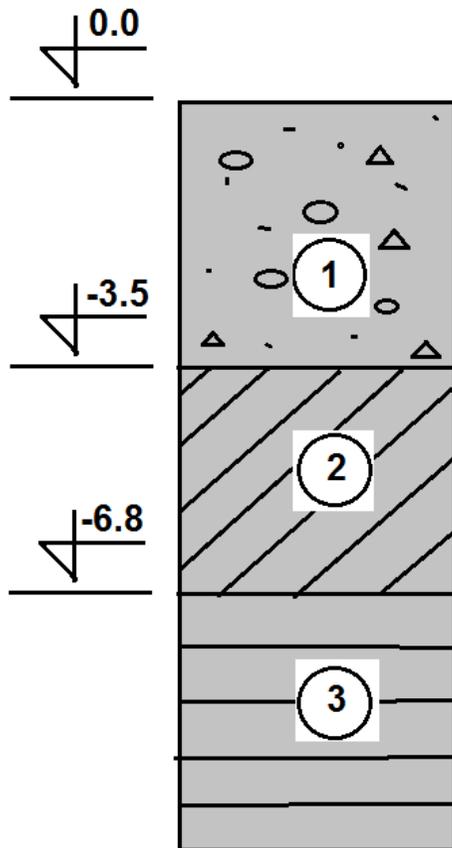
$$S = \frac{1}{E} \int \sigma$$

Осадка с ограничением глубины сжимаемой толщи по СП22:

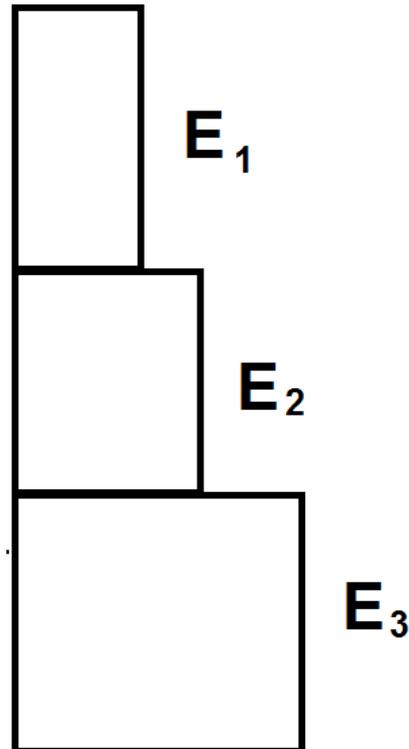
$$S = \frac{1}{E} \int_0^{h_a} \sigma(z) dz$$

Механические свойства грунтов

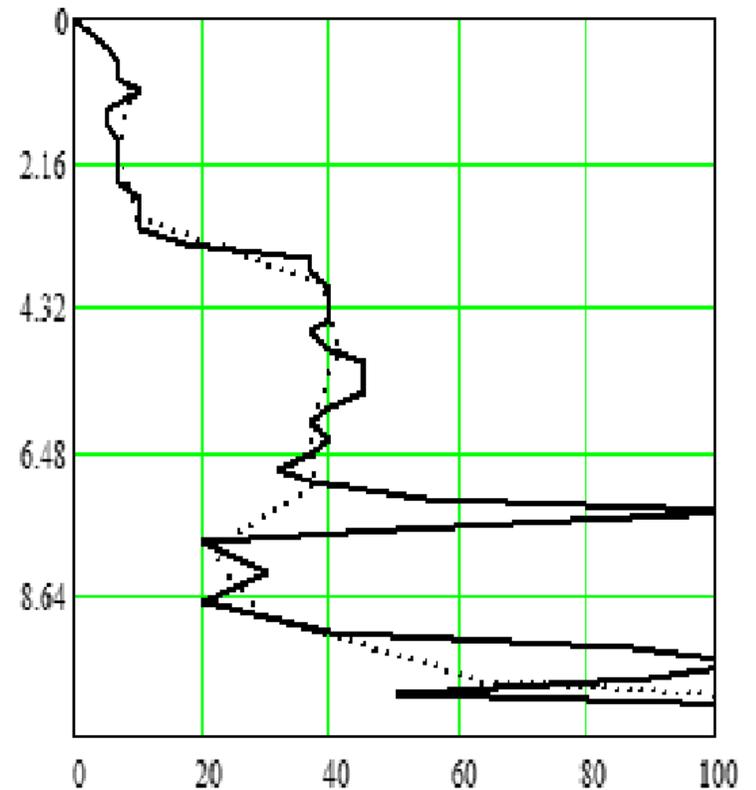
Геологическая колонка



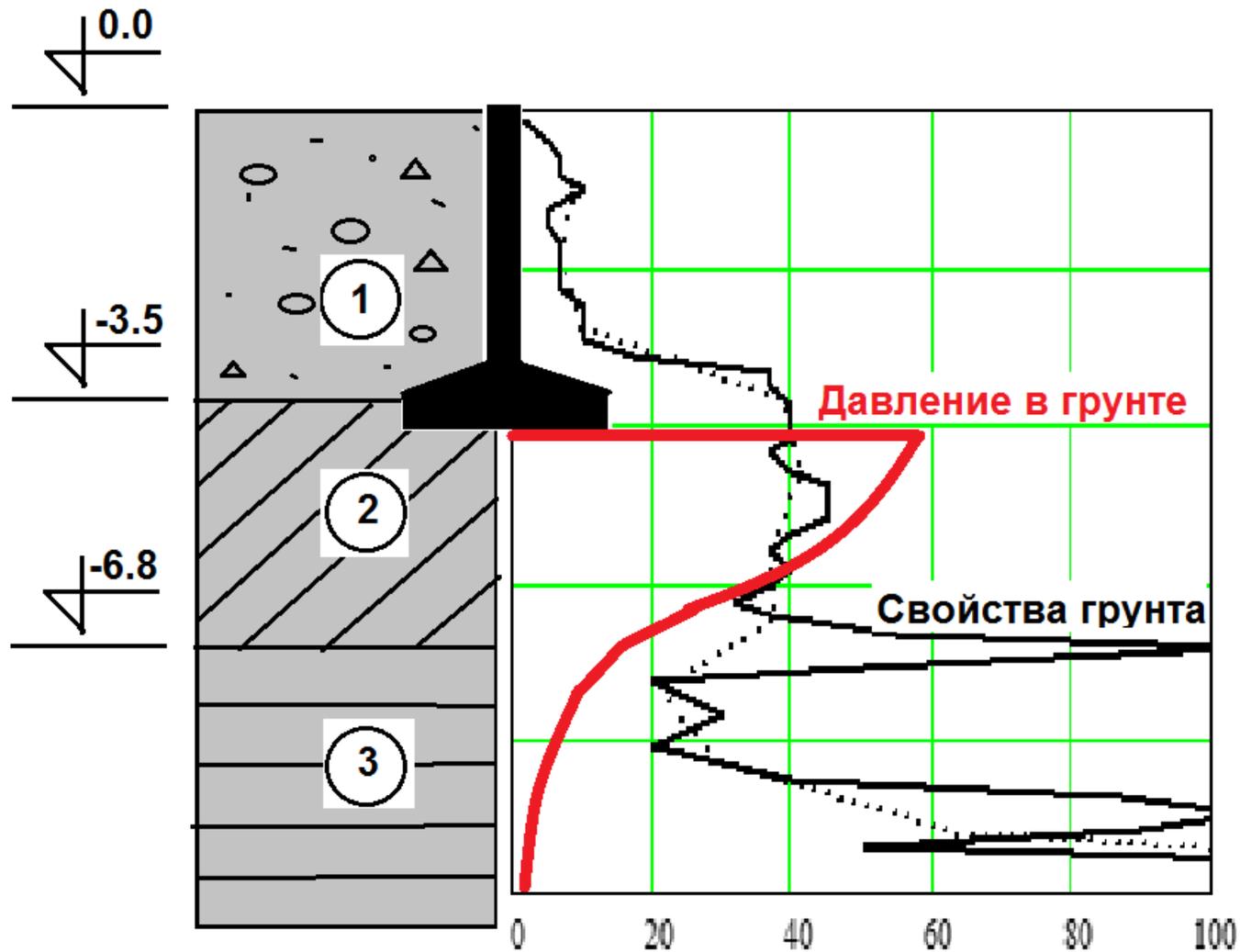
Свойства по данным лаборатории



Свойства по результатам зондирования



Поставленная задача: соединить давление в грунте с результатами зондирования



Внесение функции свойств грунта под знак суммирования

$$S = \frac{1}{E} \int \sigma \quad \rightarrow \quad S = \int \frac{\sigma}{E}$$

E – постоянная для
слоя грунта по
данным
лаборатории

E – функция для
геологического
разреза по данным
зондирования

**Предлагаемый вариант записи формулы
с учетом изменчивости модуля деформации:**

$$S = \int_0^{h_a} \frac{\sigma(z)}{E(z)} dz$$

**Предлагаемый вариант записи формулы для осадки,
вычисляемой по результатам статического зондирования:**

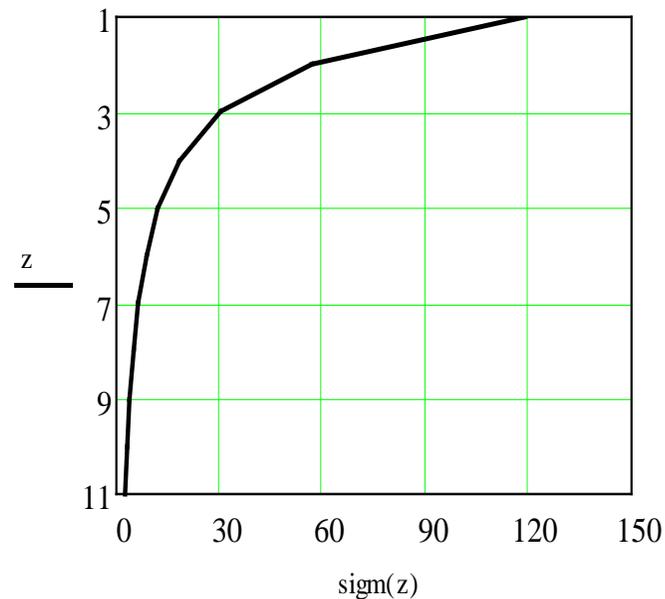
$$S = \frac{1}{K} \int_0^{h_a} \frac{\sigma(z)}{q_c(z)} dz$$

Последовательность вычислений:

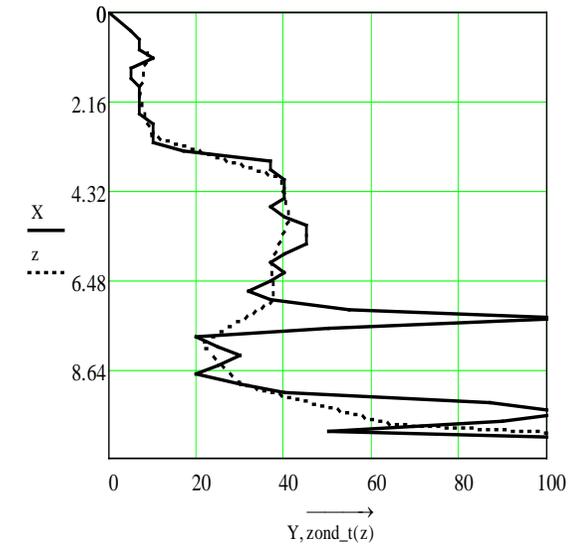
Вычисление добавочных давлений в грунте по формуле:

$$\text{sigm}(z) := \frac{3 \cdot (q - \gamma \cdot d) \cdot z^3}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{1}{\left[(x-w)^2 + (y-v)^2 + z^2 \right]^{\frac{5}{2}}} \, dx \, dy$$

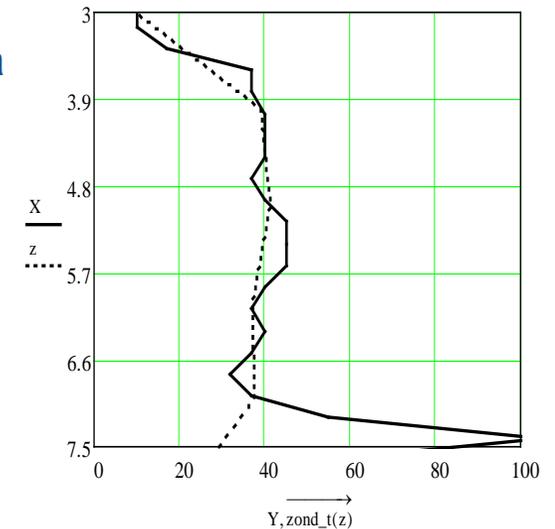
Построение эпюры добавочных давлений (кПа) в грунте по глубине толщи (м)



Ввод результатов полевого исследования грунтов статическим зондированием zond_t (МПа) по глубине толщи (м):



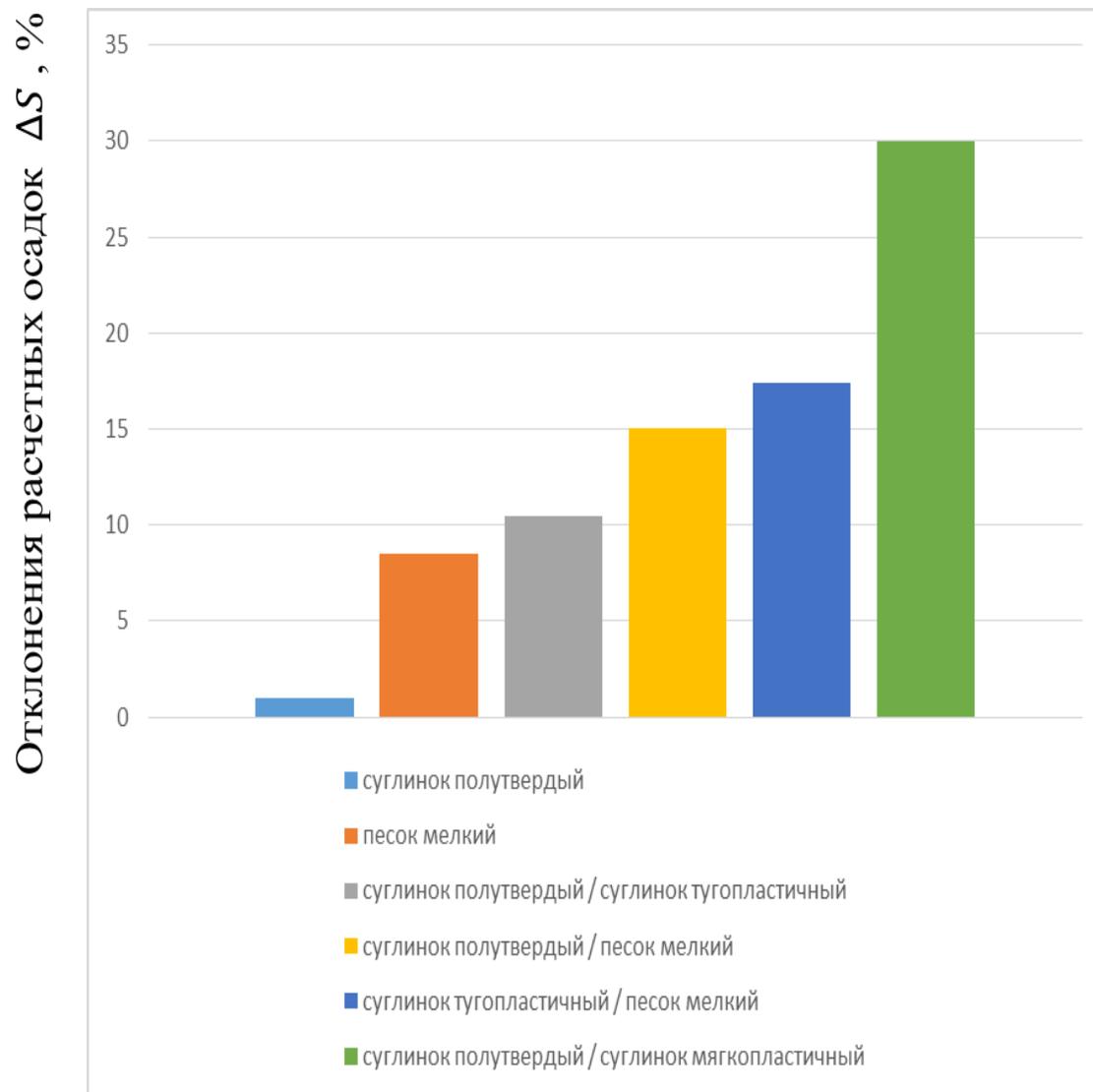
Выделение активной зоны грунта и необходимого для расчета осадки участка графика сопротивления зондированию:



Вычисление осадки по формуле:

$$\text{osadka} := \frac{0.8}{\kappa \cdot 100} \int_d^{d+ha} \frac{\text{sigm}(z)}{\text{zond_t}(z)} dz$$

Верификация метода расчета осадки по результатам статического зондирования



Расчетное сопротивление грунта

Форма записи по СП22:

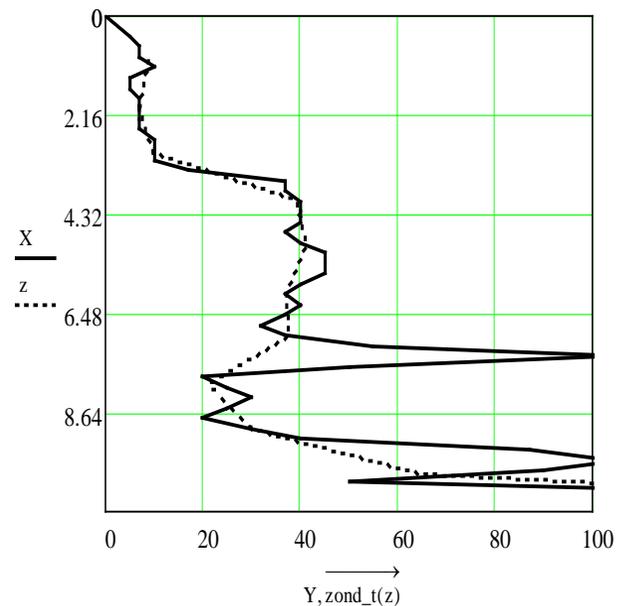
$$R^{II} = \frac{\gamma_{c1}\gamma_{c2}}{k} (M_{\gamma} \cdot b \cdot \gamma + M_q \cdot d \cdot \gamma' + M_c \cdot c)$$

Форма записи через характеристики прочности:

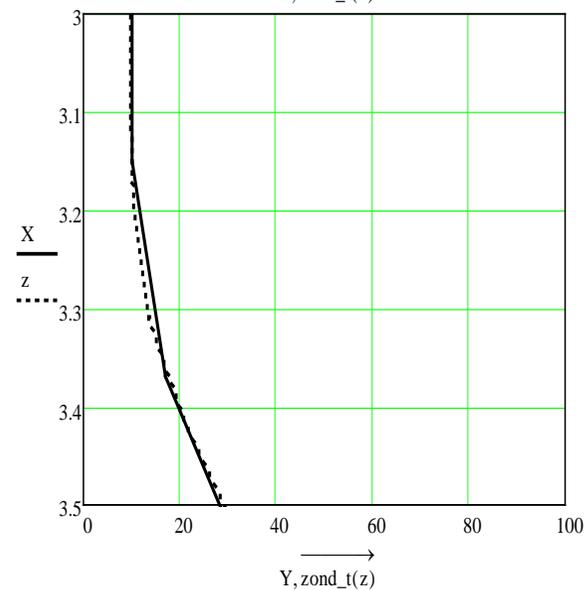
$$R = \frac{\gamma_{c1}\gamma_{c2}}{k} \cdot \left[\pi \cdot \frac{\gamma' d + \gamma \cdot 0.25b + C \cdot \cot \varphi}{\cot \varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi} + \gamma' d \right]$$

Последовательность вычислений:

Ввод результатов полевого исследования грунтов статическим зондированием $zond_t$ (МПа) по глубине толщи (м):



Выделение на графике зондирования участка, соответствующего глубине развития зоны предельного равновесия $b/4$:

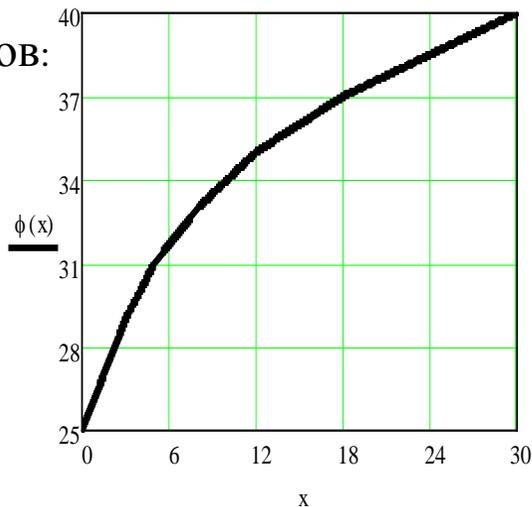


Вычисление среднего значения сопротивления под остриём зонда на выделенном участке:

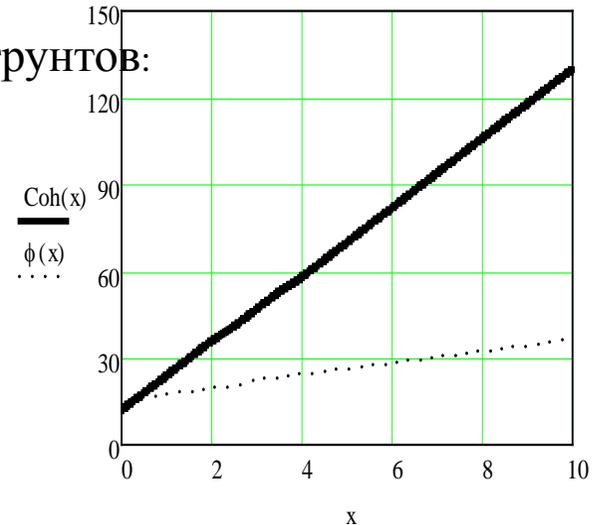
$$q_s := \frac{0.4}{b} \cdot \int_d^{d+\frac{b}{4}} zond_t(z) \, z$$

Определение прочностных характеристик (удельного сцепления, угла внутреннего трения) грунта через сопротивление грунта зондированию

• для песков:



• для глинистых грунтов:



Определение давления на грунт, соответствующего развитию зон разрушения грунта на глубину b/4:

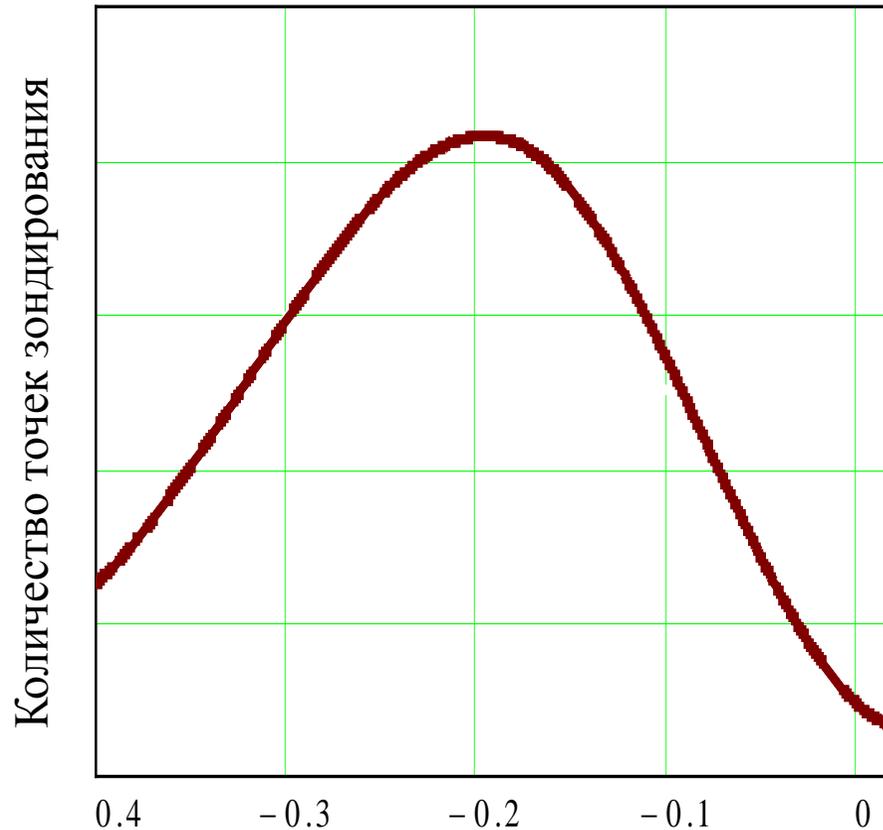
$$R_s := \pi \cdot \frac{\gamma \cdot \left(d + \frac{b}{4} \right) + Ch \cdot \cot(\varphi_i)}{\cot(\varphi_i) + \varphi_i - \frac{\pi}{2}} + \gamma \cdot d$$

Верификация метода вычисления расчетного сопротивления грунта по результатам статического зондирования



Огибающая гистограммы относительного отклонения (доли единицы) расчетного сопротивления грунта основания R по данным статического зондирования к расчетному сопротивлению, рассчитанному по характеристикам ИГЭ

Верификация метода вычисления силы предельного сопротивления выдергиваемого фундамента



Огибающая гистограммы относительного отклонения (доли единицы) силы предельного сопротивления основания выдергиваемого фундамента $F_{u,a}$ по данным статического зондирования к предельной силе выдергивания, рассчитанной по характеристикам ИГЭ

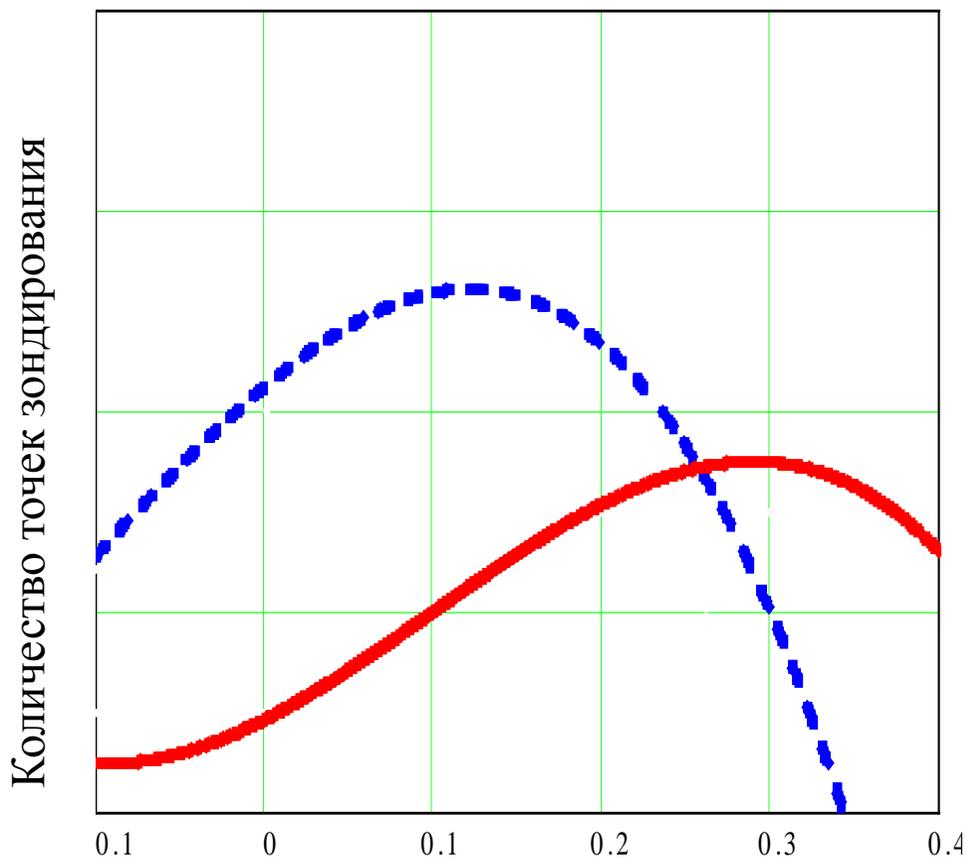
Данные статического зондирования в расчете оснований с коэффициентом постели

При расчете оснований, соответствующих модели Винклера, по результатам статического зондирования, может быть рекомендовано вычисление величины коэффициента постели C_n (согласно п.5.1.11а СП22.13330.2016):

$$C_n = K \left[\int_0^{h_a} \frac{\alpha_{\sigma z}(z)}{q_c(z)} dz \right]^{-1}$$

где $\alpha_{\sigma z}(z)$ – коэффициент угасания вертикальных напряжений по глубине.

Расчет несущей способности свай на вдавливание и выдергивание по результатам статического зондирования



Огибающие гистограмм относительного отклонения (доли единицы) несущих способностей свай на сжатие (сплошная линия) и выдергивание (пунктирная линия) по данным статического зондирования к соответствующим несущим способностям, вычисляемым на основании свойств ИГЭ

Заключение

Получены соотношения, позволяющие расчет фундаментов опор ЛЭП по результатам полевых испытаний грунтов статическим зондированием.

Произведена верификация (сравнение) результатов расчетов по разработанной методике с расчетами по лабораторным характеристикам грунтов.

Результаты работы реализованы в техническом сопровождении проекта технологического присоединения ВЛ к энергетическим установкам Курской АЭС с положительным решением госэкспертизы.