

УДК 691.32.008.6

## **РАСЧЕТ ОСАДКИ СВАЙНО-ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА**

**Сернов В.А.**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь)*

**Аннотация:** В статье приведены методики расчета осадки свайно-плитных фундаментов, учитывающие рассеивание напряжений под плитой в межсвайном пространстве.

**Abstract:** The methods of piled-raft foundations settlement calculation are given in the article. Stress dissipation under the raft base is taking into account.

Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований, проведенных до настоящего времени в нашей стране и за рубежом [1], а также данных модельных исследований, выполненных в лаборатории и на полигоне кафедры «Геотехника и экология в строительстве» БНТУ [2, 4], и натурных испытаний на строительных площадках [3, 4] г. Минска позволили выявить основные закономерности взаимодействия элементов свайно-плитного фундамента с основанием. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что традиционные расчетные схемы для определения несущей способности и осадки свайных фундаментов чрезмерно упрощены, не учитывают взаимодействие элементов фундамента, а результаты расчетов часто в несколько раз отличаются от экспериментальных данных. В соответствии с действующими

нормативно-техническими документами осадка группы свай определяется для условного массива. Принимается, что грунт в пределах условного фундамента оседает вместе со сваями. Такая схема не позволяет правильно отразить роль шага свай и учесть взаимодействие фундаментной плиты с основанием. Экспериментально было установлено [4], что при уменьшении шага свай в группе от  $6d$  до  $3d$  без изменения размеров условного фундамента осадка последнего снижалась в 2 и более раза. При включении плиты в работу осадка фундамента также существенно уменьшается. Результаты проведенных исследований опровергают широко распространенное до сих пор предположение о том, что грунт межсвайного пространства оседает вместе со сваями. Рассмотрим некоторые факты подтверждающие, что вертикальные деформации грунта межсвайного пространства незначительны по сравнению с осадкой свай.

Во-первых, давление на грунт под нижними концами свай в десять раз превышает давление на том же уровне в межсвайном пространстве от сил трения вдоль их боковых поверхностей. Следовательно, осадка свай должна быть больше осадки окружающего грунта.

Во-вторых, вертикальные напряжения от сил трения вдоль боковых поверхностей свай резко уменьшаются с удалением от них. Значения этих напряжений в любой плоскости, перпендикулярной ее оси, можно определить, используя решение Д. Пати (1963) [5]:

$$p_{z\sigma} = 1,148 f (R / r)^{-1,237}, \quad (1)$$

где  $f$  — расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности сваи в пределах последних 1–2 м у острия;

$r$  — радиус сваи;

$R$  — расстояние от оси сваи до исследуемой точки.

Эпюры напряжений, построенные по зависимости (1) показывают, что максимальные вертикальные напряжения, возникающие у боковой поверхности сваи, резко затухают с удалением от нее (рис. 1). Эти расчеты подтверждаются результатами экспериментальных исследований, проведенных С. И. Цымбалом [6] и объясняют отсутствие значительных вертикальных перемещений грунта уже на расстоянии менее  $0,5d$  от боковой поверхности сваи при проведении модельных исследований [2].

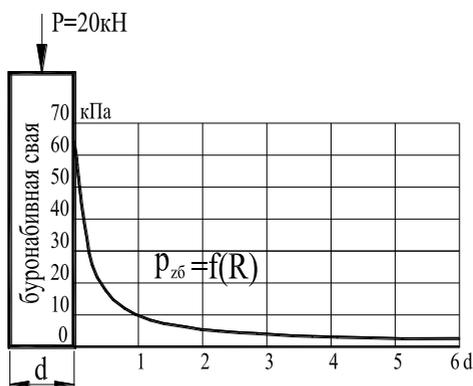


Рис. 1. Эпюра распределения вертикальных напряжений в уровне нижнего конца свай от сил трения грунта по боковой поверхности

В-третьих, при достижении свай сдвигов от осадки ее ствол начинает проскальзывать относительно окружающего грунта без дальнейшего увеличения сил трения вдоль боковой поверхности [7]. При последующем нагружении свай вся дополнительная нагрузка передается на грунт их нижними концами и увеличения осадки межсвайного грунта не происходит.

В-четвертых, многочисленные натурные и модельные испытания [2–4] показали, что при включении ростверка в работу несущая способность свайного фундамента возрастает, а деформативность уменьшается, что было бы невозможно при осадке окружающего грунта вместе со сваями.

Результаты выполненных экспериментальных и теоретических исследований [1–4] позволяют сделать следующие выводы:

1. Расчет осадки свайного фундамента как условного массива с некоторым допущением можно применять для групп с шагом свай не более 3-4d, и передачей большей части нагрузки на основание их боковыми поверхностями. С увеличением шага свай и уменьшением доли работы их боковых поверхностей этот метод будет давать значительную погрешность. В данном случае осадку группы свай целесообразно рассчитывать исходя из осадки одиночной свай с учетом их взаимодействия в группе.

2. Поскольку осадка группы свай значительно больше чем у окружающего грунта, включенный в работу ростверк, оседая вме-

сте с ними, оказывает давление на основание. С увеличением осадки напряжения под ростверком возрастают и рассеиваются частично или полностью в пределах длины свай, уменьшая давление на грунт под их нижними концами. В результате сглаживания максимальных пиковых напряжений под остриями свай, осадка фундамента с низким ростверком значительно меньше, чем с высоким.

Схема перераспределения давлений на грунт основания от внешней нагрузки  $N$  при уменьшении шага свай и включении ростверка в работу приведена на рисунке 2. Как было установлено выше, давление под нижними концами свай  $P_n$  во много раз превышает давления на том же уровне от сил трения вдоль их боковых поверхностей  $P_6$ . При достаточно большом шаге свай (рис. 2, б) эпюры давлений  $P_n$  и  $P_6$  на основание на уровне их нижних концов будут аналогичны таким же эпюрам одиночных свай (рис. 2, а).

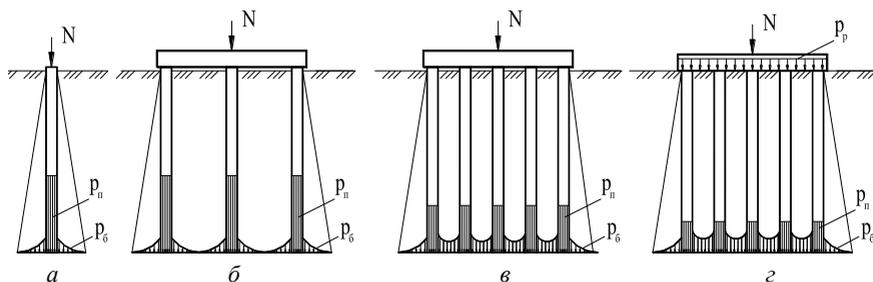


Рис. 2. Схема распределения давления на грунты основания одиночной сваи (а), группы свай с высокими (б, в) и низкими (г) ростверками

Увеличивая количество свай в группе без изменения внешней нагрузки  $N$  и размеров фундамента, давление на грунт межсвайного пространства  $P_6$  возрастает за счет передачи большей части этой нагрузки боковыми поверхностями свай из-за увеличения их общей площади и наложения напряжений вследствие уменьшения их шага (рисунок 2в). Давление под нижними концами свай  $P_n$  уменьшается, поскольку возрастает площадь их опирания на грунт. Кроме того, как показывает практика, несущая способность боковых поверхностей свай реализуется раньше, чем их нижних концов, особенно в песчаных грунтах, где значение сдвиговой осадки составляет всего несколько миллиметров [7], и вследствие этого, при увеличении

количества свай в первую очередь уменьшаются давления под их нижними концами свай.

При взаимодействии ростверка с основанием (рис. 2, з) под его подошвой возникает давление  $p_p$  и часть нагрузки  $N$  передается на грунт межсвайного пространства, разгружая основание на уровне нижних концов свай. При этом, в первую очередь, уменьшаются напряжения под остриями свай  $P_n$ . За счет обжатия грунта в основании ростверка и возникновения горизонтальных распорных напряжений возрастают силы трения вдоль боковых поверхностей свай, а неравномерность вертикальных напряжений в уровне их нижних концов уменьшается. Таким образом, эффективность взаимодействия ростверка с основанием связана не только с уменьшением доли нагрузки, приходящейся на сваи, но и в снижении неравномерности давлений на грунт в уровне их нижних концов. Нагрузка на основание распределяется более равномерно. Часть напряжений затухает в пределах межсвайного пространства, не достигая уровня нижних концов свай, и осадка такого фундамента гораздо ниже, чем группы свай с высоким ростверком.

При расчете осадки свайного фундамента деформации бетонных конструкций обычно не учитываются, а за расчетное сечение принимается плоскость на уровне нижних концов свай. Определяются дополнительные напряжения от внешней нагрузки на эту плоскость и с учетом деформационных свойств грунтов, расположенных ниже расчетного сечения, определяется осадка фундамента. При взаимодействии ростверка с грунтом часть нагрузки рассеивается в пределах межсвайного пространства, не оказывая влияния на напряженное состояние основания на уровне нижних концов свай. Величину рассеянной нагрузки можно определить, зная деформационные свойства грунта межсвайного пространства и характер затухания напряжений под подошвой ростверка.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что в верхней части основания группы свай с высоким ростверком вертикальные напряжения практически отсутствуют. Силы трения вдоль боковых поверхностей свай незначительны в пределах 1–2 м от их оголовков, а при забивке свай, в верхней части основания часто образуется зазор между ее стволом и грунтом, а силы трения отсут-

ствуют вообще. С глубиной вертикальные напряжения в межсвайном пространстве от сил трения вдоль боковых поверхностей возрастают и в однородных грунтах достигают максимального значения на уровне нижних концов свай. При включении ростверка в работу максимальные вертикальные напряжения возникают под его подошвой и уменьшаются с глубиной как под фундаментом на естественном основании.

Для оценки возможности применения теории линейно-деформируемых тел при определении напряжений в грунте межсвайного пространства под подошвой ростверка выполнено сравнение теоретических и опытных данных. На рисунке 3 представлены эпюры распределения напряжений в основании ростверков для фундаментов с разным количеством и шагом свай, построенные по экспериментальным [8] и расчетным данным по теории линейно-деформированных тел.

На рис. 3 слева даны эпюры распределения вертикальных напряжений в межсвайном пространстве для групп свай с высокими ростверками, справа — для групп свай с низкими ростверками. Эпюры в основании низких ростверков имеют седлообразную форму, поскольку напряжения от давления ростверка на грунт с глубиной затухают, а от сил трения вдоль боковых поверхностей свай возрастают. Для сравнения экспериментальных и теоретических данных построены эпюры дополнительных вертикальных напряжений от взаимодействия ростверка с основанием по разнице седлообразной эпюры суммарных напряжений в правой части схемы и эпюры для группы свай с высоким ростверком в левой ее части.

Сравнение теоретических и опытных значений показывает их совпадение, даже при давлениях под ростверками свыше 0,6 МПа. Погрешность составила не более 5 %. Для расчета же фундамента на естественном основании схожих размеров по теории линейно-деформируемых тел, давление под подошвой не должно превышать расчетное сопротивление грунта  $R = 0,24$  МПа при заглублении  $d = 1$  м. Таким образом, значения напряжений в межсвайном пространстве от взаимодействия ростверка с основанием с высокой точностью можно определить по теории линейно-деформируемых тел.

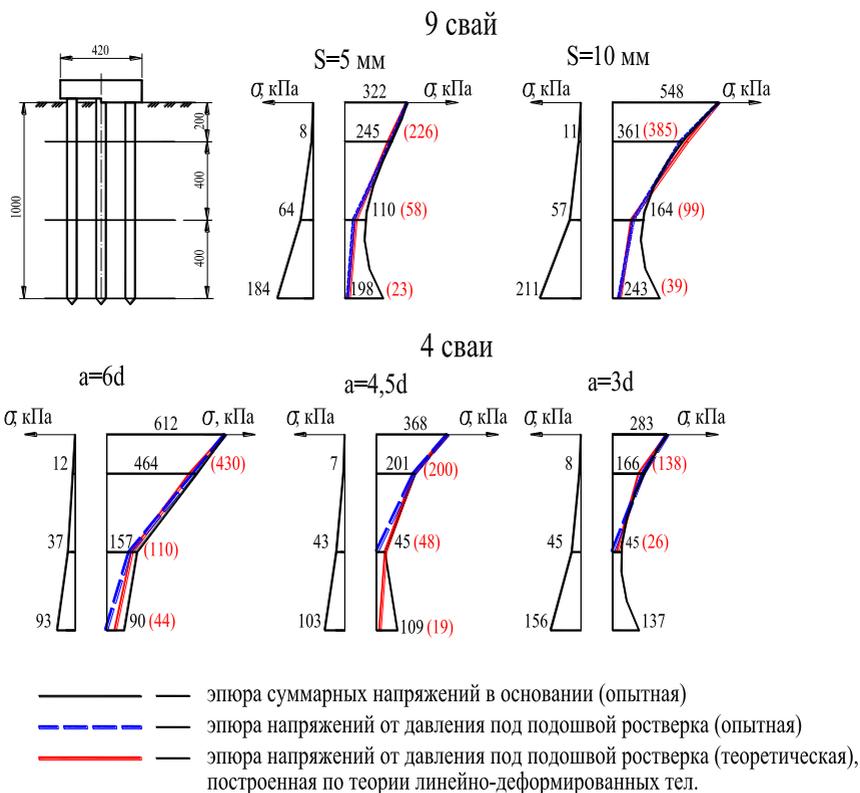


Рис. 3. Экспериментальные и теоретические эпюры распределения напряжений в основании ростверка

В зависимости от геометрических параметров свайного фундамента и напряжений под подошвой ростверка глубина сжимаемой толщи  $H_c$  может быть меньше или больше длины свай  $L$ . В случае  $H_c < L$  (рис. 4) давление под подошвой ростверка рассеивается в межсвайном пространстве и не оказывают влияние на напряженное состояние грунта на уровне нижних концов свай. Если  $H_c > L$  (рис. 5) давление под подошвой ростверка рассеивается не полностью в пределах длины свай и на уровне их нижних концов возникают дополнительные напряжения вызывающие увеличение осадки свай. Эти выводы подтверждаются результатами экспериментальных исследований. Из графиков на рис. 4 видим, что напряжения

в основании группы свай с низким ростверком выше, чем у группы с высоким, в случаях, когда  $H_c < L$ . Аналогичные результаты были получены при исследовании деформации грунта межсвайного пространства моделей в лотке с прозрачной стенкой [2]. Если глубина сжимаемой толщи  $H_c$  превышает длину свай  $L$  при расчете осадки группы свай необходимо учитывать дополнительные напряжения на уровне их нижних концов.

Расчет осадки свайного фундамента с несущим ростверком представляет собой решение задачи с двумя неизвестными. Во-первых, неизвестна осадка фундамента. Во-вторых, неизвестна доля нагрузки, передаваемая на основание ростверком. Данная задача может быть решена методом последовательных приближений исходя из условия равенства осадок группы свай и ростверка либо графическим способом. Задаваясь значениями осадки с определенным шагом строятся графики зависимости осадки ростверка и группы свай от нагрузки:  $s_r = f(P_r)$  и  $s_p = f(P_p)$ . Суммируя эти графики можно получить зависимость осадки свайного фундамента с несущим ростверком от нагрузки  $s_{pr} = f(P_{pr})$  (рис. 6).

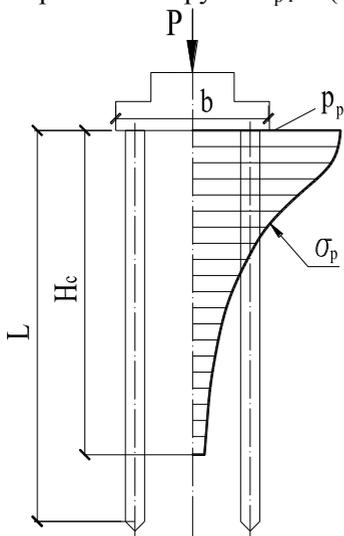


Рис. 4. Схема распределения вертикальных напряжений под подошвой ростверка при  $H_c < L$

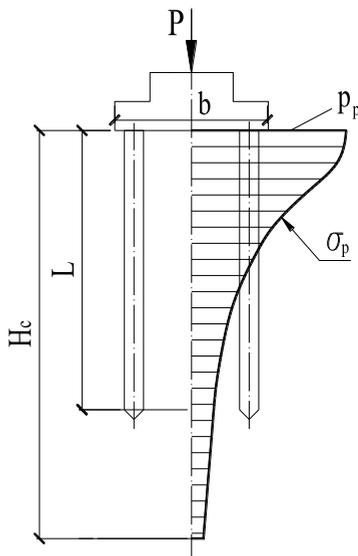


Рис. 5. Схема распределения вертикальных напряжений под подошвой ростверка при  $H_c > L$

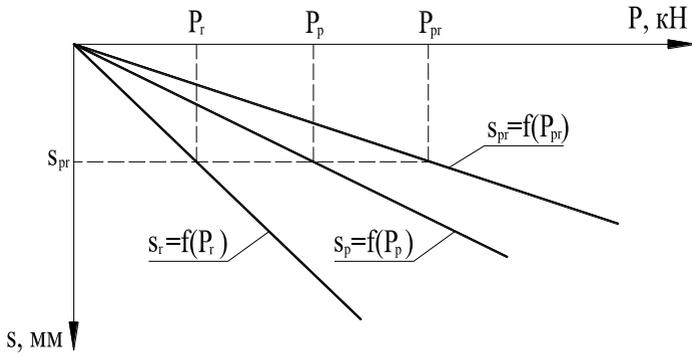


Рис. 6. Графический способ определения осадки свайного фундамента с несущим ростверком

График зависимости  $s_r = f(P_r)$  для ростверка строится как для фундамента на естественном основании. Поскольку не вся площадь подошвы ростверка опирается на грунт, а часть ее передает нагрузку на сваи, при построении зависимости  $s_r = f(P_r)$  необходимо использовать приведенную площадь подошвы ростверка  $A_r^r$ . Приведенная площадь равна разнице фактической площади ростверка и сумме площадей поперечных сечений свай, входящих в состав фундамента.

$$A_r^r = A_r - nA_{ci} \quad (2)$$

где  $A_r$  — площадь подошвы ростверка,  $\text{м}^2$ ;

$A_{ci}$  — площадь поперечного сечения сваи,  $\text{м}^2$ ;

$n$  — количество свай в фундаменте.

Поскольку глубина сжимаемой толщи зависит от соотношения длины и ширины  $l/b$  фундамента, значения  $l/b$  у приведенного и фактического ростверка должно быть одинаковым.

График зависимости  $s_p = f(P_p)$  для группы свай строится с учетом дополнительных вертикальных напряжений от взаимодействия ростверка с основанием на уровне нижних концов свай. При расчете осадки группы буронабивных свай можно использовать график зависимости осадки от нагрузки одиночной сваи, полученный по результатам статических испытаний. В этом случае осадка фундамента определяется с учетом коэффициента группового эффекта, характеризующего увеличение осадки группы свай при их взаимо-

действию по отношению к одиночной свае. Просуммировав долю нагрузки, воспринимаемую отдельно ростверком и сваями, можно построить график зависимости осадки свайного фундамента с несущим ростверком от нагрузки  $s_{pr} = f(P_{pr})$  (см. рис. 6). По данной зависимости можно определить осадку  $s_{pr}$  и соответствующие значения доли нагрузки, воспринимаемой отдельно ростверком  $P_r$  и сваями  $P_p$  в любой момент нагружения фундамента.

Условия работы грунта в основании ростверка и фундамента на естественном основании отличаются тем, что группа свай, представляющая собой вертикальное армирование основания под ростверком, препятствует выпору грунта из-под его подошвы. Этот фактор вызывает значительное увеличение несущей способности грунта в основании ростверка в сравнении с фундаментом на естественном основании. Эффективность армирования будет возрастать с уменьшением шага свай. В настоящее время не существует методики расчета, позволяющей точно определить предельное сопротивление грунта, расположенного между армирующими элементами. Результаты диссертационных исследований, выполненных С.Н. Банниковым, показали, что в случае вертикального армирования грунта его несущая способность возрастает в 2 и более раза.

Несущая способность группы свай определяется суммой предельных сопротивлений грунта вдоль их боковых поверхностей и под их нижними концами. Срыв сил трения вдоль боковых поверхностей свай, как правило, происходит раньше, чем глубинный выпор грунта из-под нижних концов. При взаимодействии ростверка с основанием изменяются условия работы грунта вдоль боковых поверхностей и под нижними концами свай. В межсвайном пространстве возникают горизонтальные напряжения, создающие дополнительный распор, и соответственно, способствующие увеличению сил трения вдоль боковых поверхностей свай, а вертикальные напряжения в уровне их нижних концов создают дополнительную пригрузку, препятствующую выпору грунта. Напряжения, возникающие в основании ростверка, способствуют увеличению несущей способности свай. Однако, в верхней части межсвайного пространства осадка грунта, расположенного под подошвой ростверка, будет незначительно отличаться от осадки свай. Поскольку, для реализации сил трения вдоль боковых поверхностей свай разница этих осадок должна достигнуть некоторого значения сдвиговой осадки  $S_{cd}$ , в верх-

ней части основания боковая поверхность свай включается в работу лишь частично. Значение  $S_{cd}$  зависит от вида грунта [7], а для песчаных грунтов  $S_{cd}$  не превышает 5 мм. Снижение сопротивления боковых поверхностей свай, в результате влияния ростверка, в песчаных будет незначительным и при расчете несущей способности этот фактор можно не учитывать. В глинистых грунтах сдвиговая осадка достигает 25мм и влияние ростверка на сопротивление боковых поверхностей свай распространяется на гораздо большую глубину, чем в песках. При расчете несущей способности свай в глинистых грунтах сопротивление их боковых поверхностей рекомендуется не учитывать до глубины равной  $B/2$  от подошвы ростверка ( $B$  — ширина подошвы ростверка). Значение глубины равное  $B/2$  принято по результатам анализа эпюр затухания напряжений в основании ростверка, построенных по экспериментальным данным.

Таким образом, взаимное влияние свай и ростверка способствует увеличению несущей способности этих элементов фундамента по сравнению со значениями, полученными при их раздельном нагружении. Результаты модельных и натурных испытаний свайных фундаментов показывают, что несущая способность группы свай с низким ростверком часто оказывается больше суммарной несущей способности свай и ростверка при их раздельных испытаниях в тех же грунтовых условиях. При включении ростверка в работу графики зависимости осадки от нагрузки  $s = f(P)$  имеют более пологий характер. Экспериментально сложно установить предельное сопротивление грунта в основании такого фундамента, поскольку при ступенчатом нагружении, с увеличением осадки возрастает сопротивление ростверка и горизонтальный распор грунта вдоль боковых поверхностей свай. Деформации стабилизируются даже при их значениях, существенно превышающих предельно допустимые осадки.

Предельное давление в основании ростверка армированного сваями с выпором грунта из-под его подошвы может быть достигнуто только при осадке, значительно превышающей ее предельно допустимое значение. При таком условии решение данной задачи не имеет практического значения, поэтому при оценке предельной нагрузки на свайный фундамент учитывается не несущая способность грунта в основании ростверка, а прогнозируемое значение доли работы ростверка при расчетной осадке. Поскольку значение нагрузки, передаваемой ростверком на основание, зависит от осадки

фундамента, задача по определению предельного сопротивления грунта и его деформаций решается совместно, используя рассмотренный выше графический метод.

## Литература

1. Сернов, В.А. Совместная работа свай с ростверком в песчаных грунтах / В.А. Сернов // Сб. науч. тр./ ПГАСА. – Днепропетровск, 2003. – Вып. 22, ч.1. : Строительство, материаловедение, машиностроение. – С. 252–256.

2. Сернов, В.А. Исследование напряженно-деформированного состояния грунта в межсвайном пространстве / В.А. Сернов // Геотехника Беларуси : наука и практика : сб. статей междунар. науч.-технич. конф., Минск, 20-22 мая 2008 г. / БНТУ; редкол. : М.И. Никитенко [и др.]. – Минск, 2008. – 239–246 с.

3. Сернов, В.А. Эффективные конструкции свайных фундаментов с несущими ростверками / В.А. Сернов // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. науч. трудов XVI Междунар. науч.-методич. семинара, Брест 28-30 июня 2009 г. : в 2 ч. / БрГТУ; редкол. : А.А. Борисевич [и др.]. – Брест, 2009. – Ч. II. – С. 174–178.

4. Sernov, V.A. The increase of bearing capacity of pile foundations taking into account soil-raft interaction / V.A. Sernov // Modern Building Materials, Structures and Techniques: The 10th International Conference. – Lithuania, 2010. – S. 1153–1160.

5. Далматов, Б.И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б.И. Далматов, Ф.К. Лапшин, Ю.В. Россихин. – Л. : Стройиздат, 1975. – 240 с.

6. Цымбал, С.И. Экспериментальное исследование напряженного состояния в основании модели висячей сваи / С.И. Цымбал // Республ. межвед. науч.-техн. сб. – Киев : Будівельник, 1973. – Вып. 6 : Основания и фундаменты. – С. 134–141.

7. Лапшин, Ф.К. Расчет свай по предельным состояниям / Ф.К. Лапшин. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 152 с.

8. Козачок, Л.Д. Исследование распределения вертикальных напряжений в основании кустов висячих свай с низким ростверком: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Л.Д. Козачок. – Л., 1979. – 174 л.