

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ МНОГОЭТАЖНЫХ И ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ В СЛОЖНЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

*Пойта П. С., д.т.н., профессор,
Клебанюк Д. Н., магистр технических наук,
Шведовский П. В., к.т.н., профессор*

Введение

Массовое строительство многоэтажных и высотных зданий на неоднородных основаниях, сложенных слабыми грунтами, грунтами с неравномерной сжимаемостью и в стесненных условиях, обуславливает необходимость поиска и перехода от традиционных плитных к более эффективным конструктивным решениям фундаментов [1].

Как показывает практика, плитные фундаменты (ПФ) на естественном основании эффективны только на грунтах средней сжимаемости, с локализованными в плане неоднородностями, так как они способны, из-за собственной жесткости, перераспределять на основания значительные вертикальные нагрузки.

Однако от жесткости фундаментов не зависит формирование ни общей осадки, ни общего крена, которые очень важны с точки зрения нормальной эксплуатации многоэтажных и высотных зданий, что и обуславливает необходимость перехода к плитным фундаментам на свайном основании, т. е. плитно-свайным (ПСФ), у которых сваи являются элементами повышения жесткости основания.

При этом степень эффективности применения ПСФ будет определяться совместностью работы плитной и свайной составляющих, зависящих от 3 условий:

- непосредственным опиранием плиты ростверка на грунт;
- определенной податливостью свай, позволяющей давать осадку свай под нагрузкой;
- наличием участков, достаточно удаленных от свай, в зоне расположения которых формируются «осадочные воронки».

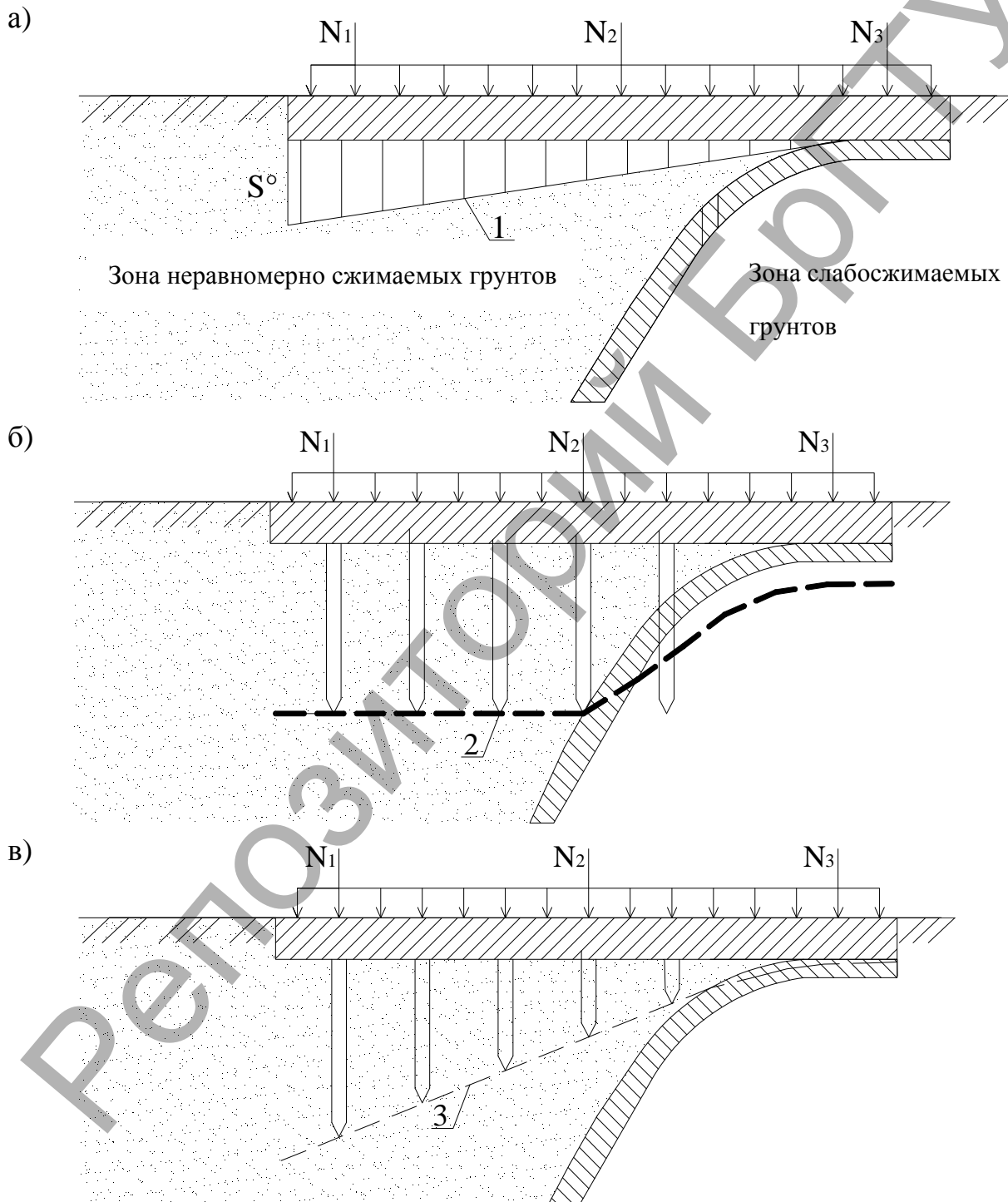
Экспериментальная часть

Наиболее оптимальным, исходя из вышеотмеченных условий, будет размещение свай в опорных зонах несущих колонн и стен (рисунок 1), что приурочивает работу плитной компоненты к пролетным, а не к межсвайным участкам и соответственно не ограничивает долю нагрузки, воспринимаемой плитой ростверка [2].

Отсюда, расчеты ПСФ должны проводиться как ПФ на неоднородном по сжимаемости основании с искусственно создаваемой (полезной) неоднородностью [1]. При этом количество свай и их параметры должны определяться условием восприятия нагрузки (Φ_i), которую необходимо перераспределить с плитной составляющей на свайную, и соответственно

$$\left. \begin{aligned} \Phi_i^1 &= N_i \left(1 - K_\alpha \cdot S_{ult} / S^0 \right); \\ \Phi_i^2 &= N_i - K_\alpha \cdot A_i \cdot R \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где Φ_i^1 – нагрузка, обеспечивающая ограничение величины общей осадки, а Φ_i^2 – давления по подошве плиты; N_i – полная нагрузка на расчетном участке; A_i – площадь участка; S_{ult} и S^0 – соответственно предельно допускаемая и средняя расчетная осадки; K_α – коэффициент уменьшения опорной площади плиты.



а – плитный; б – плитный на свайном поле; в – плитно-свайный

1 – эпюра осадок; 2 – поверхность равной несущей способности;

3 – поверхность с несущей способностью, обеспечивающей равномерную осадку

Рисунок 1 – Особенности работы ПФ и ПСФ на неоднородных грунтовых основаниях

Анализ схемы работы ПФ на свайном поле (рисунок 1б) позволяет отметить, что таким образом в некоторой мере решается проблема допустимой осадки, но проблема выравнивания неравномерных осадок плиты не решается вообще. Поэтому вместо свайных полей целесообразно проектировать систему подкрепляющих свай с параметрами и схемой расположения (рисунок 1в), обеспечивающей удовлетворение требованиям по неравномерности деформаций.

При этом подкрепляющие сваи должны рассчитываться на нагрузку

$$\Delta N_i = N_i - N_i^{red}, \quad (2)$$

где N_i – полная нагрузка на расчетный участок; N_i^{red} – суммарный отпор грунта под подошвой плиты на расчетном участке и

$$N_i^{red} = K_\alpha \cdot S_{i,a} \cdot C_{z,i}, \quad (3)$$

где $S_{i,a}$ – допустимая (желаемая осадка); $C_{z,i}$ – коэффициент постели естественного основания расчетного участка.

Отсюда следует, что одним из определяющих этапов в проектировании ПФ является определение местоположения поверхности равной несущей способности (рисунок 1в), т. е. глубины погружения поддерживающих свай.

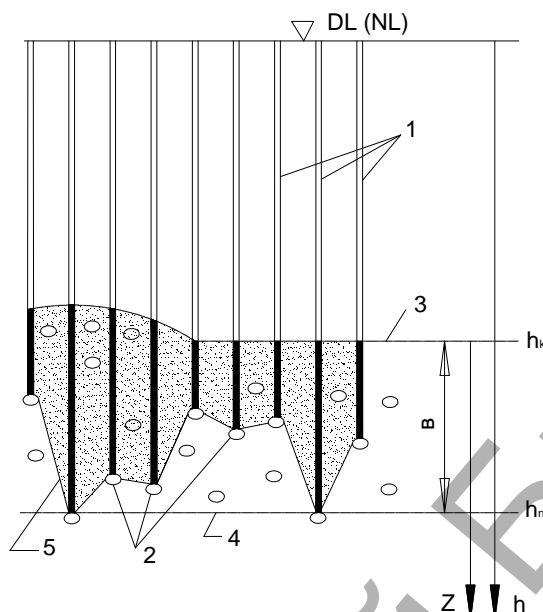
Единственной основой для определения глубины погружения поддерживающих свай являются данные инженерно-геологических изысканий, дающие относительно достоверные сведения только в тех точках, где производился отбор проб или методами зондирования определялись расчетные характеристики грунтов. Во всех остальных точках грунтового полупространства свойства грунтов обычно устанавливаются интуитивно или методами математической интерпретации.

Отсюда, решение проблемы требует понимания, что не только неоднородное, но и любое другое грунтовое основание объективно является стохастической средой, т. е. пространственная неоднородность и стохастическая природа – это фундаментальное свойство любой грунтовой среды и для адекватного описания распределения его физико-механических свойств необходимо применение вероятностных методов, позволяющих разработать вероятностную модель грунтового основания, адекватно отражающую его неоднородность и способную компенсировать неполноту инженерно-геологической информации.

В основу вероятностной модели в соответствии с [4, 5, 6] положены понятия «препятствие» и «несущий слой». Препятствием может быть любая точка внутри грунтового массива, ниже которой погружение свай конструктивно нецелесообразно, так как в ней выполняются все требования по несущей способности сваи и осадке. Физическая природа препятствия при этом не имеет значения, так как общим у них является расчетный отказ сваи при достижении препятствия.

Основными видами препятствий могут быть любые точки в грунтовой толще, при достижении которых глубина погружения свай отвечает всем условиям расчетов. Феноменологическая модель распределения препятствий в грунте имеет вид (рисунок 2).

Количественной мерой препятствия является глубина его расположения в грунтовом массиве от естественной поверхности или от любой другой поверхности, являющейся началом координат, например планировочной отметки.



1 – сваи; 2 – препятствия, случайно распределенные в несущем слое;
3 – верхняя граница несущего слоя (кровля); 4 – нижняя граница несущего
слоя (подошва); 5 – реализация случайной функции $Z(i)$

Рисунок 2 – Феноменологическая модель стохастического грунтового основания

Несущим слоем является слой грунта, в котором распределены препятствия и его положение определяется расположением в грунтовом массиве его верхней и нижней границ. При этом верхняя граница – это плоскость, параллельная поверхности и проходящая над препятствием, имеющим наименьшую глубину заложения, а нижняя – горизонтальная плоскость, проходящая под препятствием с наибольшей глубиной заложения.

Следует отметить, что в современной практике фундаментостроения под несущим слоем понимают инженерно-геологический элемент (ИГЭ), в который погружается свая на глубину $(2-3)d$. Однако практически всегда несущий ИГЭ не имеют четких границ раздела. И даже в случаях, когда ИГЭ разделены четко определяемой поверхностью, остаются неопределенными кривизна и положение этой поверхности в пространстве между точками изысканий.

Принятое определение несущего слоя принципиально отличается от традиционного, так как он определяет тот интервал глубин, в котором все сваи достигают требуемой несущей способности, и при этом напрямую не привязан к выделенным ИГЭ.

В детерминированной постановке задачей проектировщика является определение глубины месторасположения препятствий в каждой точке погружения сваи, что практически нереально.

В вероятностной же постановке задача может быть сформулирована следующим образом: установить вероятностное распределение препятствий в грунтовом массиве и выделить границы несущего слоя.

Как видно из рисунка 2, глубина погружения свай до встречи с первым препятствием является случайной величиной. Ломаная, проведенная через нижние концы свай, представляет собой одну из реализаций случайной функции глубины погружения свай в стохастическое неоднородное основание. За начало координат для этой функции удобно принять верхнюю границу несущего слоя (ось Z), эта функция определена на отрезке $i \in [1, \dots, N]$, длина которого численно равна числу свай в фундаменте, поэтому его длина всегда является целым числом "N", равным числу свай в фундаменте. Текущее значение аргумента i всегда целочисленное, равное номеру сваи. То есть множество значений аргумента является конечным множеством целых чисел от 1 до N, а множество значений функции является непрерывным на отрезке $Z \in [0, b]$. При этом для данной модели не имеет значения ни порядок нумерации свай, ни их расположение на плане, так как их изменение приводит только к фиксации других реализаций случайной функции $Z(i)$, без изменения вероятностных характеристик самой функции.

Глубины заложения верхней и нижней границ несущего слоя выбираются с учетом выполнения следующих условий

$$S \leq S_n \quad \text{при } h \geq h_k ; \quad (4)$$

$$P_1[R \geq R_p] \quad \text{при } h_k + Z_i \leq h \leq h_n , \quad (5)$$

где S и S_n – расчетная и предельно допустимая величины осадок свайного фундамента; $P_1[R \geq R_p]$ – вероятность того, что при погружении в несущий слой свая достигнет расчетной несущей способности.

Условие (4) исключает опирание свай на тонкие прослойки или линзы плотного грунта, лежащие выше несущего слоя. Оно требует, чтобы все без исключения сваи были погружены не менее, чем до верхней границы несущего слоя. Промежуточные плотные прослойки и линзы, при достижении которых сопротивление сваи может даже превзойти расчетное значение несущей способности, в принятой модели не относятся к препятствиям. Препятствиями являются только те точки, которые находятся в границах несущего слоя и в которых сопротивление сваи не менее расчетной несущей способности.

Соответственно толщина несущего слоя $b = h_n - h_k$, где h_n – наибольшая глубина погружения свай, при которой выполняется условие (5), а h_k – наименьшая глубина, ниже которой вероятность обнаружения препятствия $P_1[R > R_n]$.

Количественной же мерой распределения препятствия в грунтовом массиве, а значит его неоднородности, является интенсивность распределения препятствий. Приняв за интенсивность распределения препятствий в вертикальном направлении среднее количество препятствий на единичном отрезке величина интенсивности может быть описана следующей зависимостью

$$\lambda(Z) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{l_i} , \quad (6)$$

где $\lambda(Z)$ – интенсивность препятствий по направлению Z ; κ – количество отрезков; l_i – длина отрезков; n_i – количество препятствий на i -м отрезке; $i=1, 2, \dots, \kappa$ – номер отрезка.

Сегодня основным практическим методом обнаружения препятствий является статическое и динамическое зондирование. Однако они способны установить глубину залегания только самого верхнего препятствия. Поэтому в формуле (6) величина $n_i=1$, и она принимает вид

$$\lambda(Z) = \frac{1}{\kappa} \sum_{i=1}^{\kappa} \frac{1}{Z_i}, \quad (7)$$

где Z_i – глубина i -го препятствия, отсчитываемая от кровли несущего слоя (рисунок 2).

Однако определенная таким образом интенсивность распределения препятствий является постоянной величиной только в пределах несущего слоя. В реальных же инженерно-геологических условиях она находится в зависимости от глубины погружения в несущий слой. Используя процедуру разбиения толщины несущего слоя на интервалы с учетом того, что на интервале ΔZ_j обнаружено несколько препятствий средняя величина интенсивности на интервале будет равна

$$\lambda(Z_j) = \frac{1}{m_j} \sum_{i=1}^{\kappa} \frac{1}{Z_{ij}}. \quad (8)$$

Переходя к пределу $j \rightarrow \infty$; $\Delta Z_j \rightarrow 0$, можно получить сглаженную функцию $\lambda(Z)$.

Проанализируем способы поиска функции $\lambda(Z)$ для ПСФ с N числом свай. Ожидаемое число свай, встретивших препятствие на глубине Z

$$N_1(Z) = N \cdot P_1(Z), \quad (9)$$

а ожидаемое число свай, не встретивших препятствие до глубины Z ,

$$N_0(Z) = N \cdot [1 - P_1(Z)]. \quad (10)$$

Частоту, с которой сваи будут достигать препятствия, определим дифференцированием

$$\frac{dN_1(Z)}{dZ} = N \cdot q(Z), \quad (11)$$

где $q(Z)$ – функция плотности вероятности.

Отношение частоты встречи свай с препятствиями к ожидаемому числу свай, не встретивших препятствия, равно интенсивности распределения препятствий

$$\lambda(Z) = \frac{q(Z)}{1 - P_1(Z)}. \quad (12)$$

Отсюда интенсивность распределения препятствий может быть определена как условная плотность вероятности встречи сваи с препятствием на глубине Z при условии, что до глубины $(Z - dZ)$ встречи не произошло. При этом функция $\lambda(Z)$ является статистическим показателем неоднородности всей грунтовой толщи, а не только в пределах несущего слоя. Все это позволяет при проектировании через препятствие определить взаимодействие сваи с грунтовой толщей, формирующей ее несущую способность, а через несущий слой и интенсивность – степень и характер неоднородности этого взаимодействия в пределах всей строительной площадки.

Отсюда, основной задачей инженерно-геологических изысканий будет являться не только определение координат экстремальных точек поверхности равной несущей способности в плане и по глубине, но и поверхности с несущей способностью, обеспечивающей равномерную осадку.

В соответствии с теорией вероятности определить местоположение этих точек из бесконечного множества, при относительно ограниченном числе точек изысканий, близко к нулю, т. е. выявить их практически невозможно. А так как сегодня основным методом определения сопротивления свай на различных глубинах является статическое или динамическое зондирование грунтов, данные по которым наилучшим образом коррелируются с результатами статических испытаний свай, то проблема оптимизации количества точек зондирования и выбор их месторасположения являются существенными и актуальными [6, 7].

Бесспорно, что для получения представительной выборки значений глубины залегания этих поверхностей необходимо, чтобы точки зондирования были расположены равномерно по всей площади объекта.

При разбивке площадки изысканий на конечное число участков вероятность определения участка с экстремальной точкой будет равна

$$P(h_k) = P(h_n) = \frac{1}{n}, \quad (13)$$

где $P(h_k)$ – вероятность выявления участка, содержащего точку поверхности с минимальной глубиной заложения, соответствующей кровле несущего слоя (h_k); $P(h_n)$ – то же для участка, содержащего точку с максимальной глубиной заложения, соответствующей подошве несущего слоя (h_n); n – количество участков, на которое разбита поверхность.

Точность определения h_k и h_n зависит от количества испытаний n , их равновероятности и независимости, т. е. точки испытаний должны располагаться в узлах регулярной прямо- или треугольной сетки по всей площадке.

Так как форма этих поверхностей неизвестна, то целесообразно использовать последовательную процедуру испытаний [7, 8], приняв на нулевом шаге, при параметре неоднородности $\alpha=1$, глубину погружения свай

$$\bar{h}_0 = h_k + \frac{b}{2}, \quad (14)$$

где b – мощность несущего слоя и $b = h_n - h_k$.

Эти значения соответствуют равномерному распределению вероятности встречи с поверхностью, в виде наклонной плоскости, и несущей способностью, обеспечивающей равномерную осадку, в диапазоне глубин $h_k \leq h \leq h_n$ (рисунок 2).

Учитывая, что параметр неоднородности α определяет размах интервала изменения глубины заложения его середины, то естественно предположить, что чем выше его величина, тем больше диапазон изменения длин погружаемых свай в пределах строительной площадки.

При этом чем меньше относительный диапазон изменения длины свай, тем слабее отразится повышение точности определения вероятностных параметров \bar{Z} , \bar{h} и d на расчетное значение объема свайных работ и стоимость фундамента. Отклонение истинного значения \bar{h} от имеющегося на нулевом шаге \bar{h}_0 находится в пределах

$$\bar{h}_0 - \frac{b}{2} \leq \bar{h} \leq \bar{h}_0 + \frac{b}{2}. \quad (15)$$

В более общем виде это неравенство можно записать так

$$\bar{h}_0 - \xi \cdot b \leq \bar{h} \leq \bar{h}_0 + \xi \cdot b. \quad (16)$$

Отклонение истинной величины средней глубины погружения свай от \bar{h}_0

$$\bar{h}_0 - \bar{h} = \xi \cdot b. \quad (17)$$

и соответственно максимальный диапазон изменения коэффициента ξ , как следует из (17) $-\frac{1}{2} \leq \xi \leq \frac{1}{2}$, при среднем значении $-0,25 \leq \xi \leq +0,25$.

Чем меньше величина степени неоднородности, тем меньший вклад в общую величину средней глубины погружения свай дает уточнение \bar{h} . Так при α , равном 0,1, отклонение истинного значения глубины от \bar{h}_0 , полученной на нулевом шаге, составит 2,5%, т. е. результат, полученный на нулевом шаге, вполне удовлетворителен. При толщине несущего слоя сравнимой с \bar{h}_0 ($b = \bar{h}_0$) – $\alpha = 1$, а $\bar{\delta} = 25\%$ от \bar{h}_0 .

Как показывает анализ, граничным значением достоверности для нулевого шага является параметр неоднородности в пределах ($\alpha > 0,25$).

Совсем по-другому эту проблему необходимо решать при высокой степени неоднородности грунтов ($\alpha > 0,25$). Чтобы вычислить среднее значение функции, которой является поверхность препятствий относительно поверхности грунта, нужно точки зондирования размещать равномерно по всей площадке таким образом, чтобы каждому значению функции $\varphi(x, y)$ можно было приписать равную площадь поверхности. Тогда соответственно

$$\bar{h} = \frac{1}{2(n+1)} \left(h_k + h_n + 2 \sum_{i=1}^n y_i \right), \quad (18)$$

где $i=1, 2, \dots, n$ – количество промежуточных точек зондирования; h_i – глубина залегания плоскостей в i -й точке зондирования.

В соответствии с расчетами достаточно достоверно значение средней глубины залегания плоскостей можно иметь при минимизации точек зондирования от 5 до 9, включая полученные на нулевом шаге. Большее число зондировочных точек приводит к увеличению величины \bar{h} не более, чем на 3-5%, что несущественно с практической точки зрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывает практика, устройство плитных фундаментов приводит только к уменьшению абсолютных величин осадок зданий, что однако не означает уменьшения их неравномерности или избежания возможных кренов здания.

Расчет осадок многоэтажных и высотных зданий должен выполняться на основе нелинейных моделей механики грунтов, используя стохастическую модель грунтового массива, адекватно отражающего его неоднородность и способную компенсировать неполноту инженерно-геологической информации.

Эффективным решением плитно-свайных фундаментов является устройство вместо свайного поля подкрепляющих свай, размещаемых в опорных зонах несущих колонн и стен, с глубиной их погружения до поверхности с несущей способностью, обеспечивающей равномерную осадку и недопущение крена здания.

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оржеховский, Ю. Р. Плитно-свайные фундаменты как способ решения сложных геотехнических проблем / Ю. Р. Оржеховский, В. В. Лушников, Р. Я. Оржеховская, А. С. Ярдяков // Академ. вестник УралНИИпроект РААСН: Строительные науки. – 2013. – № 4. – С. 83-86.
2. Оржеховский, Ю.Р. Оптимизация решений плитных фундаментов на неоднородном основании / Ю. Р. Оржеховский, В. В. Лушников // Геотехнические проблемы строительства на рубеже XXI века. – Темиртау, 2006. – Т. 2. – С. 109-118.
3. Пойта, П. С. К особенностям учета неоднородности грунтовых условий при проектировании свайных фундаментов / П. С. Пойта, П. В. Шведовский, Д. Н. Клебанюк // Вестник БрГТУ. – 2006. – 2 1. – С. 110-118.
4. Сирожиддинов, З. Расчет и проектирование свайных фундаментов на основе теории надежности / З. Сирожиддинов // МГСУ. – М., 1993. – 260 с.
5. Абрамов, В.Е. Теоретические основы устройства свайных фундаментов на неоднородном грунтовом основании / В.Е. Абрамов // ДальНИИС, Владивосток, 1998. – 250 с.
6. Шведовский, П.В. Особенности учета изменчивости грунтов в процессе погружения забивных свай на их несущую способность / П. В. Шведовский, П. С. Пойта, А. Ю. Дроневиц // Вестник БрГТУ, 2012. – № 1(73). – С. 77-81.
7. Бондарик, Г. К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород / Г. К. Бондарик. – М.: Недра, 1971. – 198 с.
8. Шейнин, В. И. Определение статистических характеристик осадок системы фундаментов на неоднородном основании / В. И. Шейнин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М., 1980. – Вып. 66. – С. 28-37.
9. Шведовский, П. В. Особенности оптимизации геотехнических аспектов инженерной подготовки оснований в сложных грунтовых условиях / П. В. Шведовский, Д. Н. Клебанюк, П. С. Пойта // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением САПР: сб. ст. МНТК. – Брест: БрГТУ. – С. 71-77.