

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, ВЫБОРА КОНСТРУКЦИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛИТНО-СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПОД МНОГОЭТАЖНЫЕ И ВЫСОТНЫЕ ЗДАНИЯ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

**Пойта П.С., Сливка Д.Н., Шведовский П.В., Клебанюк Д.Н.**

Одной из основных тенденций современного фундаментостроения является рост нагрузок на фундаменты в связи с массовым увеличением этажности зданий, что обуславливает необходимость поиска ресурсов повышения несущей способности традиционных типов фундаментов и разработки новых конструктивных решений, особенно в случае слабых грунтовых оснований.

Рекомендации по применению свайных фундаментов в этих условиях служат предпосылкой поиска способов повышения эффективности их работы, одним из которых является изменение расчётных моделей и методов расчёта с целью наиболее полного учета работы комбинированных конструкций, позволяющих более эффективно использовать строительные свойства грунтов оснований [1, 2, 3].

К настоящему времени имеется ряд теоретических и экспериментальных исследований в данном направлении, центральной идеей которых является передача нагрузки ростверком не только на сваи, но и на грунтовое основание, при наличии контакта, через его подошву, т.е. концепция использования плитно-свайных фундаментов (ПСФ), для которых характерно совместное действие обеих компонент фундаментной плиты и свай - в передаче нагрузки на основание.

Исследования [4, 5, 6] показали, что несущая способность ПСФ может возрастать на 33-137% в зависимости от площади подошвы плиты, длины, количества свай и расстояния между ними. При полном включении плиты-ростверка в работу значительно уменьшается осадка свайных групп, что отражает факт мобилизации межсвайного грунта без прямой связи с осадкой свай. При этом по данным исследований [6] максимальные вертикальные напряжения, возникающие у боковой поверхности свай, быстро затухают при удалении от них.

Отсюда, рассматривая ПСФ с конструктивной точки зрения – как многократно статически неопределимую систему, для которой характерно многостороннее взаимодействие всех конструктивных элементов с грунтами оснований – эффективность включения плитной части в работу [2] предложил оценивать плитно-свайным коэффициентом, а общую несущую способность – суммой несущей способностей свайной группы и плиты. Основным же критерием при проектировании ПСФ должно быть равенство осадок плиты и концов свай.

В действующих методах расчёта осадок ПСФ в большинстве стран СНГ [7, 8] имеется один общий недостаток – отсутствие учёта влияния напряжённо-деформируемого состояния межсвайного грунта под действием нагрузки от свай на уменьшение жёсткости плитной части. С этой точки зрения, простое суммирование жёсткостей плиты и свайной группы неприемлемо.

В национальных ТНПА также отсутствуют методики расчёта деформативных свойств грунта в основании фундаментной плиты. Считается, что вся

нагрузка от внешних воздействий передается на основание свайной группой, а несущая способность фундамента определяется как сумма несущих способностей отдельных свай. Согласно действующим нормативным документам, осадка свайного фундамента определяется как для условного массива с условием, что межсвайный грунт полностью вовлечён в работу сваями.

Как отмечено в исследованиях [3, 4] разработка методики расчета с учётом специфики работы межсвайного грунта является одним из возможных путей наиболее полного использования строительных свойств основания, что в конечном итоге позволяет избежать необоснованных запасов по надёжности ПСФ, сделать их менее материалоемкими, соответственно уменьшив трудоёмкость и стоимость нулевого цикла.

Все это позволяет выделить два пути повышения эффективности проектных решений ПСФ многоэтажных и высотных зданий:

- снижение расхода материальных ресурсов на единицу несущей способности и, соответственно, веса фундаментов;
- создание новых конструкций фундаментов, позволяющих вовлечь в работу максимальный объем грунта, обеспечив при этом равномерное напряженное состояние грунтового массива в основании фундамента, и снижение концентрации напряжений на границе «ПСФ-основание».

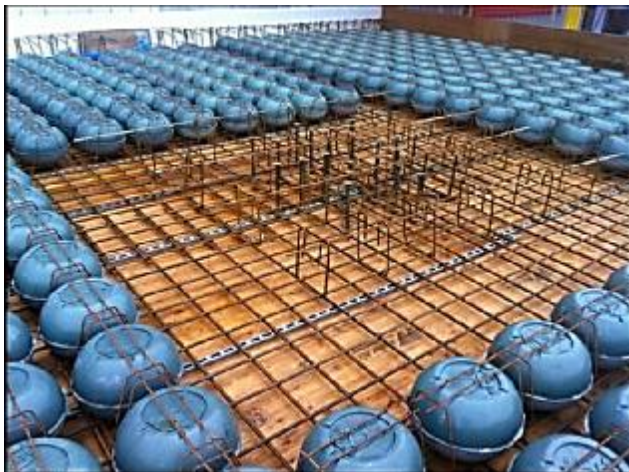
Для снижения веса фундаментов и материалоемкости достаточно перспективным решением является использование в качестве площадных фундаментов тонкостенных конструкций в виде вогнутых и выпуклых, по отношению к грунту, оболочек или железобетонных плит с выпуклой поверхностью опирания. Выявлено, что НДС грунтового основания под такими конструкциями кардинально отличается от НДС фундаментных плит с плоской подошвой, что обусловлено особенностью распределения реактивных напряжений по ширине подошвы – максимальные значения в центре сечения плиты и минимальное – по ее краям.

Не менее эффективными способами снижения материалоемкости фундаментных конструкций является снижение на них нагрузки, за счет применения облегченных многопустотных дисков перекрытия и устройства рёбер жёсткости, располагаемых по осям зданий и в местах действия максимальных продольных и поперечных сил и изгибающих моментов, или уширения в зоне расположения колонн.

Достаточно эффективно и устройство сплошной монолитной железобетонной плиты коробчатой конструкции с консолями (вылетом плиты за контуры здания).

Опыт применения и детальные исследования особенностей работы [11, 12] облегченных многопустотных дисков перекрытия с системой закрытых полостей, формируемых пустотообразователями – модулями из пустотелых конструкций «Eco-Line» или «Slim-Line», изготавливаемые из вторичного полипропилена – позволяет такой способ снижения материалоемкости перенести и на ПСФ.

Общий вид формирования системы закрытых полостей в плите ПСФ приведен на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Общий вид формирования системы закрытых полостей в ПСФ с помощью пустотообразователей**

Размеры и формы закрытых полостей определяются исходя из геометрических размеров (толщины) плиты и нагрузок на неё. Для предотвращения всплытия и вспучивания пустотообразователей при бетонировании рекомендуется использовать временную нагрузку или металлические изогнутые петли (рисунок 2).



*1 – временная нагрузка; 2 – металлические петли;  
3 – пустотообразователи модульные Sobiax «Eco-Line»*

**Рисунок 2 – Схема установки устройств для предотвращения всплытия и вспучивания пустотообразователей при бетонировании**

Достаточно эффективно и решение ПСФ с концепцией адаптивного управления параметрами в процессе строительства (метод «отложенного» решения).

Сущность метода – принятие решения устройства подкрепляющих свай в процессе строительства по результатам мониторинга осадок плиты по мере увеличения нагрузок. Для этого в тело плиты закладываются специальные гильзы, через которые, при необходимости, устраиваются буронабивные сваи.

Рассматривая особенности работы ПСФ следует отметить, что для повышения их несущей способности необходимо максимально включать в работу на отпор грунта плиту, что требует [13, 14]:

- непосредственного опирания плиты на грунтовый массив;
- наличия участков достаточно удаленных в плане от свай;
- определенной податливости свай, т.е. возможности осадки свай под нагрузкой.

В исследованиях [6] отмечено, что полноценный отпор по подошве плиты может быть только на участках вне зоны влияния свай, т.е. зоны формирования «осадочной воронки» радиусом  $(1-1,5)d$  за счет вовлечения околосвайного грунта в общую осадку со сваей. Шаг свай  $(5-8)d$  позволяет подключить к работе центральные участки межсвайных промежутков плиты.

Отсюда, сваи необходимо рассматривать как элементы жесткости основания, а свайную компоненту – как участок повышенной жесткости, и соответственно ПСФ как плиту на неоднородном, по сжимаемости, основании с искусственно создаваемой (полезной) неоднородностью.

Тогда, соответственно, размещение свай будет наиболее рационально в виде кустов или рядов с минимальным шагом в опорных зонах несущих колонн и стен, что позволяет приурочить работу плитной компоненты к межкустовым и межрядовым участкам и исключить межсвайные участки.

Некоторые особенности имеет схема размещения свай в сложных инженерно-геологических условиях (наличие в основании слабых грунтов, неравномерная сжимаемость основания) и стесненных условиях. В этих случаях, кроме свайных кустов, на каждом расчетном участке – грузовая площадь колонны или стены – необходимо в опорных зонах колонн и стен, по всему плану плиты, устанавливать подкрепляющие сваи, обеспечивающие выравнивание неравномерных осадок плиты, количество которых и параметры определяются условием восприятия доли нагрузки, которую необходимо снять с подошвы в соответствии с требованиями –

$$S' \leq S_{ult} \text{ и } P' \leq R, \quad (1)$$

где  $S'$  и  $S_{ult}$  – средняя расчетная и предельно допускаемая осадка;  
 $P'$  и  $R$  – среднее давление на основание и расчетное сопротивление грунта.

Такая практика расстановки свайных кустов, рядов и поддерживающих свай требует при расчете ПСФ учитывать совокупность факторов – взаимодействие свай с грунтом и плиты с грунтом, а также взаимовлияние свай через грунт и свай и плиты через грунт – в связи с тем, что как показывают исследования [4, 5, 9] угловые сваи в свайном поле в 2,5-4,0, а периметральные – в 1,5-2 раза перегружены по сравнению с центральными.

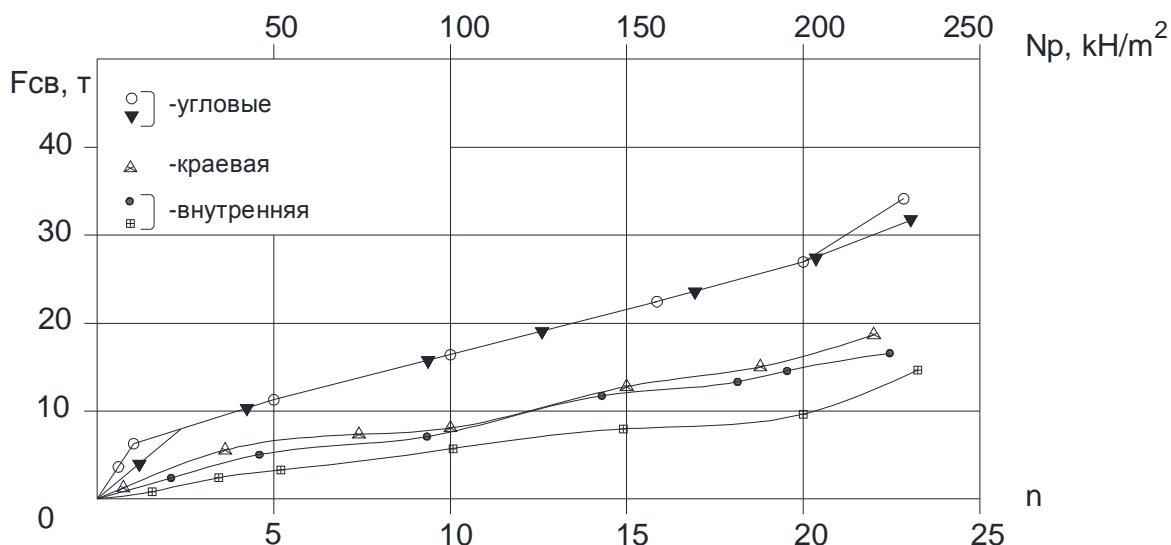
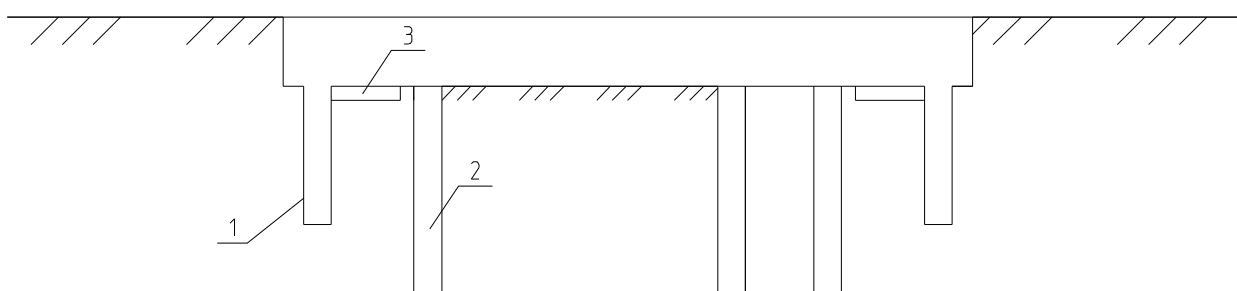


Рисунок 3 – Усилия в сваях в зависимости от их расположения

На рисунке 3 приведены графики зависимости усилий в забивных призматических сваях сечением  $0,3 \times 0,3$  м и длиной 11 м ПСФ монолитного здания переменной этажности высотой 70-90 м по данным [3].

Анализ графиков позволяет отметить превышение усилия ( $F_{св}$ ) в краевой свае над внутренними до 30%, а в угловых сваях усилия были значительно больше усилий во всех краевых и внутренних, что вызывает появление значительных изгибающих моментов. Во избежание развития деформаций угловых участков плиты нами предложена конструкция плитно-ребристого свайного фундамента (рисунок 4).

Вертикальные давления на грунт, которые концентрируются у края плиты создают пригруз грунта, существенно увеличивающий как активное, так и пассивное давление грунта на наружные грани ребер. За счет безопорных участков существенно уменьшается пригруз грунта у внутренних граней ребер и соответственно уменьшается активное давление грунта, противодействующее разгружающим давлениям на наружную грань ребер. Все это обуславливает создание разгружающих моментов на конце концевых участках плиты и соответственно позволяет уменьшить ее прогиб.



1 –

*периметральные ребра; 2 – сваи; 3 – безопорные плитные участки*

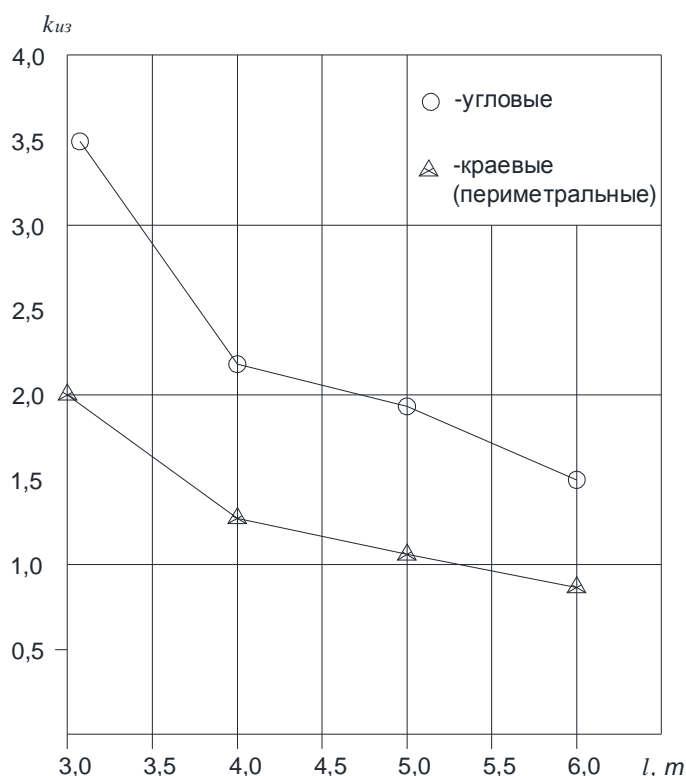
**Рисунок 4 – Конструктивная схема плитно-ребристого свайного фундамента**

Следует также отметить, что распределение усилий между сваями определяется шагом, длиной, нагрузкой на них и механическими характеристиками грунтов.

На рисунке 5 приведены графики интенсивности изменения коэффициентов взаимовлияния свай ( $k_{из}$ ) в зависимости от шага ( $l$ ) и расположения их в плане.

Анализ графиков показывает, что отношение усилий в угловых и краевых сваях максимально при шаге  $3d$  (2,0-3,5 раза) и с увеличением шага уменьшается до 0,9-1,5 раза.

Не менее существенно и влияние прочностных характеристик грунтов основания. Например, при повышении прочностных характеристик на 30% коэффициент влияния ( $k_{из}$ ) для угловых свай возрастает с 2,1 до 3,1 раза, а краевых – с 1,1 до 1,6 раза, т.е. нагрузка на эти сваи может возрасти на 50% и более. Поэтому для снижения перегрузки угловых и краевых свай рекомендуется применять более короткие сваи, либо менять шаг и/или диаметр.



**Рисунок 5 – Величина изменения коэффициента взаимовлияния свай в зависимости от шага и их расположения в плане**

Отсюда расчет несущей способности и осадок ПСФ представляет собой решение задачи с пятью неизвестными: осадок фундамента, плиты и группы свай и доли нагрузок, передаваемых на основание сваями и плитой, с учетом условия, что предельное сопротивление грунта в основании ПСФ, с выпором (сдвигом) из-под подошвы, может быть реализовано только при осадках, значительно превышающих допустимые значения.

Следует отметить, что для ПСФ характерна параллельная осадка около-свайного грунта и свай с ее линейным сопротивлением при небольших нагрузках, затем постепенная мобилизация предельного касательного сопротивления грунта по стволу сваи от пяты сваи вверх и последующее существенное возрастание нелинейности сопротивления, с приближением к предельному состоянию грунта под пятой сваи, при увеличении нагрузки [5, 6].

При этом рассеивание напряжений по глубине межсвайного пространства незначительно, вследствие чего напряжения в грунте с увеличением глубины изменяются также на небольшую величину, из-за совместного деформирования системы «плита-свайное поле-грунт межсвайного пространства», обуславливающего, при небольшом уровне нагрузки, незначительный отпор грунта под подошвой плиты и увеличением начальной жесткости свайного основания. Значительную роль при этом играет и рост сопротивления грунта по боковой поверхности сваи за счет увеличения разницы в смещениях свай слабонапряженного грунта под плитой.

Увеличение нагрузки приводит к противоположным изменениям процесса деформаций и соответственно увеличению жесткости грунтового основания.

Следует также отметить, что предельное сопротивление по боковой поверхности и острию сваи определяется как начальным напряженным состоянием

ем грунтового массива, так и дополнительными напряжениями от пригрузки грунта плитой.

При этом осадка грунта под плитой уменьшает взаимное смещение сваи и грунта и, соответственно, снижает отпор грунта смещению сваи. Аналогично влияние, вызванного сваей, смещения грунта на его отпор осадке плиты, что и обуславливает снижение жёсткости плиты и сваи в составе ПСФ, относительно жёсткости плиты без свай и одиночной сваи.

В случае применения только подкрепляющих («редких» свай) взаимовлияние свай через грунт несущественно, а для свайных полей («частых» свай) можно пренебречь взаимодействием плиты с грунтом и взаимовлиянием свай и плиты через грунт.

Для расчета взаимодействия подкрепляющих свай в составе ПСФ с грунтом по боковой поверхности и острию рекомендуется [2] использовать методы кривых нелинейного деформирования или нелинейных коэффициентов отпора. Расчет взаимодействия плиты с грунтом может производиться как для плиты на естественном основании, при этом результирующий локальный коэффициент постели уменьшается в зоне радиусом  $4d$ , падая до нуля на контакте со сваей.

При этом, характерное для свайных полей вовлечение в работу всего массива межсвайного грунта приводит к тому, что отпор грунта смещению свай концентрируется только в области острия и в нижней части ствола.

## **ВЫВОДЫ**

1. Анализ особенностей работы ПСФ показывает, что они являются эффективным инструментом решения таких сложных проблем, как ограничение общей величины и степени неравномерности осадок при строительстве многоэтажных и высотных зданий в сложных инженерно-геологических условиях.

2. При расчете ПСФ важным является полнота и достоверность учета анизотропии, начального напряженно-деформированного состояния и консолидации грунта, взаимосвязи и взаимовлияния свай друг на друга, степень перегруженности угловых и периметральных свай относительно центральных и механических характеристик грунта.

3. Расчет осадки ПСФ целесообразно разделить на две составляющие: локальную осадку продавливания отдельных свай и общую осадку «условного» фундамента с жесткостью в вертикальном направлении, равным осредненной жесткости свай и межсвайного грунта на сжатие, а во всех других направлениях – равной жесткости грунта, т.е. грунтовый массив принимается как конструктивно анизотропный.

4. Для определения осадки «условного» фундамента можно использовать конечноэлементный расчет в пространственной постановке.

5. Несовершенство нормативной базы требует проведения мониторинга на всех этапах строительства и после его завершения до стабилизации деформаций.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тер-Мартиросян, З.Г. Проблемы механики грунтов, оснований и фундаментов при строительстве многофункциональных высотных зданий и комплексов / В.И. Теличенко, М.В. Королев // Вестник МГСУ. – 2006. – № 1. – С. 18-27.
2. 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 УралНИИпроекта, РААСН 2015. – С. 82-86.
3. Шумятьев, О.А. Фундаменты высотных зданий / О.А. Шумятьев // Вестник ПНИПУ, «Строительство и архитектура». № 4. – М., 2014. – С. 203-245.
4. Береснев, А.С. О распределении заданного нагружения между плитой и сваями в плитно-свайном фундаменте / А.С. Береснев, А.Ю. Большаков, Г.Н. Гусев, В.В. Коркодинов, Б.Н. Пименов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2008. – Volume 4, Issue 2. – P. 33.
5. Оржеховский, Ю.Р. Экспериментальное исследование плитно-свайного фундамента / Ю.Р. Оржеховский, В.В. Лушников, А.С. Ярдяков // Академический вестник УралНИИпроект РААСН Строительные науки. – 2009. – Вып. 1. – С. 71-73.
6. Мирсаяпов, И.Т. Моделирование напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента при совместном деформировании с окружающим грунтовым массивом / И.Т. Мирсаяпов, Д.А. Артемьев // Вестник гражданских университетов. – С-Петербург, 2009. – № 2. – С. 121-124.
7. СП 50.102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов / Госстрой РФ; НИИОСП. – М, 2004.
8. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты / Министерство регионального развития РФ; НИИОСП. – М, 2011.
9. Особенности расчетов оснований и фундаментов зданий и сооружений ММДЦ «Москва-СИТИ» / С.Г. Безволев, О.А. Шулятьев, И.А. Боков, С.О. Шулятьев // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2008. – № 12. – С. 223-249.
10. Ильичёв, В.А. Принципы проектирования оснований и фундаментов высотных зданий, учитывающие их геотехнические особенности / В.П. Петрухин, В.И. Шейнин // Современное высотное строительство / ГУН «ИГЦ Москомархитектуры». – М., 2007. – С. 255-261.
11. Чураков, А.Г. Двухосная пустотная плита с инновационными видами пустот / А.Г. Чураков // Строительство уникальных зданий и сооружений, 2014. – № 6(21), С-Петербург, с. 71-81.
12. Коцюра, И.П. Экспериментальные исследования балочного фрагмента монолитной многопустотной плиты перекрытия / И.П. Коцюра, Е.А. Деркач, Н.Н. Шалобыта // Вестник ГТУ, т. 6, № 2. – 2026. – С. 74-82.
13. Мангушев, Р.А. плитно-свайный фундамент для здания повышенной этажности / Р.А. Мангушев, А.Б. Фадеев // Основания, фундаменты и механика грунтов. М., 2008. – № 1. – С. 15-19.
14. Гусев, Г.Н. Численное моделирование силового взаимодействия плитно-свайного фундамента с грунтовым массивом / Г.Н. Гусев, А.А. Ташкинов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т.5, № 3. – С. 359-363.