

*На правах рукописи*

**ГУРСКИЙ АЛЕКСАНДР ВИТАЛЬЕВИЧ**

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВЛИЯНИЯ ВДАВЛИВАНИЯ  
ШПУНТА НА ДОПОЛНИТЕЛЬНУЮ ОСАДКУ  
СОСЕДНИХ ЗДАНИЙ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016



## I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность избранной темы.** В процессе современного строительства больших городов всё большее внимание уделяется освоению подземного пространства. Территории строительства новых административных и жилых зданий сильно ограничены по площади из-за уплотненной застройки, свойственной центральной части мегаполисов, которая приводит к устройству дополнительных подземных этажей и разработке глубоких котлованов в непосредственной близости к существующим зданиям. При организации новых подземных объемов важным требованием является сохранение примыкающих к площадке строительства существующих зданий, обязательным условием которого может служить устройство ограждающих стен котлованов.

Наиболее распространенными в Санкт-Петербурге являются ограждающие шпунтовые стены, погружение которых производится с использованием вибропогружателей и, считающимся щадящим, методом статического вдавливания, последний из которых применяется в условиях примыкания шпунтовых стен к существующим зданиям. Основным преимуществом статического вдавливания является снижение вибраций при погружении шпунта. В инженерно-геологических условиях центральной части Санкт-Петербурга, включающих 20...30-ти метровую толщу слабых тексотропных пылевато-глинистых грунтов, динамические воздействия могут привести к значительному снижению механических характеристик грунтов, вплоть до перехода этих грунтов в состояние вязкой жидкости.

С целью сохранения окружающих зданий, на проектной стадии, выполняется геотехническое обоснование с выполнением соответствующих расчетов оснований и фундаментов, направленных на определение влияния нового строительства на соседние здания, которые учитывают их дополнительную осадку в процессе разработки котлована и от веса возводимого сооружения. При этом, технологические осадки в геотехнических расчетах, практически, не учитываются и долгое время считалось, что их величиной можно пренебречь. Вместе с тем, многочисленные результаты геодезических наблюдений и мониторинга показывают, что технологическая осадка от вдавливания шпунта может достигать величины 2-3 см, которая никак не учитывается в геотехнических расчетах. Наибольшее влияние вдавливания шпунта на дополнительную осадку соседних зданий наблюдается в грунтовых условиях, преимущественно сложенных из песчаных грунтов в верхней части геологического разреза подстилаемых большой мощностью слабых глинистых грунтов. Согласно принятой рабочей гипотезы, песчаные грунты верхней зоны геологического разреза обеспечивают большие силы трения вдоль боковой поверхности погружаемого шпунта, которые оказывают давление на нижележащие слабые глинистые грунты и вызывают дополнительную осадку соседних зданий.

В связи с этим, оценка и учет дополнительной осадки зданий при устройстве ограждающих шпунтовых стен методом статического вдавливания и разработка методики их расчета является актуальной и малоисследованной задачей при проектировании ограждений котлованов.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами устройства ограждающих шпунтовых стен занимались ряд специалистов и ученых, среди которых: Баркан Д.Д., Белов Г.А., Верстов В.В., Гайдо А.Н., Городнова Е.В., Никифорова Н.С., Пономарев А.Б., Филиппов Е.Н., Фрейдман Б.Г., Цейтлин М.Г. и др.

Расчетам устойчивости подпорных стен положила начало работа Ш. Кулона в 1773 г., в которой была предложена теория давления грунта на вертикальные стенки. Изучением работы внедренных в упругое полупространство конструкций занимались Горбунов-Посадов М.И., Жемочкин Б.Н., Симвулиди И.А., Снитко А.Н.

Возможность моделирования сложных геотехнических ситуаций и относительная простота применения послужили причиной разработки и распространения численных методов расчета. Моделированием ограждающих конструкций с использованием численных методов и расчетом дополнительных осадок существующих соседних зданий занимались Готман Ю.А., Ильичев В.А., Колыбин И.В., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С., Парамонов В.Н., Петрухин В.П., Пономарев А.Б., Сахаров И.И., Тер-Мартirosян З.Г., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шулятьев О.А., Улицкий В.М. и другие.

В настоящее время численные методы расчета активно используются при геотехническом прогнозе дополнительных осадок окружающих зданий от нового строительства. Геотехнический прогноз, как правило, включает в себя расчет дополнительной осадки от строительства нового здания, разработки котлована и от деформаций ограждающих конструкций. Технологические осадки при прогнозировании влияния нового строительства на соседние здания в настоящее время в расчетах не учитываются.

**Цель исследования** заключается в оценке влияния устройства ограждающих шпунтовых стен методом статического вдавливания на дополнительную осадку зданий окружающей застройки; разработке методики расчета дополнительной осадки зданий от вдавливания шпунта.

**Задачи исследования:**

- определить силы взаимодействия между погружаемым статическим вдавливанием шпунтом и окружающим массивом грунта;
- разработать методику расчета возникающих при вдавливании шпунта напряжений в окружающем массиве грунта;
- оценить влияние всех возникающих при вдавливании шпунта сил на дополнительную осадку соседнего здания;
- разработать и изготовить испытательный комплекс, позволяющий моделировать погружение линейных элементов, разработать методику проведения эксперимента согласно критериям физического моделирования, провести сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами аналитических расчетов;
- выполнить серию поверочных расчетов по предлагаемой методике и сравнить полученные результаты с данными геодезического мониторинга, что позволит оценить достоверность предлагаемого метода расчета.

**Объект исследования** – устройство шпунтовых стен, погружаемых методом статического вдавливания в примыкании к существующим зданиям.

**Предмет исследования** – влияние процесса вдавливания шпунта на дополнительную осадку соседних зданий.

**Научная новизна исследования** заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Разработана аналитическая методика расчета осадки зданий, вызванной вдавливанием шпунта, позволяющая учесть различия в прочностных характеристиках каждого слоя грунта, а также увеличение давления на шпунтовую стенку с увеличением глубины заложения рассматриваемого слоя.

2. Разработана инженерная методика расчета дополнительной осадки зданий при вдавливании шпунта, даны рекомендации по применению представленной методики. На основе предложенной таблицы расчетных коэффициентов установлен характер распространения напряжений в окружающем массиве грунта от погружаемого корытообразного шпунта.

3. Выполнено точное определение распределения вертикальных напряжений на основе проведенных модельных экспериментов. Определен корреляционный коэффициент, позволяющий более точно определять распространение дополнительных напряжений в массиве грунта от погружаемого шпунта.

4. Обоснована возможность применения разработанной методики для расчета влияния вдавливания шпунта на дополнительную осадку соседних зданий. Проведен сравнительный анализ результатов расчетов, выполненных по предлагаемой методике, с данными геодезического мониторинга на реализованных в Санкт-Петербурге объектах, по результатам которого разница расчетных значений с данными геодезического мониторинга не превысила 30 процентов.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработанной методике расчета, позволяющей оценить изменение напряженного состояния грунтового массива, вызванного статическим вдавливанием шпунта.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в разработке принципов проектирования шпунтовых ограждений, выполненных методом статического вдавливания, при устройстве котлованов в условиях городской застройки. Предложенная методика расчета позволит определить величину и характер распространения напряжений от вдавливания шпунта для достоверного расчета дополнительной осадки, а также разработать комплекс мероприятий для снижения дополнительных технологических осадок соседних зданий при устройстве вблизи них котлована со шпунтовым ограждением, выполняемых методом статического вдавливания.

**Методология и методы исследования.** По результатам анализа данных литературных источников было получено аналитическое решение, позволяющее рассчитывать дополнительную осадку соседних зданий от вдавливания шпунта. Возможность применения полученного аналитического решения проверялась выполненными модельными экспериментами, по результатам которых был получен корреляционный коэффициент,

позволяющий более точно рассчитывать дополнительные напряжения в грунтовом массиве на расстояниях, превышающих 10 процентов от длины шпунта. Разработанная методика расчета была применена на двух реальных объектах, расположенных в центральной части Санкт-Петербурга и показала удовлетворительную сходимость с данными геодезического мониторинга.

**Положения, выносимые на защиту:**

- методика аналитического расчета технологической осадки зданий соседней застройки при устройстве ограждающих шпунтовых стен, погружаемых методом статического вдавливания;
- экспериментальные исследования определения напряжений в окружающем массиве грунта при вдавливании шпунта;
- результаты сравнительного анализа материалов аналитических расчетов, выполненных по разработанной методике, с данными геодезического мониторинга на реализованных объектах Санкт-Петербурга;

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения, а именно п. 4 «Разработка методов расчета, конструирования и устройства фундаментов на естественном основании, глубокого заложения и свайных фундаментов с учетом взаимодействия их с надфундаментными конструкциями, фундаментами близрасположенных зданий и сооружений и конструкциями подземных сооружений».

**Степень достоверности и апробация результатов.** Степень достоверности результатов исследований и выводов диссертационной работы подтверждаются применением основных положений и моделей механики грунтов, теории упругости, механики деформируемого тела; обеспечивается достаточным объемом данных геодезического мониторинга, выполненного на построенных строительных объектах в условиях слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов и плотной городской застройки Санкт-Петербурга.

Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы подтверждены апробацией на международных научно-практических конференциях: международной конференции посвященной 100-летию со дня рождения Б.И.Далматова «Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции» (10-12 ноября 2010, СПбГАСУ, Санкт-Петербург), 63-й международной научно-технической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (2010, СПбГАСУ, Санкт-Петербург), трех научно-технических конференциях по геотехнике, механике грунтов, основаниям и фундаментам, проведенных в СПбГАСУ в 2012-2014 гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, общим объемом 1,681 п.л., лично 1,463 п.л., в т. ч. 3 статьи опубликованы в научных журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК РФ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация изложена на 130 страницах печатного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения,

списка литературы, включающего 130 источников. В работе представлено 56 рисунков, 11 таблиц и 38 формул.

*Во введении* обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы практическая значимость работы, предмет и объект исследования, описаны методы исследования, практическая и теоретическая значимость работы, приведены сведения об апробации научных результатов, имеющихся публикациях и общей структуре работы.

*В первой главе* проанализированы различные методы устройства ограждающих стен котлованов, рассмотрены преимущества и недостатки каждого метода, обосновано применение метода статического вдавливания для устройства ограждающих шпунтовых стен в примыкании к существующим зданиям, сформулированы цель исследования и задачи.

*Во второй главе* выполнено аналитическое определение сил, действующих по боковой поверхности погружаемого шпунтового элемента; на основании решений теории упругости получена формула для расчета напряжений, вызванных силами, действующими по боковой поверхности погружаемого шпунта; разработаны табличные значения коэффициентов распределения напряжений для инженерного метода расчета и представлена графическая картина распределения напряжений от вдавливания шпунта; разработана методика расчета дополнительной осадки соседних зданий от вдавливания шпунта, сформулированы условия определения границы сжимаемой толщи; аналитически обосновано минимальное влияние сил, развивающихся на боковой поверхности погружаемого шпунта; разработана методика расчета давления, возникающего под лобовой поверхностью шпунта, и определено его влияния на общее напряженное состояние окружающего массива грунта.

*В третьей главе* представлены конструкция испытательного комплекса, методика проведения и результаты модельного эксперимента, критерии моделирования и конструкция испытательного комплекса. Выполнено сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами расчета по предложенной методике, предложен корреляционный коэффициент, позволяющий более точно оценить напряжения на расстояниях, превышающих 10 процентов от длины шпунта.

*В четвертой главе* выполнено практическое апробирование разработанной методики расчета на реализованных объектах в центральной части Санкт-Петербурга. Выполнено сопоставление рассчитанных по предлагаемой методике значений дополнительной осадки соседних зданий с данными геодезического мониторинга, которые показали удовлетворительную сходимость.

*В заключении* изложены основные итоги выполненного исследования.

## **II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**1. Разработана аналитическая методика расчета осадки зданий, вызванной вдавливанием шпунта, позволяющая учесть различия в прочностных характеристиках каждого слоя грунта, а также увеличение**

### давления на шпунтовую стенку с увеличением глубины заложения рассматриваемого слоя

Поскольку лобовая поверхность шпунта имеет пренебрежимо малую площадь в сравнении с боковой поверхностью, то ее влияние в дальнейших расчетах не учитывалось.

Вдавливание металлического шпунта, в первом приближении, можно характеризовать как разрезание грунта погружаемым элементом, и оно осуществляется в процессе его непрерывного сдвига относительно окружающего грунта.

На основании этого усилие, возникающее по боковой поверхности шпунта, принималось равным сопротивлению сдвигу прорезаемого слоя грунта и рассчитывалось по следующей формуле:

$$\tau_i = \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_{z,i} \cdot \xi_i \cdot \operatorname{tg}\varphi_{si} = \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_{z,i} \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_i}{2}\right) \cdot \operatorname{tg}\varphi_{si}, \quad (1)$$

где  $\tau_i$  – сопротивление сдвигу грунта вдоль боковой поверхности шпунта,  $\gamma_i$  – удельный вес рассматриваемого слоя грунта;  $\Delta\sigma_{z,i}$  – увеличение общего бытового давления грунта;  $\varphi_{si}$  – угол трения грунта в контактной зоне, равный  $(2/3) \cdot \varphi_i$ ;  $\varphi_i$  – угол внутреннего трения рассматриваемого слоя грунта;  $\xi_i$  – коэффициент активного давления грунта.

Согласно исследованиям, в области дорожного машиностроения, при разрезании грунт в контактной зоне испытывает пластические деформации с переходом рыхлосвязанной воды в свободное состояние. Данное обстоятельство приводит к снижению прочностных характеристик грунта в контактной зоне, а выделяющаяся вода выступает в роли смазки и значительно снижает липкость грунтов. С учетом указанных обстоятельств, в формуле (1) сцепление грунта не учитывалось, а угол внутреннего трения в контактной зоне принимался заниженным на  $1/3$ .

В расчетах по предложенной методике принимается величина сопротивления сдвигу грунта как максимальная и постоянная величина. Данное положение обосновано исследованиями Ф.К. Лапшина и понятием «сдвиговой осадки».

#### *Распределение напряжений в зоне погружения шпунта*

Решение задачи о распределении напряжений выполнялось в плоской постановке с помощью интегрирования решения Милана с исправлениями М.И. Горбунова-Посадова о распределении напряжений от силы, приложенной внутри линейно-деформируемого упругого полупространства. Расчетная схема представлена на рисунке 1.

Для определения вертикальных напряжений в точке  $M$ , выполнялось интегрирование по дискретному участку боковой поверхности погружаемого элемента  $dl=l_2-l_1$ . При этом, усилие сдвига на дискретном участке принималось равномерно распределенным.

В результате интегрирования получена формула (2) для расчета напряжений в точке  $M$  при разделении длины шпунта на дискретные участки,



позволяющая учитывать различия сдвиговых усилий грунта на каждом дискретном участке:

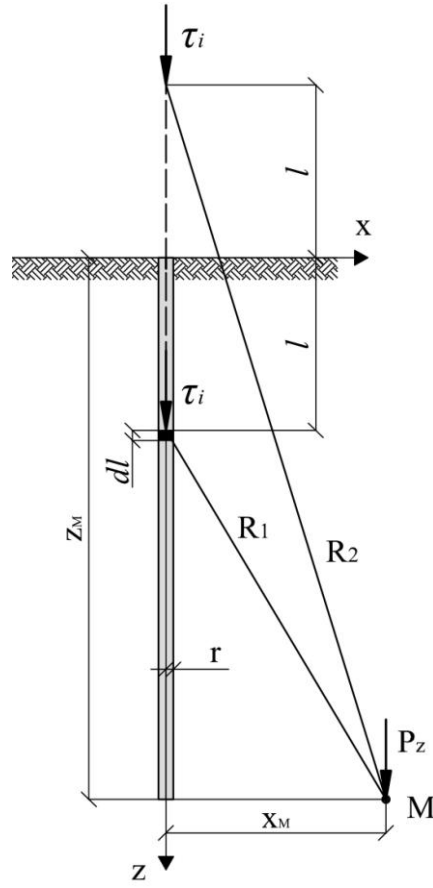


Рисунок 1 - Расчетная схема для определения напряжений при погружении шпунта

$$\sigma_{mp,i} = \tau_i \cdot \alpha_i^z = \tau_i \cdot \left[ \frac{m+1}{2 \cdot m \cdot \pi} \left( \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{R_{2(2)}^2 \cdot R_{1(1)}^2}{R_{1(2)}^2 \cdot R_{2(1)}^2} - z \cdot \frac{2 \cdot l_2 \cdot [x^2 \cdot R_{2(2)}^2 + (l_2 + z)^2 \cdot R_{1(2)}^2]}{R_{1(2)}^2 \cdot R_{2(2)}^4} - z^2 \left( \frac{1}{R_{2(2)}^2} - \frac{1}{R_{2(1)}^2} \right) - z \cdot \frac{2 \cdot l_1 \cdot [x^2 \cdot R_{2(1)}^2 + (l_1 + z)^2 \cdot R_{1(1)}^2]}{R_{1(1)}^2 \cdot R_{2(1)}^4} \right) + \frac{m-1}{4 \cdot m \cdot \pi} \left( \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{R_{2(2)}^2 \cdot R_{1(1)}^2}{R_{1(2)}^2 \cdot R_{2(1)}^2} - 2 \cdot z \left[ \frac{l_2 + z}{R_{2(2)}^2} - \frac{l_1 + z}{R_{2(1)}^2} \right] \right) \right], \quad (2)$$

где  $\tau_i$  – среднее распределенное сопротивление сдвигу грунта вдоль боковой поверхности шпунта на участке  $dl$ ;  $\alpha_i^z$  – коэффициент распространения напряжений;  $\sigma_{mp,i}$  – напряжение в  $i$ -ой точке от сил развивающихся по боковой поверхности шпунта;  $x, z$  – координаты  $i$ -ой точки в которой определяются напряжения;  $l_1$  и  $l_2$  – соответственно глубина кровли и подошвы рассматриваемого слоя;  $R_{1(1)}$ ,  $R_{1(2)}$ ,  $R_{2(1)}$ ,  $R_{2(2)}$  – радиус-векторы;  $m = (1-\mu)/\mu$ ,  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

$$R_{1(1)}^2 = (z - l_1)^2 + x^2,$$

$$R_{1(2)}^2 = (z + l_2)^2 + x^2,$$

$$R_{2(1)}^2 = (z - l_1)^2 + x^2,$$

$$R_{2(2)}^2 = (z + l_2)^2 + x^2.$$

**2. Разработана инженерная методика расчета дополнительной осадки зданий при вдавливании шпунта, даны рекомендации по применению представленной методики. На основе предложенной таблицы расчетных коэффициентов установлен характер распространения напряжений в окружающем массиве грунта от погружаемого корытообразного шпунта**

С принятым допущением, что распределенная по всей боковой поверхности шпунта нагрузка является равномерно распределённой, было выполнено интегрирование сразу по всей длине шпунта без деления на дискретные участки. По результатам проведенной работы была получена упрощенная формула для инженерного метода расчета:

$$\sigma_{mp,i} = \tau_{cp} \cdot \alpha_i^z = \tau_{cp} \cdot \left[ \frac{m+1}{2 \cdot m \cdot \pi} \left( \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{R_2^2}{R_1^2} - z \cdot \frac{2 \cdot L \cdot [x^2 \cdot R_2^2 + (L+z)^2 \cdot R_1^2] + z \cdot R_1^2 \cdot R_2^2}{R_1^2 \cdot R_2^4} + \frac{z^2}{z^2 + x^2} \right) + \frac{m-1}{4 \cdot m \cdot \pi} \left( \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{R_2^2}{R_1^2} - 2 \cdot z \cdot \frac{L+z}{R_2^2} + 2 \cdot \frac{z^2}{z^2 + x^2} \right) \right], \quad (3)$$

где  $\tau_{cp}$  – средняя величина равномерного сопротивления сдвигу грунтов вдоль боковой поверхности шпунта;  $l$  – длина шпунта;  $R_1$  и  $R_2$  – радиус-векторы.

$$R_1^2 = (z-l)^2 + x^2,$$

$$R_2^2 = (z+l)^2 + x^2.$$

По формуле (3) определены универсальные значения коэффициентов распределения напряжений, по которым построена эпюра распространения напряжений при  $\tau_{cp}=1$ , представленная на рисунке 2.

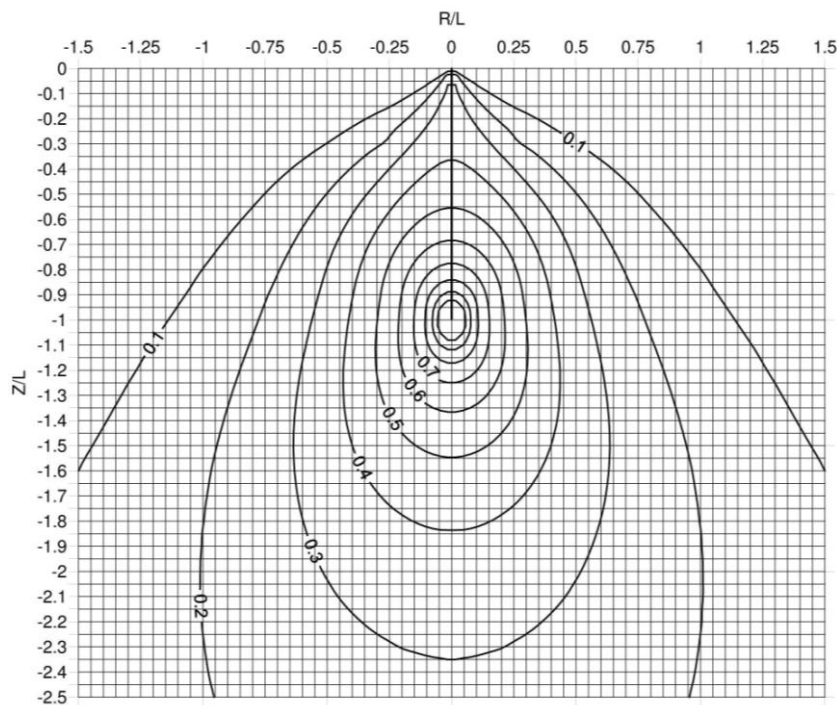


Рисунок 2 - Распределение напряжений в грунтовом массиве от действия равномерно распределенной нагрузки  $\tau_{cp}=1$  длиной  $L$ ,  $\mu=0,35$

Результаты расчетов распределения напряжений в грунтах с различными коэффициентами Пуассона на глубине соответствующей нижней грани погружаемого шпунта представлены на рисунке 3. Таким образом, доказано незначительное влияние изменения коэффициента Пуассона на расчет напряжений и, в дальнейшем, принята усредненная величина коэффициента Пуассона равная 0,35.

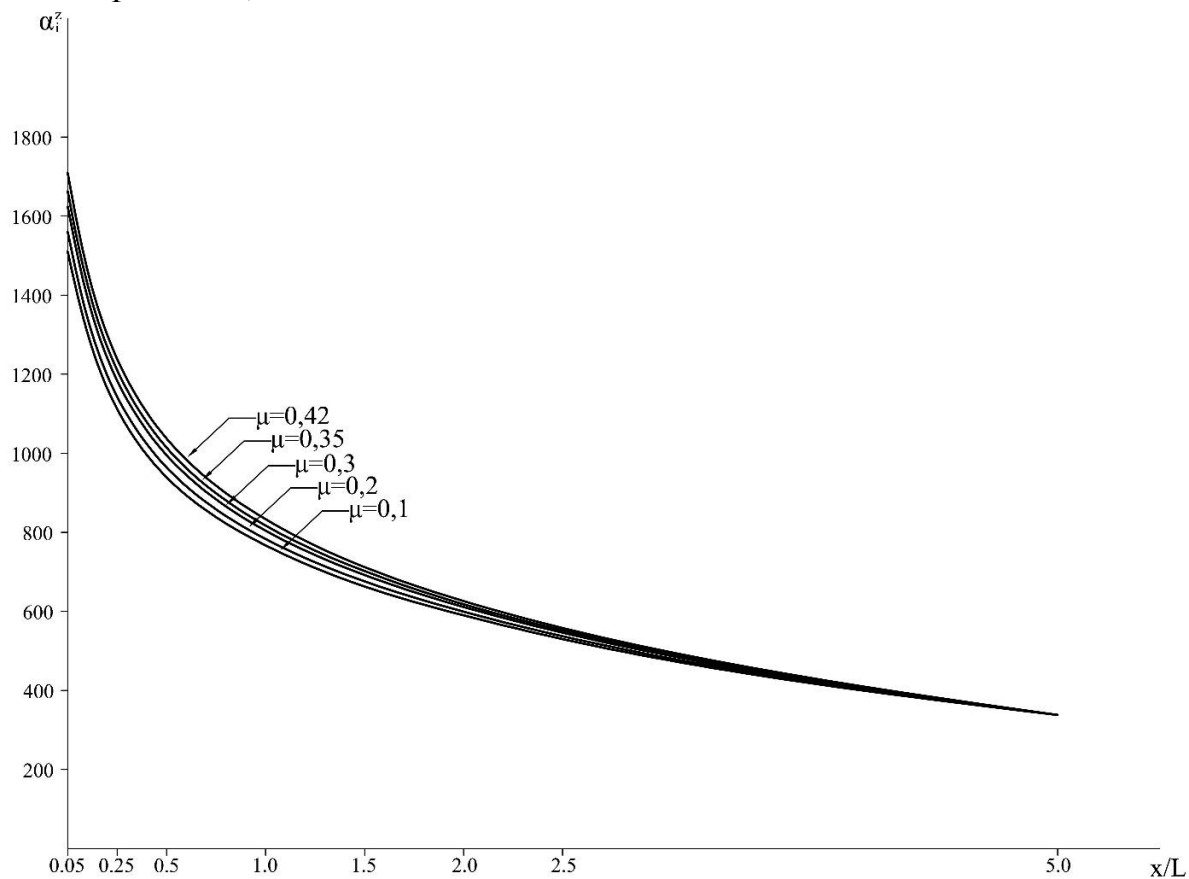


Рисунок 3 - Графики изменения коэффициентов  $\alpha_i^z$  при различных коэффициентах Пуассона

Результаты расчета напряжений, создаваемых дальней относительно существующего здания стороной шпунта, показали их пренебрежимо малое значение в сравнении с напряжениями, создаваемыми стороной шпунта, ближайшей к зданию. В дальнейших расчетах влияние дальней относительно существующего здания стороны шпунтовой стенки не учитывалось.

#### *Учет объемной составляющей шпунта*

Применяемые на практике шпунты могут быть различной формы и размеров в плане, что позволяет значительно увеличить момент инерции и жесткость шпунтовой стенки в сравнении с плоским элементом. Требование по обеспечению необходимой жесткости шпунтовой стенки обосновано обеспечением устойчивости грунтового массива за периметром котлована и сохранением окружающих зданий.

Влияние формы и размеров погружаемого шпунта на дополнительную осадку окружающих зданий будет проявляться в концентрации создаваемых боковой поверхностью шпунта напряжениях в центральной части шпунтового ряда.

Для оценки концентраций указанных напряжений была построена графическая модель шпунта типа Arcelor AZ28 длиной 3 м. На плане шпунтовой стенки были нанесены изолинии напряжений, создаваемых каждой гранью шпунта и определялись точки их пересечения. В программе *Surfer* для построения географического рельефа была получена общая графическая картина концентрации напряжений под лобовой поверхностью шпунтового ряда при  $\tau_{cp} = 1$ , представленная на рисунке 4.

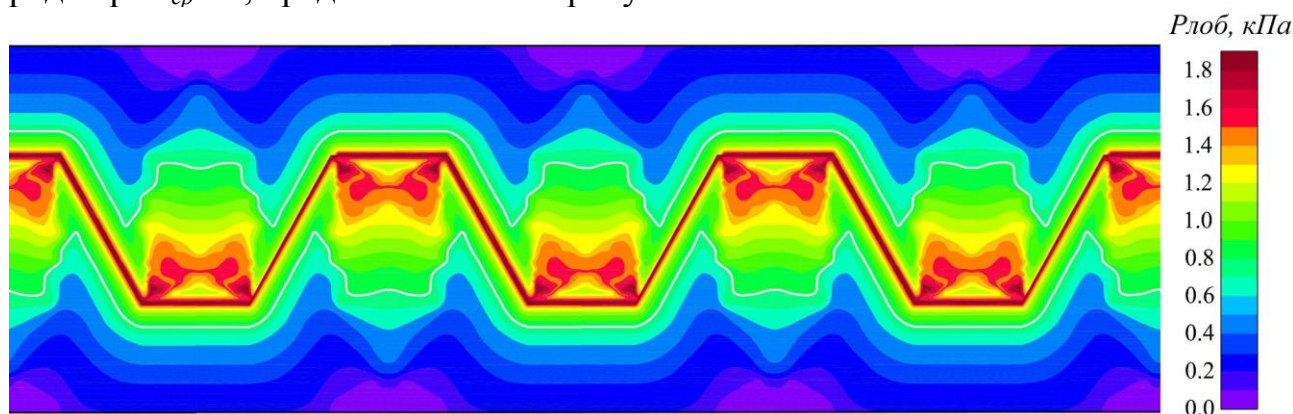


Рисунок 4 - Распределение напряжений под лобовой поверхностью погружаемого шпунта Arcelor AZ28

С учетом большого многообразия форм и размеров применяемых шпунтов, для учета концентрации напряжений было предложено принимать создаваемое под лобовой поверхностью давление равномерно распределенным и для трехметрового шпунта равным среднему распределенному сопротивлению сдвигу грунтов по боковой поверхности ( $\tau_{cp}$ ).

Основываясь на принятом допущении, была разработана методика расчета напряжений, создаваемых давлением под лобовой поверхностью шпунта. Давление под лобовой поверхностью предложено определять в зависимости от соотношения длины ( $L$ ) шпунта к ширине шпунтового ряда ( $b$ ) по формуле (4), для рассмотренного профиля Arcelor AZ 28 длиной 3 метра это соотношение равняется 7:

$$p_{лоб} = \frac{L}{7 \cdot b} \cdot \tau_{cp} = n \cdot \tau_{cp}, \quad (4)$$

где  $p_{лоб}$  – давление под лобовой поверхностью шпунта;  $n$  – коэффициент, отвечающий за концентрацию напряжений.

Дополнительное напряжение от давления под лобовой поверхностью, можно рассчитать методом угловых точек по СП 22.13330.2011.

**3. Выполнено точное определение распределения вертикальных напряжений на основе проведенных модельных экспериментов. Определен корреляционный коэффициент, позволяющий более точно определять распространение дополнительных напряжений в массиве грунта от погружаемого шпунта**

Проверка предложенной методики расчета напряжений, создаваемых погружаемым шпунтом, проведена с помощью модельных испытаний, в

которых моделировалось вдавливание шпунта и, с помощью месдоз давления, измерялись вертикальные напряжения в окружающем массиве грунта.

Для проведения модельных испытаний была сконструирована и изготовлена специальная испытательная машина с гидроприводом. Устройство испытательной машины представлено на рисунке 5. Шпунт моделировался плоским металлическим листом, а для проверки гипотезы о концентрации напряжений проводились эксперименты с объемной моделью шпунта Arcelor AZ 28.



Рисунок 5 - Общий вид испытательного комплекса

Месдозы располагались на глубинах 39 и 78 см, 4 рядами с расстоянием 8, 16, 24 и 32 см от погружаемой модели. Модель шпунта вдавливалась ступенями на глубину 80 см. Схема расположения месдоз представлена на рисунках 6,7.

Предварительно месдозы были подвергнуты тарировке в градуировочном баке.

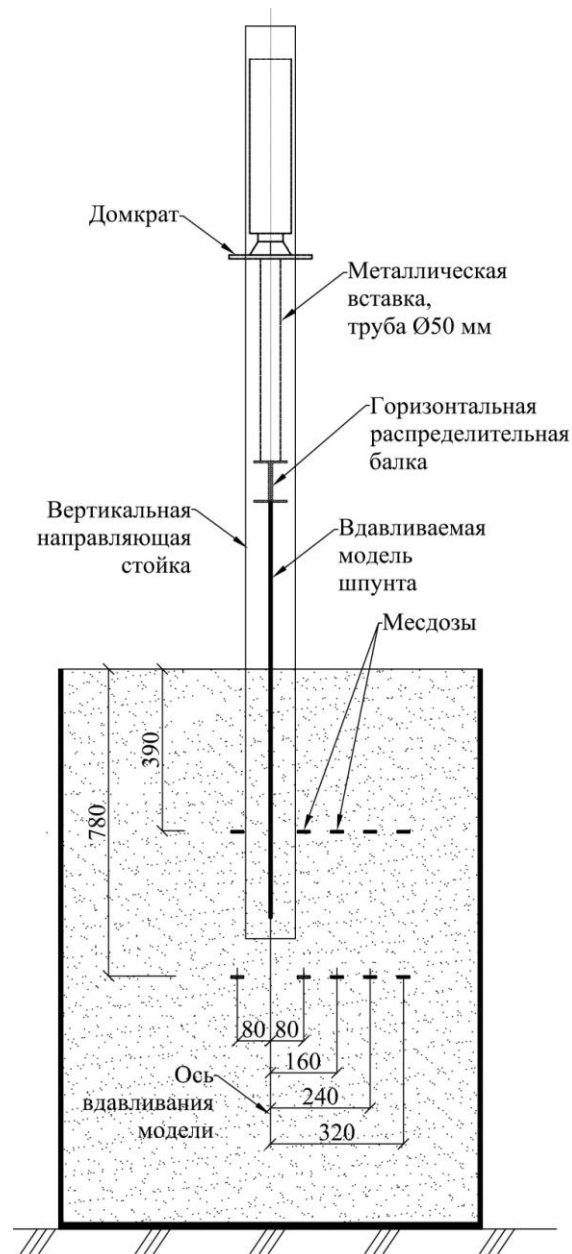


Рисунок 6 - Продольный разрез испытательной установки по оси шпунта. Схема расположения месдоз

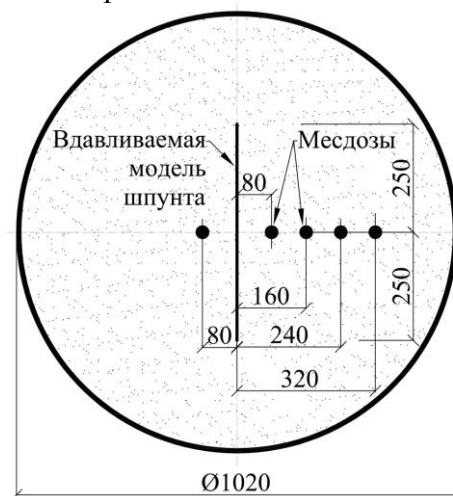


Рисунок 7 - Поперечный разрез испытательной установки по оси расположения месдоз. Схема расположения месдоз

Обобщенные результаты измерений вертикальных напряжений представлены на рисунке 8. Для наглядности, на графиках дополнительно представлены напряжения, полученные по результатам расчетов по предлагаемой методике.

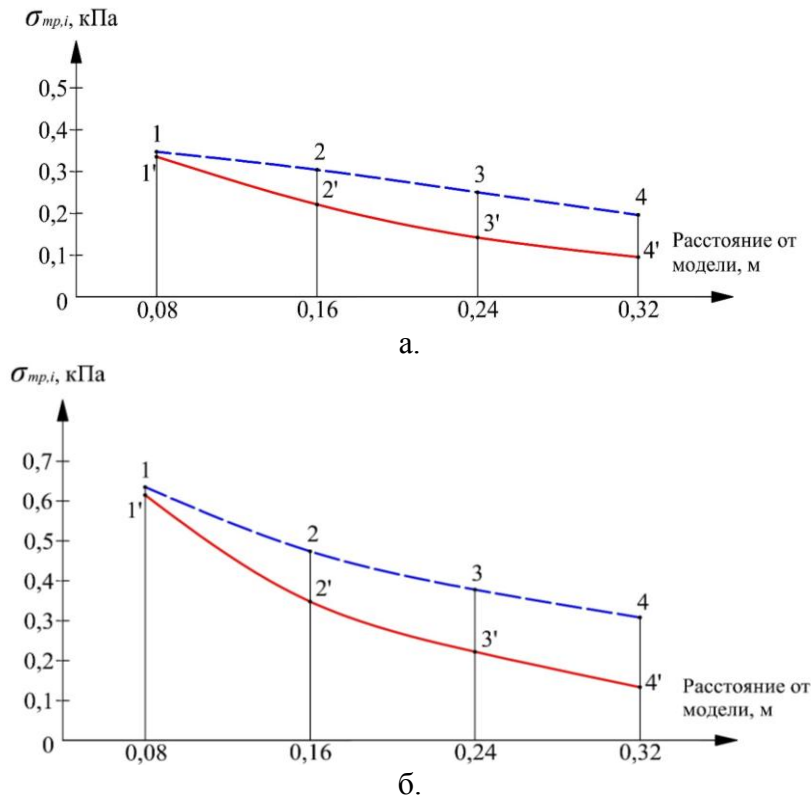


Рисунок 8 - Графики распределения экспериментальных и расчетных вертикальных напряжений в зависимости от расстояния от поверхности модели шпунта.

а - на глубине 0,39 м, б – на глубине 0,78 м.

1,2,3,4 – расчетные значения; 1',2', 3', 4' – экспериментальные значения

Из сопоставления полученных результатов видно, что разработанная инженерная методика расчета напряжений дает хорошую сходимость при определении напряжений на расстоянии, не превышающем 10 процентов от длины шпунта, но с удалением от погружаемого шпунта погрешность расчетов возрастает.

Для более корректного определения напряжений на расстояниях от 10 до 100 процентов длины шпунта от его боковой поверхности, на основании сопоставления экспериментальных и расчетных данных, был определен поправочный коэффициент для оценки напряжений в зоне влияния погружения, рассчитываемый по формуле (5):

$$k = 1.8 \cdot \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{x}{L}} \right), \quad (5)$$

где  $k$  – поправочный коэффициент,  $x$  – расстояние от шпунта до центра фундамента здания,  $L$  – длина шпунта.

Результаты эксперимента с объемной моделью шпунта показали концентрацию напряжений в центре шпунтового ряда.

*Расчет дополнительной осадки* соседнего здания от вдавливания шпунта предложено производить известным методом послойного суммирования:

$$S_{\text{дон}} = \beta \cdot k \cdot \sum \frac{\sigma_{\text{дон},i} \cdot h_i}{E_i}; \quad (6)$$

где  $\beta$  – коэффициент, зависящий от коэффициента Пуассона, принимаемый 0,8;  $\sigma_{\text{дон},i}$  – среднее дополнительное напряжение в рассматриваемом слое грунта ( $\sigma_{\text{тр},i}$  или  $\sigma_{\text{лоб},i}$ );  $h_i$  – мощность рассматриваемого слоя грунта;  $E_i$  – модуль деформации рассматриваемого слоя;  $k$  – поправочный коэффициент, рассчитываемый по формуле (5).

Так как поправочный коэффициент ( $k$ ) не зависит от глубины расположения точки, в которой определяются вертикальные напряжения, то его, возможно, вынести за скобки при суммировании напряжений.

Граница сжимаемой толщи для предлагаемой методики расчета определяется исходя из условия (7) со следующими дополнениями:

- 1) Граница сжимаемой толщи находится ниже отметки погружения шпунта.
- 2) Во всех слоях грунта, залегающих ниже границы сжимаемой толщи, также должно выполняться условие (7), в противном случае глубина сжимаемой толщи увеличивается.
- 3) Расчет осадки производится по деформациям всех слоев грунта сжимаемой толщи вне зависимости от выполнения условия (7).

$$\frac{\sigma_{\text{дон}}}{E} \leq 3 \cdot 10^{-4}. \quad (7)$$

**4. Обоснована возможность применения разработанной методики для расчета влияния вдавливания шпунта на дополнительную осадку соседних зданий. Проведен сравнительный анализ результатов расчетов, выполненных по предлагаемой методике, с данными геодезического мониторинга на реализованных в Санкт-Петербурге объектах, по результатам которого разница расчетных значений с данными геодезического мониторинга не превысила 30 процентов**

Разработанная методика расчета технологической осадки была применена на двух реализованных объектах центральной части Санкт-Петербурга. Строительство выбранных объектов производилось в условиях уплотненной застройки. Окружающие котлован здания практически не отличались по конструктивным параметрам, различием для выбранных объектов являлись инженерно-геологические условия площадок строительства.

*В качестве первого объекта* рассмотрено строительство жилого дома на Васильевском острове Санкт-Петербурга, инженерно-геологические условия которого до глубины 18-21 м характеризуются преимущественно песчаными грунтами подстилаемых слабыми водонасыщенными грунтами большой мощности. Данное геологическое строение является наиболее неблагоприятным, так как большая мощность песчаных грунтов обеспечивает



высокий угол трения между шпунтом и грунтом, что вызывает наибольшие силы трения по боковой поверхности шпунта. Мощность подстилающих слабых грунтов, под воздействием развивающихся по боковой поверхности погружаемого шпунта сил, провоцирует дополнительно осадку существующих зданий.

На основании разработанной методики были рассчитаны дополнительные напряжения, вызванные боковой поверхностью погружаемого шпунта, которые совместно с напряжениями от собственного веса здания представлены на рисунке 9.

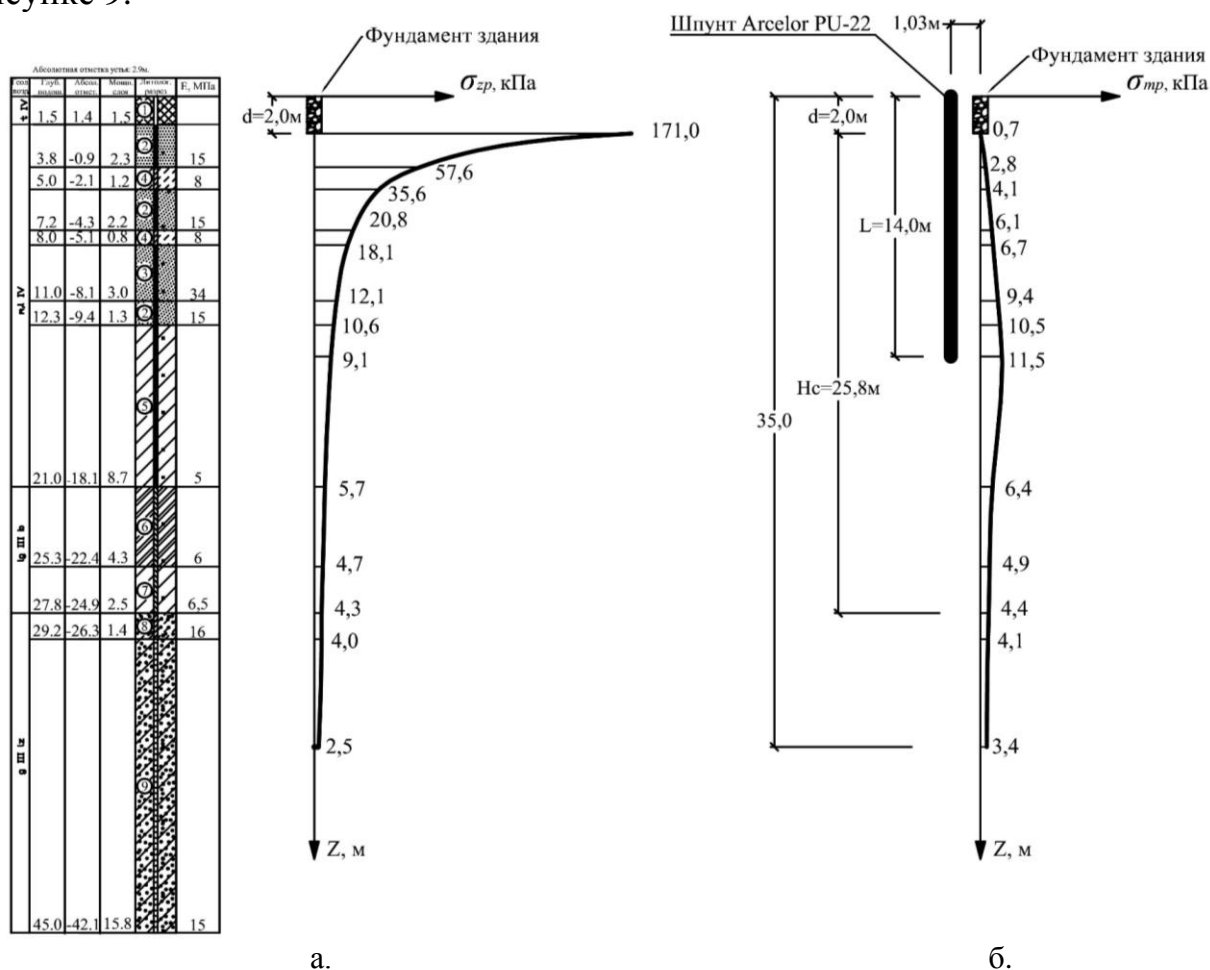


Рисунок 9 - Эпюры напряжений  $\sigma_z$ : а – эпюра напряжений от веса здания, б – эпюра дополнительных напряжений от вдавливания шпунта

По результатам расчета напряжения, вызванные давлением под лобовой поверхностью шпунта, имели значительно меньшие величины, чем напряжения, создаваемые усилиями вдоль боковой поверхности погружаемого шпунта, однако, они увеличили итоговую дополнительную осадку здания до 20 процентов. Данное обстоятельство объясняется большой сжимаемостью грунтов в зоне приложения давления. Расчетные напряжения, создаваемые давлением под лобовой поверхностью погружаемого шпунта, представлены на рисунке 10.

Возможность применения поправочного коэффициента  $k$  была исследована расчетом более удаленного от места погружения шпунта здания. Алгоритм расчета оставался прежним, единственным отличием являлось

занижение расчетных значений дополнительных напряжений на величину поправочного коэффициента  $k$ , который был разработан на основании результатов проведенных модельных экспериментов и рассчитывался по формуле (5).

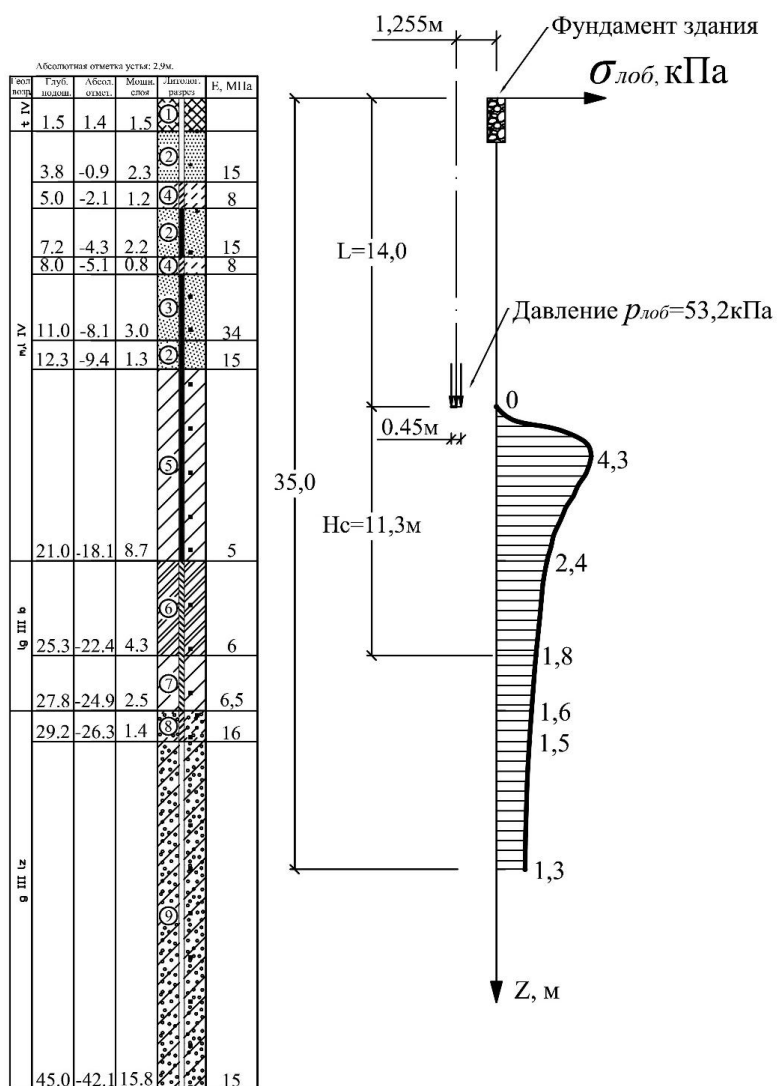


Рисунок 10 - Эпюра напряжений, вызванных давлением  $p_{лоб}$

В качестве второго объекта рассмотрен объект в Центральном районе Санкт-Петербурга с примыкающим к площадке строительства существующим четырехэтажным кирпичным зданием. В верхней части геологического разреза, под техногенными грунтами, залегают пылеватые пески мощностью 3,5м, подстилаемые 10-метровой толщей слабых озерно-ледниковых отложений, представленных суглинками текучей и текучепластичной консистенции, а также пластичными супесями. С глубины 16,5 метров геологический разрез представлен надежными ледниковыми отложениями, состоящими из тугопластичных суглинков, а также супесей пластичной и твердой консистенции, которые подстилаются твердыми протерозойскими глинами. Уровень грунтовых вод на площадке строительства зафиксирован на глубине 2,0 м.

Основным отличием от площадки строительства на Васильевском острове являлось залегание сильносжимаемых грунтов в верхней части геологического разреза, которые прорезались устраиваемой шпунтовой стенкой, и малосжимаемых грунтов ниже лобовой поверхности шпунта. Таким образом, основные деформации соседних зданий происходили за счет осадки грунтов, прорезаемых шпунтом. При таком варианте геологического строения участка большое значение приобретает точность определения напряжений в верхних слоях грунтов основания.

Результаты расчета дополнительных напряжений, создаваемых действующими боковой поверхности погружаемого шпунта силами, на данном объекте представлен на рисунке 11 по дискретным участкам ( $\tau_i$ ) и по усредненному сопротивлению сдвигу ( $\tau_{cp}$ ).

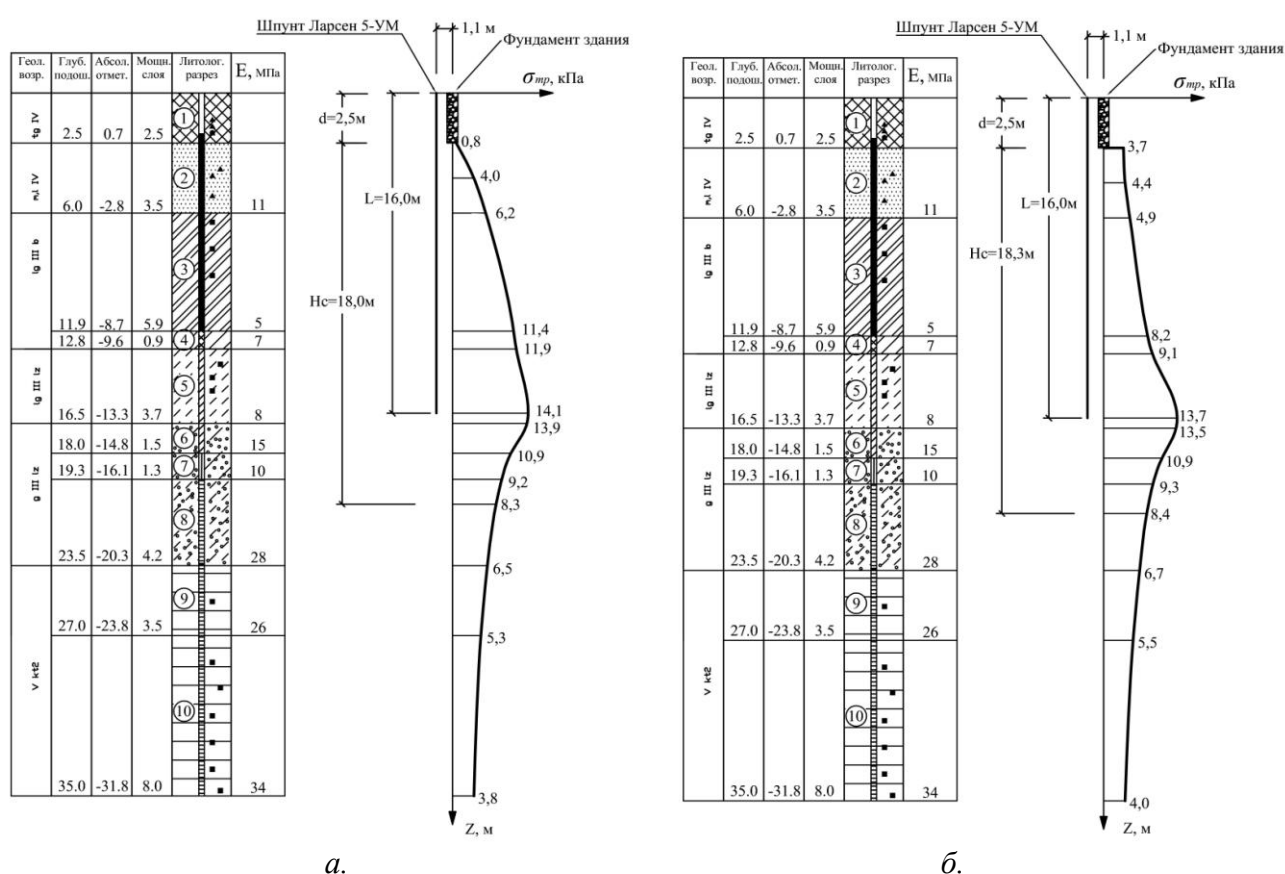


Рисунок 11 - Напряжения от создаваемых усилий по боковой поверхности погружаемого шпунта при расчете по дискретным участкам (а) и по усредненной силе трения (б)

Анализ полученных результатов показал, что инженерная методика расчета по усредненным значениям сдвиговых усилий оказывает наибольшее влияние на грунты, расположенные выше глубины погружения шпунта. Данное обстоятельство объясняется тем, что в указанной зоне величина и место приложения нагрузки имеет наибольшее значение, ниже лобовой поверхности шпунта характер приложения нагрузки имеет менее важную роль.

Поскольку в рассматриваемом случае сильносжимаемые грунты залегали в верхней части грунтового массива, рассчитанная по упрощенному методу осадка здания оказалась заниженной на 19 процентов в сравнении с расчетом

по дискретным участкам, что показало возможность применения разработанной инженерной методики расчета для прогноза дополнительной технологической осадки соседних зданий. На объекте №1, в верхней части геологического разреза залежали относительно малосжимаемые грунты и различия в определении напряжений практически не сказалось на расчетной дополнительной осадке соседних зданий.

Результаты сопоставления рассчитанных по предлагаемой методике дополнительных осадок с результатами геодезического мониторинга представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Сопоставление результатов расчета с данными мониторинга

№ объекта	Этажность	Расстояние, м	Расчетная осадка, мм	Осадка при расчете по $\tau_{ср}$ , мм	Средняя осадка по результатам геодезического мониторинга, м
Объект №1	4 этажа	0,63	25,2	25,1	25,0-31,0
Объект №1а	2 этажа	3,1	9,3	9,7	11,0
Объект №2	4 этажа	0,60	22,0	18,1	20,2-24,0

### III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам работы над диссертацией могут быть сделаны следующие выводы:

1. На основе многочисленных геодезических наблюдений и мониторинга строящихся и соседних с ними зданий установлено, что вдавливание шпунта является наиболее щадящей технологией его погружения в условиях уплотнительной застройки, однако дополнительная технологическая осадка соседних зданий при определенных инженерно-геологических условиях (песчаные грунты, подстилаемые слабыми пылевато-глинистыми грунтами) может достигать 2-3 см;
2. На основе аналитических решений теории упругости и лабораторных модельных экспериментов, установлен характер распространения напряжений в окружающем массиве грунта от вдавливания шпунта и разработана таблица расчетных коэффициентов для определения распределения напряжений в массиве грунта;
3. Спроектирован и изготовлен испытательный комплекс, позволяющий моделировать погружение линейных элементов. Разработана методика проведения эксперимента согласно критериям физического моделирования, позволившая оценить вертикальные напряжения в различных точках окружающего массива грунта при вдавливании шпунта;
4. На основании полученных экспериментальных данных и их сравнения с результатами аналитических расчетов определен поправочный коэффициент для формулы расчета осадки, позволяющий более точно определять

дополнительные осадки зданий, удаленных на расстояние, превышающих 10 процентов от длины шпунта;

5. На основе аналитических решений и лабораторных модельных экспериментов предложена инженерная методика расчета дополнительной осадки зданий, вызванной вдавливанием стального шпунта около них;

6. Выполнено сопоставление результатов определения значений вертикальных напряжений полученных на основе модельных экспериментов при статическом погружении стального шпунта с результатами аналитических расчетов, показавшее сходимость в пределах 4 %;

7. Выполнены расчеты по предложенной инженерной методике дополнительных осадок двух реальных зданий, возведенных в условиях слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов и плотной городской застройки Санкт-Петербурга, которые сопоставлены с результатами геодезического мониторинга их осадок. Результаты сопоставления показали хорошую сходимость данных натуральных наблюдений реальных объектов с расчетом дополнительных технологических осадок по разработанной инженерной методике, разница расчетных значений с данными геодезического мониторинга не превышает 30 процентов.

#### **IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Гурский, А.В. Аналитическое определение напряжений в грунтовом массиве, вызванных статическим погружением шпунта как плоского элемента [Текст] / **Гурский А.В.** // Вестник гражданских инженеров. – 2014. - № 6 (47). с. 109-116. (0,437 п.л.)

2. Гурский, А.В. Расчет дополнительной технологической осадки от вдавливания стального шпунта [Текст] / **Гурский А.В.** // Вестник гражданских инженеров. – 2016. - № 2 (55). с. 73-80. (0,437 п. л.)

3. Мангушев, Р.А. Оценка влияния вдавливания шпунта на дополнительные осадки соседних зданий [Текст] / Мангушев Р.А., **Гурский А.В.** // Геотехника. – 2016. - № 2. с. 30-37. (0,219 п.л./0,437 п.л.)

##### **В других изданиях:**

1. Гурский, А.В., Преимущества и недостатки устройства ограждающих шпунтовых стен методом статического вдавливания [Текст] / **Гурский А.В.** // Актуальные проблемы современного строительства: 63-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых / Санкт-Петербургский госуд. архит-строит. ун-т. – В 3 ч. Ч. II. – СПб., 2010. – С. 6-8. (0,12 п. л.)

2. Гурский, А.В., Методика проведения и некоторые результаты лоткового эксперимента по определению влияния устройства ограждающих шпунтовых стен на напряженное состояние основания [Текст] / **Гурский А.В.** // Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции: сборник трудов научно-технической конференции / Санкт-Петербургский госуд. архит-строит. ун-т. – СПб., 2010. – С. 300-304. (0,25 п. л.)