

На правах рукописи



**АНИКЬЕВ АНАТОЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**УПРОЧНЕНИЕ ОСНОВАНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ ФУНДАМЕНТОВ  
НАКЛОННЫМИ ЩЕБЕНОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, ВЫПОЛНЕННЫМИ  
В ПРОБИТЫХ СКВАЖИНАХ**

**Специальность: 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Акционерном Обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт Оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова» (АО «НИЦ Строительство» – НИИОСП им. Н.М. Герсеванова).

Научный руководитель:

Кандидат технических наук

**Шишкин Владимир Яковлевич**

Официальные оппоненты:

**Абелев Марк Юрьевич**

Профессор, доктор технических наук,  
Заслуженный строитель России, Лауреат  
Государственной Премии СССР, директор  
Научно-образовательного центра технологий в  
строительстве и производстве стройматериалов  
Института строительства и жилищно-  
коммунального хозяйства ГАСИС ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский  
университет «Высшая Школа Экономики»  
(ФГАОУ ВО «НИУ «ВШЭ»)

**Конюхов Дмитрий Сергеевич**

Доцент, кандидат технических наук, начальник  
отдела научно-технического сопровождения  
строительства, Акционерное Общество  
«Мосинжпроект» (АО «Мосинжпроект»)

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный  
университет архитектуры и строительства»  
(ФГБОУ ВО «ПГУАС»)

Защита состоится «26» декабря 2019 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г.Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте [www.cstroy.ru](http://www.cstroy.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Шулятьев Станислав Олегович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Актуальность темы и направленность исследования обусловлена широкой распространенностью зданий и сооружений, устроенных на фундаментах мелкого заложения и малой изученностью вопросов проектирования и методики расчета упрочненного основания существующих фундаментов.

### **Степень разработанности темы**

Метод упрочнения оснований существующих ленточных фундаментов щебеночными элементами успешно используется на практике в строительстве, однако широкого применения он не получил, из-за отсутствия методики проектирования и исследований воздействия щебеночных элементов на деформационные характеристики упрочняемого массива грунта.

### **Цель и основные задачи диссертационной работы**

Целью диссертации является исследование изменения деформационных свойств грунтового основания реконструируемых ленточных фундаментов после упрочнения щебеночными элементами с разработкой рекомендаций по методике проектирования и учету дополнительных осадок.

Достижение поставленной цели исследования определяется решением следующих задач:

- анализ существующих методов проектирования и расчета щебеночных элементов;
- исследование воздействия щебеночных элементов на изменение характеристик грунтов основания и развитие уплотненной зоны, образуемой при трамбовании щебня в стенки скважины;
- исследование влияния геометрических параметров щебеночных элементов на НДС грунтов основания реконструируемого здания методами математического моделирования;
- исследование закономерностей изменения модуля деформации грунтов основания упрочненных щебеночными элементами и дополнительной нагрузки при различных допустимых дополнительных осадок реконструируемого здания;
- практическая апробация предложенной методики расчета и проектирования на реальных объектах с проведением натурных испытаний на опытных участках;
- сопоставление и анализ результатов мониторинга по архивным объектам;
- разработка практических рекомендаций по проектированию и методике расчета, упрочненного щебеночными элементами основания фундамента.

### **Объект исследования**

Объектом исследования являются щебеночные элементы, выполненные в пробитых скважинах, применяемые при упрочнении основания существующих фундаментов.

### **Предмет исследования**

Предметом исследования является влияние щебеночных элементов на НДС массива грунта, в том числе влияние основных геометрических параметров щебеночных элементов на способность восприятия дополнительной нагрузки при равной допустимой осадке; изменение деформационных характеристик упрочненного массива грунта.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

-выявлены закономерности увеличения модуля деформации грунтов основания после упрочнения щебеночными элементами и изменение дополнительной нагрузки при различных допустимых дополнительных осадках реконструируемого здания;

-определен характер развития уплотненной зоны, образуемой при трамбовании щебня в стенки скважины, а также воздействия щебеночных элементов на изменение свойств грунтов основания;

-определены зависимости влияния геометрических параметров щебеночных элементов на изменение дополнительной нагрузки на основание существующих ленточных фундаментов.

### **Теоретическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в оценке влияния щебеночных элементов на НДС массива грунта, в том числе:

-установлен характер изменения свойств грунтов основания и развитие уплотненной зоны при воздействии щебеночных элементов, образуемой при трамбовании щебня в стенки скважины. При рассмотрении различных видов грунтов, при одинаковом объеме втрамбованного щебня, величина зоны уплотнения в слабых грунтах будет меньше, чем в плотных;

-показано, что при расчете дополнительной осадки реконструируемого здания существенное влияние на НДС основания оказывают следующие геометрические параметры щебеночных элементов: шаг элементов в плане, отступ от края подошвы фундамента, угол наклона, глубина погружения и длина щебеночного элемента;

-установлено, что с увеличением начальных деформационных характеристик грунтов основания, эффект от упрочнения щебеночными элементами уменьшается.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость заключается в разработке рекомендаций по упрочнению оснований существующих ленточных фундаментов щебеночными элементами, которые включают в себя:

-методику проектирования, которая позволяет обосновано выполнять проектные решения по упрочнению основания реконструируемых зданий;

-методику расчета, упрочненного щебеночными элементами основания, позволяющая прогнозировать дополнительную осадку при увеличении нагрузки на фундамент;

-установлено, на основании анализа и сопоставления с архивными проектами, что применение щебеночных элементов с рациональными параметрами по разработанной методике расчета позволяет уменьшить объем затраченного щебня на погонный метр до 50% и примерно в 2 раза снизить затраты труда.

### **Методология и методы исследований**

Работа выполнена на основе расчетно-теоретических и натурных исследований. Расчетно-теоретические исследования упрочнения основания щебеночными элементами проведены путем численного моделирования изменения НДС грунта при изменении силы воздействия на основание. Экспериментальные исследования выполнены на реальных объектах с использованием традиционных способов и средств измерений характеристик уплотненного массива. При обработке результатов исследований применены методы математической статистики.

### **Личный вклад автора**

Участие соискателя на всех этапах исследования:

-анализ существующих методов и результатов исследований проектирования и расчета щебеночных элементов, в т.ч. по архивным объектам;

-проведение аналитических исследований воздействия щебеночных элементов на изменение характеристик грунтов основания и развитие уплотненной зоны, образуемой при трамбовании щебня в стенки скважины;

-разработка методики и выполнении численного моделирования и расчетного анализа влияния щебеночных элементов на НДС массива грунта при реконструкции существующих зданий и сооружений;

-выполнение исследований методами математической статистики изменения модуля деформации грунтов основания упрочненных щебеночными элементами и дополнительной

нагрузки при различных допустимых дополнительных осадках реконструируемого здания;

- проведение натурных исследований на опытных площадках реальных объектов с применением разработанной экспериментальной методики;

- обработка и интерпретация экспериментальных данных;

- анализ и обобщение полученных результатов;

- разработка методики проектирования и расчета, упрочненного щебеночными элементами основания фундамента;

- подготовка и написание основных публикаций по выполненной работе.

### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся результаты исследования упрочнения основания фундаментов щебеночными элементами, включающие:

- рекомендации по проектированию щебеночных элементов при упрочнении основания существующих ленточных фундаментов;

- методику расчета изменения дополнительной нагрузки при варьировании допустимой осадки на упрочненное щебеночными элементами основания существующих фундаментов в различных грунтовых условиях при варьировании допустимой осадки;

- методику расчета изменения модуля деформации на упрочненное щебеночными элементами основания фундаментов в зависимости от начальных деформационных характеристик массива грунта.

### **Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность результатов исследований обеспечена:

- использованием численных методов расчетов в сертифицированных геотехнических программных комплексах;

- применением методов статистической обработки информации с использованием сертифицированных программ;

- применением в экспериментальных исследованиях сертифицированного тарированного оборудования;

- приемлемой сходимостью результатов численных расчетов по разработанной методике с данными проведенных экспериментальных исследований.

### **Апробация работы**

Основные положения проведенных исследований докладывались на следующих конференциях:

- Учебный семинар НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство»

(Москва, 2010г., 2015г.);

-71-ая научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГАСУ с международным участием (Санкт-Петербург, 2015г.);

-2-ая российская учебно-практическая молодежной конференции по геотехнике (Москва, 2016г.).

### **Внедрение результатов**

Результаты диссертации были использованы при проектировании и реконструкции следующих объектов:

1. Поликлиника №122 по адресу: г. Москва, ул. 2-ая Пугачевская, д. 8 (НПФ "ФундаментСтройПроект");
2. Жилой дом по адресу: г. Ивантеевка, Фабричный проезд (НПФ "ФундаментСтройПроект").

### **Публикации**

Основные положения диссертации и материалы исследований изложены в 6 печатных работах, из них 4 печатные работы в журналах, включенных в перечень ВАК. Общий объем в печатных листах - 2,5 п.л., объем выполненный лично автором – 1,6 п.л.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, приложения и выводов. Список литературы состоит из 121 наименований работ отечественных и зарубежных авторов. Общий объем диссертационной работы составляет 131 страниц, 54 рисунка и 34 таблицы.

Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 2, 10 паспорта специальности 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения».

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

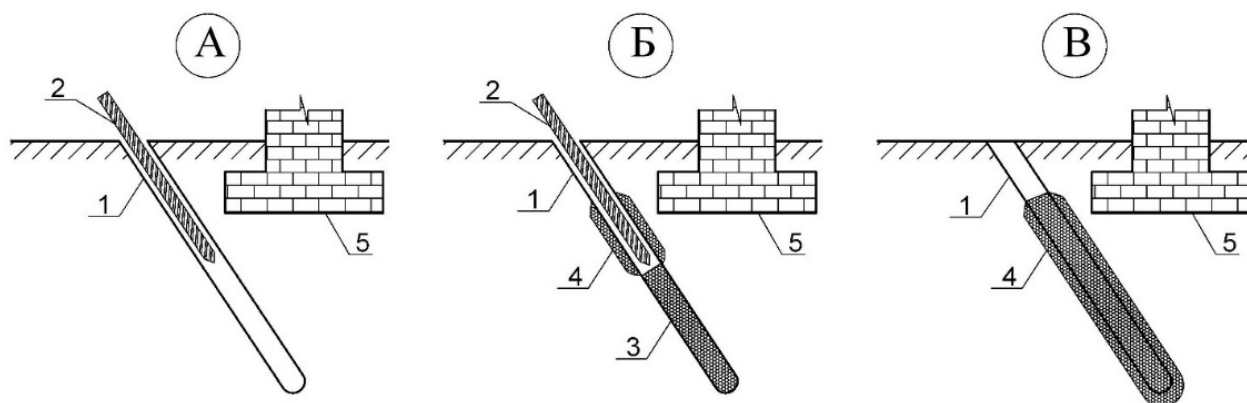
**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, отмечена научная новизна и практическая ценность работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены способы упрочнения основания фундаментов в пробитых скважинах. Основные принципы расчета и проектирования фундаментов в вытрамбованных котлованах, грунтовых свай, щебеночных колонн, щебеночных элементов и метода виброфлотации исследовались в работах *Абелева Ю.М., Абелева М.Ю., Алексеева С.И. Багдасарова Ю.А., Бахолдина Б.В., Буслова А.С., Глухова В.С., Готмана А.Л., Готман Н.З. Джантимилова Х.А., Ильичева В.А., Келер У., Когая В.К., Колыбина И.В., Коновалова*

П.А., Конюхова Д.С., Крутова В.И., Мангушева Р.А., Никифоровой Н.С., Полищука А.И., Пронозина Я.А., Рабиновича И.Г., Рытова С.А., Сидорчука В.Ф., Сорочана Е.А., Ставницера Л.Р., Тер-Мартirosяна А.З., Тер-Мартirosяна З.Г., Терцаги К., Шейнина В.И., Шишкина В.Я., Шулятьев О.А., Degen W.S., Steerman S. и др.

Рассмотрено применение малогабаритных щебеночных элементов, устроенных путем пробивки скважины, что позволяет производить не только подготовку основания для строительства нового фундамента, но и упрочнять основание уже существующих фундамента без выемки грунта, проводя работы в стесненных условиях подвальных помещений.

Технология изготовления щебеночных элементов предусматривает устройство, как вертикальных, так и наклонных лидерных скважин, путем продавливания грунта пневмопробойником с реверсивным извлечением его из скважины (рис. 1.А). Затем вручную скважина засыпается щебнем на всю высоту, а пневмопробойник также, как при устройстве лидерных скважин, по направляющей погружается и втрамбовывает щебень в грунт (рис. 1.Б). Операция повторяется несколько раз до проектного объема втрамбованного щебня (рис. 1.В). После пневмопробойник извлекается, скважина засыпается щебнем и цементируется через трубу-инъектор под давлением в 0,15-0,2 МПа до условного отказа. При наличии в основании песчаных грунтов, во избежание обратной засыпки, устройство щебеночных элементов производится с установленной сверху пневмопробойника обсадной трубы с теряемым башмаком.



**Рисунок 1** - Технология изготовления щебеночных элементов

1- скважина; 2- пневмопробойник; 3-щебень; 4- зона щебеночного уширения; 5- существующий фундамент

В 1997 году разработаны рекомендации по проектированию и расчету щебеночных свай. Эффект от усиления щебеночными элементами оценивался по таблице в зависимости

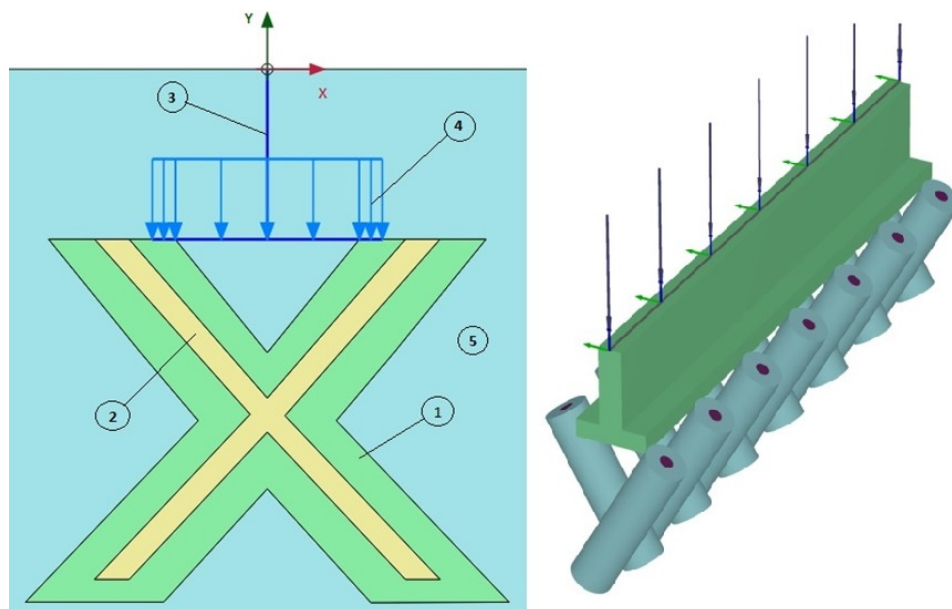
от начальных грунтовых условий и объема, втрамбованного инертного материала. При этом в данных рекомендациях отсутствуют необходимые геометрические параметры усиления, такие как: шаг элементов в плане, отступ от края подошвы фундамента, угол наклона, а также глубина и длина щебеночных элементов.

**Во второй главе** разработаны основные положения по выполнению исследований методами математического моделирования и полевых исследований.

Работа посвящена исследованиям упрочнения пластичных супесей, суглинков от мягкопластичной до полутвердой консистенции и песчаных неводонасыщенных грунтов.

При исследовании методами математического моделирования были приняты начальные грунтовые условия из СП 22.13330.2016 (рекомендованного Приложения А). Область применения ограничена грунтами со степенью влажности  $S_r \leq 0,75$ , коэффициентом пористости  $e=0,9 - 0,65$ , модулем деформации  $E_0= 7000 \text{ кН/м}^2 - 19000 \text{ кН/м}^2$ , углом внутреннего трения и удельным сцеплением:  $\varphi=18^\circ-24^\circ$  и  $c=9 \text{ кН/м}^2 - 28 \text{ кН/м}^2$  (для пылевато-глинистых грунтов)  $\varphi=26^\circ-28^\circ$  и  $c=1 \text{ кН/м}^2 - 3 \text{ кН/м}^2$  (для песчаных грунтов).

Для комплексного исследования поведения грунтового основания с учетом упрочнения щебеночными элементами в условиях плоского и пространственного НДС при воздействии статических нагрузок были построены геотехнические модели в ПК PLAXIS 2D и 3D (рис. 2). При выполнении исследований принята идеально упруго-пластическая модель, с предельной поверхностью, описываемой критерием Кулона-Мора.



**Рисунок 2** - Характерные расчетные схемы в Plaxis 2D и 3D

1- зона уплотненного грунта; 2- зона щебеночного уширения, 3- существующий фундамент; 4- нагрузку на основание; 5- неуплотненный грунт

Радиус щебеночного уширения зависят от объема втрамбованного щебня и определены по формуле:

$$R_{щ.у.} = \sqrt{\frac{V_{в.щ.}}{\pi L_{щ.с.}}}, \quad (1)$$

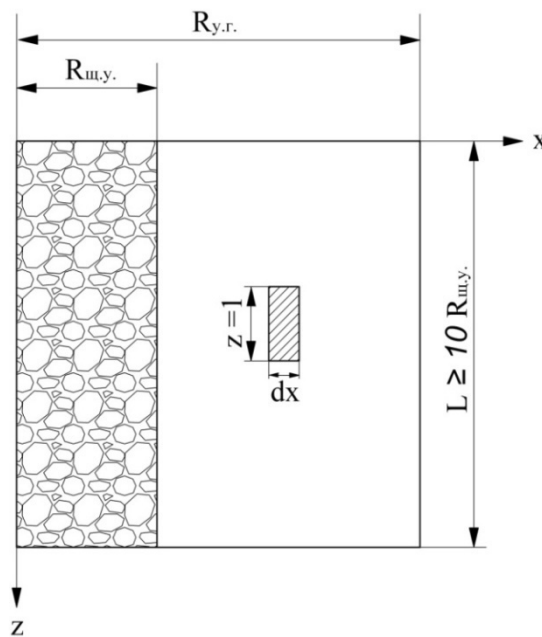
где  $V_{в.щ.}$  - объем втрамбованного щебня;

$L_{щ.с.}$  - длина щебеночного элемента.

Моделирование щебеночного уширения (ствола элемента) осуществлялось массивом грунта с модулем деформации  $E=100$  МПа и физико-механическими характеристиками, как для плотного крупнообломочного грунта с учетом соответствующих характеристик окружающего массива грунта -  $\gamma=21$ кН/м<sup>3</sup>;  $\phi=43^\circ$ ;  $c=2$ кПа (для песчаных грунтов основания);  $c=20$ кПа (для пылевато-глинистых грунтов основания).

В работе рассмотрены щебеночные элементы при отношении длины элемента к его диаметру не менее 5, таким образом можно не учитывать образование буферного слоя (выпора грунта). Для расчетов принято, что наиболее близкая геометрическая фигура, соответствующая форме скважины после формирования ее ствола - цилиндрическая.

Габариты зоны уплотненного грунта определены по аналогии с решением *Грачева Ю.А.* и базируется на гипотезе, что изменение объема пор в объеме грунта равно объему добавленных твердых частиц в объеме грунта.



**Рисунок 3-** Расчетная схема с элементарным участком грунта в виде цилиндрического кольца.  $R_{щ.у.}$  - радиус щебеночного уширения;  $R_{у.г.}$  - радиус уплотненного грунта

В общем виде распределения уплотнения в массиве грунта упрочненным щебеночными элементами (рис. 3) имеет вид:

$$\int_{x=R_{у.у.}}^{x=R_{у.з.}} 2\pi x \left( \frac{e_0}{1+e_0} - \frac{e_{(x)}}{1+e_{(x)}} \right) dx = \pi R_{у.у.}^2 \frac{1}{1+e_0}, \quad (2)$$

где  $e_0$  - начальный коэффициент пористости;  $e_{(x)}$  - изменение коэффициента пористости при удалении по оси X.

Для практических целей была определена расчетная зона уплотненного грунта исходя из средних значений физических характеристик уплотненного грунта, по аналогии с решениями Крутова В.И., Рабиновича И.Г и др.

Для нахождения радиуса уплотненного грунта с учетом средних характеристик в пределах уплотненной зоны, было положено, что значение  $e_{(x)} = e_{cp} = const$ , где  $e_{cp}$  - среднее значение коэффициента пористости в пределах зоны уплотненного грунта, определяемое по формуле:

$$e_{cp} = \frac{\rho_s}{\rho_{d.cp.}} - 1, \quad (3)$$

где  $\rho_s$  - плотность частиц грунта;

$\rho_{d.cp.}$  - среднее значение плотности сухого грунта в пределах уплотняемой толщи.

После математических преобразований выражения (2), получена формула для практического определения осредненного значения зоны уплотненного грунта:

$$R_{у.з.} = R_{у.у.} \sqrt{\frac{e_0 + 1}{e_0 - e_{cp}}}, \quad (4)$$

Моделирование зоны уплотненного грунта осуществляется массивом грунта с учетом осредненных физических характеристик ( $e_{cp}$ ,  $\rho_{cp}$ ,  $W_{cp}$ ). Учет изменения прочностных характеристик грунта в пределах зоны уплотненного грунта принимался интерполяцией по рекомендованным таблицам СП 22.13330.2016 (Приложение Б), в зависимости от начального неуплотненного и среднего значения уплотненного коэффициента пористости и показателя текучести (для связных грунтов).

Контроль качества упрочнения грунтов основания проводился с помощью полевого зонда для определения горизонтального давления в грунте, разработанного В. Ф. Сидорчуком (так же известно, как "Лопатка Сидорчука"). Зонд представляет собой пластину с заостренным концом. Погружение зонда в грунтовый массив обычно осуществляется с помощью оборудования используемого при статическом зондировании, но в связи с

производством работ в стесненных условиях подвала, впервые было опробовано погружение зонда под действием установленного на него пневмопробойника.

**В третьей главе** проведены исследования методами математического моделирования рациональных параметров щебеночных элементов по следующему алгоритму:

- Определение начального НДС грунта;
- Определение изменения НДС грунта при изменении силы воздействия на фундамент;
- Варьирование параметров упрочнения основания щебеночными элементами с целью определения дополнительных нагрузок при одинаковой дополнительной осадке реконструируемого здания равной 20мм;
- Сопоставление полученных значений, для определения оптимальных параметров упрочнения основания фундаментов щебеночными элементами.

Исходные геометрические параметры:

- Отступ от края подошвы фундамента  $S_y=0,25\text{м}$ ;
- Угол наклона  $\alpha=45^\circ$ ;
- Глубина погружения ниже подошвы фундамента  $H_{щ.э.}=1,5\text{м}$ .

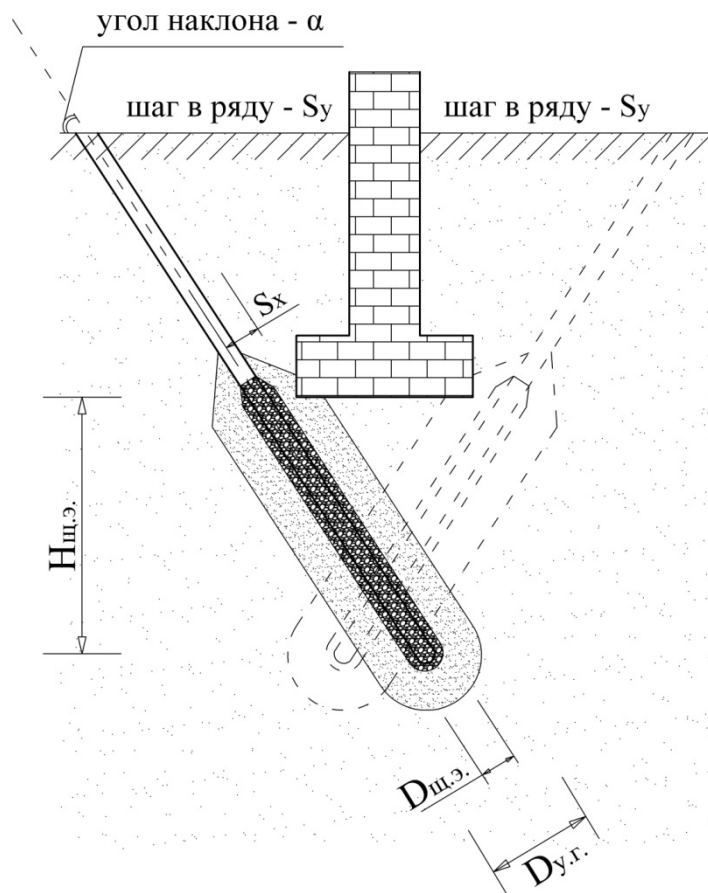
При варьировании одного геометрического параметра остальные остаются постоянными.

Допустим рассматриваемый фундамент ленточный шириной  $B=1,0\text{м}$  с заглублением  $H=1,5\text{м}$ . Диаметр щебеночного уширения принят  $0,25\text{м}$ .

Рассмотрим влияние отступа щебеночного элемента от края подошвы фундамента ( $S_x$ , рис.4), так же существенно влияет на значение дополнительной нагрузки. Отступ от края подошвы фундамента принят кратным диаметру щебеночного уширения  $D_{щ.у.}$  (фор.1). Согласно расчетам, с уменьшением отступа щебеночных элементов от края подошвы фундамента увеличивается нагрузка на основание на 15, 25 и 35% при соответствующих отступах  $2D_{щ.у.}$ ,  $1,5D_{щ.у.}$  и  $D_{щ.у.}$ . Рациональным отступом для дальнейших исследований принят отступ  $S_x=D_{щ.у.}$

Влияния угла наклона щебеночных элементов также существенно влияет на величину дополнительной нагрузки ( $\alpha$ , рис.4). Рассмотрены углы наклона в интервале от  $90^\circ$  до  $45^\circ$ . На основании полученной зависимости между нагрузкой и осадкой, построен соответствующий график (рис. 4). В связи с тем, что устройство щебеночных элементов под углом в  $45^\circ$  может быть невозможным по причинам стесненных условий производства

работ и плохой устойчивости стенок скважин при повторной проходке в уплотненном щебне, дополнительно был рассмотрен угол наклона щебеночных элементов, который зависит от угла внутреннего трения грунтов основания и рассчитывается как  $\alpha = \pi/4 + \varphi/2$ . Применение такого угла наклона позволяет перекрывать возможное образование слабых зон при возрастании нагрузок непосредственно под подошвой фундамента. С уменьшением угла наклона щебеночных элементов от  $90^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $45^\circ$  дополнительная нагрузка на основание увеличивается соответственно на примерно 10, 20, 30, 40%, соответственно. В связи с технологическими особенностями рациональным углом наклона для дальнейших исследований принято устройство щебеночных элементов при  $\alpha = \pi/4 + \varphi/2$  (примерно  $55^\circ$ ).



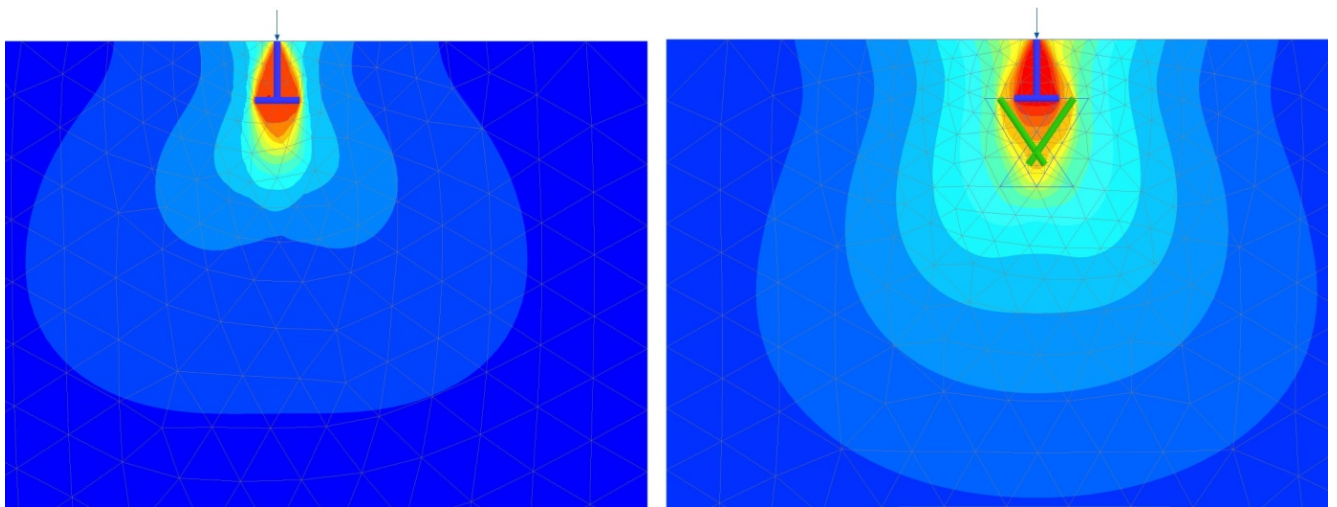
**Рисунок 4-** Разрез по фундаменту упрочненному щебеночными элементами с основными геометрическими параметрами

Далее определим рациональную глубину погружения щебеночных элементов ниже подошвы фундаментов ( $H_{щ.э.}$ , рис.4). Глубина погружения щебеночного элемента ниже подошвы фундамента принимается кратной ширине усиливаемого фундамента  $B_0$ . Расчеты показали, что при одинаковых осадках дополнительные нагрузки возможно увеличить на

20, 30 и 40 процентов если заглубление щебеночного элемента щебеночного элемента ниже подошвы составляет  $B_0$ ,  $1,5B_0$  и  $2B_0$  соответственно. Исходя из технологических особенностей работы пневмопробойника рациональным заглублением для дальнейших исследований принята глубина погружения щебеночного элемента, соответствующая  $1,5B_0$  упрочняемого фундамента.

При упрочнении оснований существующих зданий и сооружений щебеночные элементы располагаются относительно фундамента в шахматном порядке. Одним из самых значимых параметров следующим к рационализации, является шаг элементов ( $S_y$ , рис.4), т.к. с одной стороны уменьшение шага существенно влияет на увеличение дополнительной нагрузки при заданной допустимой осадке, а с другой стороны технологически выполнить щебеночные элементы на близком расстоянии друг от друга невозможно из-за "отказа" пневмопробойника. Обобщая опыт производства работ пневмопробойником ИП 4603Б диаметром 130 мм, диаметр щебеночного элемента составлял 250-350 мм, диаметр уплотненного грунта в среднем был в 2 раза больше – 0,5 – 0,7м и , соответственно, шаг элементов в ряду изменялся в интервале 0,5-0,7м, что соответствует  $D_{y.g.}$  и  $1,5D_{y.g.}$ , где  $D_{y.g.}$  - диаметр уплотненного грунта, определяемый по формуле 4. Рациональным шагом щебеночных элементов в ряду для дальнейших исследований принят шаг, соответствующий диаметру уплотненного грунта.

**В четвертой главе** проведено исследование закономерностей изменения напряженно-деформируемого состояния грунтов основания после упрочнения щебеночными элементами с рациональными параметрами при варьировании значения дополнительной нагрузки (рис.5).



**Рисунок 5-** Изополя общих перемещений до (слева) и после (справа) устройства элементов

Исходя из анализа рисунка (5), при одинаковой нагрузке у фундамента на естественном основании начинается образование характерных зон сдвигов, а 80% деформаций происходят на меньшей площади, чем для усиленного щебеночными элементами фундамента. Таким образом щебеночные элементы изменяют существующее НДС основания, включая в положительную работу бóльший объем грунта.

Для дальнейшего анализа был введен коэффициент  $K$ , который отражает характер изменения величины дополнительной нагрузки до и после упрочнения щебеночными элементами в зависимости от допустимых дополнительных деформаций ( $S_{(ad)}$ ). Коэффициент определяется отношением:

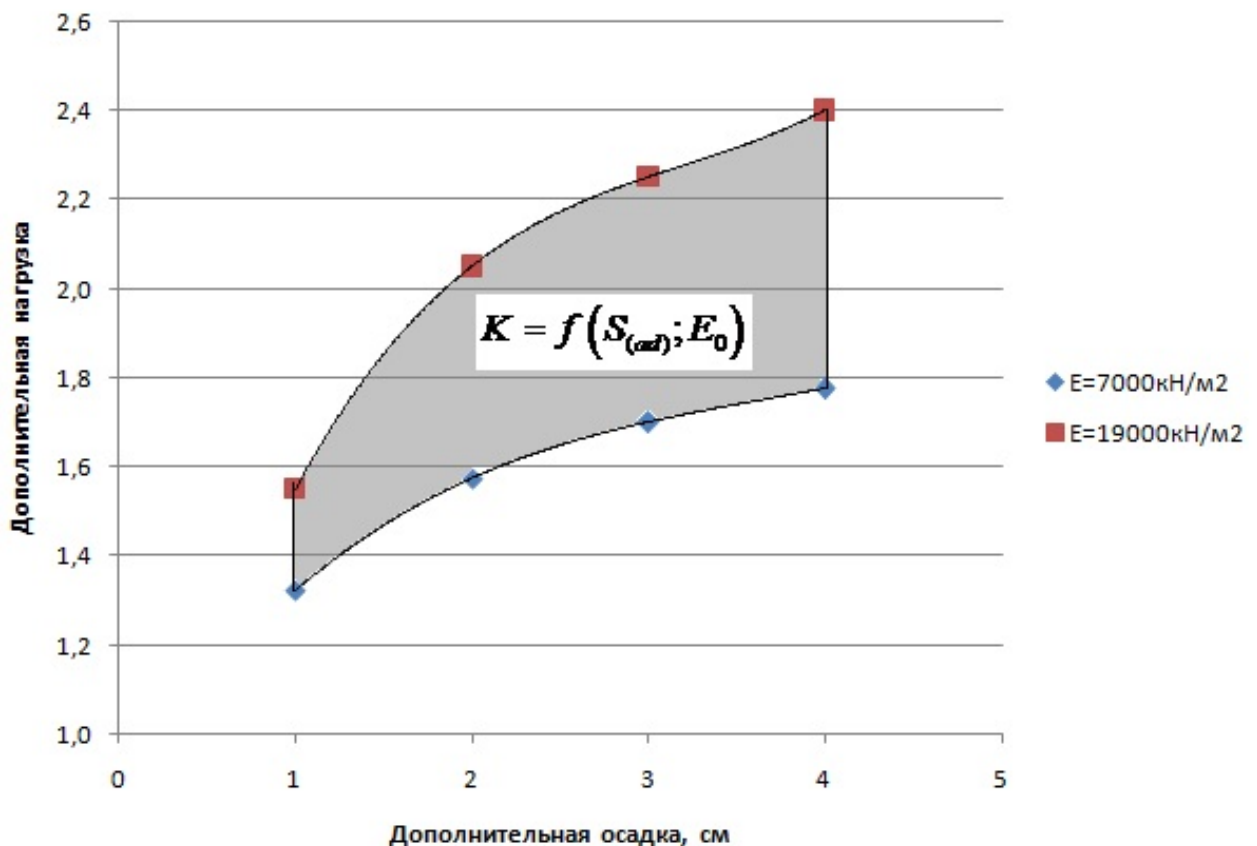
$$K = P_{щ.э.} / P_0 \quad (5)$$

где  $K$  - коэффициент эффекта упрочнения щебеночными элементами;

$P_0$  - существующая нагрузка на фундамент;

$P_{щ.э.}$  - нагрузка после упрочнения при заданной осадке.

График зависимости  $K$  от допустимой дополнительной осадки  $S_{(ad)}$  представлен на рисунке (6).



**Рисунок 6-** График функциональной зависимости коэффициента изменения дополнительной нагрузки  $K$  от значения допустимой дополнительной осадки  $S(ad)$  при величине модуля деформации грунта 7 и 19 МПа

Коэффициент  $K$  зависит от двух параметров - допустимая дополнительная осадка ( $S_{(ad)}$ ) и начальный модуль деформации ( $E_0$ ) (рис.6). Данную зависимость можно описать функцией:

$$K=f(S_{(ad)};E_0), \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6), используя методы математической статистики, получили следующее выражение для определения дополнительной нагрузки на усиленные щебеночными элементами основания фундаментов:

$$P_{щ.э.}=P_0K_3(AS^3+BS^2+CS+D), \quad (7)$$

где -  $K_3$  и  $S$  коэффициенты, принимаемые по таблице (1) в зависимости от начального модуля деформации и допустимой дополнительной осадке;

$A, B, C, D$  - константы, определяемые по таблице (2).

$P_0$ - существующая нагрузка на фундамент;

**Таблица 1** - Определение коэффициента  $S$  и  $K_3$  в зависимости от  $S_{(ad)}$  и  $E_0$

$S_{(ad)}$ , мм	$S$	$K_3$	
		При $E_0=7000$ кН/м <sup>2</sup>	При $E_0=19000$ кН/м <sup>2</sup>
10	1	0,45	0,56
20	2		0,59
30	3		0,60
40	4	0,47	0,62
Для промежуточных значений принимать по интерполяции			

**Таблица 2** - Значение констант для формулы (7)

$A$	$B$	$C$	$D$
0,05	-0,54	1,98	1,38

Модуль деформации упрочненного щебеночными элементами основания фундаментов определяется из выражения:

$$E_{щ.э.}=E_0(A_eE_k^2+B_eE_k^2+C_e), \quad (8)$$

где -  $E_0$  - начальный модуль деформации.

$E_k$  - коэффициент принимаемые по таблице (3) в зависимости от начального модуля деформации;

$A_e, B_e, C_e$  - константы, определяемые по таблице (4).

**Таблица 3-** Определение коэффициента  $E_k$  в зависимости от  $E_0$ 

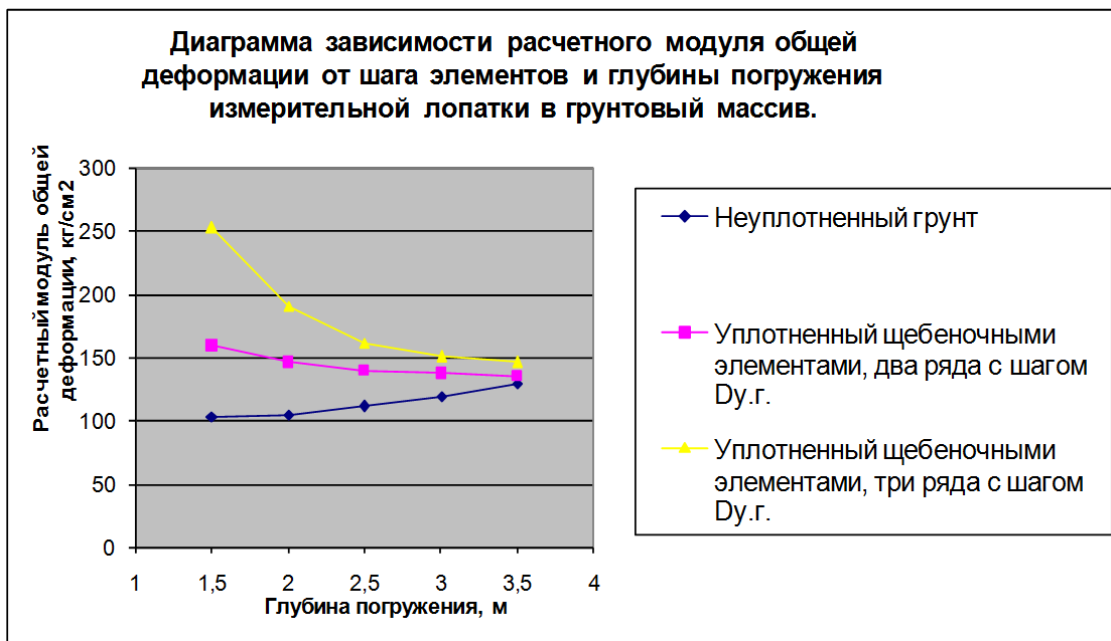
$E_0$ , кН/м <sup>2</sup>	$E_k$
7000	7
19000	19

**Таблица 4 -** Значение констант для формулы (8)

$A_e$	$B_e$	$C_e$
0,002	-0,09	2,67

**В пятой главе** приведены результаты натурных испытаний на двух опытных участках объектов строительства, анализ и сопоставление по архивным объектам, а также разработаны рекомендации по проектированию и расчету упрочненного щебеночными элементами основания.

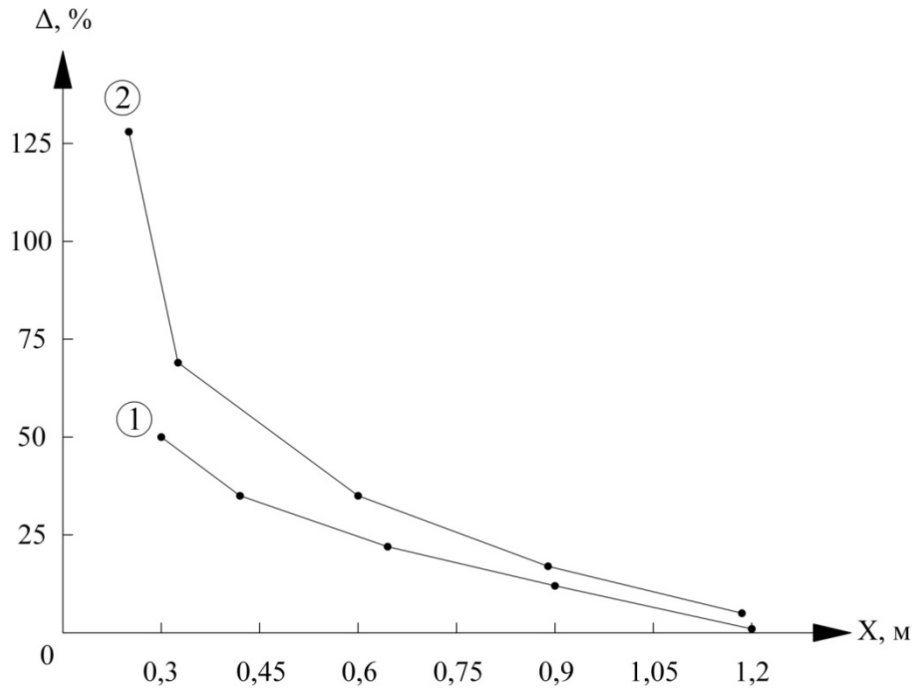
Полевой зонд, описанный во второй главе, погружался строго вертикально, что позволило выявить характер изменения модуля деформации по глубине после устройства щебеночных элементов (рис. 7).



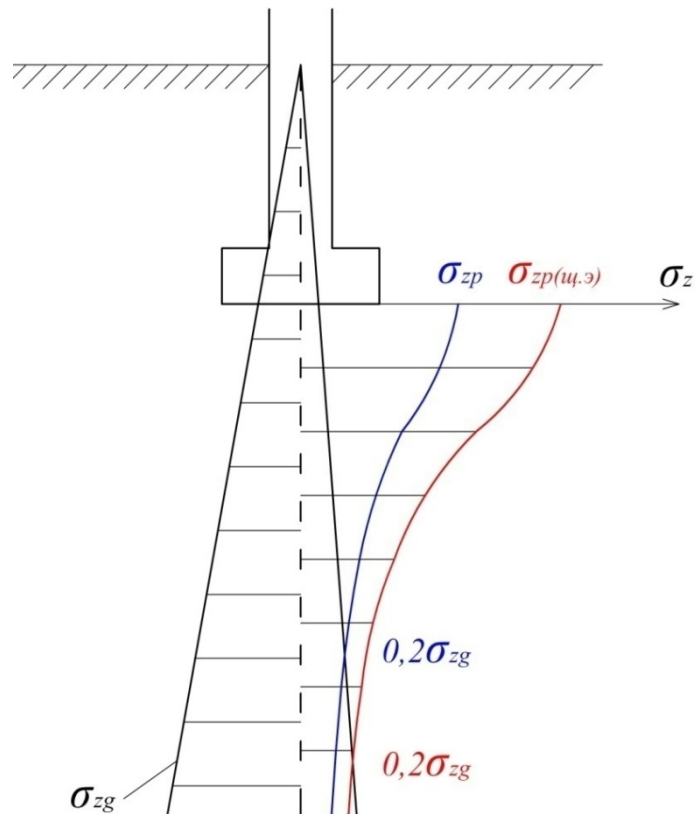
**Рисунок 7-** Характер изменения модуля деформации от шага щебеночных элементов и глубины погружения зонда в грунтовый массив

Кроме того, определили влияние уплотнения на различном расстоянии  $X$  от щебеночных элементов. На рис. 8 представлена качественная картина изменения горизонтальных напряжений  $\Delta$  в процентах от величины  $X$  (м). Изменение горизонтальных

напряжений  $\Delta$  это отношение горизонтальных напряжений после уплотнения к их значению до уплотнения.



**Рисунок 8-** Изменение горизонтальных напряжений при влиянии двух щебеночных элементов: 1 - при шаге двух рядах с шагом  $D_{y.r.}$ ; 2 - при трех рядах с шагом  $D_{y.r.}$ .



**Рисунок 9-** Распределение вертикальных напряжений в линейно деформируемом полупространстве после устройства щебеночных элементов (выделено красным цветом)

Расчет глубины сжимаемой толщи и дополнительной осадки предлагается производить методом линейно-деформируемого полупространства с учетом повышения до глубины  $H_{щ.э}$  модуля деформации упрочненными щебеночными элементами грунта  $E_{i(щ.э)}$  :

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp} h_i}{E_{i(щ.э)}}, \quad (9)$$

где  $\sigma_{zp}$ ,  $\beta$ ,  $h_i$ ,  $n$  - то же, что и в классическом методе определения осадки методом линейно-деформируемого полупространства, описанном в нормативных документах.

После упрочнения щебеночными элементами дополнительная нагрузка значительно увеличивается при одинаковых дополнительных осадках (рис. 9).

На опытных участках был замерен диаметр щебеночного уширения откопанных шурфов. В лаборатории получены значения коэффициента пористости и модуля деформации грунта после отбора проб вокруг щебеночных элементов. Дополнительно был совершен переход от горизонтальных давлений, полученных при погружении зонда к общему модулю деформации по экспериментальной формуле *Кятова Н.Х.* Результаты исследований сведены в таблице 5.

**Таблица 5-** Сводная таблица результатов исследований на опытных площадках

Грунт в основании	Метод исследования	Коэф. пористости		Модуль деформации, МПа		Диаметр щебеночного уширения, м
		До	После	До	После	
Песок рыхлый	Полевой	-	-	10	25	-
	Аналитический	-	0,56	-	21	0,25
	Лабораторный	0,88	0,60	9	22	0,27
Суглинок тугопластичный	Полевой	-	-	18	22	-
	Аналитический	-	0,69	-	20	0,18
	Лабораторный	0,74	0,64	16	19	0,20
Супесь пластичная	Полевой	-	-	9	16	-
	Аналитический	-	0,71	-	14	0,25
	Лабораторный	0,84	0,73	8	12	0,26

Щебеночные элементы впервые были применены при упрочнении основания существующего здания Моспочтамта в 1993г. В работе проведен анализ и сопоставление характерных объектов по упрочнению основания фундаментов при надстройке одного (ул. Кедровая, д.5а) и двух этажей (Переведеновский пер., д.13/13), перепрофилирование здания (ул. Флотская, д.15/1) и развитие неравномерных деформаций за годы эксплуатации (ул. Мясницкая, д.26, ул. 2-я Пугачевская, д.8).

Анализ сравнения результатов исследования с архивными данными, показал, что на рассматриваемых объектах применение щебеночных элементов с рациональными параметрами позволило бы сэкономить на количестве устраиваемых щебеночных элементов, их длине и общем объеме затраченного щебня на погонный метр. При этом отсутствует превышение допустимой дополнительной осадки (табл. 6).

**Таблица 6-** Сравнение архивных значений осадок и модуля деформации

Архивный объект	Начальная нагрузка, кН/м <sup>2</sup>	Нагрузка после реконструкции, кН/м <sup>2</sup>	Дополнительная осадка, мм			Общий модуль деформации, кН/м <sup>2</sup>	
			Допустимая	Мониторинг	Расчет	Радиоизотопный каротаж	Расчет
ул. Мясницкая, д.26	200	250	20	7,9	10	21000	15000
ул. Кедрова, д.5а	220	280	30	8	12	25000	22000
Переведеновский переулок, д.13/13	190	300	30	13,4	20	21000	20000
ул. Флотская, д.15/1	200	300	20	13,1	17	22000	17000
ул. 2-ая Пугачевская, д.8	220	250	20	5	10	25000	19000

На основании проведенного анализа была откорректирована таблица, применяемая в рекомендациях 1997 года. Применение щебеночных элементов с рациональными параметрами позволило уменьшить объем затраченного щебня на погонный метр в среднем на 40%.

Проведенный анализ позволил составить рекомендации по проектированию упрочнения основания щебеночными элементами с рациональными параметрами, включающие в себя методику проектирования (расположение элементов в плане и на поперечном разрезе), методику определения величины дополнительной нагрузки при допустимой дополнительной осадке и методику оценки изменения общего модуля деформации.

Алгоритм проектирования упрочнения основания существующих ленточных фундаментов щебеночными элементами следующий:

1. Анализ исходных данных – свойства грунтов основания, геометрия фундамента, фактическая нагрузка, дополнительная нагрузка после реконструкции, допустимая дополнительная осадка;

2. Определение рациональных параметров щебеночных элементов (ЩЭ);

2.1. Диаметр щебеночного уширения ( $D_{щэ}$ ) рассчитывается по формуле (1) в зависимости от объема втрамбованного щебня;

2.2. Диаметр уплотненного грунта ( $D_{уг}$ ) зависит от коэффициента пористости грунта, степени влажности, диаметра щебеночного уширения ( $D_{щэ}$ ) и рассчитывается по формуле (4);

2.3. Длина ЩЭ и глубина погружения ниже подошвы фундамента принята равной  $1,5B_0$  ( $B_0$  - ширина фундамента);

2.4. Отступ от края подошвы фундамента соответствует диаметру щебеночного уширения ( $D_{щэ}$ );

2.5. Угол наклона ЩЭ зависит от угла внутреннего трения грунтов основания и определяется по формуле  $\alpha = \pi/4 + \varphi/2$ ;

2.6. Шаг ЩЭ в ряду принимается равным диаметру уплотненного грунта ( $D_{уг}$ );

3. Расчетное обоснование применения ЩЭ;

3.1. Дополнительная нагрузка для значения дополнительной осадки по формуле (7);

3.2. Модуль деформации упрочненного ЩЭ основания фундаментов по формуле (8);

3.3. Дополнительная осадка основания фундамента по формуле (9).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования по диссертационной работе позволили получить следующие результаты:

1. В ходе обзора современных способов упрочнения основания фундаментов реконструируемых зданий выявлена необходимость в использовании экономичных способов, позволяющих производить работы в стесненных условиях подвальных помещений, не имеющих существенных динамических воздействий, не токсичных и не трудоемких в процессе производства работ. Одним из таких методов является использование реверсивных пневмопробойников для устройства наклонных щебеночных элементов в грунте основания фундаментов при необходимости их упрочнения. Актуальность метода обусловлена его низкой стоимостью за счет малой цены материалов (щебня) и использования недорогого малогабаритного оборудования - пневмопробойников и компрессоров производства Российской Федерации;

2. Исследования на нескольких реконструируемых объектах с использованием упрочнения основания щебеночными элементами и моделирование работы щебеночных элементов на программных комплексах позволило выявить размеры зоны уплотнения. Получена формула для определения зоны уплотненного грунта. Диаметр зоны уплотненного грунта пропорционален объему втрамбованного щебня. При рассмотрении различных видов грунтов, при одинаковом объеме втрамбованного щебня, величина зоны уплотнения в слабых грунтах будет меньше, чем в плотных;

3. Установлено, что с уменьшением отступа щебеночных элементов от края подошвы фундамента на расстоянии от  $2D_{щ.э.}$  -  $1,5D_{щ.э.}$  -  $1,0D_{щ.э.}$  (где  $D_{щ.э.}$  - диаметр щебеночного уширения) увеличивается нагрузка на основание на 15%-25%-35%, при одинаковой допустимой осадке. Рациональным отступом для дальнейших исследований принят отступ, соответствующий одному диаметру щебеночного элемента;

4. Установлено, что с увеличением заглубления щебеночного элемента  $B$  -  $1,5B$  -  $2,0B$  (где  $B$  - ширина упрочняемого ленточного фундамента) увеличивается нагрузка на основание на 20%-30%-40% соответственно. Рациональным заглублением для дальнейших исследований принята глубина погружения щебеночного элемента, соответствующая значению полторы ширины упрочняемого фундамента;

5. Установлено, что с уменьшением угла наклона щебеночных элементов от  $90^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $45^\circ$  дополнительная нагрузка на основание увеличивается соответственно на примерно 10, 20, 30, 40%, соответственно. В связи с технологическими особенностями

рациональным углом наклона для дальнейших исследований принято устройство щебеночных элементов при  $\alpha=\pi/4+\varphi/2$  (примерно  $55^\circ$ );

6. Установлено, что с уменьшением шага щебеночных элементов  $1,5D_{у.г.} - D_{у.г.}$  (где  $D_{у.г.}$  - диаметр уплотненного грунта) увеличивается нагрузка на основание на 15%, 30% и 45% соответственно. Рациональным шагом щебеночных элементов в ряду для дальнейших исследований принят шаг, соответствующий диаметру уплотненного грунта.

7. Получено, с использованием методов математической статистики, решение для определения дополнительной допустимой нагрузки при заданной допустимой осадке, позволяющее обосновано выполнять проектные решения по упрочнению основания реконструируемых зданий. Дополнительная нагрузка на фундамент реконструируемого здания увеличивается относительно действующей в интервале от 30% при допустимой дополнительной осадке в 10мм до 140% при допустимой дополнительной осадке в 40 мм.

8. Получено эмпирическое решение для определения модуля деформации упрочненного щебеночными элементами основания. Применение щебеночных элементов с рациональными параметрами позволяет повысить модуль деформации до двух раз в зависимости от начальных деформационных характеристик грунтов основания.

9. Проведен анализ влияния щебеночных элементов на изменение горизонтального давления и модуля деформации. В зависимости от шага щебеночных элементов горизонтальное давление увеличивается относительно начальных значений до 130%, а модуль деформации до 150%. При расстоянии в 1,2м влияние щебеночных элементов практически отсутствует (до 5%). Получена экспериментальная формула для расчета дополнительной осадки на основе метода линейно деформированного полупространства.

10. Применение щебеночных элементов с рациональными параметрами по разработанным Рекомендациям позволяет уменьшить объем затраченного щебня на погонный метр в среднем на 40%.

**Перспективы дальнейшей разработки темы** в рамках обозначенной предметной области может стать усовершенствование предложенной методики расчета и проектирования щебеночных элементов за счет проведения стендовых лотковых и полевых штамповых испытаний.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. \*Шишкин В.Я., Сидорчук В.Ф., Аникьев А.А. Исследование грунта основания аварийного здания после его уплотнения щебеночно-цементными сваями [Текст] // Основание, фундаменты и механика грунтов. – 2010. – №2. – С.15-18. (Shishkin V.Y., Sidorchuk V.F., Anik'ev A.A. Investigation of the bed soil of a failed building after its compaction by crushed-stone/cement piles [Web of Science] // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2010.)
  2. \*Шишкин В.Я., Аникьев А.А. Уплотнение грунта с помощью пневмопробойника в условиях реконструкции и нового строительства [Текст] // Интеграл. – 2011. – №4. – С.120-123.
  3. \*Шишкин В.Я., Аникьев А.А. Уплотнение грунта основания щебеночными сваями. [Текст] // Жилищное строительство. – 2012. – №9. – С.33-37.
  4. \*Аникьев А.А. Способ усиления основания фундамента путем пробивки скважины с неоднократной подачей жесткого материала [Текст] // Геотехника. – 2016. – №5. – С.38-44.
  5. Ставницер Л.Р., Шишкин В.Я., Аникьев А.А. Строительство сооружений на слабых грунтах с применением грунтовых щебеночных свай [Текст] // Вестник «НИЦ «Строительство», Вып. №10, 2014г. – с. 22-30.
  6. Аникьев А.А. Аналитическое исследование зоны уплотненного грунта, создаваемой вследствие втрамбовывания щебня при производстве щебеночных скважин. [Текст] // Вестник «НИЦ «Строительство». – 2017. – С.139-147.
- \* - работы в ведущих изданиях, входящих в перечень, утвержденный ВАК Минобрнауки России.