

**Министерство строительства  
и жилищно-коммунального хозяйства  
Российской Федерации**

**Федеральное автономное учреждение  
«Федеральный центр нормирования, стандартизации  
и технической оценки соответствия в строительстве»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО РАСЧЕТУ ОСАДОК  
ВЕРТИКАЛЬНО-НАГРУЖЕННЫХ СВАЙ ГРУПП  
С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ**

**Москва 2020**

## Содержание

1	Область применения.....	1
2	Нормативные ссылки.....	1
3	Термины и определения.....	2
4	Общие положения.....	2
5	Расчет свайных фундаментов по методу коэффициентов взаимного влияния .....	6
6	Расчеты свайных фундаментов для различных расчетных схем инженерно-геологических условий .....	14
7	Расчет функции влияния численным методом.....	19
8	Рекомендации по анализу и обработке полученных результатов расчетов .....	222
9	Рекомендации по оформлению полученных результатов расчетов.....	23
10	Примеры выполнения расчетов свайных фундаментов по методу коэффициентов взаимного влияния.....	255
	Библиография .....	511

## **Введение**

Методические указания разработаны в развитие положений СП 22.13330.2016 «СНиП 2.02.01-83\* Основания зданий и сооружений», СП 24.13330.2011 «СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты» в части расчета осадок вертикально-нагруженных свай групп с учетом их взаимного влияния. В настоящих методических указаниях приведены сведения и рекомендации по расчету осадок вертикально-нагруженных групп свай с учетом их взаимного влияния, по методу коэффициентов взаимного влияния.

В настоящее время, в промышленном и гражданском строительстве наблюдается рост доли свайных фундаментов. Эта тенденция объясняется ростом нагрузок на основание, застройкой территорий ранее считавшихся малопригодными для строительства, ростом масштабности и сложности строительства в целом.

Для повышения эффективности применения свайных фундаментов совершенствуются методы расчета свайных фундаментов.

Расчет свайных фундаментов по деформациям – одна из важнейших задач механики грунтов и фундаментостроения. В настоящее время, за исключением численных методов, большинство широко применяемых методов расчета осадок рассматривают свайный фундамент как некоторое, весьма существенное геометрическое упрощение (условный фундамент, условная свая), что не позволяет рассматривать поведение индивидуальных свай в составе свайного фундамента и даже такие базовые параметры как шаг и положение свай.

Один из наиболее существенных факторов не позволяющий проводить детальные расчеты свайных фундаментов для повышения их эффективности

– высокие трудозатраты на выполнение расчетов и высокая стоимость специализированных расчетных комплексов.

Представляется, что указанная проблема может быть решена применением метода коэффициентов взаимного влияния, основанного на принципе суперпозиции теории упругости, для расчета свайных фундаментов без значительной потери в точности расчета.

В настоящих методических указаниях приведены сведения и рекомендации по расчету осадок вертикально-нагруженных групп свай, с учетом их взаимного влияния, по методу коэффициентов взаимного влияния.

Методические указания разработаны с учетом актуализации нормативной базы за последние десять лет, в том числе СП 24.13330.2011, ГОСТ 5686–2020, а также СП 305.1325800.2017 (в части геотехнического мониторинга при строительстве свайных фундаментов).

Методические указания предназначены для специалистов проектных и строительных организаций.

Методические указания разработаны авторским коллективом АО «НИЦ «Строительство» – НИИОСП им. Н.М. Герсевича (канд. техн. наук *В.Г. Федоровский*, науч. сотр. *И.А. Боков*, мл. науч. сотр. *А.И. Калмыкаев* и *И.Р. Сайфуллин*, под общей редакцией канд. техн. наук *И.В. Колыбина* и канд. техн. наук *Д.Е. Разводовского*).

## **1 Область применения**

Настоящие методические указания распространяются на выполнение расчетов осадки вертикально нагруженных свайных групп по методу коэффициентов взаимного влияния при проектировании свайных фундаментов вновь строящихся и реконструируемых зданий и сооружений (далее – сооружений).

Методические указания не распространяются на проектирование плитно-свайных фундаментов; свайных фундаментов возводимых на вечномёрзлых, просадочных и набухающих грунтах; на сваи прорезающие целиком хотя бы один слой скальных или полускальных грунтов; на полые сваи погружаемые с открытым нижним концом; на сваи с уширением; на грунтоцементные и деревянные сваи.

## **2 Нормативные ссылки**

В настоящих методических указаниях использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 5686–2020 Грунты. Методы полевых испытаний сваями

СП 22.13330.2016 «СНиП 2.02.01-83\* Основания зданий и сооружений» (с изменениями № 1, № 2, № 3)

СП 24.13330.2011 «СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты» (с изменениями № 1, № 2, № 3)

СП 58.13330.2019 «СНиП 33-01-2003 Гидротехнические сооружения. Основные положения»

СП 305.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве»

Примечание – При пользовании настоящими методическими указаниями целесообразно проверить действие ссылочных документов в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный документ, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого документа с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил целесообразно проверить в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

### **3 Термины и определения**

В настоящих методических указаниях использованы следующие термины с соответствующими определениями:

**3.1 относительная длина сваи:** Отношение длины сваи к ее диаметру,  $l/d$ .

**3.2 относительная сжимаемая толщина свайного фундамента:** Отношение глубины сжимаемой толщи к длине сваи,  $h/l$ .

**3.3 функция влияния:** Зависимость величины дополнительной осадки ненагруженной сваи находящейся в поле деформаций нагруженной сваи от расстояния между сваями.

### **4 Общие положения**

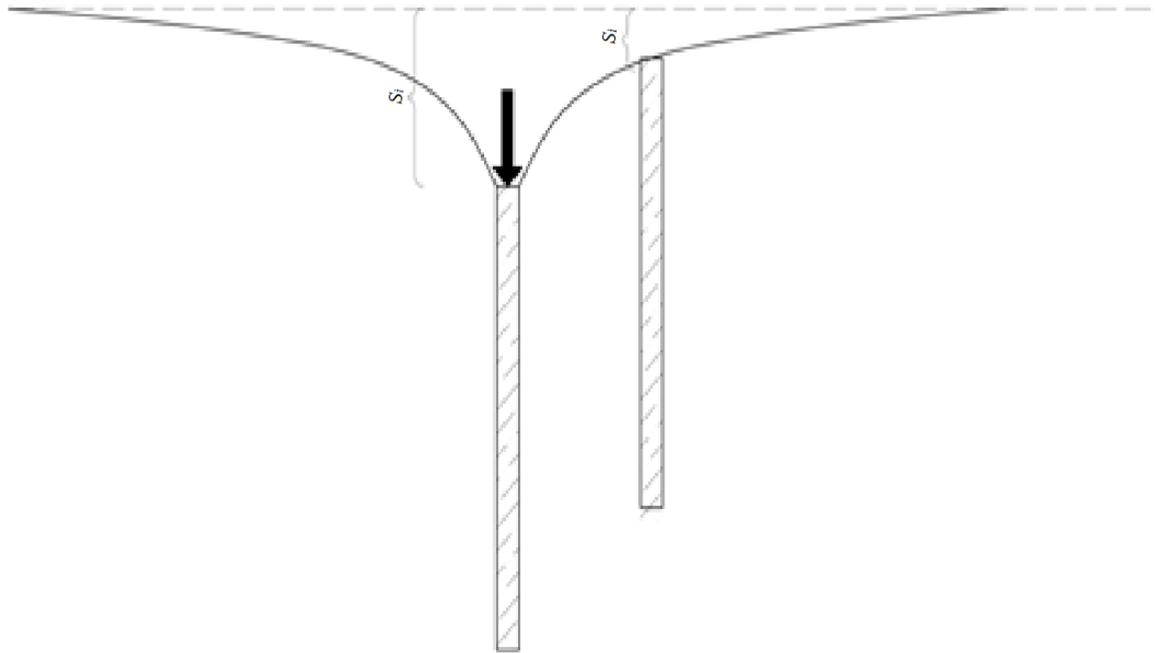
**4.1** В составе обязательных расчетов согласно СП 22.13330 и 24.13330 при проектировании свайных фундаментов содержатся требования к расчету по предельным состояниям второй группы.

4.2 Расчеты по предельным состояниям второй группы могут быть выполнены в соответствии с пунктами 7.4.2 – 7.4.5 СП 24.13330.2011 по методу коэффициентов взаимного влияния (далее – МКВВ). В настоящих методических указаниях поясняются основные положения по расчету с помощью МКВВ, а также приводятся новые положения.

4.3 Среди существующих известных методов расчета осадки свайных фундаментов МКВВ [1] – [4] занимает промежуточное положение по точности и подробности получаемых результатов между методами условного фундамента или эквивалентной сваи (опоры) и детальным численным решением в пространственной постановке. МКВВ характеризуется высокой, по сравнению с численными методами, скоростью расчета, хорошей сходимостью с результатами численных решений.

Существенное отличие МКВВ от более простых методов состоит в том, что МКВВ позволяет рассчитывать свайные группы произвольной конфигурации с учетом расположения свай в плане и их шага, а также получать коэффициенты жесткости индивидуальных свай в составе свайного фундамента, в том числе с учетом упруго-пластической работы грунта.

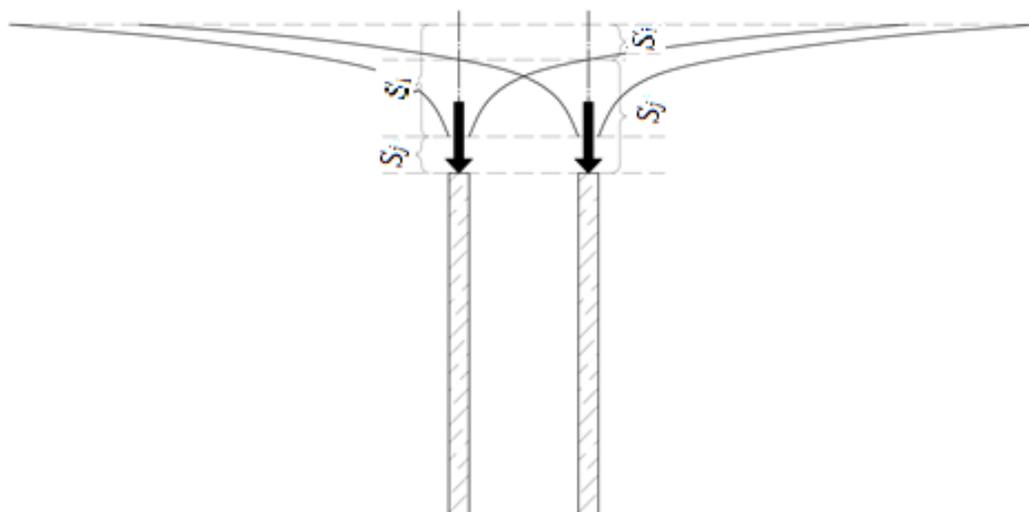
4.4 Метод коэффициентов взаимного влияния основан на принципе суперпозиции теории упругости. В методе принято, что при приложении нагрузки к свае (нагруженная свая), рассматриваемая свая, кроме того, что получает осадку  $S_i$ , создает некоторое поле осадок грунта. Расположенные поблизости сваи, попадая в это поле осадок грунта (рисунок 1), получают осадку  $S_j$ , не обусловленную приложением к ней нагрузки (ненагруженная свая).



**Рисунок 1 – Схема взаимодействия свай по МКВВ**

4.5 В методе коэффициентов взаимного влияния принято, что грунт, передавая влияние от одной сваи к другой, работает в упругой стадии, что позволяет описывать взаимодействие основными зависимостями теории упругости.

4.6 При расчете по МКВВ осадка сваи в составе группы вычисляется суммированием собственной осадки  $S_i$  полученной от нагрузки приложенной к голове сваи и осадок, полученных в результате нагружения всех остальных свай. Схема расчета, на примере группы из двух свай, нагруженных одинаковой нагрузкой, показана на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Схема расчета**

4.7 Характеристики поля осадок (интенсивность в зависимости от расстояния), создаваемого свай при нагружении зависят от ее длины, диаметра, жесткостных характеристик грунта и материала сваи, инженерно-геологических условий.

4.8 Зависимость величины дополнительной осадки ненагруженной сваи, находящейся в поле деформаций нагруженной сваи, от расстояния между сваями называется функцией влияния.

4.9 Функция влияния, как правило описывается аналитической аппроксимацией численного решения, выраженной в замкнутой форме (представляет собой математическое выражение, которое может быть оценено в конечном количестве операций).

4.10 Функция влияния нелинейная, как правило, плавно изменяющаяся (характер изменения логарифмический или степенной), с увеличением расстояния обращаясь в ноль или затухающая на бесконечно большом расстоянии.

4.11 Свайные фундаменты, рассчитываемые по МКВВ, должны проектироваться на основе и с учетом: результатов инженерных изысканий для строительства; жесткостных характеристик надфундаментного строения; действующих на фундаменты нагрузок; технико-экономического сравнения возможных вариантов проектных решений.

4.12 Для зданий и сооружений геотехнических 2-й и 3-й категорий, возводимых на свайных фундаментах, расчеты которых выполняются по МКВВ необходимо предусматривать проведение натурных измерений (мониторинг). Состав, объем и методы мониторинга устанавливаются в соответствии с СП 22.13330.

4.13 Функции влияния разработанные для МКВВ могут быть применены для расчетов свайного фундамента по модели эквивалентной сваи (опоры)

## **5 Расчет свайных фундаментов по методу коэффициентов взаимного влияния**

5.1 В общем случае, расчет осадки сваи в составе свайной группы выполняется по формуле 1.

$$S_i = s(N_i) + \sum_{j \neq i} \delta_{ij} \frac{N_j}{G_1 l} \quad (1)$$

где  $s(N_i)$  – осадка одиночной сваи при нагрузке  $N$  определяемая в соответствии с пунктами 7.4.2 и 7.4.3 СП 24.13330.2011;

$\delta_{ij}$  – коэффициенты, рассчитываемые по формуле (2**Ошибка!** **Источник ссылки не найден.**) (формула (7.39) СП 24.13330.2011), формулам приведенным в разделе 6, в зависимости от расчетной схемы

инженерно-геологических условий или рассчитываемые численными методами;

$N$  – нагрузка на сваю;

$G_1$  – модуль сдвига грунта вдоль боковой поверхности сваи;

$l$  – длина сваи;

$$\delta = \begin{cases} 0,17 \ln \frac{K_v G_1 l}{2 G_2 a}, & \text{если } \frac{K_v G_1 l}{2 G_2 a} > 1; \\ 0 & \text{, если } \frac{K_v G_1 l}{2 G_2 a} \leq 1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $k_v$  – коэффициент определяемый по формуле (7.35) СП 24.13330.2011;

$G_2$  – модуль сдвига грунта под пятой сваи;

$a$  – расстояние между сваями.

5.2 Граница области осадок грунта создаваемых одиночной свайей – радиус влияния  $r_b$ . Для расчета в условиях упругого и двухслойного полупространства радиус влияния не определяется. Для условий нахождения сваи в однородном упругом основании, подстилаемым несжимаемым слоем, радиус влияния может быть определен по формуле

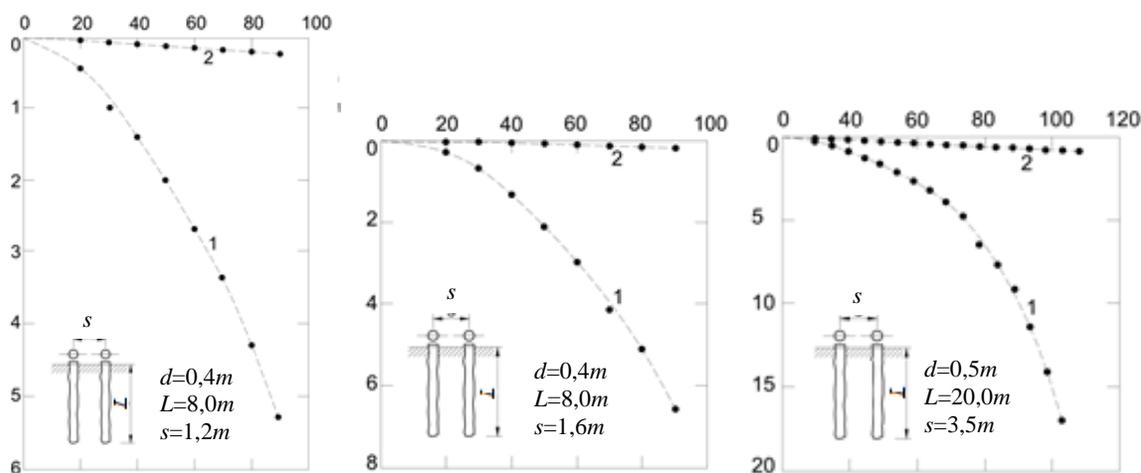
$$r_b = 1,28 h/l + 1,36. \quad (3)$$

Для более сложных расчетных схем грунтовых условий радиус влияния может быть определен численным методом.

5.3 В расчетах принимается, что контакт между ростверком и грунтом отсутствует, работа плитной части ростверка в расчете жесткости свайного фундамента не учитывается.

5.4 При выполнении расчета в упругой постановке, значения жесткости свай и усилия в наиболее удаленных от центра фундамента сваях могут быть чрезмерно завышены, особенно в группах свай характеризующихся большой долей взаимного влияния, что не соответствует фактической работе свайных фундаментов. Для получения более достоверных результатов рекомендуется проведение расчетов в упруго-пластической постановке.

5.5 При приближении грунта вдоль боковой поверхности сваи к предельному состоянию в ходе нагружения, происходит проскальзывание сваи относительно грунта, что приводит к тому, что связь между сваей и грунтом нарушается, что приводит к прекращению увеличения дополнительной осадки окружающих свай. В результате этого дополнительная осадка, создаваемая нагружаемой сваей, ограничена осадкой, соответствующей предельному сопротивлению сваи [5], [6].



$d$  – диаметр сваи,  $L$  – длина сваи,  $s$  – шаг свай

**Рисунок 3 – Результаты измерения осадки ненагруженной сваи в присутствии нагруженной для разных  $l/d$  и  $s/d$  по результатам опытов [6]**

5.6 При выполнении расчета с учетом 5.5 и нелинейного поведения свай в составе фундамента (в упруго-пластической постановке), нелинейность работы грунта допускается учитывать в пределах области грунта по контакту сваи с грунтом.

5.7 При выполнении расчета в упруго-пластической постановке в соответствии с 5.6, учитывая, что на расстоянии  $l/d$  от сваи величина предельной сдвиговой деформации грунта при нагружении сваи, как правило, составляет менее 1 %, для расчета свайных фундаментов с шагом свай равным или большим  $3d$  допускается при расчете применять упругое значение модуля сдвига грунта прорезаемого сваей и находящегося под ее пятой.

5.8 Нелинейная зависимость нагрузка-осадка для одиночной сваи может быть задана билинейной или трехлинейной кривой (в этом случае первые две линии трехлинейной можно определять в соответствии с приложением Д СП 24.13330.2011), или плавно изменяющейся, определяемой численными методами или по результатам полевых испытаний свай.

5.9 Для описания (аппроксимации) нелинейной зависимости нагрузка-осадка для одиночной сваи рекомендуется применение формулы

$$q = \frac{K_0 w}{[1 + |K_0 w / q_{ult}|^m]^{1/m}}, \quad (4)$$

где  $q$  – нагрузка на сваю;

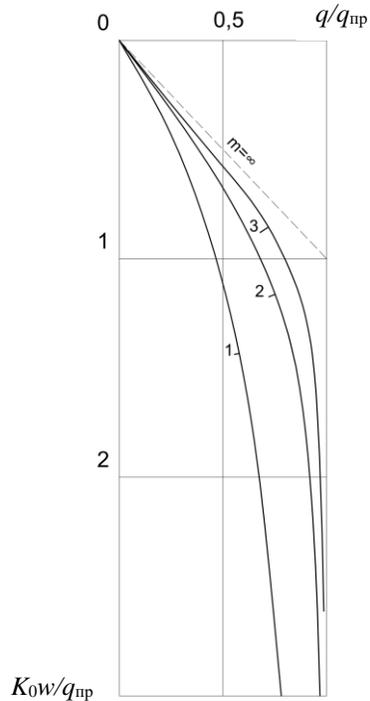
$K_0$  – начальный коэффициент жесткости сваи;

$w$  – осадка сваи;

$m$  – параметр, характеризующий скорость нарастания осадки с увеличением нагрузки;

$q_{ult}$  – предельная нагрузка на сваю.

Вид характерных зависимостей, рассчитываемых по формуле (4) показан на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Вид характерной нелинейной зависимости нагрузка-осадка по формуле (4) ( $q/q_{пр}$  – отношение действующей нагрузки к предельной;  $K_{0w}/q_{пр}$  – нормализованная по  $q_{пр}/w$  осадка сваи)**

5.10 В расчетах следует принимать, что несущая способность группы свай всегда меньше или равна сумме несущих способностей одиночных свай;

5.11 В рамках расчетов по предельному состоянию первой группы, кроме проверок требуемых СП 24.13330, дополнительно проверяются условия устойчивости основания свайного фундамента против блокового разрушения.

5.12 Для вычисления осадок и реакций в сваях применяют для этого метод сил строительной механики. В общем случае, для расчета по

предлагаемому способу требуется решить систему линейных алгебраических уравнений описываемых матрицами:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{i1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{1j} & \cdots & \alpha_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_i \end{bmatrix}, \quad (5)$$

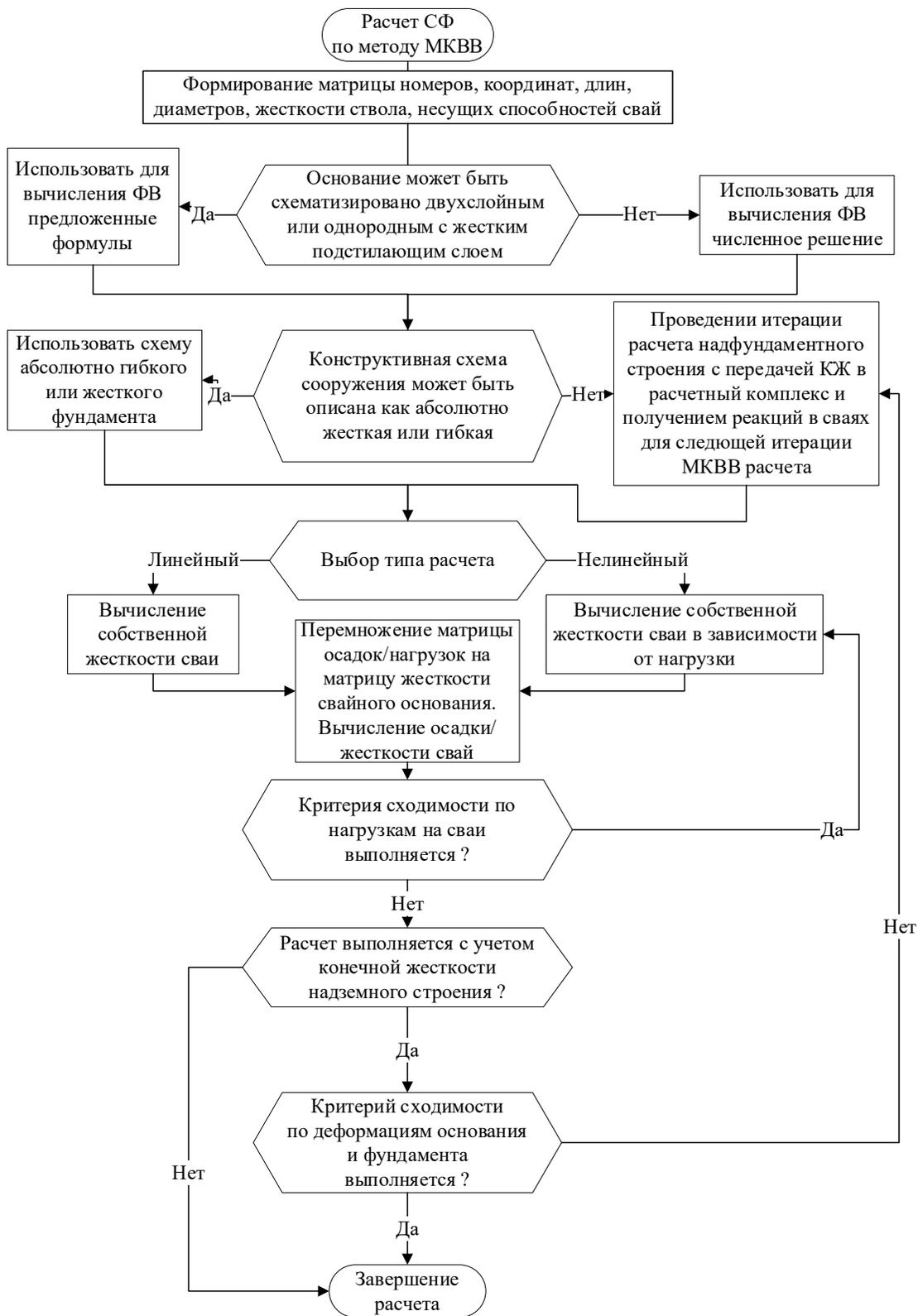
где  $\alpha_{11} \dots \alpha_{ij}$  коэффициенты взаимного влияния свай;

Первая матрица содержит коэффициенты взаимного влияния свай ( $\alpha_{11} \dots \alpha_{ij}$ ), вторая матрица содержит информацию по нагрузкам приходящимся на сваи ( $N_1 \dots N_i$ ), а третья по осадкам свай ( $w_1 \dots w_i$ ).

5.13 Дополнительные осадки, возникающие в результате воздействия поля деформаций каждой нагруженной сваи на каждую ненагруженную, вычисляются в соответствии с разделом 6. Формируется матрица единичных жесткостей свайной группы, имеющая размерность  $n \cdot n$ , где  $n$  – количество свай в группе. Диагонали матрицы равны и для ускорения расчета одна из диагоналей может не вычисляться.

5.14 В зависимости от выбранной схемы надземного сооружения значения нагрузки на сваи устанавливаются одинаковыми для схемы абсолютно-гибкого сооружения или устанавливается одинаковой осадка всех свай для случая абсолютно-жесткого строения.

5.15 Решая показанную систему уравнений находят осадки или реакции в головах свай. Блок-схема алгоритма предлагаемого способа расчета приведена на рисунке 5 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**



СФ – свайный фундамент; ФВ – фундамент влияния, КЖ – конструктивная жесткость

**Рисунок 5 – Блок-схема расчета**

5.16 Граничные условия могут быть сформулированы в виде заданных перемещений или заданных нагрузок на сваи. В случае заданных перемещений матрица 3 заполняется значениями перемещений свай, а значения матрицы 2 неизвестны. В случае заданных сил матрица 2 заполняется значениями сил действующих на сваи, а значения матрицы 3 неизвестны.

5.17 При выполнении предварительных расчетов допускается, для жестких сооружений задавать перемещения свай равными между собой, а для гибких сооружений задавать равными значениям сил, действующих на сваи. В этом случае характер работы надземного сооружения соответствует абсолютно жесткому или абсолютно гибкому сооружению.

5.18 При выполнении окончательных расчетов значения перемещений свай или действующих на них сил следует получать по результатам совместного, с надземным сооружением, итерационного расчета.

5.19 Величина осадки ненагруженной сваи определяется в соответствии с разделом 6, с использованием формул, разработанных для характерных схем применения свайных фундаментов, а также численными методами, по методике представленной в разделе 6.

5.20 Расчет коэффициента жесткости одиночной сваи следует выполнять в соответствии с пунктом 7.4.2 СП 24.13330.2011.

5.21 Начальная жесткость одиночной сваи и характеристика нагрузка-осадка, принимается по результатам полевых статических испытаний грунтов сваями в соответствии с ГОСТ 5686.

## **6 Расчеты свайных фундаментов для различных расчетных схем инженерно-геологических условий**

### **6.1 Общие положения**

6.1.1 Функции влияния применяемые для расчета по МКВВ имеют существенные отличия в интенсивности затухания величины дополнительной осадки в зависимости от инженерно-геологических условий.

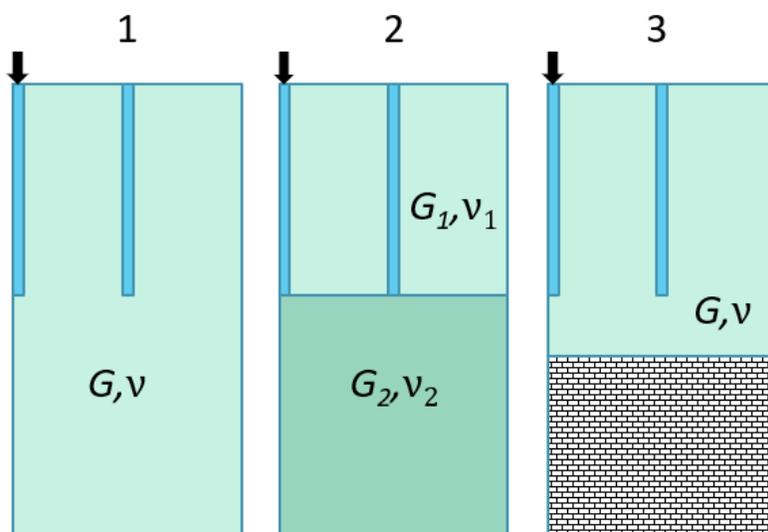
6.1.2 Для условий упругого полупространства функция влияния с увеличением расстояния от нагружаемой сваи стремится к нулю и не имеет конечного радиуса влияния.

6.1.3 Для условий двухслойного полупространства, с более жестким подстилающим слоем, функция влияния затухает существенно быстрее, чем для условий упругого полупространства, однако также стремится к нулю и не имеет конечного радиуса влияния.

6.1.4 Для условий ограниченной сжимаемой толщи функция влияния затухает существенно быстрее, чем для условий упругого полупространства и на определенном конечном радиусе практически обращается в ноль.

6.1.5 Указанные особенности обуславливают невозможность выполнения расчетов с универсальной функцией влияния, что требует применения функций характерных для рассматриваемых инженерно-геологических условий.

6.1.6 Перечисленные расчетные схемы грунтового основания (рисунок б) подробно рассмотрены в подразделах 6.2 – 6.4.



(1 – однородное полупространство; 2 – двухслойное полупространство; 3 – упругий слой конечной толщины подстилаемый несжимаемым слоем

**Рисунок 6 – Расчетные схемы грунтовых оснований**

6.1.7 Перед выбором функции влияния, применяемой для расчета, оценивается возможность схематизации основания для применения известных методик расчета функций влияния.

6.1.8 В случае выявления возможности схематизации производится расчет по формулам приведенным в настоящем разделе или иным известным зависимостям.

6.1.9 При невозможности схематизации по имеющимся решениям выполняются серии численных пространственных расчетов.

6.1.10 Приведенная в пункте 7.4.4 СП 24.13330.2011 функция влияния наиболее точно описывает случаи, когда сжимаемая толща свайного фундамента, определяемая в соответствии с СП 22.13330 приблизительно равна длине свай, наибольший размер свайной группы менее  $1,5l$ , расстояние между сваями не превышает  $0,5l$ .

## 6.2 Однородное полупространство

6.2.1 В условиях двухслойного однородного и двухслойного полупространств, с удалением от свай, осадка грунта стремится к малой, но ненулевой величине.

6.2.2 Для грунтовых условий характеризующихся однородностью механических характеристик в пределах исследованной толщи, для групп шириной менее  $0,5l$  и шагом более  $5d$  рекомендуется применение формулы (6) [7].

$$\delta = \frac{a}{(b + \frac{r}{l})}, \quad (6)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты определяемые по формулам:

$$a = \frac{(1-\nu)}{2\pi}; \quad (7)$$

$$b = (0,3392 - 0,2924\nu)\left(\frac{l}{d}\right)^{-0,163}. \quad (8)$$

## 6.3 Двухслойное полупространство

6.3.1 В схеме двухслойного полупространства, чем больше жесткость второго слоя, тем быстрее затухает функция и стремится к малой, но ненулевой, по сравнению с условиями упругого полупространства, величине. Указанная величина тем меньше, чем больше отношение  $G_2/G_1$ .

6.3.2 Для грунтовых условий характеризующихся существенной разницей между жесткостями прорезаемых и несущего слоя ( $G_2/G_1 > 2$ ), а также для фундаментов, где сваи расположены с шагом более  $5d$  рекомендуется применение формулы (9)

$$\delta = \frac{a}{\left(b + \frac{G_2 r}{G_1 l}\right)}, \quad (9)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты определяемые по формулам (7) и (8).

6.3.3 В случае опирания пяты сваи на скальный грунт жесткостные характеристики скального грунта допускается принимать в соответствии с СП 58.13330.

#### **6.4 Упругий слой конечной толщины подстилаемый несжимаемым слоем**

6.4.1 При наличии несжимаемого слоя грунта поведение функции влияния весьма существенно отличается от случая однородного или двухслойного полупространства.

6.4.2 Нередко в инженерно-геологического разрезе встречается слой грунта, жесткость которого на порядок или два превышает жесткость вышележащих слоев, но при этом механические характеристики вышележащих слоев грунта достаточны для обеспечения требований расчета по предельному состоянию первой и второй группы, что обуславливает применение свай трения, а не свай стоек. Часто от основания сваи до несжимаемого слоя грунта (сжимаемая толща) расстояние составляет менее одной длины сваи.

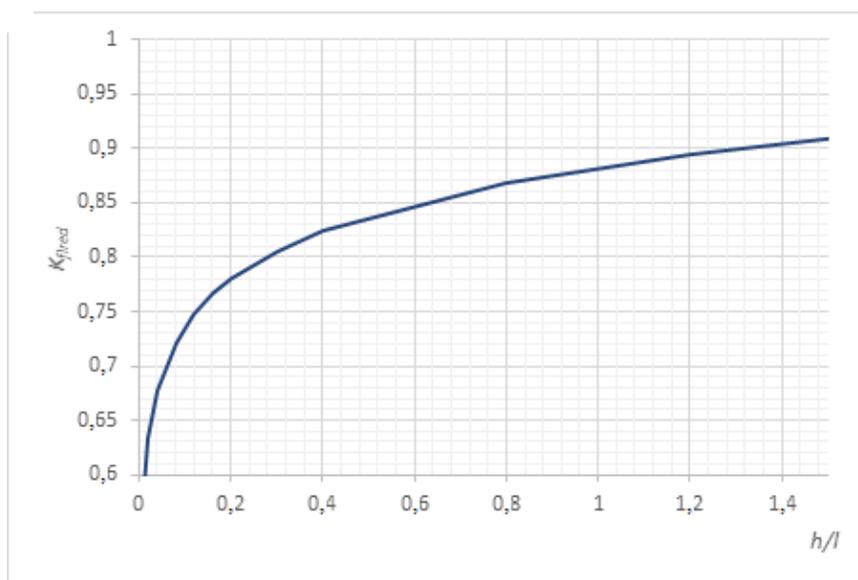
6.4.3 Осадка одиночной сваи имеет логарифмическую зависимость от относительной толщины сжимаемого слоя  $h/l$ , где  $h$  – толщина сжимаемого слоя ниже пяты сваи (расстояние от пяты сваи до верхней границы несжимаемого слоя), а  $l$  – ее длина. При  $h/l=0,02$  осадка сваи составляет приблизительно 0,6 относительно осадки для условий полупространства, а при глубине  $h/l=0,1$  – 0,76 относительно осадки для условий полупространства.

6.4.4 Указанная зависимость осадки сваи от относительной толщины сжимаемого слоя может быть описана логарифмической функцией с точностью приблизительно 5 % в диапазоне длин свай и коэффициентов Пуассона.

$$\frac{w_{fl}}{w_{inf}} = 0,064 \ln\left(\frac{h}{l}\right) + 0,883, \quad (10)$$

где  $\frac{w_{fl}}{w_{inf}}$  – отношение осадки сваи в условиях сжимаемого слоя конечной толщины к осадке в условиях однородного полупространства.

6.4.5 Значение  $S$  определяемое по формуле (7.32) СП 24.13330.2011 следует умножать на отношение  $\frac{w_{fl}}{w_{inf}}$  вычисляемое по формуле (10). Кривая коэффициента  $K_{flred}$  в зависимости от относительной сжимаемой толщи свайного фундамента ( $h/l$ ) приведена на рисунке 7.



**Рисунок 7 – Значение коэффициента  $K_{flred}$  в зависимости от относительной сжимаемой толщи свайного фундамента**

$$\delta = \frac{1}{a \cdot \ln\left(\frac{r}{l}\right)} + b', \quad (11)$$

где  $r$  – расстояние между сваями;

$a'$  и  $b'$  – коэффициенты, определяемые по формулам:

$$a' = \frac{(0,042v^5 + 0,004) \cdot \log(h/l)}{e^{\left(\frac{h}{l}\right)}} - 0,0114v + 1,12; \quad (12)$$

$$b' = \frac{(0,093 - 0,096v^3) \cdot \operatorname{atan}(h/l) - 0,15v^{1,5} - 1}{e^{\left(\frac{h}{l}\right)}}. \quad (13)$$

6.4.6 Решение по формуле (11) может применяться до относительной толщины сжимаемого слоя  $h/l=4$ . Возможно применение и для больших глубин, однако значения величины осадки будут несколько завышены (в запас надежности).

## 7 Расчет функции влияния численным методом

7.1 Для расчета функции влияния численным методом требуется решить серию задач о взаимодействии двух свай через грунт. Задачу следует решать линейно, численным методом, в пространственной постановке.

7.2 К выбору вида и формы математической функции, описывающей осадку грунта в зависимости от расстояния предъявляются следующие требования:

- высокая точность аппроксимации в диапазоне расстояний от  $0,5d$  до  $15d$ ;
- удовлетворительная точность в диапазоне от  $15d$  до  $2l$ ;
- соответствие решению Буссинеска в диапазоне от  $2l$  до бесконечности;
- небольшое количество констант (до двух);

- возможность обращения функции в 0 на заданном расстоянии.

7.3 Ввиду сложности применения функции удовлетворяющей 6.4.5, при соответствующем обосновании, допускается применение упрощенных функций.

7.4 С точки зрения возможности описания осадки грунта различными аппроксимирующими функциями можно выделить следующие:

- простые логарифмические функции (с 1–2 константами). Обладают высокой точностью в диапазоне  $1–1,5l$ , но некорректно описывают поведение грунта на большем расстоянии. Для больших отношений  $G_2/G_1$  точность функций пересекающих ноль стремительно падает;

- гиперболические функции хорошо описывают поведение в диапазоне  $0–1l$  и совпадают с точным решением на расстоянии более  $2l$ , но имеют не лучшую точность на начальном участке;

- комбинированные экспоненциально-логарифмические функции описывают поведение в диапазоне  $0–2l$  и позволяют ограничивать радиус влияния заданной величиной, но при этом не дают возможности простого учета двухслойного основания;

- комбинированная экспоненциально-степенная функция имеет наибольшую точность в диапазоне  $0–2l$  среди рассмотренных, но в силу неточного описания поведения функции после  $2l$  не обеспечивает возможность применения упрощенного подхода для учета двухслойного основания.

7.5 Расстояние между нагруженной и ненагруженной сваями следует принимать так, чтобы дополнительная осадка ненагруженной сваи последующего расчетного случая была в два раза меньше чем предыдущего.

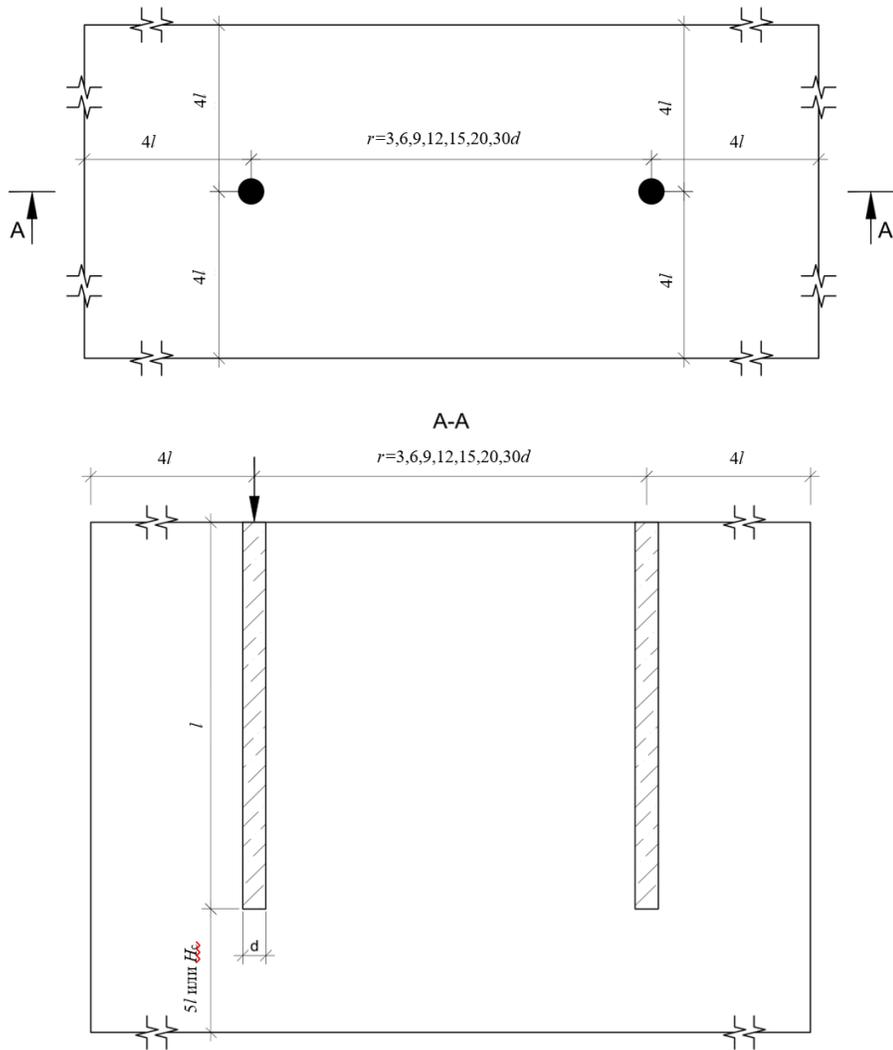
Для случая упругого полупространства указанные расстояния допускается принимать равными 3, 6, 9, 12, 15, 20, 30 диаметров свай.

7.6 Размеры расчетной области в плане следует принимать не менее  $4l$  в каждую сторону от рассматриваемых свай и не менее  $5l$  от низа свай по глубине при рассмотрении случая упругого или двухслойного полупространства, а для случая ограниченной сжимаемой толщи, по ее нижней границе. Рекомендуемая схема расчетной области для выполнения численных расчетов представлена на рисунке 8.

7.7 Полученные пары значений относительного расстояния  $l/d$  и дополнительной осадки  $S_{ad}$  следует аппроксимировать логарифмической, степенной или гиперболической функцией. Основным критерий выбора вида функции – высокий коэффициент корреляции с численным расчетом, в диапазоне относительных расстояний, характерном для рассматриваемого фундамента (в общем случае  $1-10d$ ).

7.8 Указанные серии расчетов следует проводить для каждой рассматриваемой относительной длины сваи  $l/d$ .

7.9 Ввиду трудоемкости выполнения большого количества расчетов в пространственной постановке, расчет функции влияния численным методом рекомендуется производить на окончательных этапах расчета.



**Рисунок 8 – Расчетная схема для вычисления функции влияния численными методами**

## **8 Рекомендации по анализу и обработке полученных результатов расчетов**

8.1 Учитывая многофакторность взаимодействия свай в составе группы, невозможно заранее определить оптимальное расположение свай, обеспечивающее наиболее полное использование их как по грунту, так и материалу.

8.2 Среди геометрических характеристик группы существенно на ее осадку влияют отношение длины к диаметру, шага свай к диаметру и количество свай в группе. Среди свойств свай и грунта значительно на осадку влияют отношение жесткости опорного слоя к жесткости прорезаемого, изменение сжимаемости грунта по глубине и отношение модуля упругости материала свай к модулю упругости грунта. В условиях однородного основания, с увеличением длины свай, жесткость группы растет нелинейно и после определенного значения длины практически перестает возрастать. С увеличением ширины, при сохранении того же давления на основание, жесткость группы падает.

8.3 При проектировании свайного фундамента, для выбора оптимального варианта, следует выполнять параметрические расчеты зависимостей жесткости группы от длины, диаметра и шага свай. Такие расчеты выполняются для установления качественной зависимости взаимодействия свай в составе фундамента, т.е. для определения принципов расстановки свай в составе группы.

## **9 Рекомендации по оформлению полученных результатов расчетов**

9.1 Результаты расчетов, как правило, следует оформлять с приведением информации достаточной для контроля корректности исходных данных принятых в расчете, возможности анализа промежуточных результатов расчета и окончательных результатов, используемых, в том числе, для выполнения расчетов надфундаментных конструкций.

9.2 В составе исходных данных должны быть приведены:

- план рассчитываемой свайной группы с нумерацией свай, информацией позволяющей определять расстояние между сваями, распределение нагрузок на сваи;
- длина и диаметр свай, модуль деформации материала сваи;
- расчетная схема инженерно-геологических условий;
- принятая в расчете нелинейная зависимость нагрузка-осадка для одиночной сваи, в случае выполнения упруго-пластического расчета.

9.3 Промежуточные результаты расчетов должны быть представлены в табличной форме и содержать:

- координаты центра свай  $X$  и  $Y$ , м;
- длину –  $l$ , м;
- диаметр (в случае призматических свай приведенный диаметр)  $d$ , м;
- жесткость материала ствола сваи –  $E_p$ , МПа, принимаемую в соответствии с СП 58.13330;
- коэффициент жесткости для одиночной сваи  $K_{ws}$ , МН/м;
- несущую способность сваи или коэффициенты для описания зависимости нагрузка-осадка –  $N_u$ , МН,  $k_1$ ,  $k_2$ .
- нагрузку на каждую сваю  $N_i$ , МН;
- расстояние между каждой парой свай  $a_{ij}$ , м;
- величину дополнительной осадки  $S_{ad}$ , м, создаваемую каждой сваей на каждую.

9.4 Результаты расчетов предоставляются в табличной и графической форме и должны содержать:

- планы, на которых показаны нагрузки на сваи, осадки свай и коэффициенты жесткости свай;

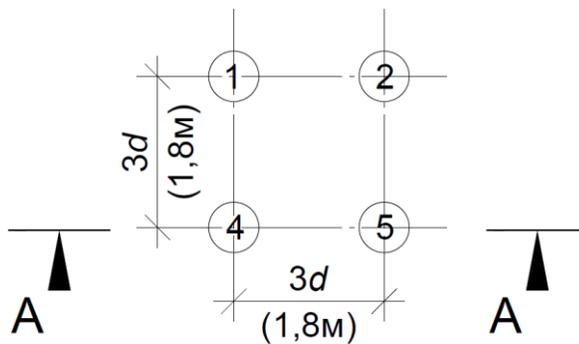
- схемы свайной группы, где точками показано расположение свай в плане, а цвет точек показывает величину нагрузки, осадки или коэффициента жесткости свай. В случае применения черно-белого отображения свай следует показывать окружностями, площадь которых зависит от интенсивности рассматриваемой величины.

## **10 Примеры выполнения расчетов свайных фундаментов по методу коэффициентов взаимного влияния**

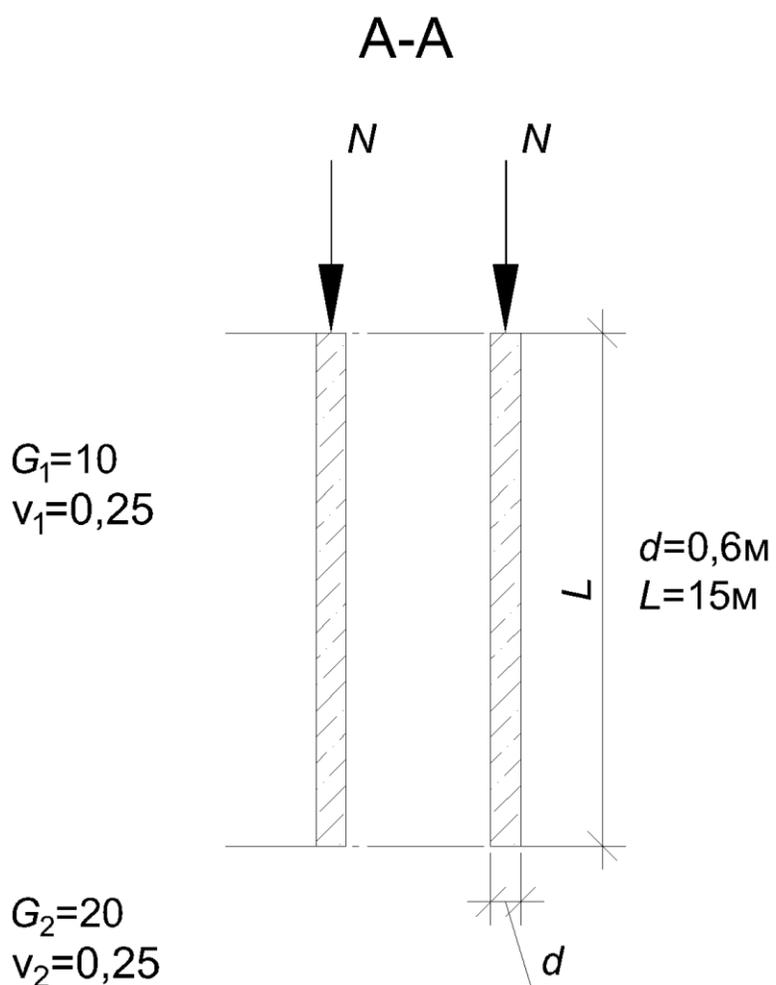
### **Пример 1**

Свайный фундамент состоит из четырех свай расположенных регулярно, по квадратной сетке с шагом  $3d$  (1,8 м), длиной 15 м, диаметром 0,6 м. Расчетная схема инженерно-геологических условий представляет собой двухслойное основание характеризуемое модулями сдвига  $G_1$  и  $G_2$  равными 10 и 20 МПа соответственно, коэффициентом Пуассона  $\nu=0,25$ . Нагрузка на все свай одинаковая и составляет 1 МН. План и разрез по свайной группе показаны на рисунке 9. Схема взаимодействия свай в составе свайной группы показана на рисунках 10–13.

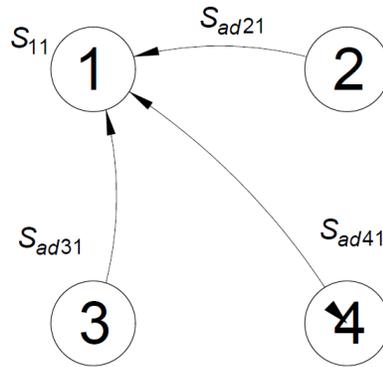
В рассматриваемом фундаменте, при одинаковых нагрузках на свай влияние от свай 2, 3, 4 на сваю 1 равно влиянию от свай 1, 3, 4 на сваю 2, от свай 1, 2, 4 на сваю 3 и от свай 1, 2, 3 на сваю 4, что при расчете осадки позволяет рассматривать только одну сваю.



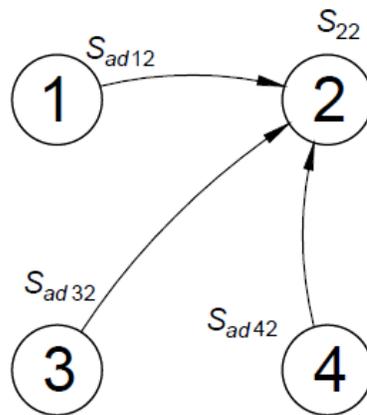
*Рисунок 9, лист 1 – План рассматриваемой свайной группы*



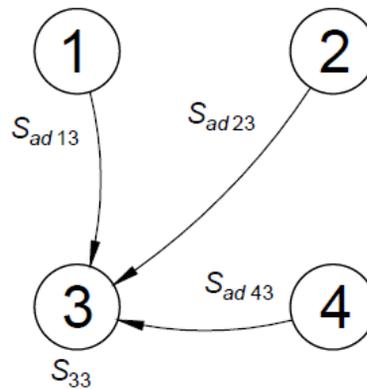
*Рисунок 10, лист 2*



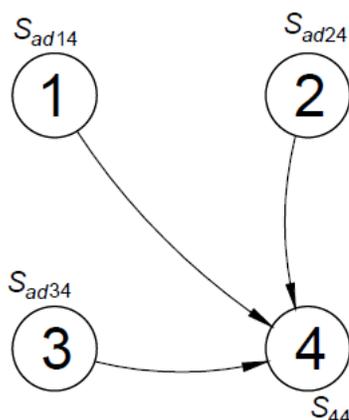
**Рисунок 10** – Схема влияния создаваемого сваями 2, 3, 4 на сваю 1



**Рисунок 11** – Схема влияния создаваемого сваями 1, 3, 4 на сваю 2



**Рисунок 12** – Схема влияния создаваемого сваями 1, 2, 4 на сваю 3



**Рисунок 1311 – Схема влияния создаваемого сваеями 1, 2, 3 на сваю 4**

Расчет осадки для одиночной висячей сваи без уширения пяты производим по формуле

$$S_{\text{од}} = \beta \frac{N}{G_1 l} = 0,668 \frac{1}{10 \cdot 15} = 0,00445 \text{ м}$$

где  $N=1$  МН – вертикальная нагрузка, передаваемая на сваю;

$\beta$  – коэффициент, определяем по формуле

$$\beta = \frac{\beta'}{\lambda_1} + 0,5 \frac{1 - (\beta'/a')}{\chi} = \frac{0,5474}{0,85} + 0,5 \frac{1 - (0,5474/0,6664)}{3,768} = 0,668;$$

здесь  $\beta'$  – коэффициент соответствующий абсолютно жесткой свае ( $EA=\infty$ );

$$\beta' = 0,17 \ln(k_v G_1 l / G_2 d) = 0,17 \ln(2,011 \cdot 10 \cdot 15 / 20 \cdot 0,6) = 0,5474;$$

$\alpha'$  – тот же коэффициент для случая однородного основания с характеристиками  $G_1$  и  $\nu_1$ , определяют по формуле

$$\alpha' = 0,17 \ln(k_{\nu_1} l / d) = 0,17 \ln(2,011 \cdot 15 / 0,6) = 0,6664;$$

$\chi$  – относительная жесткость сваи;

$$\chi = EA / G_1 l^2 = 8478 / 10 \cdot 15^2 = 6 = 3,768;$$

$EA$  – жесткость ствола сваи на сжатие, МН;

$$A = 0,3 \cdot 0,3 \cdot 3,14 = 0,2826 \text{ м}^2;$$

$$EA = 30000 \cdot 0,2826 = 8478 \text{ МН};$$

$\lambda_1$  – параметр, характеризующий увеличение осадки за счет сжатия ствола и определяемый по формуле

$$\lambda_1 = \frac{2,12 \chi^{3/4}}{1 + 2,12 \chi^{3/4}} = \frac{2,12 \cdot 3,768^{3/4}}{1 + 2,12 \cdot 3,768^{3/4}} = 0,85;$$

$k_{\nu}$ ,  $k_{\nu_1}$  – коэффициенты, определяемые по формуле

$$k_{\nu} = 2,82 - 3,78\nu + 2,18\nu^2;$$

при  $\nu = (\nu_1 + \nu_2) / 2 = (0,25 + 0,25) / 2 = 0,25$

$$k_{\nu} = 2,82 - 3,78 \cdot 0,25 + 2,18 \cdot 0,25^2 = 2,011;$$

при  $\nu = \nu_1 = 0,25$

$$k_{\nu_1} = 2,82 - 3,78 \cdot 0,25 + 2,18 \cdot 0,25^2 = 2,011.$$

При расчете осадок группы свай необходимо учитывать их взаимное влияние. Дополнительная осадка сваи, находящейся на расстоянии  $a_1=1,8$  м (свая 2 и 3),  $a_2=2,56$  м (свая 4) (расстояние измеряется между осями свай) от сваи, к которой приложена нагрузка  $N$ , равна

$$S_{ad} = \delta \frac{N}{G_1 l},$$

$$\text{где } \delta = \begin{cases} 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a} & \text{если } \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a} > 1; \\ 0 & \text{если } \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a} \leq 1. \end{cases}$$

При  $a_1=1,8$  м.

$$\text{Так как } \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 10 \cdot 15}{2 \cdot 20 \cdot 1,8} = 4,19 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a_1} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 10 \cdot 15}{2 \cdot 20 \cdot 1,8} = 0,243.$$

Дополнительная осадка на сваю 1 от сваи 2 и 3 равна

$$S_{ad12} = S_{ad13} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,243 \frac{1}{10 \cdot 15} = 0,00162 \text{ м.}$$

При  $a_2=2,56$  м.

$$\text{Так как } \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a_2} = \frac{2,011 \cdot 10 \cdot 15}{2 \cdot 20 \cdot 2,56} = 2,94 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a_2} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 10 \cdot 15}{2 \cdot 20 \cdot 2,56} = 0,1836.$$

Дополнительная осадка на сваю 1 от сваи 4 равна

$$S_{ad14} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,1836 \frac{1}{10 \cdot 15} = 0,00122 \text{ м};$$

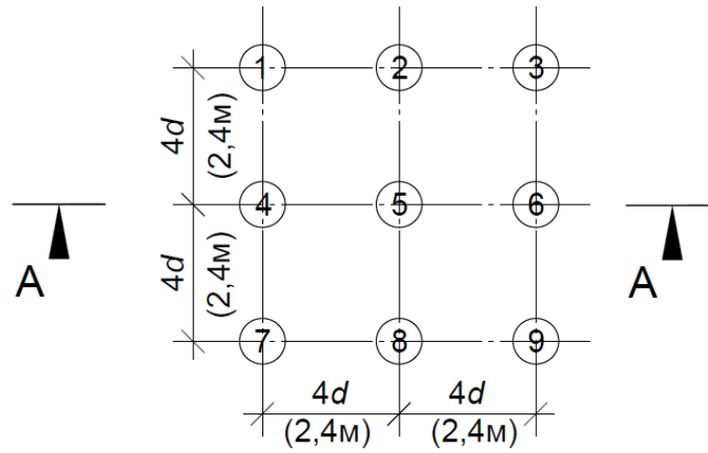
$$S_{\text{общ}} = S_{\text{од}} + S_{ad12} + S_{ad13} + S_{ad14} = 0,00445 + 0,00162 + 0,00162 + 0,00122 = \\ = 0,0089.$$

## Пример 2

Свайный фундамент состоит из девяти свай расположенных регулярно, по квадратной сетке с шагом  $4d$  (2,4 м), длиной 18 м, диаметром 0,6 м. Расчетная схема инженерно-геологических условий представляет собой двухслойное основание характеризуемое модулями сдвига  $G_1$  и  $G_2$  равными 5 и 10 МПа соответственно, коэффициентом Пуассона  $\nu=0,25$ . Нагрузка на все сваи одинаковая и составляет 2 МН.

План и разрез по свайной группе показаны на рисунке 14. Схема взаимодействия свай в составе свайной группы показана на рисунках 14 – 22.

Проанализировав схему взаимодействия можно отметить, что влияние создаваемое сваями 1, 3, 7 и 9 на остальные одинаково. Также одинаково влияние создаваемое сваями 2, 4, 6 и 8. Указанная особенность позволяет рассматривать три расчетных случая: осадка свай 1, 2 и 5.



A-A

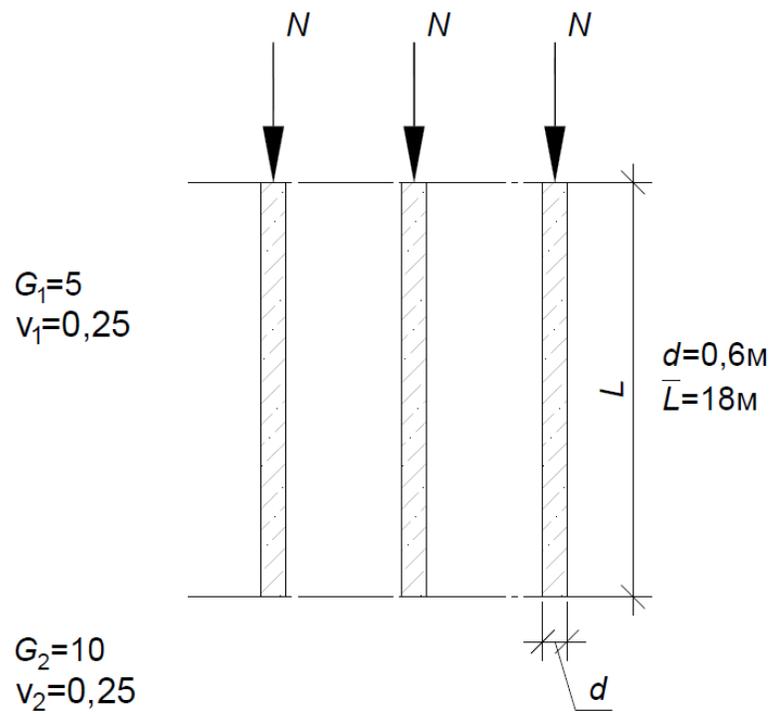
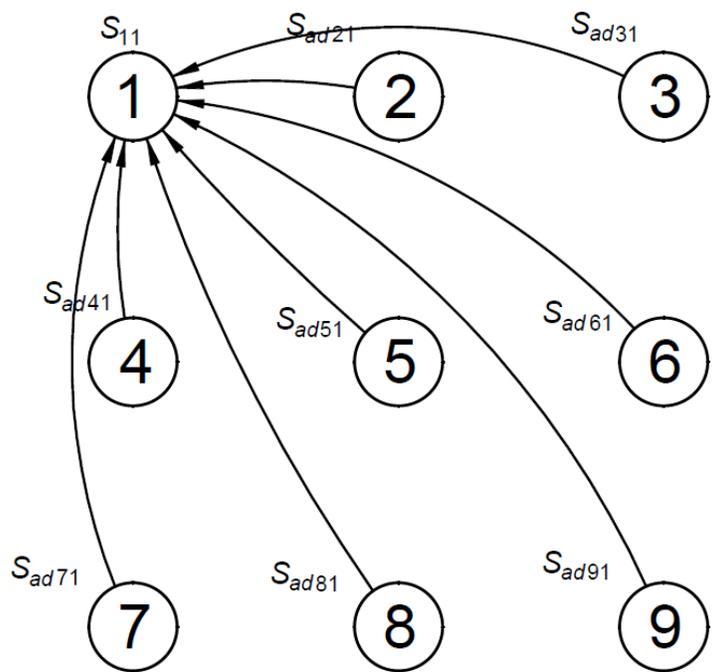
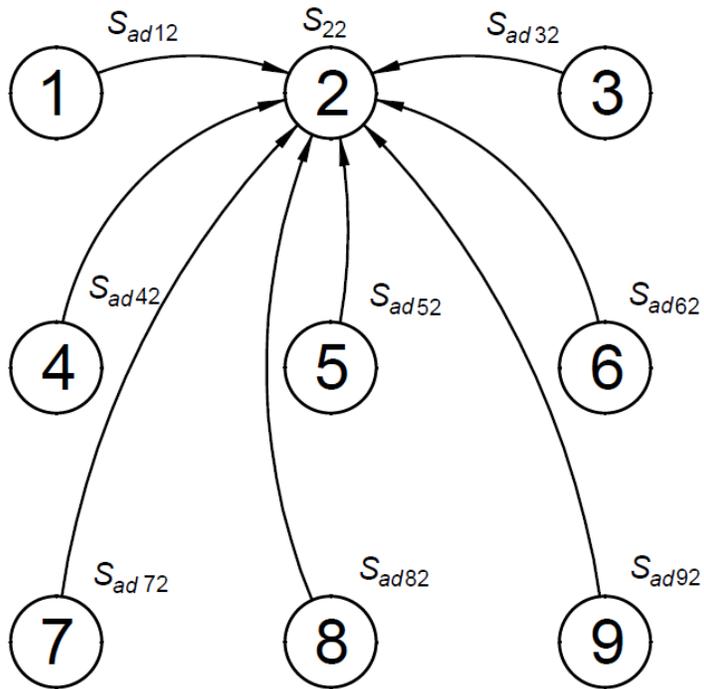


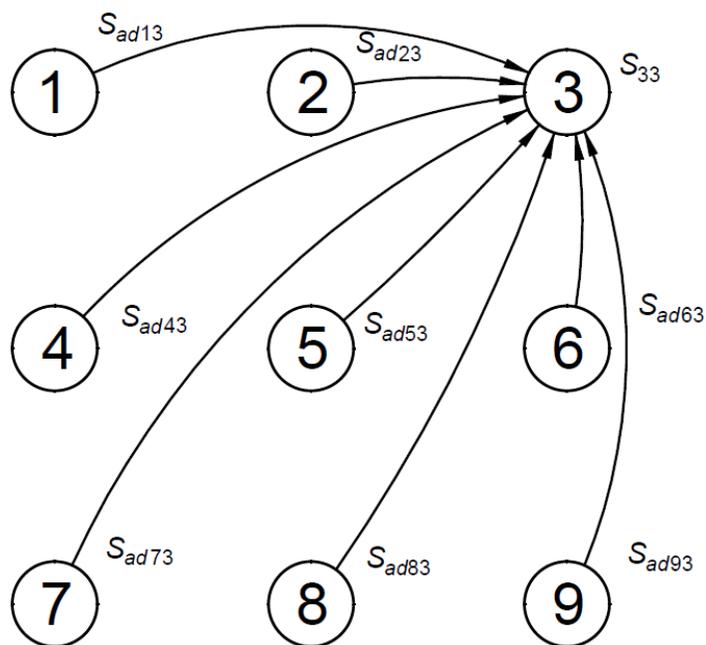
Рисунок 14 – План рассматриваемой свайной группы



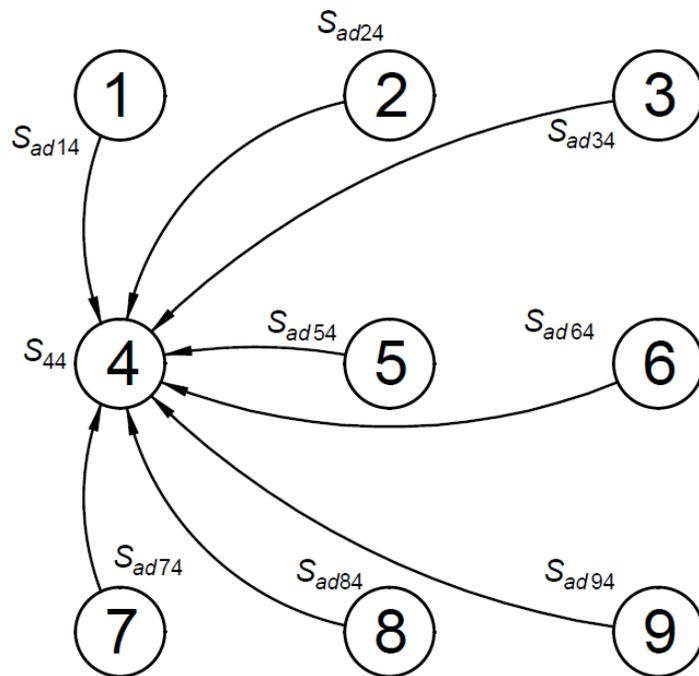
**Рисунок 15 – Схема влияния создаваемого сваей 1 на остальные сваи**



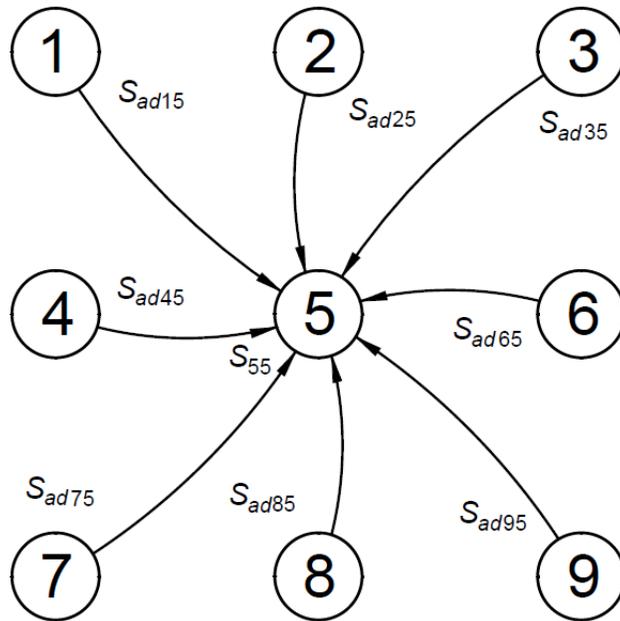
**Рисунок 16 – Схема влияния создаваемого сваей 2 на остальные сваи**



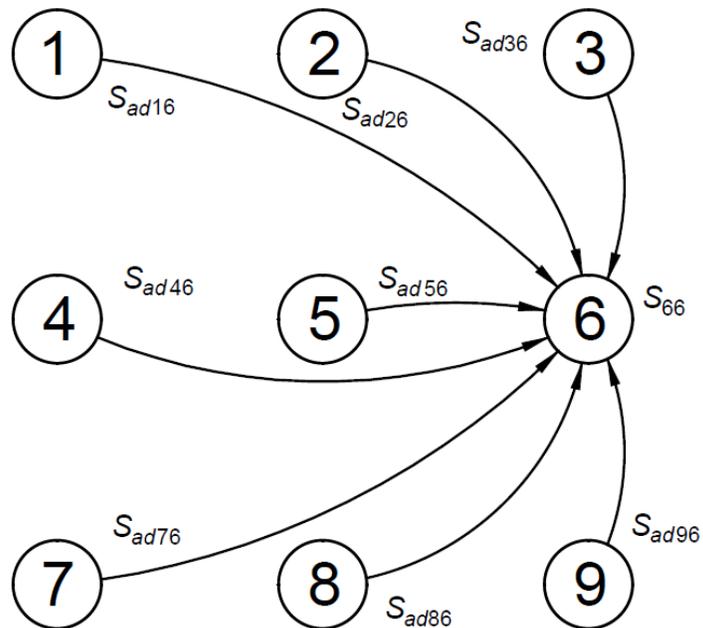
**Рисунок 17 – Схема влияния создаваемого сваей 3 на остальные сваи**



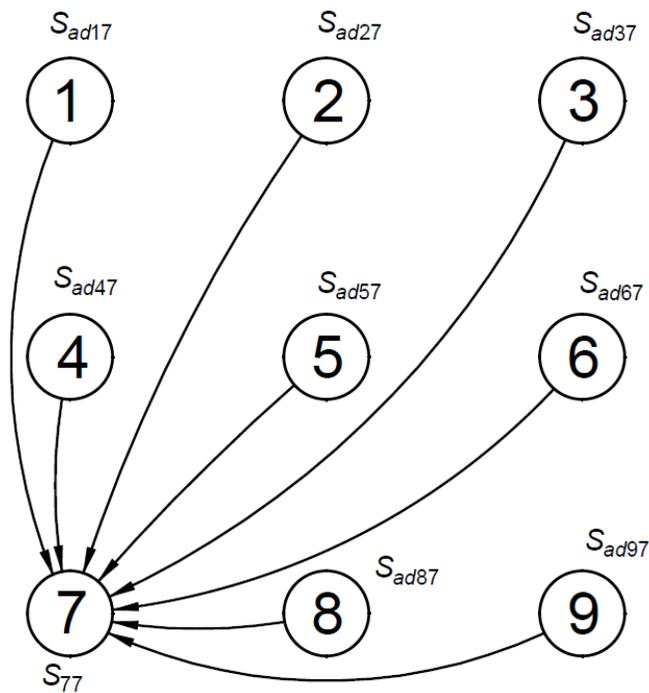
**Рисунок 18 – Схема влияния создаваемого сваей 4 на остальные сваи**



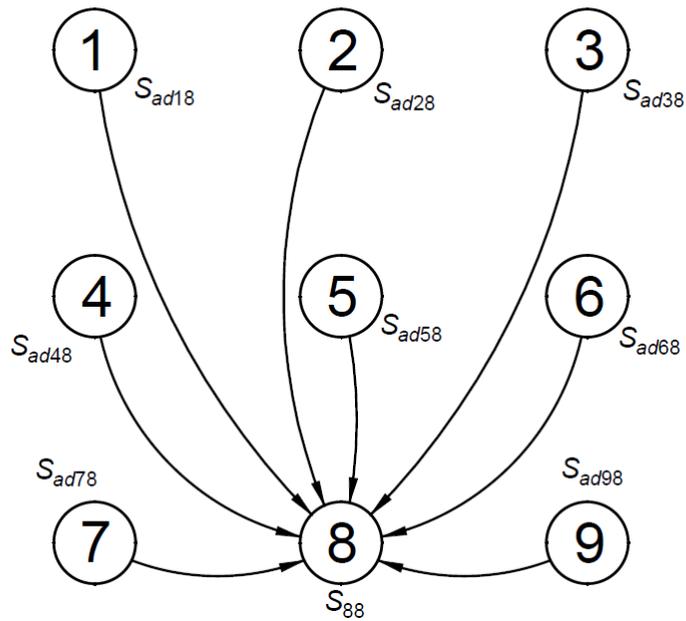
**Рисунок 19 – Схема влияния создаваемого сваей 5 на остальные сваи**



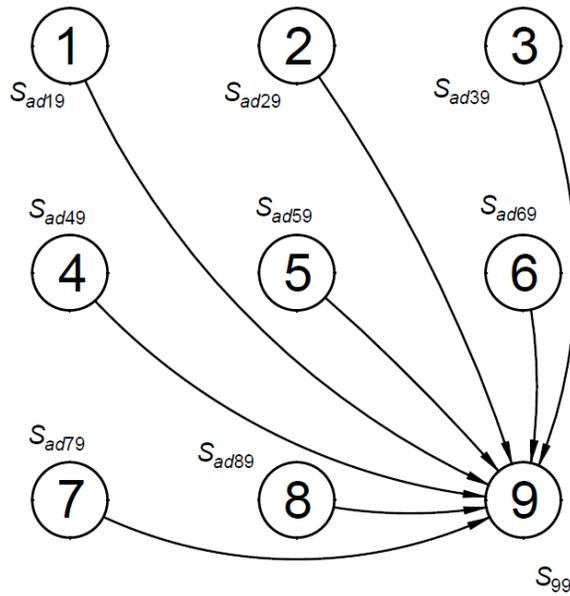
**Рисунок 20 – Схема влияния создаваемого сваей 6 на остальные сваи**



**Рисунок 21 – Схема влияния создаваемого сваей 7 на остальные сваи**



**Рисунок 22 – Схема влияния создаваемого сваей 8 на остальные сваи**



**Рисунок 23 – Схема влияния создаваемого сваей 9 на остальные сваи**

### **Расчет осадки свай 1, 3, 7, 9**

Расчет осадки для одиночной висячей сваи без уширения пяты выполняют по формуле

$$S_{\text{од}} = \beta \frac{N}{G_1 l} = 0,605 \frac{2}{5 \cdot 18} = 0,0134 \text{ м,}$$

где  $N=2$  МН – вертикальная нагрузка, передаваемая на сваю;

$\beta$  – коэффициент, определяемый по формуле

$$\beta = \frac{\beta'}{\lambda_1} + 0,5 \frac{1 - (\beta'/a')}{\chi} = \frac{0,51}{0,88} + 0,5 \frac{1 - (0,51/0,697)}{5,23} = 0,605,$$

здесь  $\beta'$  – коэффициент соответствующий абсолютно жесткой свае ( $EA=\infty$ );

$$\beta' = 0,17 \ln(k_v G_1 l / G_2 d) = 0,17 \ln(2,011 \cdot 5 \cdot \frac{18}{15} \cdot 0,6) = 0,51;$$

$\alpha'$  – тот же коэффициент ( $\beta'$ ) для случая однородного основания с характеристиками  $G_1$  и  $v_1$ ;

$$\alpha' = 0,17 \ln(k_{v1} l / d) = 0,17 \ln(2,011 \cdot 18 / 0,6) = 0,697;$$

$\chi$  – относительная жесткость сваи;

$$\chi = EA / G_1 l^2 = 8478 / 5 \cdot 18^2 = 5,23;$$

$EA$  – жесткость ствола сваи на сжатие, МН;

$$A = 0,3 \cdot 0,3 \cdot 3,14 = 0,2826 \text{ м}^2;$$

$$EA = 30000 \cdot 0,2826 = 8478 \text{ МН};$$

$\lambda_1$  – параметр, характеризующий увеличение осадки за счет сжатия ствола и определяемый по формуле

$$\lambda_1 = \frac{2,12 \chi^{3/4}}{1 + 2,12 \chi^{3/4}} = \frac{2,12 \cdot 5,23^{3/4}}{1 + 2,12 \cdot 5,23^{3/4}} = 0,88;$$

$k_v, k_{v1}$  – коэффициенты, определяемые по формуле

$$k_v = 2,82 - 3,78v + 2,18v^2;$$

при  $v = (v_1 + v_2) / 2 = (0,25 + 0,25) / 2 = 0,25$

$$k_v = 2,82 - 3,78 \cdot 0,25 + 2,18 \cdot 0,25^2 = 2,011;$$

при  $\nu = \nu_1 = 0,25$

$$k_{\nu_1} = 2,82 - 3,78 \cdot 0,25 + 2,18 \cdot 0,25^2 = 2,011.$$

При расчете осадок группы свай необходимо учитывать их взаимное влияние. Дополнительная осадка сваи 1, находящейся на расстоянии  $a_1 = 2,4$  м (свая 2 и 4),  $a_2 = 3,39$  м (свая 5),  $a_3 = 4,8$  м (свая 3 и 7),  $a_4 = 5,36$  м (свая 6 и 8),  $a_5 = 6,79$  м (свая 9) (расстояние измеряется между осями свай) от сваи, к которой приложена нагрузка  $N$ , равна

$$S_{ad} = \delta \frac{N}{G_1 l},$$

где

$$\delta = \begin{cases} 0,17 \ln \frac{k_{\nu} G_1 l}{2 G_2 a} & \text{если } \frac{k_{\nu} G_1 l}{2 G_2 a_1} > 1; \\ 0 & \text{если } \frac{k_{\nu} G_1 l}{2 G_2 a_1} \leq 1. \end{cases}$$

При  $a_1 = 2,4$  м.

$$\text{Так как } \frac{k_{\nu} G_1 l}{2 G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 2,4} = 2,514 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_{\nu} G_1 l}{2 G_2 a_1} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 2,4} = 0,1564.$$

Дополнительная осадка на сваю 1 от сваи 2 и 4 равна

$$S_{ad12} = S_{ad14} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,1564 \frac{2}{5 \cdot 18} = 0,0035 \text{ м.}$$

При  $a_2 = 3,39$  м.

$$\text{так как } \frac{k_{\nu} G_1 l}{2 G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 3,39} = 1,779 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 3,39} = 0,0986.$$

Дополнительная осадка на сваю 1 от сваи 5 равна

$$S_{ad15} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,0986 \frac{2}{5 \cdot 18} = 0,00219 \text{ м.}$$

При  $a_3=4,8$  м.

$$\text{так как } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 4,8} = 1,25 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 4,8} = 0,0374.$$

Дополнительная осадка на сваю 1 от сваи 3 и 7 равна

$$S_{ad13} = S_{ad17} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,0374 \frac{2}{5 \cdot 18} = 0,00083 \text{ м.}$$

При  $a_4=5,36$  м.

$$\text{Так как } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 5,36} = 1,125 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 5,036} = 0,0204.$$

Дополнительная осадка на сваю 1 от сваи 6 и 8 равна

$$S_{ad16} = S_{ad18} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,243 \frac{2}{5 \cdot 18} = 0,00045 \text{ м.}$$

При  $a_5=6,79$  м.

$$\text{Так как } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 6,79} = 0,88 < 1,$$

то  $\delta = 0$ .

Дополнительная осадка на сваю 1 от сваи 9 равна

$$S_{ad19} = 0;$$

$$S_{общ} = S_{од} + S_{ad12} + S_{ad13} + S_{ad14} + S_{ad15} + S_{ad16} + S_{ad17} + S_{ad18} + S_{ad19} = 0,0134$$

$$+0,0035+0,00083 +0,0035 +0,00219 +0,00045+0,00083+0,00045 +0 =0,025\text{м.}$$

### Расчет осадки свай 2, 4, 6, 8

При расчете осадок группы свай необходимо учитывать их взаимное влияние. Дополнительная осадка сваи 2, находящейся на расстоянии  $a_1=2,4$  м (свая 1, 3, 5),  $a_2=3,39$  м (свая 4, 6),  $a_3=5,36$  м (свая 7 и 9),  $a_4=4,8$  м (свая 8) (расстояние измеряется между осями свай) от свай, к которым приложена нагрузка  $N$ , равна

$$S_{ad} = \delta \frac{N}{G_1 l},$$

$$\text{где } \delta = \begin{cases} 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a} & \text{если } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} > 1; \\ 0 & \text{если } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} \leq 1. \end{cases}$$

При  $a_1=2,4$  м.

$$\text{Так как } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 2,4} = 2,514 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 2,4} = 0,1564.$$

Дополнительная осадка на сваю 2 от свай 1, 3, 5 равна

$$S_{ad21} = S_{ad23} = S_{ad25} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,1564 \frac{2}{5 \cdot 18} = 0,0035 \text{ м.}$$

При  $a_2=3,39$  м.

$$\text{Так как } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 3,39} = 1,779 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 3,39} = 0,0986.$$

Дополнительная осадка на сваю 2 от свай 4, 6 равна

$$S_{ad24} = S_{ad26} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,0986 \frac{2}{5 \cdot 18} = 0,00219 \text{ м.}$$

При  $a_3=5,36$  м.

$$\text{так как } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 5,36} = 1,125 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 5,36} = 0,0204.$$

Дополнительная осадка на сваю 2 от свай 7 и 9 равна

$$S_{ad27} = S_{ad29} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,243 \frac{2}{5 \cdot 18} = 0,00045 \text{ м.}$$

При  $a_4=4,8$  м.

$$\text{так как } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 4,8} = 1,25 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 4,8} = 0,0374.$$

Дополнительная осадка на сваю 2 от сваи 8 равна

$$S_{ad28} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,0374 \frac{2}{5 \cdot 18} = 0,00083 \text{ м};$$

$$S_{общ} = S_{од} + S_{ad21} + S_{ad23} + S_{ad24} + S_{ad25} + S_{ad26} + S_{ad27} + S_{ad28} + S_{ad29} =$$

$$0,0134$$

$$+0,0035 + 0,00219 + 0,0035 + 0,00219 + 0,0035 + 0,00045 + 0,00083 + 0,00045$$

$$= 0,03 \text{ м}.$$

### Расчет осадки сваи 5

При расчете осадок группы свай необходимо учитывать их взаимное влияние. Дополнительная осадка сваи 5, находящейся на расстоянии  $a_1=2,4$  м (сваи 2, 4, 6, 8),  $a_2=3,39$  м (сваи 1, 3, 7, 9), (расстояние измеряется между осями свай) от сваи, к которой приложена нагрузка  $N$ , равна

$$S_{ad} = \delta \frac{N}{G_1 l},$$

$$\text{где } \delta = \begin{cases} 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a} & \text{если } \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a_1} > 1; \\ 0 & \text{если } \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a_1} \leq 1. \end{cases}$$

При  $a_1=2,4$  м.

$$\text{Так как } \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 2,4} = 2,514 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2 G_2 a_1} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 2,4} = 0,1564.$$

Дополнительная осадка на сваю 5 от свай 2, 4, 6, 8 равна

$$S_{ad52} = S_{ad54} = S_{ad56} = S_{ad58} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,1564 \frac{2}{5 \cdot 18} = 0,0035 \text{ м}.$$

При  $a_2=3,39$  м.

$$\text{Так как } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 3,39} = 1,779 > 1,$$

$$\text{то } \delta = 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a_1} = 0,17 \ln \frac{2,011 \cdot 5 \cdot 18}{2 \cdot 15 \cdot 3,39} = 0,0986.$$

Дополнительная осадка на сваю 5 от свай 1, 3, 7, 9 равна

$$S_{ad51} = S_{ad53} = S_{ad57} = S_{ad59} = \delta \frac{N}{G_1 l} = 0,0986 \frac{2}{5 \cdot 18} = 0,00219 \text{ м};$$

$$\begin{aligned} S_{\text{общ}} &= S_{\text{од}} + S_{ad51} + S_{ad52} + S_{ad53} + S_{ad54} + S_{ad56} + S_{ad57} + S_{ad58} + S_{ad59} = \\ &0,0134 \\ &+ 0,0035 + 0,00219 + 0,0035 + 0,00219 + 0,0035 + 0,00219 + 0,0035 \\ &+ 0,00219 = 0,036 \text{ м}. \end{aligned}$$

Расчетные значения жесткостей свай, определенные как отношение продольного усилия в свае к ее осадке показаны на рисунке 24.



**Рисунок 24 – Схема коэффициентов жесткости свайного фундамента при абсолютно гибком ростверке**

Суммарную жесткость фундамента можно определить как

$$K_w = \sum K w_i / N_i = 4 \cdot (2/0,025) + 4 \cdot (2/0,03) + 2/0,0636 = 642 \text{ МН/м.}$$

### Пример 3

Свайный фундамент состоит из девяти свай расположенных регулярно, по квадратной сетке с шагом  $4d$  (2,4 м), длиной 18 м, диаметром 0,6 м. Расчетная схема инженерно-геологических условий представляет собой двухслойное основание характеризуемое модулями сдвига  $G_1$  и  $G_2$  равными 5 и 15 МПа соответственно, коэффициентом Пуассона  $\nu=0,25$ . Вертикальная нагрузка на фундамент составляет 18 МН, сваи объединены абсолютно-жестким ростверком.

Настоящий пример почти полностью повторяет пример 2 однако, в отличии от примера 2, фундамент принят абсолютно жестким, что соответствует одинаковой осадке всех свай и различными реакциями в сваях.

Для решения поставленной задачи необходимо построить матрицу жесткости свайного фундамента  $(\alpha_{11} \dots \alpha_{ij})$ . Для этого удобно выражать значения собственных и дополнительных осадок в виде единичных жесткостей, значения которых имеют размерность м/МН

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11} & \dots & \alpha_{i1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{1j} & \dots & \alpha_{ij} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_i \end{pmatrix}$$

Матрица жесткости фундамента, в этом случае имеет следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} 0,00691 & 0,00174 & 0,00043 & 0,00174 & 0,00109 & 0,00022 & 0,00043 & 0,00022 & 0,00000 \\ 0,00174 & 0,00691 & 0,00174 & 0,00109 & 0,00174 & 0,00109 & 0,00022 & 0,00043 & 0,00022 \\ 0,00043 & 0,00174 & 0,00691 & 0,00022 & 0,00109 & 0,00174 & 0,00000 & 0,00022 & 0,00043 \\ 0,00174 & 0,00109 & 0,00022 & 0,00691 & 0,00174 & 0,00043 & 0,00174 & 0,00109 & 0,00022 \\ 0,00109 & 0,00174 & 0,00109 & 0,00174 & 0,00691 & 0,00174 & 0,00109 & 0,00174 & 0,00109 \\ 0,00022 & 0,00109 & 0,00174 & 0,00043 & 0,00174 & 0,00691 & 0,00022 & 0,00109 & 0,00174 \\ 0,00043 & 0,00022 & 0,00000 & 0,00174 & 0,00109 & 0,00022 & 0,00691 & 0,00174 & 0,00043 \\ 0,00022 & 0,00043 & 0,00022 & 0,00109 & 0,00174 & 0,00109 & 0,00174 & 0,00691 & 0,00174 \end{pmatrix}$$

Используя значение жесткости фундамента полученное в примере 2, определяем осадку фундамента при которой сумма реакций в сваях соответствует  $18 \text{ МН}$   $w_{(18\text{МН})} = 18/642 = 0,027 \text{ м}$ . Указанное значение присваивается каждому элементу матрицы  $w_1 \dots w_i$ . Значения матрицы  $N_1 \dots N_i$  неизвестны.

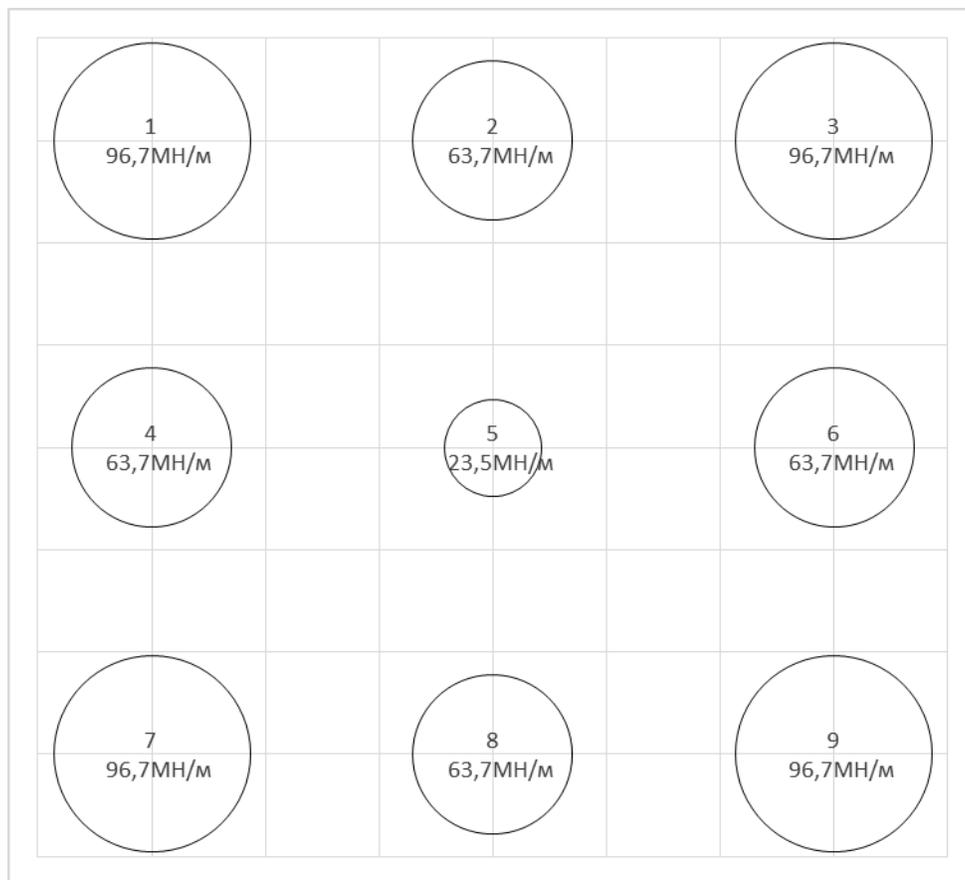
Для решения полученной системы уравнений можно применить метод обратной матрицы:

$$\begin{pmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \dots & \alpha_{i1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{1j} & \dots & \alpha_{ij} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_i \end{pmatrix}$$

Для рассматриваемого случая матрица имеет следующие значения.

$$\begin{pmatrix} 163 & -34,0 & -0,0851 & -34,0 & -10,8 & 3,90 & -0,0851 & 3,90 & 1,93 \\ -34,0 & 172 & -34,0 & -10,7 & -28,6 & -10,7 & 3,90 & 0,002 & 3,90 \\ -0,0851 & -34,0 & 163 & 3,90 & -10,8 & -34,0 & 1,93 & 3,90 & -0,0851 \\ -34,0 & -10,7 & 3,90 & 172 & -28,6 & 0,002 & -34,0 & -10,7 & 3,90 \\ -10,8 & -28,6 & -10,8 & -28,6 & 180 & -28,6 & -10,8 & -28,6 & -10,8 \\ 3,90 & -10,7 & -34,0 & 0,002 & -28,6 & 172 & 3,9 & -10,7 & 34,0 \\ -0,0851 & 3,90 & 1,93 & -34,0 & -10,8 & 3,90 & 163 & -34,0 & -0,0851 \\ 3,90 & 0,002 & 3,90 & -10,7 & -28,6 & -10,7 & -34,0 & 172 & -34,0 \\ 1,93 & 3,90 & -0,0851 & 3,90 & -10,8 & -34,0 & -0,0851 & -34,0 & 163 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,0277 \\ 0,0277 \\ 0,0277 \\ 0,0277 \\ 0,0277 \\ 0,0277 \\ 0,0277 \\ 0,0277 \\ 0,0277 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,61 \\ 1,72 \\ 2,61 \\ 1,72 \\ 0,635 \\ 1,72 \\ 2,61 \\ 1,72 \\ 2,61 \end{pmatrix}$$

Расчетные значения жесткостей свай, определенные как отношение продольного усилия в свае к ее осадке показаны на рисунке 25.



**Рисунок 25 – Схема коэффициентов жесткости свайного фундамента при абсолютно жестком ростверке**

Рассмотрев результаты расчета фундамента в примере 3 можно отметить весьма высокую разницу между сваями в зависимости от их положения в плане.

#### Пример 4

Свайный фундамент состоящий из девяти свай расположенных регулярно, по квадратной сетке с шагом  $4d$  (2,4 м), длиной 18 м, диаметром 0,6 м. Расчетная схема инженерно-геологических условий представляет собой двухслойное основание характеризуемое модулями сдвига  $G_1$  и  $G_2$  равными 5 и 15 МПа соответственно, коэффициентом Пуассона  $\nu=0,25$ . Вертикальная нагрузка на фундамент составляет 18 МН, сваи объединены абсолютно-жестким ростверком. Расчет выполняется в упруго-пластической постановке.

Условия примера 4 соответствуют примеру 3. Дополнительно вводятся параметры: несущая способность сваи  $N=5$  МН и  $m=1$  для расчета по формуле (4). Полученная зависимость нагрузка-осадка, рассчитанная по формуле (4), показана на рисунке 26.

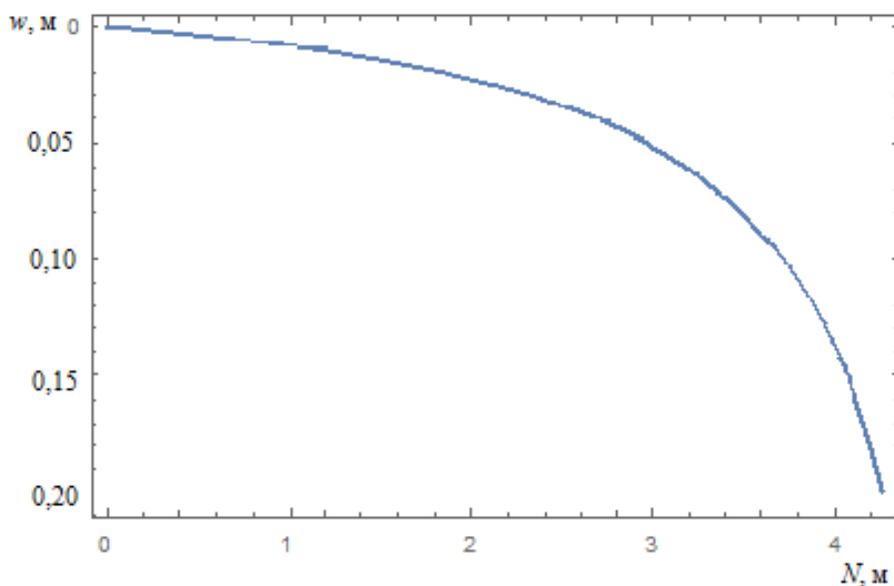
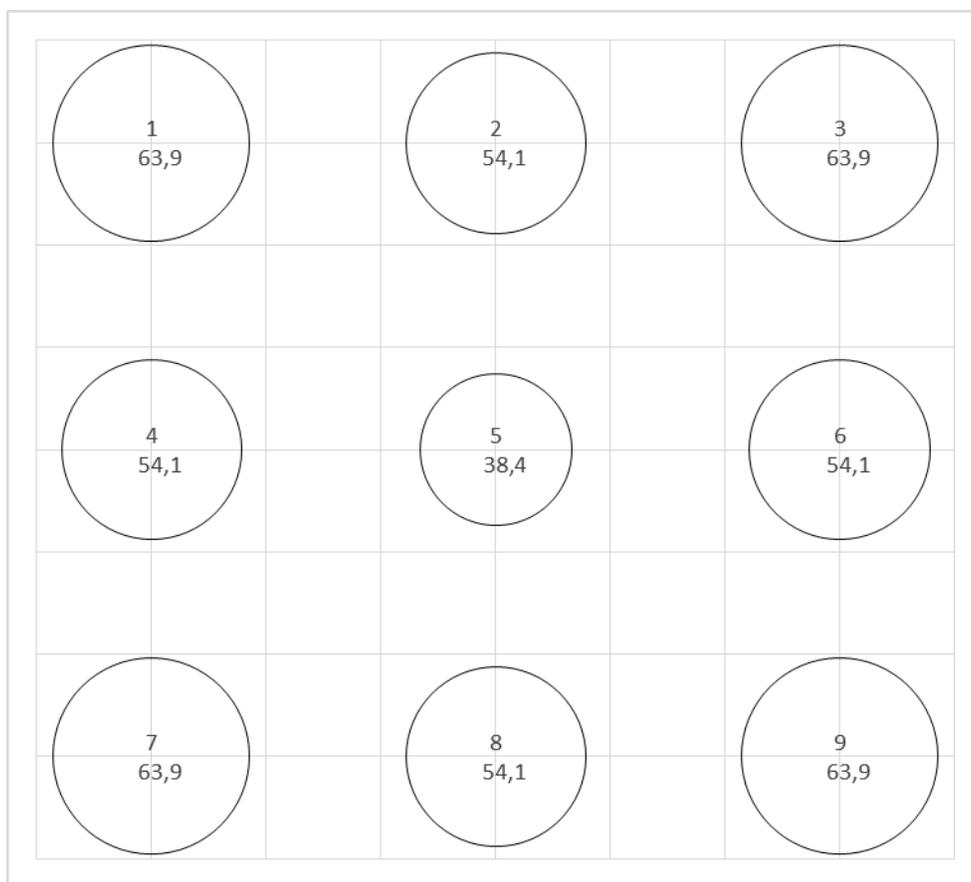


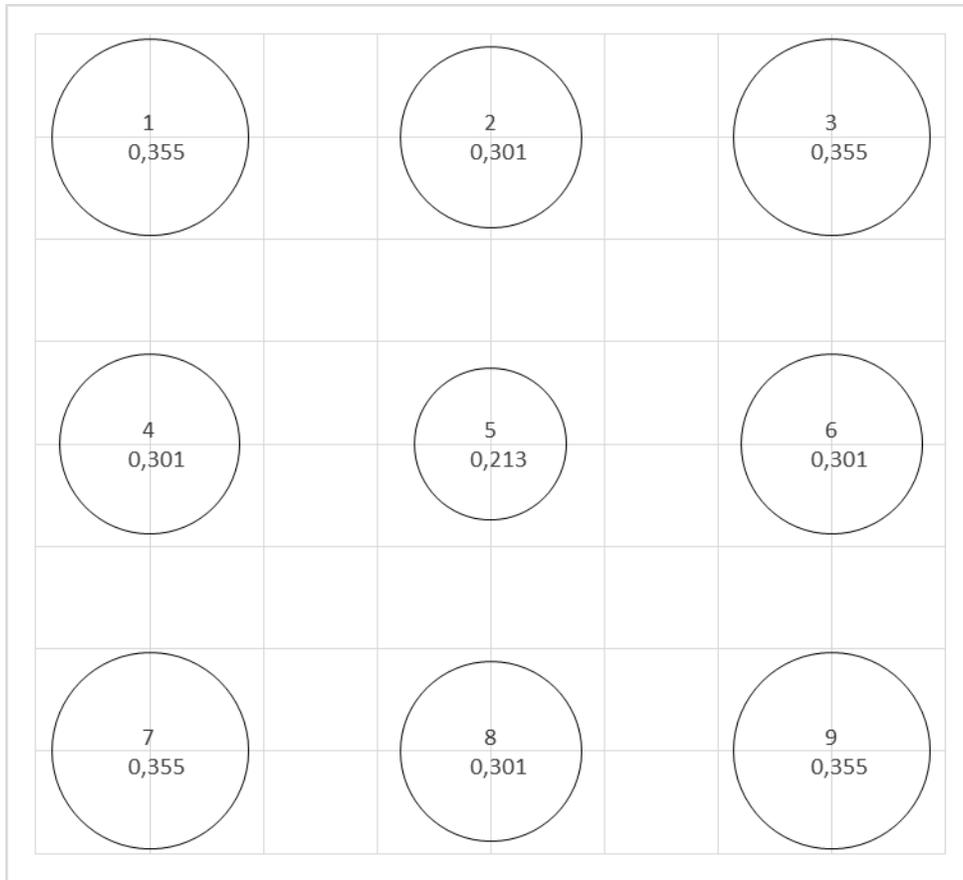
Рисунок 26 – Зависимость нагрузка-осадка, рассчитанная по формуле (4)

Далее проводятся расчеты аналогичные примеру 3, однако собственная жесткость сваи на главной диагонали матрицы коэффициентов влияния корректируется с использованием зависимости нагрузка-осадка приведенной на рисунке 26. Расчет проводится с постепенным увеличением значения заданной осадки  $w_i$  до достижения требуемой нагрузки на фундамент.

Результаты расчетов в виде схемы распределения жесткостей свай показаны на рисунке 27. На рисунке 28 показано отношение продольного усилия в свае к несущей способности сваи. На рисунке 29 показана зависимость нагрузка-осадка для одиночной сваи (синяя линия) и для сваи в составе группы.

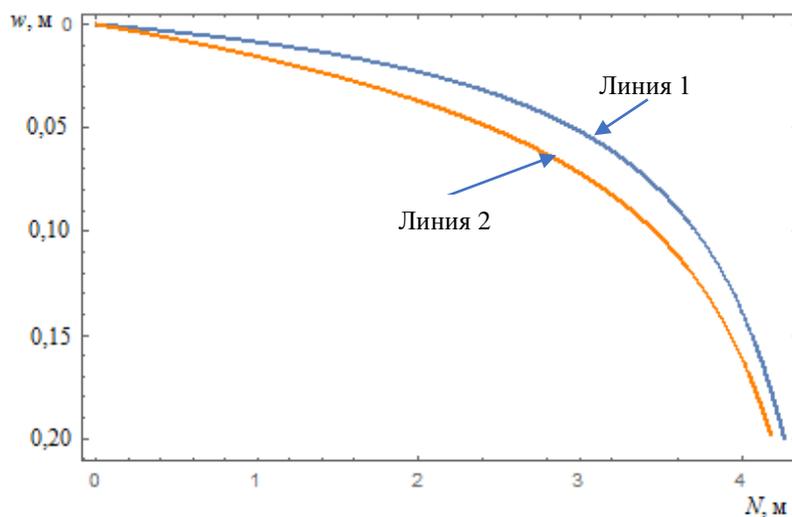


**Рисунок 27 – Схема коэффициентов жесткости свайного фундамента, МН/м, при абсолютно жестком ростверке. Расчет в упруго-пластической постановке**



**Рисунок 28 – Отношение действующей на сваю нагрузки к ее несущей способности**

Рассматривая данные, представленные на рисунке 29 можно отметить более однородное распределение коэффициентов жесткости.



**Рисунок 29 – Зависимость нагрузка-осадка для одиночной сваи (линия 1) и для группы свай (линия 2). По оси  $N$  показано усилие на каждую сваю**

## Библиография

- [1] Рекомендации по проектированию фундаментов из свайных полей. – Москва: ВНИИС, 1983. – 26 с.
- [2] Руководство по проектированию свайных фундаментов. – Москва: Стройиздат, 1980. – 153 с.
- [3] СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты
- [4] СП 50-102-2003 Проектирование и устройство свайных фундаментов
- [5] В. Г. Федоровский, Расчет осадок свай в однородных и многослойных основаниях. *дис. канд. техн. наук: 05.23.02: дис. канд. техн. наук* / М. И. Горбунов-Посадов, НИИОСП им. Н.М. Герсеева Госстроя СССР. – Москва, 1974. – 201 с.
- [6] Vincenzo Caputo, C. Viggiani, *Pile foundation analysis: A simple approach to nonlinearity effects* // *Rivista Italiana di Geotecnica*. – 1984. – Т. 18. С. 32–51
- [7] И. А. Боков, В. Г. Федоровский, О расчете осадки группы свай с использованием коэффициентов взаимного влияния по модели упругого полупространства // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2017. № 6. С. 2–8.