

Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

*На правах рукописи*



УДК 624.94:624.15

**Писаренко Анастасия Валерьевна**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕСКАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ С  
ОСНОВАНИЕМ ИЗ ЧАСТИЧНО ЗАКРЕПЛЕННОГО  
ПРОСАДОЧНОГО ГРУНТА**

05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения (технические  
науки)

**Диссертация**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Яркин Виктор Владимирович,  
кандидат технических наук, доцент

Идентичность всех экземпляров диссертации **заявляю**  
Ученый секретарь  
специализированного диссертационного совета ДОНУРС 02

*Я.В. Назим*



Макеевка – 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ТЕМЫ</b>   |           |
| <b>ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....</b>  | <b>18</b> |
| 1.1. Особенности просадочных грунтов.....   | 18        |
| 1.2. Особенности распространения воды в просадочных грунтах.....                                  | 21        |
| 1.3. Моделирование просадочных деформаций в системе «здание – фундамент – просадочный грунт»..... | 25        |
| 1.3.1. Деформации земной поверхности при просадках от собственного веса грунта.....               | 28        |
| 1.3.2. Деформации просадочного основания от действия внешней нагрузки.....                        | 32        |
| 1.4. Расчет зданий и сооружений, взаимодействующих с просадочным основанием.....                  | 32        |
| 1.4.1. Моделирование просадочных деформаций.....  | 32        |
| 1.4.2. Моделирование грунтового основания.....  | 35        |
| 1.4.3. Моделирование зданий и сооружений.....   | 37        |
| 1.5. Анализ существующих методов увеличения жесткости основания                                   | 38        |
| 1.6. Выводы.....  | 45        |
| <b>РАЗДЕЛ 2. ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ</b>   |           |
| <b>ПРОСАДОЧНОГО ГРУНТА, ЗАКРЕПЛЕННОГО РАСТВОРОМ С</b>   |           |
| <b>АНИОНОАКТИВНЫМИ ПОЛИАКРИЛАМИДНЫМИ</b>  |           |
| <b>ДОБАВКАМИ.....</b>   | <b>46</b> |
| 2.1. Математическая модель просадочного грунта.....   | 46        |
| 2.2. Исследование и подбор рациональной рецептуры инъекционного раствора.....                     | 51        |
| 2.3. Оценка характеристик грунта, закрепленного различными инъекционными растворами.....          | 62        |
| 2.3.1. Методики экспериментальных исследований.....   | 62        |

|  |            |
|--|------------|
| 2.3.1.1. Экспериментальные стенды, приборы и оборудование.....   | 62         |
| 2.3.1.2. План экспериментальных исследований.....  | 63         |
| 2.3.2. Характеристики зон локального закрепления грунта.....   | 65         |
| 2.4. Деформационные характеристики закрепленного просадочного грунта.....  | 69         |
| 2.5. Механизм формирования упрочненной зоны просадочного грунта раствором с анионоактивными полиакриламидными добавками.....   | 80         |
| 2.6. Коэффициент жесткости основания с частичным закреплением просадочного грунта в плане и по глубине.....  | 84         |
| 2.7. Выводы.....   | 87         |
| <b>РАЗДЕЛ 3. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНО ЗАКРЕПЛЕННОГО ОСНОВАНИЯ, СЛОЖЕННОГО ПРОСАДОЧНЫМ ГРУНТОМ.....</b>   | <b>88</b>  |
| 3.1. Методика численного моделирования системы «здание – фундамент – просадочное основание» при частичном закреплении основания.....                                 | 88         |
| 3.1.1. Основные положения методики.....  | 88         |
| 3.1.2. Расчетные схемы бескаркасных зданий на просадочных грунтах I типа.....  | 90         |
| 3.1.3. Порядок выполнения расчета здания, взаимодействующего с частично закрепленным просадочным основанием.....   | 91         |
| 3.2. Напряженно-деформированное состояние конструкций зданий и сооружений на просадочных грунтах без закрепления и с частичным закреплением просадочного грунта..... | 92         |
| 3.3. Выводы.....   | 118        |
| <b>РАЗДЕЛ 4. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НДС БЕСКАРКАСНОГО ЗДАНИЯ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С ЧАСТИЧНО ЗАКРЕПЛЕННЫМ ПРОСАДОЧНЫМ ОСНОВАНИЕМ.....</b>                             | <b>121</b> |

|   |            |
|---|------------|
| 4.1. Краткая конструктивная характеристика объекта.....   | 121        |
| 4.2. Инженерно-геологические условия объекта.....   | 124        |
| 4.3. Результаты натурного обследования.....   | 129        |
| 4.4. Обоснование необходимости закрепления основания.....   | 131        |
| 4.5. Предложения по частичному закреплению просадочного грунта  | 132        |
| 4.6. Результаты численных исследований при частичном закреплении просадочного грунта по глубине.....                              | 135        |
| 4.7. Результаты численных исследований при частичном закреплении просадочного грунта в плане.....                                 | 139        |
| 4.8. Технико-экономическое сравнение вариантов.....   | 142        |
| 4.9. Выводы.....  | 145        |
| <b>РАЗДЕЛ 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЧАСТИЧНОМУ<br/>ЗАКРЕПЛЕНИЮ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ,<br/>СЛОЖЕННЫХ ПРОСАДОЧНЫМ ГРУНТОМ.....</b> | <b>146</b> |
| 5.1. Рецептура состава химического закрепляющего раствора   | 146        |
| 5.2. Оборудование, необходимое для проведения процедуры закрепления просадочного грунта.....                                      | 148        |
| 5.3. Технологические схемы подачи раствора при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений.....                              | 152        |
| 5.4. Техника безопасности при выполнении процедуры закрепления просадочного грунта.....   | 160        |
| 5.5. Контроль качества производства работ.....  | 163        |
| 5.6. Выводы.....  | 164        |
| <b>ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....</b>  | <b>165</b> |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>  | <b>167</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ И СПРАВКИ ВНЕДРЕНИЯ<br/>РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....</b>   | <b>185</b> |

|  |     |
|--|-----|
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ТАБЛИЦА ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ.....</b>                        | 189 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. ТАБЛИЦА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ПРИБОРЕ КПр-1.....</b>                    | 201 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ DESCON.....</b>                                 | 204 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ПК ЛИРА-САПР 2013.....</b>             | 205 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е. ТАБЛИЦА ДАННЫХ ПО РАСЧЕТНЫМ СЕЧЕНИЯМ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ПК ЛИРА-САПР 2013.....</b> | 213 |

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы

Просадочные грунты широко распространены на территории как нашего региона, так и соседних государств. Просадочные грунты занимают около 15% территории стран СНГ. Особенно широко они распространены на Украине (более 70%), Северном Кавказе, в Крыму, Молдавии, Центральной нечерноземной зоне России, Поволжье и Казахстане.

Строительство и эксплуатация зданий на просадочных грунтах усложнены вследствие возможного проявления в период эксплуатации значительных неравномерных деформаций основания, которые могут привести к аварийным ситуациям либо потере эксплуатационной пригодности здания. Поэтому строительство на просадочных грунтах, как правило, требует дополнительных затрат, направленных либо на предотвращение, либо на ликвидацию последствий негативных воздействий на здание от просадки грунта. Для предотвращения повреждений конструкций и обеспечения нормальной эксплуатации зданий и сооружений в этих условиях применяются различные мероприятия, стоимость которых может составлять свыше 15% от общей стоимости объекта.

Просадочные грунты характеризуются, в частности, невысокой несущей способностью, повышенной сжимаемостью и ухудшением механических свойств при увлажнении. Просадочные деформации лесовых грунтов, возникающие при природном или техногенном замачивании (утечке воды из оросительных каналов, водохранилищ, водонесущих коммуникаций, при интенсивных ливневых дождях, наводнениях и т.д.) приводят, как правило, к неравномерным деформациям основания фундаментов, что в свою очередь становится причиной возникновения дополнительных усилий и деформаций в надземных конструкциях. Проектирование зданий и сооружений без учета неустранимых просадочных деформаций основания может привести к возникновению в процессе эксплуатации недопустимых повреждений, влияющих на эксплуатационную пригодность как отдельных конструкций, так и зданий в целом.

Важность совершенствования теории проектирования, возведения и эксплуатации зданий и сооружений на просадочных грунтах определяется:

- широким распространением просадочных грунтов, причем, как правило, в районах наиболее интенсивного строительства;
- неизбежным повышением стоимости строительства при учете просадочных деформаций;
- возникающими иногда недопустимыми деформациями и повреждениями в конструкциях зданий и сооружений при недостаточно полном учете просадочных деформаций, которые в свою очередь ведут к увеличению затрат на восстановительные и ремонтные работы.

При проектировании и строительстве зданий и сооружений на просадочных грунтах существуют две основные тенденции:

– устранение или минимизация всех негативных воздействий на здание от просадочных деформаций основания путем уплотнения, закрепления основания или применения фундаментов, исключающих само появление этого воздействия на здание (фундаменты глубокого заложения и т.д.). В этом случае здание эксплуатируется в «тепличных» условиях, ничем не отличающихся от обычных инженерно-геологических условий. При этом несущие конструкции зданий, как правило, имеют неиспользуемый значительный потенциал прочности и жесткости, что экономически нецелесообразно;

– максимально эффективное использование жесткости и прочности основных несущих элементов здания путём снижения вследствие этого затрат на устранение негативных воздействий на здание от неравномерных деформаций основания, вызванных просадками грунта. В этом случае здание должно быть способным воспринять возникающие в нем дополнительные усилия без существенных повреждений, снижающих его эксплуатационные характеристики, а совместные перемещения и деформации системы «основание – фундамент – сооружение» не должны превышать предельно допустимые значения.

Критерием для выбора должен быть минимум приведенных затрат на проектирование, строительство и капитальные ремонты здания за весь период

эксплуатации, и в связи с этим второе направление представляется более перспективным.

Инъекционное закрепление грунтов является наиболее эффективным технологическим методом усиления оснований зданий и сооружений. При закреплении введенные в грунт различные реагенты начинают твердеть, образуя прочные структурные связи между частицами грунта, тем самым обеспечивая увеличение прочности, снижение сжимаемости грунтов, а также уменьшение их водопроницаемости и чувствительности к изменению внешней среды.

В строительстве широко распространены методы инъекционного закрепления грунта. В условиях просадочных грунтов применение именно таких методов позволяет осуществлять мероприятия по увеличению жесткости грунтового массива и устраниению просадочности как на глубину всей просадочной толщи, так и в пределах определенных зон просадки. Наибольшую эффективность инъекционные методы приобретают при закреплении просадочных грунтов на уже застроенной территории, так как различные методы поверхностного и глубинного уплотнения в этих условиях, как правило, не применимы.

Выбор типа инъекционного раствора определяется конкретными грунтовыми условиями и задачами, стоящими перед инъекционными работами. Это требует грамотного подбора состава действующих веществ. За рубежом такие вопросы периодически освещаются в научных трудах по материалам конференций.

Для просадочных грунтов наибольшее распространение получило инъекционное закрепление при помощи водного раствора силиката натрия по однорастворной или двухрастворной технологии. Применение традиционной рецептуры закрепляющего раствора обеспечивает высокие прочностные и деформационные характеристики закрепленного грунта, которые зачастую даже превышают значения, достаточные для обеспечения нормальных условий эксплуатации здания. При этом проникающая способность данного раствора относительно невелика и в ряде случаев при низком коэффициенте фильтрации грунта требует дополнительного применения электроосмоса. В связи с этим актуальным вопросом является разработка рецептуры закрепляющего раствора,

обеспечивающего большую проникающую способность даже за счет некоторого снижения прочностных и деформационных характеристик раствора.

Стоит отметить, что сравнительно высокая стоимость и дефицитность химических реагентов, зависимость инъекционных растворов от коэффициента фильтрации « $k_f$ », степени водонасыщенности « $S_r$ », а также от минералогического состава закрепляемого грунта не всегда позволяет широко применять их как основные строительные мероприятия.

Поэтому использование местных грунтов, закрепленных вяжущими, по эффективным технологиям с применением более дешевых и распространенных реагентов имеет важное практическое значение. Актуальным вопросом является снижение расхода закрепляющего раствора за счет разработки схем частичного закрепления основания, сложенного из просадочных грунтов не только по глубине, но и в плане, применение которых влечет за собой снижение усилий в конструкциях до допустимого уровня, который обеспечивается применением рациональных конструктивных мероприятий.

К достоинствам данного метода относят: возможность его применения при реконструкции в стесненных условиях; а также возможности полной механизации работ; снижение объема земляных работ и расхода строительных материалов; сокращение стоимости работ по частичному закреплению грунта в сравнении с полным закреплением.

### **Степень разработанности темы исследования**

Работа основана на результатах теоретических и экспериментальных исследований М. Ю. Абелева [1], М. Н. Гольдштейна [2], А. А. Григорян [3], С. Н. Клепикова [4], В. И. Крутова [5], И. М. Литвинова [6], Г. М. Ломизе [7], А. А. Мустафаева [8], З. Г. Тер-Мартиросяна [9], Н. А. Цытовича [10], Я. Д. Гильмана [11], В. А. Межеровского [12], А. И. Маркова [13], В. Р. Мустакимова [14], П. П. Шагина [15], С. Г. Кушнера [16], П. А. Коновалова [17], Coduto Donald P. [18], Frank R. [19], Tomlinson M. J. [20] и других ученых, в работах которых рассмотрены вопросы усиления слабых грунтов.

Анализ источников показал, что, несмотря на положительный опыт широко распространенного сплошного инъекционного закрепления просадочного грунта в основании фундаментов, отдельные случаи реализации на практике частичного закрепления просадочного грунта не всегда достигали положительного результата из-за отсутствия методики расчета бескаркасных зданий с частично закрепленным основанием, которая бы позволила определить схему и процент частичного закрепления просадочного грунта, обеспечивающие снижение усилий (напряжений) в конструкциях здания до допустимого уровня.

Ярким примером является частичное закрепление силикатизацией просадочных грунтов в основании Одесского театра оперы и балета в 1955 – 1956 гг. Выполненные работы позволили существенно снизить деформации основания, однако реализация остаточных просадочных деформаций привела к необходимости повторного усиления фундаментов буроинъекционными сваями, которое было выполнено в начале 2000-х годов [17].

**Целью исследования** является установление влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС) бескаркасных зданий частичного закрепления просадочного грунта основания в плане и по глубине с применением закрепляющего раствора повышенной проникающей способности.

**Для достижения указанной цели решены следующие задачи:**

- выполнен анализ существующих способов закрепления основания, сложенного просадочными грунтами, и обоснована возможность его частичного закрепления;
- разработан композиционный состав закрепляющего раствора с добавлением анионоактивного полиакриламида Ecofloc для получения химически закрепленных просадочных грунтов с прочностными и деформационными характеристиками, достаточными для устранения их просадочных свойств;
- выполнены экспериментальные исследования по подбору рациональной рецептуры инъекционного раствора для закрепления грунтов оснований, обеспечивающей его большую проникающую способность;

- выполнены экспериментальные исследования деформативности грунта, закрепленного раствором разработанного состава;
- предложена методика определения коэффициента жесткости основания при частичном закреплении просадочного грунта, учитывающая напряженное состояние грунтового массива не только по глубине, но и в плане;
- предложена методика выбора схемы частичного закрепления просадочного грунта и процентного содержания объема закрепленного грунта от объема грунта, воспринимающего внешние нагрузки, которые обеспечивают снижение усилий (напряжений) в конструкциях здания и неравномерных деформаций основания до допустимого уровня;
- выполнены численные исследования влияния частичного закрепления просадочного грунта основания в плане и по глубине на напряженно-деформированное состояние бескаркасного здания;
- проведена проверка результатов выполненных численных исследований путем сопоставления с данными натурных наблюдений на объекте, который эксплуатируется на просадочных грунтах, с целью подтверждения либо корректировки теоретических положений.

### **Научная новизна диссертационного исследования**

1. Усовершенствована методика расчета бескаркасных зданий по допустимым неравномерным деформациям основания, позволяющая предварительно установить рациональную схему частичного закрепления просадочного грунта с учетом инженерно-геологического строения массива грунта, действия внешних нагрузок и произвольных наиболее неблагоприятных схем увлажнения (замачивания) грунтового массива, а затем уточнить процентное содержание частичного закрепления по результатам совместного расчета системы «основание – фундамент – здание».

2. Впервые получены результаты экспериментальных исследований деформативности просадочных грунтов, закрепленных раствором повышенной проникающей способности.

3. Усовершенствована методика определения коэффициента жесткости основания при частичном закреплении просадочного грунта, учитывающая неоднородность и напряженное состояние грунтового массива не только по глубине, но и в плане.

**Объект исследования:** бескаркасные здания, эксплуатируемые на просадочных грунтах.

**Предмет исследования:** жесткостные характеристики основания, изменяемые в процессе эксплуатации здания на просадочных грунтах, и их влияние на НДС конструкций бескаркасных зданий.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке:

- рецептуры инъекционного раствора на основе активной кремниевой кислоты с применением анионоактивного полиакриламида Ecofloc, позволяющего увеличить радиус закрепления грунта и таким образом снизить количество точек инъекций;
- метода частичного закрепления просадочного грунта, обеспечивающего снижение усилий в конструкциях здания и неравномерных деформаций основания до допустимого уровня;
- рекомендаций по технологии частичного закрепления просадочного грунта.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании новых и реконструируемых зданий на просадочных грунтах.

#### **Методологическая основа исследования**

Для решения поставленных задач использовались: экспериментальные методы определения деформативности грунта и вязкости закрепляющего раствора; методы определения деформаций основания на основе решений теории упругости; численные методы определения (НДС) системы «основание – фундамент – здание» методом конечных элементов; методы расчета конструкций на деформируемом основании с использованием контактных моделей грунтового основания.

#### **На защиту выносятся:**

- методика расчета бескаркасных зданий, позволяющая предварительно определить рациональную схему частичного закрепления просадочного грунта по допустимым неравномерным деформациям основания, вызванным реализацией остаточных просадочных деформаций с учетом инженерно-геологического строения массива грунта, действия внешних нагрузок и произвольных наиболее неблагоприятных схем увлажнения (замачивания) грунтового массива;
- результаты экспериментальных исследований деформативности просадочных грунтов, закрепленных раствором повышенной проникающей способности;
- методика определения коэффициента жесткости основания при частичном закреплении просадочного грунта, учитывающая напряженное состояние грунтового массива как в плане, так и по глубине.

Работа состоит из введения, пяти разделов, основных выводов, приложений и списка использованных источников.

Во **Введении** обоснована актуальность темы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена общая характеристика работы.

**Раздел 1** посвящен анализу состояния вопроса и уровня научных достижений в области обеспечения надежности фундаментов бескаркасных зданий, эксплуатируемых на просадочных грунтах.

Рассмотрены особенности просадочных грунтов и способы моделирования просадочных деформаций при расчете системы «здание – фундамент – просадочный грунт».

Выполнен анализ существующих методов увеличения жесткости просадочного основания и устранения его просадочных свойств с целью снижения дополнительных усилий в конструкциях здания, вызванных неравномерными деформациями основания. При этом особое внимание уделено инъекционным методам закрепления, так как различные методы поверхностного и глубинного уплотнения в условиях уже застроенной территории, как правило, не применимы.

Исходя из максимально эффективного использования жесткости и прочности основных несущих конструкций здания, определены пути возможного снижения затрат на закрепление просадочного основания инъекционными методами.

**Раздел 2** посвящен определению жесткостных характеристик просадочного грунта, закрепленного раствором повышенной проникающей способности. При этом были решены следующие задачи:

- подобрана рациональная рецептура закрепляющего раствора повышенной проникающей способности;
- экспериментально исследованы деформационные характеристики просадочных грунтов, закрепленных различными инъекционными растворами;
- предложена методика определения приведенного модуля деформации частично закрепленного просадочного грунта с учетом его напряженного состояния.

**В Разделе 3** приведена методика численного моделирования системы «здание – фундамент – просадочное основание» при частичном закреплении основания с учетом полученных деформационных характеристик закрепленного грунта. В соответствии с приведенной методикой выполнен анализ НДС фрагмента стены бескаркасного здания, взаимодействующего с основанием из частично закрепленного просадочного грунта.

**В Разделе 4** выполнены численные исследования НДС бескаркасного здания, взаимодействующего с просадочным основанием при его частичном закреплении (на примере здания школы №3 в г. Мариуполе). Определена схема и процент частичного закрепления просадочного грунта, достаточные для обеспечения допустимого уровня усилий (напряжений) в несущих конструкциях здания. Выполнено технико-экономическое сравнение вариантов частичного и полного закрепления просадочного грунта.

**В Разделе 5** определена область применения метода частичного закрепления просадочного основания под фундаментами бескаркасных зданий, разработаны и даны рекомендации по расчету, проектированию и технологии выполнения работ по частичному закреплению просадочного основания. Разработаны рекомендации

по подготовке закрепляющего раствора повышенной проникающей способности. Приведено применяемое оборудование при производстве работ, основные его характеристики. Рассмотрены основные критерии технологического процесса и технологические схемы закрепления просадочного основания для различных конструктивных решений фундаментов. Освещены основные требования по технике безопасности при производстве работ.

В **Приложениях** приведены: результаты лабораторных испытаний; пример расчета частично закрепленного грунтового основания, а также напряженно-деформируемого состояния здания на этом основании.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались: экспериментальные методы определения деформативности грунта и вязкости закрепляющего раствора; методы определения деформаций основания на основе решений теории упругости; численные методы определения (НДС) системы «основание – фундамент – здание» методом конечных элементов; методы расчета конструкций на деформируемом основании с использованием контактных моделей грунтового основания.

**Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена:** применением стандартных методик определения физико-механических характеристик грунта; определением НДС конструкций зданий и сооружений с использованием традиционных методов теории взаимодействия конструкций с деформируемым основанием и сертифицированного программного обеспечения; удовлетворительной сходимостью результатов численных исследований и результатов натурных обследований. Выполнение математической обработки результатов велось с помощью программ MicrosoftExcel, моделирование работы частично закрепленного грунта – в программе Descon, моделирование НДС конструкций здания – в программе ЛИРА-САПР.

### **Внедрение результатов работы**

Результаты работы внедрены в практику проектирования и строительства:

- при выполнении частичного закрепления основания фундаментов здания поликлиники ИНВХ им. В.К. Гусака в г. Донецке;

– при разработке проекта усиления основания и конструкций здания ДЮСШ №2, расположенного по ул. Кронштадская, 11а в г. Мариуполе;

– при реконструкции здания ОШ №12 по ул. Ярославского, 5а в г. Иловайске.

**Личный вклад соискателя состоит:**

– в получении зависимостей деформационных характеристик просадочного грунта при его частичном закреплении;

– в разработке закрепляющего состава на основе кремниевой кислоты с применением ПАА;

– в разработке экспериментальной установки для определения вязкости растворов.

**Апробация результатов диссертации**

Основные результаты исследований представлены: на V международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании» (Москва, 2016 г.); Восемнадцатой международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2017 г.); I международном строительном форуме «Строительство и архитектура-2017» (Макеевка, 2017 г.); на научных конференциях Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (Макеевка, 2014–2017 гг.); научных семинарах кафедр «Основания, фундаменты и подземные сооружения» и «Техносферная безопасность» (Макеевка, 2014–2017 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 1 работа – в специализированном научном издании, рекомендованном МОН Украины, 4 работы – в рецензируемых научных изданиях, утвержденных перечнем ВАК МОН ДНР, 6 работ – в сборниках трудов международных и региональных научно-практических конференций и в других изданиях.

**Объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, основных выводов и рекомендаций, библиографического списка из 166 наименований, приложений и содержит 217 страниц, в том числе 150 страниц основного текста, 18 страниц списка использованной литературы, 67 рисунков, 28 таблиц и 33 страницы приложений.

Исследования проводились под руководством кандидата технических наук, доцента В. В. Яркина, экспериментальная часть работы – под руководством доктора технических наук, профессора С. П. Высоцкого, которым автор выражает глубокую признательность.

## РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### 1.1. Особенности просадочных грунтов

Просадочными грунтами обычно считаются макропористые лесовые суглинки, реже супеси или глины. По мнению Ю. М. Абелева [1], именно макропористая структура существенно определяет деформационные, прочностные и фильтрационные свойства просадочных грунтов. Особенностью просадочных грунтов является их высокая пористость (около 40 – 60%), низкая природная влажность и довольно прочные водорастворимые структурные связи, которые разрушаются при повышении влажности выше определенного уровня. Недоуплотненность просадочных грунтов выражается в их низкой степени плотности, характеризующейся объемной массой скелета в пределах обычно 1,2 – 1,5 т/м<sup>3</sup>. С глубиной степень плотности чаще всего повышается.

Разрушение структурных связей между минеральными частицами при замачивании просадочного грунта под действием неизменной нагрузки приводит к его доуплотнению и, соответственно, дополнительным деформациям, которые называются просадочными. Так как просадочные деформации сопровождаются коренным изменением структуры грунта (перекомпоновкой минеральных частиц до более плотного сложения), просадочные грунты являются структурно неустойчивыми.

Как было установлено Б. В. Дерягиным [21], вода, находящаяся в дисперсном состоянии в грунте, может оказывать расклинивающее действие пористой структуры грунта, которое сказывается на прочностных характеристиках грунта в целом. Пленки воды, играя роль смазки, облегчают скольжение частиц и содействуют более плотной их укладке под действием давления. Сцепление увлажненного просадочного грунта в этом случае будет определяться только влиянием сил молекулярного притяжения, величина которых, как известно, зависит в основном от состава и степени плотности грунта [22]. Кроме того, известное значение в разрушении структуры агрегатов частиц имеет и растворение солей, цементирующих частицы лесовых грунтов, а также действие

осмотического давления, возникающего вследствие разности концентрации солей пленочной воды и воды.

Начало систематического изучения явления просадки и строительных свойств лесовых грунтов относится к тридцатым годам XX в. Первые нормативные документы в этой области были разработаны при участии Н. М. Герсеванова, Ю. М. Абелева, Д. Е. Польшина. Становление и развитие самостоятельной науки о строительстве на просадочных грунтах принадлежит Ю. М. Абелеву [1]. Начало её развития совпало со строительством на лесовых просадочных грунтах крупнейших металлургических, машиностроительных и др. заводов Запорожья, Никополя, Днепропетровска, Мариуполя, Херсона в условиях, когда при недостаточной изученности лесовых грунтов необходимо было решать сложнейшие вопросы обеспечения нормальной эксплуатации возводимых зданий и сооружений при полном отсутствии отечественного и зарубежного опыта.

Дальнейшее развитие этой отрасли строительной науки нашло отражение в трудах М. Ю. Абелева [1], М. Н. Гольдштейна [2], А. А. Григорян [3], С. Н. Клепикова [4], В. И. Крутова [5], И. М. Литвинова [6], Г. М. Ломизе [7], А. А. Мустафаева [8], З. Г. Тер-Мартиросяна [9], Н. А. Цытовича [10], Я. Д. Гильмана [11], В. А. Межеровского [12], А. И. Маркова [13], В. Р. Мустакимова [14], П. П. Шагина [15], С. Г. Кушнера [16], П. А. Коновалова [17], Coduto Donald P. [18], Frank R. [19], Tomlinson M. J. [20] и др.

Многолетние исследования, проведенные в НИИ оснований им. М. Герсеванова под руководством В. И. Крутова [5], легли в основу труда [23], который в дальнейшем был актуализирован на территории РФ, и основные принципы проектирования на просадочных грунтах практически без изменений перенеслись в действующие нормы РФ [24]. В нормативных документах Украины [25] по сравнению со СНиП появились более существенные изменения, в основу которых легли исследования С. Н. Клепикова [4], А. С. Трегуба [26], И. О. Розенфельда [27], В. В. Яркина [28], И. В. Матвеева [29], А. П. Пшеничкина [30], Б. Ф. Галая [31], Е. В. Емец [32] и др. ученых.

В соответствии с работами [24; 25] просадочные грунты относятся к грунтам с особыми свойствами и характеризуются следующими показателями:

- относительной просадочностью  $\varepsilon_{sl}$  – относительным сжатием грунтов при заданном давлении после их замачивания;
- начальным просадочным давлением  $p_{sl}$  – минимальным давлением, при котором проявляются просадочные свойства грунтов при их полном водонасыщении;
- начальной просадочной влажностью  $w_{sl}$  – минимальной влажностью, при которой проявляются просадочные свойства грунтов [22].

Анализ результатов многочисленных исследований отечественных ученых по изучению количественных характеристик просадочных пород в различных районах показывает, что для большинства из них характерно постоянное значение величины относительной просадочности  $\varepsilon_{sl}$  на глубину до 10 м, и глубже этой отметки, до глубины 25 – 40 м наблюдается снижение величины  $\varepsilon_{sl}$ . С увеличением влажности  $W$  наблюдается равномерное уменьшение величины  $\varepsilon_{sl}$  и соответствующее увеличение начального просадочного давления  $P_{sl}$ .

В настоящее время принято считать, что просадка лесовых грунтов в условиях природного напряженного состояния и в основаниях сооружений проявляется в результате их доуплотнения при увлажнении, т. е. деформации увлажненных лесовых грунтов рассматриваются как необратимый процесс перехода их из недоуплотненного состояния в состояние нормальной плотности. Просадочность грунтов обуславливается особенностями процесса формирования и существования толщ этих грунтов, в результате чего они находятся в недоуплотненном состоянии. При этом недоуплотненное состояние просадочных грунтов может сохраняться на протяжении всего периода их существования, если не произойдет повышение влажности или нагрузки.

При замачивании просадочного грунта может произойти его дополнительное уплотнение в нижних слоях под действием собственного веса. Однако поскольку просадка зависит от величины нагрузки, недоуплотненность толщи лесовых грунтов по отношению к внешней нагрузке, превышающей напряжения от

собственного веса грунта, сохранится. Возможность последующего уплотнения лессового грунта, находящегося в недоуплотненном состоянии от внешней нагрузки или собственного веса, при повышении влажности определяется соотношением снижения его прочности при увлажнении и величиной действующей нагрузки.

Изменение естественного уровня грунтовых вод в результате инженерно-хозяйственной деятельности человека – один из главных техногенных факторов, под воздействием которого просадочные грунты существенно изменяют свои физико-механические свойства. В свою очередь, изменение физико-механических характеристик может привести к потере несущей способности либо повышенным деформациям грунтов, служащих основаниями зданий и сооружений, и впоследствии – к существенным нарушениям в нормальной эксплуатации зданий и сооружений.

## **1.2. Особенности распространения воды в просадочных грунтах**

Повышение влажности просадочных грунтов возможно за счет:

а) замачивания грунтов основания сверху из внешних источников:

– местного замачивания грунтов основания сверху, приводящего к просадкам на ограниченной площади в пределах, как правило, верхней части просадочной толщи. Учитывается при ширине зоны замачивания  $B_w$ , которая меньше чем мощность просадочной толщи  $H_{si}$ ;

– интенсивного замачивания в течение длительного времени, приводящего к промачиванию грунтов на всю просадочную толщу и полному проявлению просадок. Учитывается при  $B_w \geq H_{si}$ ;

б) замачивания грунтов снизу при подъеме уровня грунтовых вод, приводящего к просадкам в нижней части просадочной толщи в основном от собственного веса грунта;

в) постепенного накопления влаги в грунте вследствие инфильтрации поверхностных вод и нарушения природных условий ее испарения из-за экранирования поверхности при застройке и асфальтировании территории.

Наиболее опасными для зданий и сооружений являются случаи интенсивного или местного замачивания сверху, так как в этих случаях проявляется максимальная неравномерность деформаций основания. Поэтому эти случаи должны учитываться в первую очередь при определении возможных величин просадок и расчетах конструкций зданий на неравномерные деформации основания. При полном отсутствии возможности замачивания просадочных грунтов сверху должны учитываться возможные случаи подъема уровня грунтовых вод или местного повышения влажности.

Изменение степени влажности грунта при различных схемах замачивания показаны на рис. 1.1 [11].

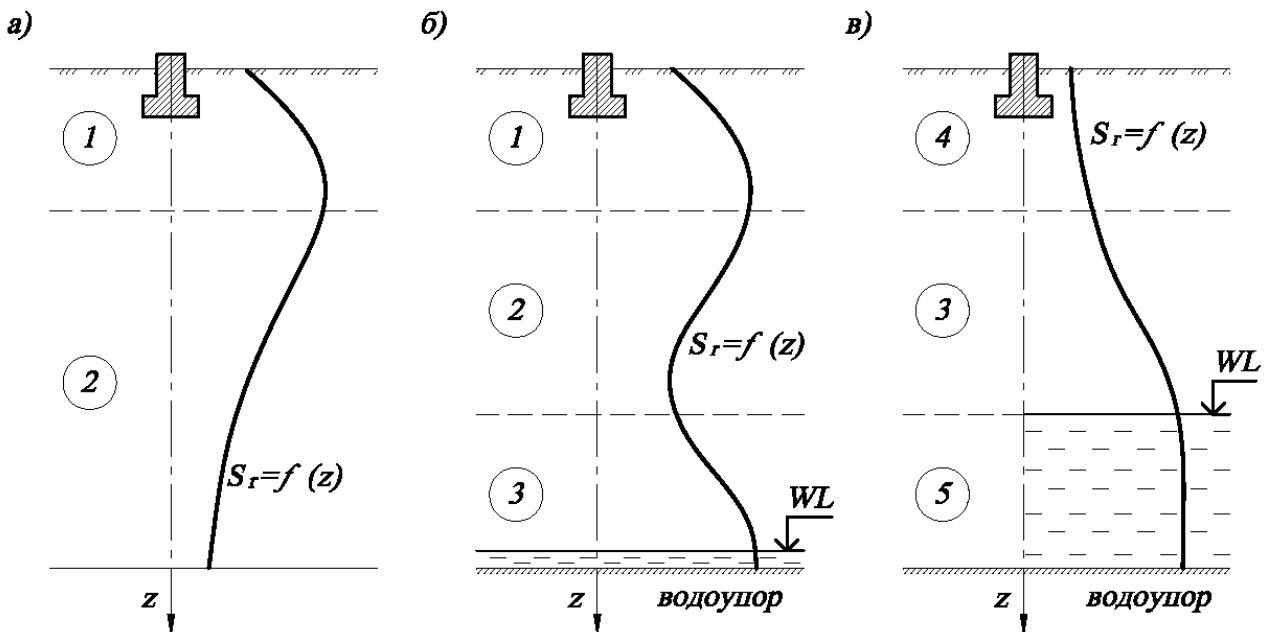


Рис. 1.1. Схемы зон увлажнения лессового грунта: а, б – инфильтрация воды сверху вниз; в – подъем уровня подземных вод; зоны: 1 – почти полного водонасыщения; 2 – переходная; 3 – капиллярного водонасыщения; 4 – природной влажности; 5 – полного водонасыщения

В пределах увлажненной зоны степень влажности грунтов может меняться, например, при замачивании сверху в непосредственной близости к источнику замачивания степень влажности  $S_r$  обычно находится в диапазоне 0,85...0,9, а в зоне капиллярного увлажнения – 0,8...0,85. При подъеме уровня подземных вод степень влажности грунтов соответствует 0,95...1 [26].

При замачивании сверху вода распространяется в толще просадочного грунта как сверху вниз, так и в стороны от источника увлажнения, образуя локальную увлажненную зону. На характер формирования и размеры увлажненной зоны влияют: форма и размеры источника замачивания; интенсивность замачивания; фильтрационные свойства грунта; неоднородность сложения грунтовой толщи; напор; рельеф местности и наклон отдельных слоев грунта; уровень подземных вод и т.д. Учесть все влияющие факторы в каждом частном случае довольно сложно, поэтому для определения размеров зоны замачивания в нормативных документах [24; 25] используют упрощенную методику, учитывающую форму и размеры источника замачивания, а также неоднородность и фильтрационные свойства грунтов просадочной толщи.

При местном замачивании из точечных, линейных и небольших площадных источников с шириной менее толщины просадочной толщи считается, что промачивание просадочной толщи происходит не на всю глубину, в результате чего формируется увлажненная зона, имеющая форму поперечного сечения, близкую к усеченному эллипсу (рис. 1.2 а). При интенсивном замачивании из площадных источников с шириной не менее толщины просадочной толщи считается, что просадочная толща промачивается на всю глубину, в результате чего формируется увлажненная зона, имеющая форму поперечного сечения, близкую к трапеции (рис. 1.2 б).

Изменение водопроницаемости просадочной толщи и подстилающего слоя влияет на распространение воды и распределение влажности в пределах увлажненной зоны. В однородных по водопроницаемости толщах растекание воды можно принимать под углом  $\beta = 35^\circ$  для супесей и  $\beta = 50^\circ$  для суглинков [33].

В слоистых по водопроницаемости толщах просадочных грунтов угол растекания меняется. По мере приближения воды к слою с меньшей фильтрационной способностью угол растекания  $\beta$  увеличивается, а у кровли слоя с большей фильтрационной способностью, наоборот, уменьшается (рис. 1.2 б). Изменение угла растекания воды для многослойных оснований с разной

фильтрационной способностью учитывается коэффициентом  $m_\beta$ , определяемым в соответствии с требованиями норм [24; 25].

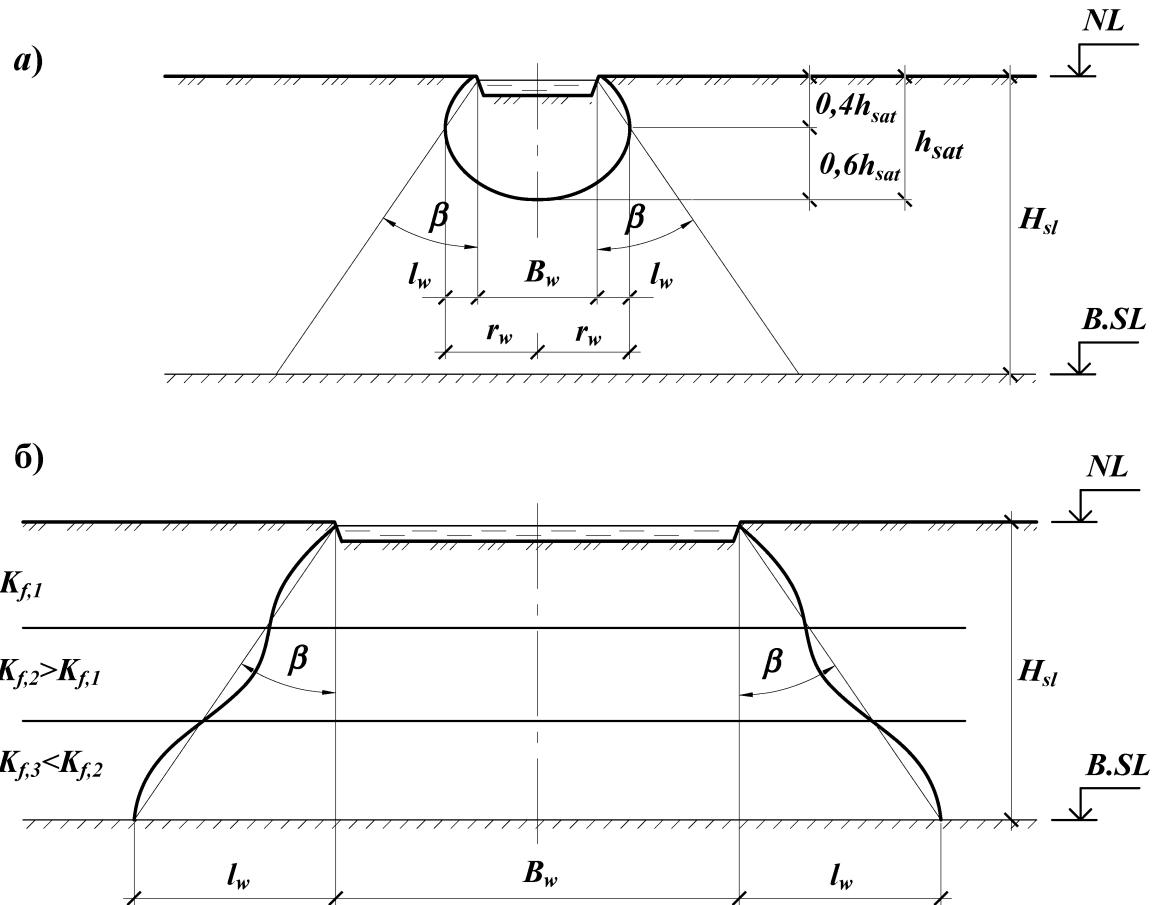


Рис. 1.2. Схемы увлажненной зоны при замачивании грунтов сверху:  
а – при  $B_w < H_{sl}$ ; б – при  $B_w \geq H_{sl}$

Расстояние  $l_w$ , на которое растекается вода на нижней границе просадочного слоя (рис. 1.2 б), определяется по формуле:

$$l_w = H_{sl} \cdot m_\beta \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (1.1)$$

где  $\beta$  – угол растекания воды;

$m_\beta$  – коэффициент, учитывающий возможное изменение угла растекания воды многослойного основания.

Характер протекания деформаций во времени на просадочных грунтах определяется их влажностью. В связи с тем, что просадочные грунты обычно находятся в маловлажном состоянии, деформация сжатия их от внешней нагрузки

происходит в течение сравнительно короткого времени. Просадка грунта, а в равной степени и осадка в водонасыщенном состоянии протекают в течение более длительного времени, так как эти процессы связаны с фильтрацией воды через толщу грунта. Вопросы развития просадочных деформаций во времени, в том числе за счет ползучести, рассмотрены в работе Н. С. Метелюка [34].

### **1.3. Моделирование просадочных деформаций в системе «здание – фундамент – просадочный грунт»**

В настоящее время существуют в основном две тенденции развития методов расчета конструкций на структурно-неустойчивых грунтах. К ним относятся: численные методы, включая метод конечных элементов (МКЭ), и инженерные (аналитические) методы, которые базируются на приближенных расчетных схемах с допущениями, упрощающими расчет.

Расчету просадочных грунтов МКЭ посвящены работы Д. М. Подольского [35], А. И. Маркова [36], В. И. Гупаленко [37] и др. ученых. При этом просадочные деформации в грунтовом массиве могут моделироваться:

- снижением модуля деформации просадочных грунтов в пределах увлажненной зоны до его значения, определяемого в водонасыщенном состоянии;
- приложением фиктивных сил в узлах конечных элементов, находящихся в пределах зоны увлажнения [38; 39];
- объемными деформациями конечных элементов, находящихся в пределах зоны увлажнения.

Инженерные (аналитические) методы определения просадочных деформаций рассмотрены в работах М. Ю. Абелева [1], М. Н. Гольдштейна [2], А. А. Григорян [3], В. И. Крутова [5], А. А. Мустафаева [8], З. Г. Тер-Мартиросяна [9], Н. А. Цытовича [10], Я. Д. Гильмана [11], Е. В. Емец [40] и др. исследователей.

В действующих в настоящее время нормативных документах как России [24], так и Украины [25], регламентирующих проектирование на просадочных грунтах, определение просадочных деформаций производится методом послойного суммирования с использованием модели линейно-деформируемого упругого

полупространства, несмотря на то, что этот метод является довольно условным [5; 3; 9; 11].

При этом принято считать, что, в отличие от осадки, просадки проявляются не от дополнительных напряжений, вызванных внешней нагрузкой на основание, а от полных  $\sigma_z$ , равных сумме напряжений от собственного веса водонасыщенного грунта  $\sigma_{zg}$  и дополнительных  $\sigma_{zp}$ :

$$\sigma_z = \sigma_{zg} + \sigma_{zp} \quad (1.2)$$

Просадочные деформации от действия суммарного напряжения  $\sigma_z$  будут развиваться как от действия внешней нагрузки, так и от действия собственного веса:

$$s_{sl} = s_{sl,g} + s_{sl,p}, \quad (1.3)$$

где  $s_{sl}$  – полное значение просадки от действия суммарного напряжения;

$s_{sl,g}$  – просадка от действия собственного веса грунта;

$s_{sl,p}$  – просадка от действия внешней нагрузки.

Просадки грунтов учитываются при  $\sigma_z \geq p_{sl}$  либо относительной просадочности  $\varepsilon_{sl} \geq 0,01$ .

При проектировании оснований, сложенных просадочными грунтами, должны учитываться:

а) просадки от внешней нагрузки  $s_{sl,p}$ , происходящие в пределах верхней зоны просадки  $h_{sl,p}$ ;

б) просадки от собственного веса грунта  $s_{sl,g}$ , происходящие в нижней зоне просадки  $h_{sl,g}$ ;

в) неравномерность просадки грунтов  $\Delta s_{sl}$ ;

г) горизонтальные перемещения основания  $u_{sl}$  в пределах криволинейной части просадочной воронки при просадке грунтов от собственного веса.

Просадка грунтов  $s_{sl}$  основания при увеличении их влажности вследствие замачивания сверху больших площадей, а также замачивания снизу при подъеме уровня грунтовых вод определяется по формуле:

$$s_{sl} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sl,i} \cdot h_i \cdot k_{sl,i} , \quad (1.4)$$

где  $\varepsilon_{sl,i}$  – относительная просадочность  $i$ -го слоя грунта от действия полного вертикального напряжения  $\sigma_z$  в середине  $i$ -го слоя;

$h_i$  – толщина  $i$ -го слоя грунта;

$n$  – число слоев, на которые разбиты зоны просадки  $h_{sl,p}$  и (или)  $h_{sl,g}$ ;

$k_{sl,i}$  – коэффициент, учитывающий условия работы основания.

Коэффициент  $k_{sl,i}$  принимается при суммировании в зоне  $h_{sl,p}$  равным:

– при ширине подошвы фундамента  $b \geq 12$  м – 1,0;

– при ширине подошвы фундамента  $b \leq 3$  м – по формуле:

$$k_{sl,i} = 0,5 + 1,5(p - p_{sl,i}) / p_0 , \quad (1.5)$$

где  $p$  – среднее давление под подошвой фундамента;

$p_{sl,i}$  – начальное просадочное давление  $i$ -го слоя грунта;

$p_0$  – давление, равное 100 кПа;

– при ширине подошвы фундамента  $3 \text{ м} < b < 12 \text{ м}$  – по интерполяции между значениями  $k_{sl,i}$ , полученными при  $b = 3$  м и  $b = 12$  м.

При суммировании в зоне  $h_{sl,g}$  коэффициент  $k_{sl,i}$  принимается равным:

– при  $H_{sl} \leq 15$  м – 1,0;

– при  $H_{sl} \geq 20$  м – 1,25;

– при промежуточных значениях  $H_{sl}$  – по интерполяции между указанными выше значениями.

Следует отметить, что в украинских и российских нормах существуют различия, касающиеся разбиения просадочной толщи на верхнюю и нижнюю зоны просадки, и, соответственно, определения величины просадки от внешней нагрузки и собственного веса грунта. Данные различия могут привести к существенно отличающимся результатам. Анализ различий выполнен в работе В. В. Яркина, А. В. Кухарь [28].

### 1.3.1. Деформации земной поверхности при просадках от собственного веса грунта

При значительной мощности просадочной толщи  $H_{sl}$  напряжения от собственного веса грунта могут превысить начальное просадочное давление, в результате чего в нижних слоях могут проявиться просадочные деформации. При замачивании сверху в толще просадочных грунтов образуется обводненная зона (водный купол), в пределах которой напряжения от собственного веса грунта должны учитывать водонасыщенное состояние.

Замачивание из поверхностных источников ограниченной площади в плане за счет растекания воды приводит к образованию зоны замачивания переменной толщины и возникновению на поверхности неравномерных деформаций, формирующих просадочную воронку.

В пределах просадочной воронки наблюдаются неравномерные вертикальные перемещения (просадки), а также горизонтальные перемещения, наклоны и кривизна.

Полностью просадка от собственного веса грунта проявляется при полном промачивании просадочной толщи, т. е. в случае, если меньшая сторона площади замачивания  $B_w$  превышает мощность просадочной толщи  $H_{sl}$ . Нижняя граница растекания воды находится на глубине  $H_{sl}$  от поверхности земли.

Характер развития деформаций земной поверхности от собственного веса грунта в пределах просадочной воронки представлен на рис. 1.3.

При ширине замачиваемой площади  $B_w > H_{sl}$  просадочная воронка имеет плоское дно шириной  $b_w$  с максимальными просадками от собственного веса и криволинейные граничные участки шириной  $r_w$ . Граничные участки просадочной воронки шириной  $r_w$  характеризуют зоны неравномерных деформаций земной поверхности: просадок, которые изменяются от максимального значения до нуля; горизонтальных перемещений  $u_{sl}$ ; наклонов и кривизны поверхности (рис. 1.3).

Расчетная длина криволинейного участка просевшей поверхности от собственного веса грунта вычисляется по формуле:

$$r_w = H_{sl} \cdot (0,5 + m_\beta \cdot \operatorname{tg} \beta). \quad (1.6)$$

Ширина плоского дна просадочной воронки с равномерными вертикальными перемещениями:

$$b_w = B_w + 2 \cdot H_{sl} \cdot m_\beta \cdot \operatorname{tg} \beta - 2 \cdot H_{sl} \cdot (0,5 + m_\beta \cdot \operatorname{tg} \beta),$$

$$b_w = B_w - H_{sl}. \quad (1.7)$$

Соответственно, при небольшой ширине замачиваемой площади  $B_w \leq H_{sl}$  горизонтальный участок просадки грунта отсутствует и просадочная воронка будет состоять только из криволинейных участков (рис. 1.3).

Следует отметить, что максимальная неравномерность просадок грунта при прочих равных условиях наблюдается при минимальной величине распространения зоны увлажнения в стороны от замачиваемой площади и, соответственно, минимальной длине криволинейных участков.

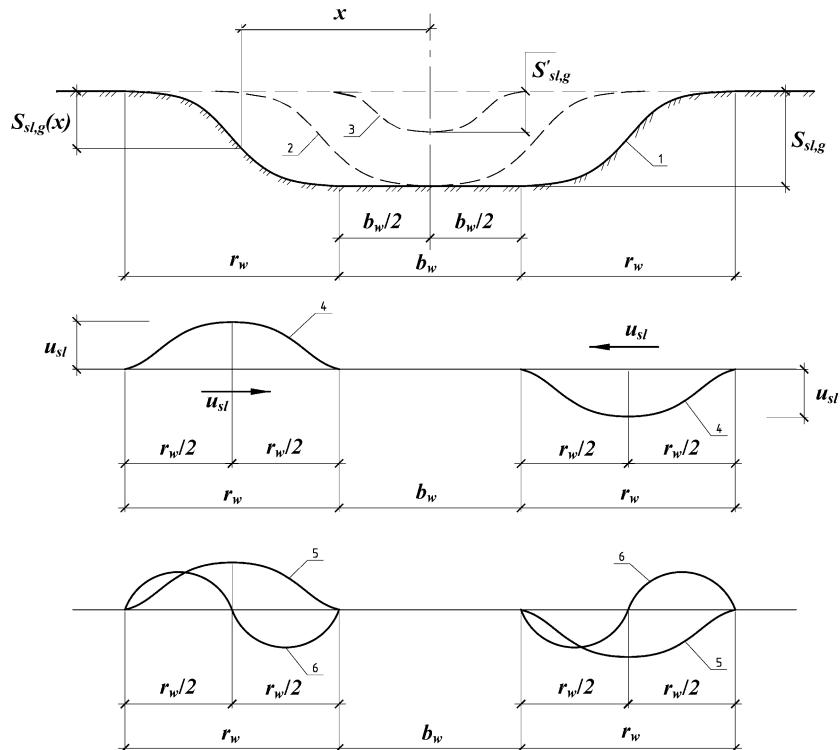


Рис. 1.3. Общий характер развития просадочных деформаций на поверхности от собственного веса грунта: 1, 2 и 3 – просадки поверхности грунта: 1 – при  $B_w > H_{sl}$ ; 2 – при  $B_w = H_{sl}$ ; 3 – при  $B_w < H_{sl}$ ; 4 – горизонтальные перемещения поверхности; 5 – наклоны; 6 – кривизна поверхности.

**Просадка грунтов основания от собственного веса**  $s_{sl,g}$  при увеличении их влажности вследствие замачивания сверху больших площадей  $B_w \geq H_{sl}$  определяется по формуле:

$$s_{sl,g} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sl,g,i} \cdot h_i \cdot k_{sl,g}, \quad (1.8)$$

где  $\varepsilon_{sl,g,i}$  – относительная просадочность  $i$ -го слоя грунта, определяемая при давлении, равном напряжениям от собственного веса водонасыщенного грунта в середине рассматриваемого слоя;

$h_i$  – толщина однородного  $i$ -го слоя грунта, принимаемая при разбивке просадочной толщи не более 2 м;

$n$  – количество слоев, на которые разбита зона просадочной толщи, в пределах которой напряжения от собственного веса грунта превышают начальное просадочное давление (рис. 1.4);

$k_{sl,g}$  – то же, что и в формуле (1.4) при суммировании в зоне  $h_{sl,g}$ .

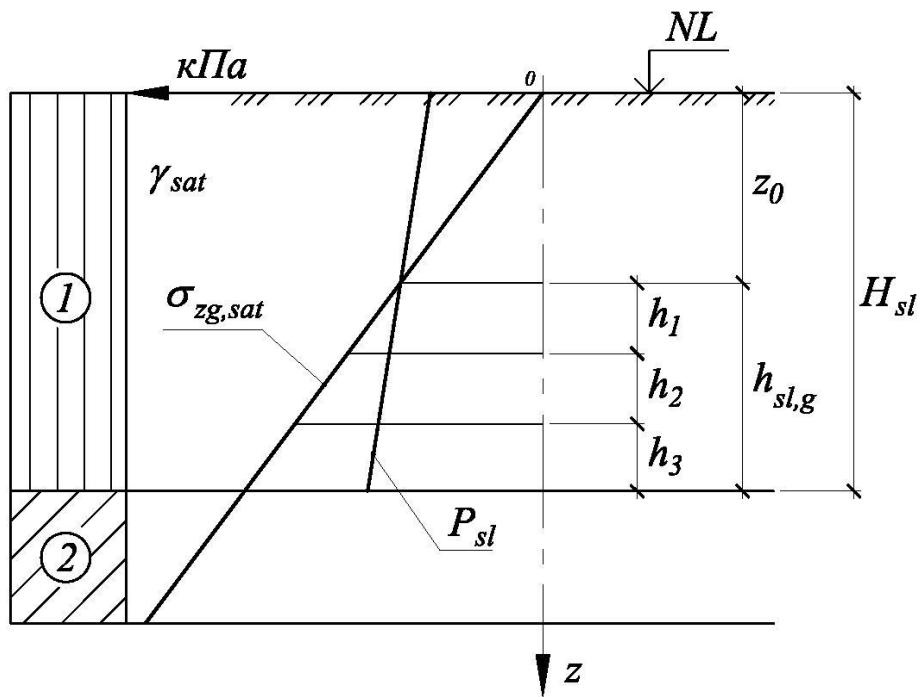


Рис. 1.4. Расчетная схема для определения просадки от собственного веса грунта

При замачивании просадочных грунтов на небольшой площади шириной  $B_w < H_{sl}$  происходит неполное промачивание просадочной толщи. В этом случае

формируется зона увлажненного грунта, имеющая в поперечном сечении форму, близкую к усеченному эллипсу (рис. 1.2 а). Просадка от собственного веса грунта в таких условиях проявляется только частично. Величина возможной просадки от собственного веса грунта  $s'_{sl,g}$  вычисляется по формуле:

$$s'_{sl,g} = s_{sl,g} \cdot \sqrt{\left(2 - \frac{B_w}{H_{sl}}\right) \cdot \frac{B_w}{H_{sl}}}. \quad (1.9)$$

При  $B_w > H_{sl}$  в формулу (1.9) подставляется значение  $B_w = H_{sl}$  и, соответственно,  $s'_{sl,g} = s_{sl,g}$ .

**Вертикальные перемещения земной поверхности**  $s_{sl,g}(x)$  в пределах криволинейных участков просадочной воронки (рис. 1.3) распределяются в соответствии со следующей формулой:

$$s_{sl,g}(x) = 0,5 \cdot s'_{sl,g} \left[ 1 + \cos \frac{\pi \cdot (x - 0,5 \cdot b_w)}{r_w} \right], \quad (1.10)$$

где  $x$  – расстояние от центра просадочной воронки до точки, в которой определяется перемещение.

**Горизонтальные перемещения земной поверхности**  $u_{sl}(x)$  в пределах криволинейных участков просадочной воронки определяются по формуле:

$$u_{sl}(x) = 0,25 \cdot \varepsilon \cdot r \left[ 1 - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot (x - 0,5 \cdot b_w)}{r_w} \right], \quad (1.11)$$

где  $\varepsilon$  – относительные горизонтальные деформации земной поверхности на криволинейном участке неравномерных деформаций земной поверхности:

$$\varepsilon = 0,66 \cdot \left( \frac{s'_{sl,g}}{r_w} - 0,005 \right). \quad (1.12)$$

**Наклоны земной поверхности**  $i_{sl}(x)$  в пределах криволинейных участков просадочной воронки определяются по формуле:

$$i_{sl}(x) = -0,5 \cdot s'_{sl,g} \cdot \frac{\pi}{r_w} \cdot \sin \frac{\pi \cdot (x - 0,5 \cdot b_w)}{r_w}. \quad (1.13)$$

### 1.3.2. Деформации просадочного основания от действия внешней нагрузки

В соответствии с данными работы [25] просадка от внешней нагрузки определяется по формуле (1.4) только в верхней просадочной толще.

В соответствии с данными работы [24] просадка от действия внешней нагрузки определяется по формуле:

$$s_{sl,p} = s_{sl} - s_{sl,g}, \quad (1.14)$$

где  $s_{sl,g}$  – просадка от собственного веса грунта;

$s_{sl}$  – полная просадка, определяемая по формуле (1.4) с учетом одновременно и верхней, и нижней зон просадки.

Определение просадки от внешней нагрузки может также производиться по принципу расчета осадки [41], например, методом послойного суммирования с учетом модулей деформации грунта в водонасыщенном состоянии. При этом модуль деформации просадочного грунта в водонасыщенном состоянии должен приниматься переменным, зависящим от нагрузки на грунт, т. е. для каждого элементарного слоя грунта  $E_{i,sat}$  будет иметь свое значение. В этом случае вертикальное перемещение, определенное по данной методике, представляет собой суммарную величину осадки и просадки. Просадка в этом случае может быть определена как разность суммарной деформации и осадки, которая определяется как для обычных непросадочных грунтов.

Существенным недостатком данного метода расчета просадки от внешней нагрузки является большая трудоемкость определения модулей деформации грунтов в водонасыщенном состоянии для различных слоев, входящих в деформируемую зону [33].

## 1.4. Расчет зданий и сооружений, взаимодействующих с просадочным основанием

### 1.4.1. Моделирование просадочных деформаций

В соответствии с данными работы [42] грунтовые условия площадок, сложенных просадочными грунтами, в зависимости от возможности проявления просадки грунтов от собственного веса подразделяются на два типа:

I тип – грунтовые условия, в которых просадка грунтов от собственного веса  $s_{sl,g}$  отсутствует или не превышает 5см;

II тип – грунтовые условия, в которых просадка от собственного веса превышает 5см.

Тип грунтовых условий по просадочности используется при общей оценке условий строительства, выборе противопросадочных мероприятий, выборе схем и методов расчета зданий, взаимодействующих с просадочным основанием.

В грунтовых условиях **I типа** по просадочности проектируемые здания и сооружения следует рассчитывать при наиболее неблагоприятном изменении жесткости основания при местном его замачивании. Как доказано В. И. Лишаком, наиболее неблагоприятными являются схемы локального замачивания:

- а) под серединой здания (рис. 1.5 а);
- б) в торце здания (рис. 1.5 б).

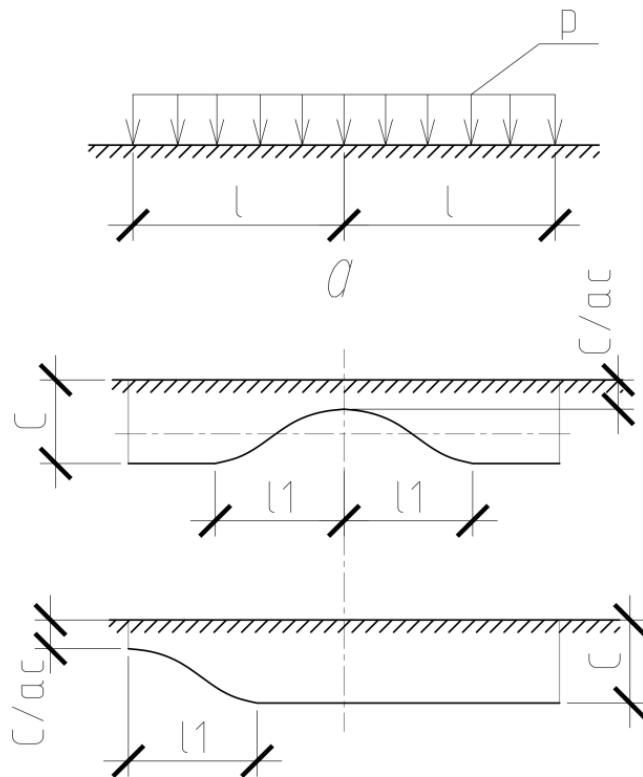


Рис. 1.5. Схема изменения коэффициента жесткости основания по длине здания при замачивании грунтов: а – под серединой здания; б – под торцом

Схемы изменения жесткости основания при местном его замачивании допускается принимать по линейному закону от минимального  $C_I$  до максимального  $C$  значений коэффициентов жесткости.

Минимальный коэффициент жесткости основания в грунтовых условиях I типа по просадочности  $C_I$  определяется по формуле:

$$C_I = C \cdot \frac{s}{s + s_{sl,p}}, \quad (1.15)$$

где  $C$  – коэффициент жесткости основания, определяемый без учета просадочных свойств грунтов как для обычных условий строительства;  $s$  – осадка основания от внешней нагрузки, определяемая без учета просадочных свойств грунтов как для обычных условий строительства;  $s_{sl,p}$  – просадка грунта от внешней нагрузки (в зоне  $h_{sl,p}$ ).

В грунтовых условиях **II типа** по просадочности в целях упрощения расчеты зданий следует выполнять по принципу независимости действия сил: на осадку и просадку от внешней нагрузки с учетом изложенных выше рекомендаций и на просадку от собственного веса грунта. При этом влияние просадочной воронки от собственного веса грунта (рис. 1.3) учитывается по схеме вынужденных перемещений земной поверхности. В дальнейшем усилия, полученные раздельно для этих двух видов воздействий, складываются с соответствующими знаками и на суммарные их величины проектируются конструкции зданий.

Неравномерность деформаций оснований при просадке лессовых грунтов от их собственного веса возникает вследствие изгиба поверхности грунта в пределах расположения всего здания или его части. В соответствии с этим рассматриваются два наиболее неблагоприятных варианта расположения источников замачивания по отношению к зданию (рис. 1.7), приводящих к образованию:

I вариант – односторонней консоли, источник замачивания у торца здания, в результате чего одна часть его расположена на просадочном грунте естественной влажности, а другая – на начальном участке кривой просадки поверхности грунта. В этом случае здание работает как консоль с креном в сторону источника замачивания;

II вариант – провисания, источник замачивания в центре здания.

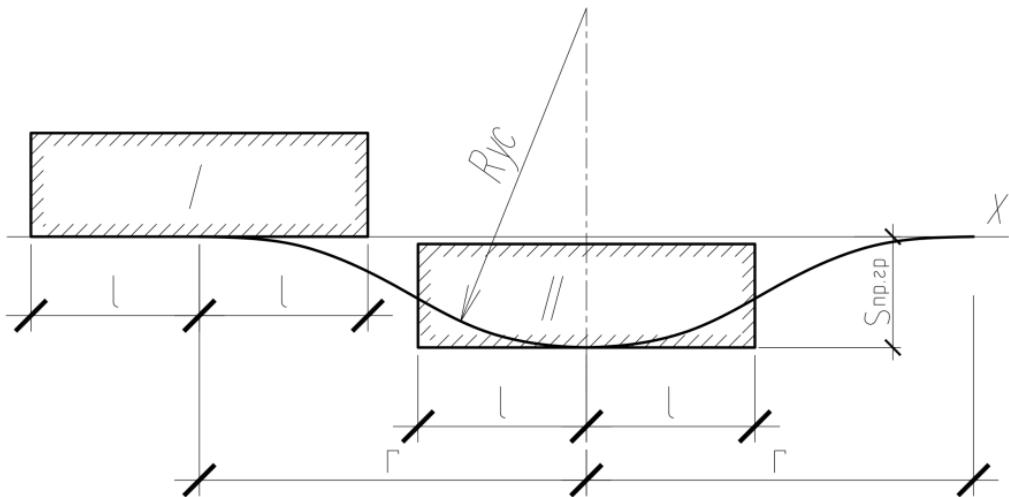


Рис. 1.6. Основные варианты расположения зданий по отношению к просадочной воронке от собственного веса грунта

Расчет конструкций на горизонтальные перемещения грунта при его просадке от собственного веса допускается выполнять по аналогии с расчетом на горизонтальные деформации земной поверхности от подработки [33; 43].

#### 1.4.2. Моделирование грунтового основания

Для определения контактных давлений в основании фундаментов, как правило, используются различные расчетные модели, схематически описывающие механические свойства грунтовой среды.

В связи с многообразием грунтов, отличающихся своими механическими характеристиками, существует большое количество различных моделей грунтового основания, которые можно классифицировать по следующим основным признакам:

- по учету распределительных свойств основания на модели общих деформаций и модели местных деформаций;
- по учету необратимых деформаций на упругие и неупругие;
- по виду зависимости между напряжениями и деформациями на линейные и нелинейные.

Поведение просадочных грунтов, по мнению большинства исследователей, удовлетворительно описывается моделями местных неупругих деформаций, хотя

существует мнение и о необходимости учета распределительных свойств грунта как минимум в зоне незамоченного основания. При этом в зависимости от уровня напряжений в основании от внешней нагрузки может возникать необходимость учета нелинейной деформируемости грунта.

Учет нелинейных деформаций грунтового основания рассмотрен в работах С. Н. Клепикова [4], А. В. Трегуба [26], В. В. Яркина [28], Н. С. Метелюка [34], Ю. К. Зарецкого [44], А. К. Бугрова [45], Д. М. Шапиро [46], М. В. Малышева [47], А. А. Петракова [48] и др. учёных.

Анализ расчетных моделей грунтового основания показал, что для рассматриваемых в настоящей работе задач наиболее приемлемой является модель переменного коэффициента жесткости основания, предложенная С. Н. Клепиковым [4] как универсальная.

Для решения контактной задачи с использованием модели переменного коэффициента жесткости основания при расчете зданий и сооружений непрерывное основание моделируется совокупностью бесконечного множества не связанных друг с другом опорных стержней, жесткости которых характеризуются соответствующими величинами коэффициента жесткости основания  $C$  (рис. 1.5). Непрерывное основание допускается заменять отдельными стержнями, жесткость которых должна быть равна жесткостям заменяемых участков непрерывного основания. Расстояния между отдельными стержнями принимают с учётом требований, предъявляемых к точности получаемого решения контактной задачи. Просадки от собственного веса грунта, не связанные с нагрузкой от сооружения и проявляющиеся в виде вертикальных и горизонтальных перемещений основания, моделируются смещениями опорных сечений стержней [4, 49].

В зависимости от особенностей совместной деформации основания и сооружения модель переменного коэффициента жесткости может приниматься в виде: линейно-упругой системы, работающей на сжатие, растяжение и сдвиг; нелинейно-упругой или неупругой системы, отражающей нелинейную связь между деформациями и нагрузками на основание в стабилизированном состоянии грунта, различие в деформационных свойствах основания при нагружении и разгрузке,

несущую способность основания, нарушение контакта между фундаментом и основанием; реологической системы, отражающей деформационные свойства основания для различных моментов времени в течение строительного и эксплуатационного периодов (нестабилизированное состояние грунта).

#### **1.4.3. Моделирование зданий и сооружений**

При расчёте зданий и сооружений, взаимодействующих с основанием, целесообразно использовать упрощенные расчетные модели для поиска наиболее неблагоприятных исходных расчетных параметров, который ведется в широком диапазоне, а затем уже более точные модели для уточнения НДС, применяемые в более узком диапазоне.

Расчетные модели зданий и сооружений можно разделить на пространственные, плоские и линейные. Для расчета бескаркасных зданий используются различные расчетные схемы в виде стержневых систем, плоских или пространственных систем пластинок, призматических оболочек и др.

При этом линейные и плоские модели, как правило, применяются для упрощенных расчетов и лишь моделирование пространственной системы «здание – фундамент – просадочный грунт» (ЗФГ), учитывающее все виды нагрузок и грунтовых особенностей, позволяет прогнозировать действительный характер осадок и дает возможность предсказать, нужно ли делать усиление и как его делать. Задача определения напряженно-деформированного состояния системы «здание – фундамент – просадочный грунт» в настоящее время, как правило, решается методом конечных элементов [50; 51].

Аналитические методы расчета взаимодействия здания с просадочными грунтами, как правило, применяются для упрощенных расчетных моделей и изложены в работах С. Н. Клепикова [4], А.А. Мустафаева [8], В.И. Крутова [33], Н. С. Метелюка [34], Б. А. Гарагаша [52] и др. ученых.

Суть этих методов сводится к определению максимальных величин обобщенных изгибающих моментов и поперечных сил в плоских или линейных конструкциях эквивалентной жесткости при неравномерных просадках грунтов.

Следствием неравномерных вертикальных перемещений оснований являются крены сооружений, различные формы деформаций изгиба, сдвига и кручения. Эти деформации проявляются как в чистом виде, так и в различных сочетаниях (крен с изгибом и т. п.). Неравномерные горизонтальные перемещения основания воздействуют на подземные части сооружений в результате сдвигающих сил по боковым поверхностям и подошвам фундаментов, а также нормального давления сдвигающегося грунта на боковые поверхности фундаментов. Если конструктивные решения фундаментов не предусматривают полного восприятия ими горизонтальных сил, то надфундаментная часть сооружения будет подвергаться внецентренному сжатию-растяжению или изгибу и сдвигу в горизонтальной плоскости [4; 11; 53].

Расчет бескаркасных зданий на просадочных грунтах детально представлен в работах С. Н. Клепикова [4] и А. С. Трегуба [26].

Инженерные расчеты конструкций на просадочных грунтах, посвященные преимущественно расчетам свайных оснований и армированных массивов, рассмотрены в работах В. И. Крутова [33] и И. К. Попсуенко [54], С. Г. Безволева [55], Д. К. Джоунса [56].

### **1.5. Анализ существующих методов увеличения жесткости основания**

В настоящее время применяются физико-механические, физико-химические и конструктивные методы улучшения прочностных свойств грунтов, обеспечивающие необходимую надежность зданий и сооружений, возводимых на просадочных и других структурно-неустойчивых грунтах [11, 57 – 59].

Каждый из приведенных выше методов применяется в зависимости от определенных условий: состава и характеристик грунтов, особенностей их образования и сложения, регулярности развития дополнительных осадок.

Классификация методов улучшения свойств грунта представлена на рис. 1.7.

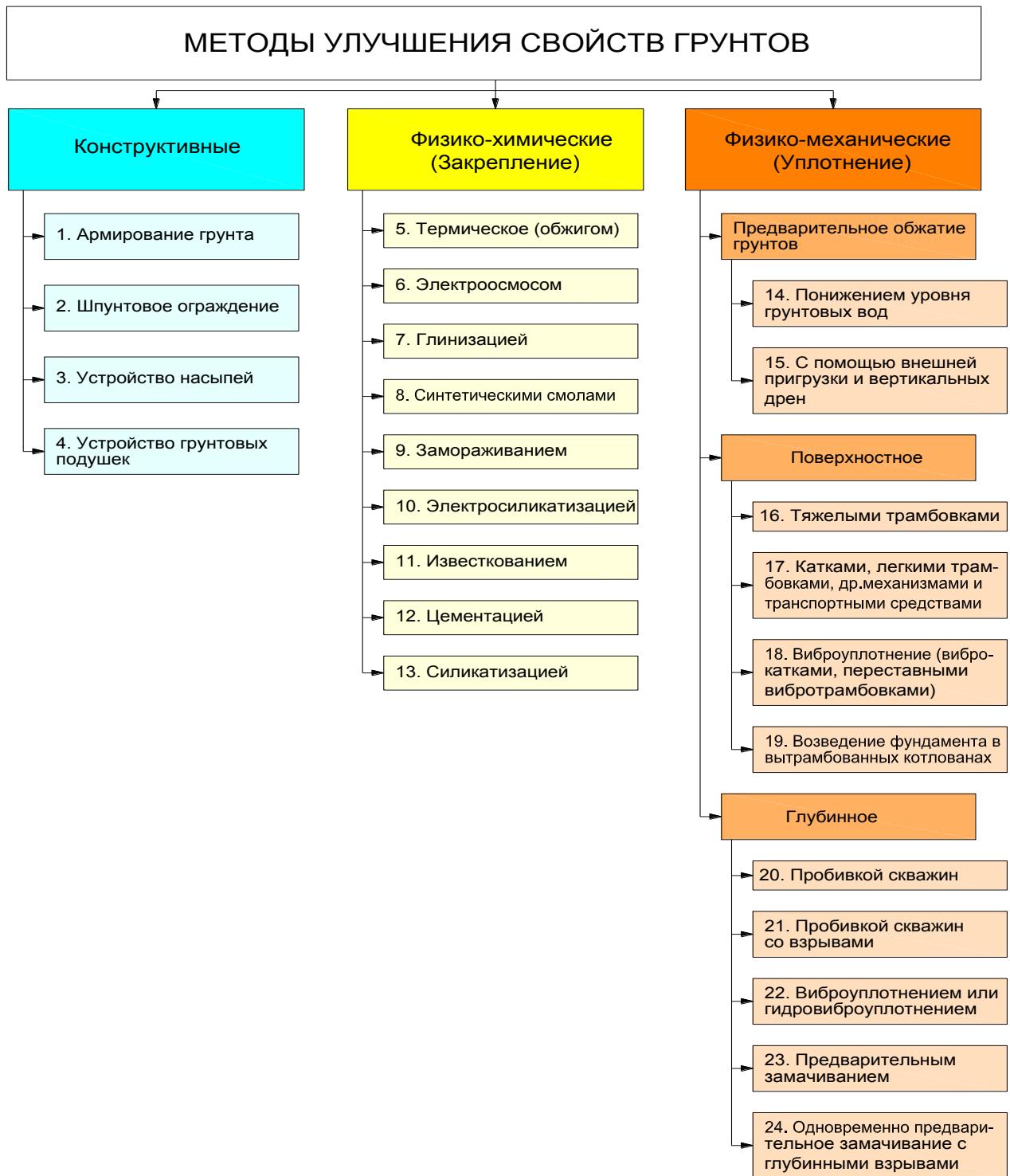


Рис. 1.7. Классификация методов улучшения свойств грунтов

Конструктивные мероприятия принимаются по расчету конструкций на неравномерные деформации основания и направлены:

- на приспособление зданий и сооружений к возможным неравномерным осадкам грунтов (принцип податливости);
- на восприятие конструкциями и узлами их сопряжения дополнительных усилий от неравномерных деформаций основания без существенных деформаций и повреждений (принцип жесткости).

Наиболее применяемым методом устранения влияния просадочных свойств грунтов на здания и сооружения является механическое частичное или полное уплотнение грунтов с доведением их свойств до значений, гарантирующих устойчивость и допустимую осадку возводимых сооружений [3; 6; 60 – 64]. Существует несколько методов уплотнения грунтов:

– поверхностное – в пределах деформируемой зоны основания или её части, уплотняющее воздействие прикладывается с поверхности грунта. Способ основан на уплотнении тяжёлыми (массой 2,5 – 10 т) падающими трамбовками, сбрасываемыми кранами-экскаваторами с высоты 3,5 – 10 м. Мощность уплотняемого слоя зависит от диаметра, веса и высоты сбрасывания трамбовки, а также плотности, влажности и структурной прочности уплотняемых грунтов и может составлять от 2 до 8 м. В пределах большей части уплотненного слоя просадочные свойства полностью ликвидируются, а в остальной его части значительно уменьшаются;

– глубинное – в пределах всей толщи рыхлых грунтов основания, уплотняющее воздействие прикладывается по всей глубине массива или по её части. При уплотнении просадочных грунтов на глубину до 25 м проводятся мероприятия по уплотнению грунтовыми набивными сваями или энергией взрыва.

Недостатки механических способов уплотнения грунтов: выполняемые работы слишком трудоемки и энергоемки; динамические воздействия на грунт основания негативно сказываются на окружающей застройке; проведение работ во многом зависит от климатических условий и свойств уплотняемого грунта.

Самым прогрессивным методом предотвращения неравномерных осадок и последующих деформаций зданий и сооружений является инъекционное закрепление грунтов основания фундаментов [65 – 67].

При инъекционном закреплении грунтов между частицами грунта искусственным путем (нагнетанием инъекционных растворов) создаются дополнительные связи, в результате чего обеспечивается: устранение просадочных свойств; увеличение несущей способности грунтов, снижение их деформативности и водопроницаемости [68]. В зависимости от технологии закрепления, химических процессов, происходящих в грунте при нагнетании растворов, и характера изменения свойств грунтов определяют следующие методы инъекционного закрепления грунтов [69]:

– **цементация** применяется для закрепления крупно-, среднезернистых песков и трещиноватых скальных пород путем нагнетания в грунт цементного раствора через инъекторы. В зависимости от размера трещины и пористости грунта применяют суспензию с отношением цемента к воде от 1:1 до 1:10, а также цементные растворы с добавками глины, песка и других инертных материалов. Радиус закрепления грунтов составляет в скальных грунтах 1,2 – 1,5 м, в крупных песках – 0,5 – 0,75 м, в песках средней крупности – 0,3 – 0,5 м. Цементацию производят нисходящими зонами; нагнетание прекращают при достижении заданного поглощения или в момент, когда снижение расхода раствора достигнет 0,5 л/мин в течение 20 мин. при заданном давлении [70 – 72]. В просадочных грунтах цементация практически не применима из-за очень малого радиуса распространения раствора в пылевато-глинистых грунтах;

– **силикатизация** применяется для повышения прочности, устойчивости и водонепроницаемости песчаных и водонасыщенных грунтов с коэффициентом фильтрации от 2 до 80 м/сут. Способ силикатизации успешно применяется для закрепления грунтов в основаниях существующих зданий в целях ликвидации их просадок [73 – 78]. Силикатизация предполагает введение в грунт специальных растворов на основе «жидкого стекла» (коллоидный раствор силиката натрия). Существуют различные рецептуры активации жидкого стекла следующими растворами: серной, плавиковой, фосфорнокислой кислотами, а также сульфатом алюминия. В зависимости от физико-химических свойств грунта применяют одно- и двухрастворную силикатизацию.

Однорастворная силикатизация представляет собой введение в грунт гелеобразующего раствора, состоящего из двух и более компонентов с вязкостью, близкой к вязкости воды, и с замедленным (заранее заданным) временем гелеобразования. При помощи инъекторов, которые размещаются в массиве грунта, нагнетают силиказоль под давлением 3 – 6 атмосфер. Вода, которая находится в порах грунта, вытесняется и замещается золем, который по истечении определенного времени превращается в гель. Гель закупоривает поры грунта, в результате чего грунт становится водонепроницаемым и приобретает механическую прочность. Важную роль в развитии однорастворной силикатизации сыграл советский ученый, профессор В. В. Аскалонов [65, 79].

Химический процесс укрепления грунтов такими растворами осуществляется за счет силоксановых связей, которые характерны для силикатных полимеров. Эти связи являются устойчивыми по отношению к гидролизующему действию воды, вследствие чего придают грунтовому массиву твердость, жесткость и водонепроницаемость. Например, поликонденсация кремниевой кислоты по своему молекулярному механизму является процессом образования новой силоксановой связи  $-Si - O - Si-$ . Конденсация быстро развивается в сторону разветвления, удлинения и циклизации этих кремнекислородных цепей, в результате чего образуются макромолекулы коллоидных размеров. В ходе гидролиза в тонком слое интенсивно протекают процессы поликонденсации силанольных групп с образованием новых силоксановых связей, одновременно образуются поликремневые кислоты с пространственной трехмерной структурой.

Силикатизация просадочных грунтов основана на хорошем проникании силикатного раствора в грунт и взаимодействии щелочного раствора силиката натрия с лессом, в результате чего происходит мгновенная обменная реакция между катионами натрия и катионами кальция коллоидного поглощающего комплекса лессового грунта.

Начиная с 1931 г. был разработан первый двухрастворный способ силикатизации просадочных грунтов, автором которого является советский учёный в области фундаментостроения, основоположник советской научной школы

химического закрепления грунтов Б. А. Ржаницын [62; 73; 74]. Двухрастворная силикатизация представляет собой последовательное нагнетание в грунт двух растворов: силиката натрия и хлористого кальция. В результате химической реакции между ними образуется гель кремневой кислоты, придающий грунту в короткие сроки высокую прочность и водонепроницаемость. Последовательная подача компонентов в грунт позволяет получить более прочное закрепление грунтовых структур. Первый компонент без отвердителя обладает большей проникающей способностью, и процесс схватывания начинается еще до ввода отвердителя из-за взаимодействия с природными отвердителями, находящимися в самом грунте. Закрепленный таким способом грунтовый массив более однороден, чем при одномоментной подаче компонентов клея в грунт [73].

Преимуществами этого способа являются мгновенный процесс закрепления и быстрое нарастание прочности во времени.

Недостаток заключается в том, что со временем под действием агрессивных вод происходит вымывание силикатного камня из структуры грунта;

– **газовая силикатизация** предназначена для закрепления песчаных и лессовидных грунтов. Отличается от обычной силикатизации тем, что дополняется обработкой силикатизированного грунта небольшим количеством углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), т. е. сначала обрабатывается грунт углекислым газом, затем силикатом натрия, а затем снова нагнетается углекислый газ для отверждения силикатного раствора. Данную тему успешно развивал основоположник отечественной школы закрепления грунтов профессор В. Е. Соколович [75; 76], который предложил способ газовой силикатизации, основанный на применении в качестве отвердителя жидкого стекла углекислого газа  $\text{CO}_2$ ;

– **смолизация** грунтов осуществляется путем нагнетания в грунт водных растворов или смесей из синтетических смол с отвердителем [80; 81]. Плотность раствора зависит от коэффициента фильтрации. Преимуществом смолизации перед однорастворной силикатизацией является возможность более прочного закрепления грунтов. При создании закрепленного массива инъекторы располагаются рядами в шахматном порядке;

– **битумизация** применяется при создании водонепроницаемости грунтов.

Битум подают в грунт с помощью инъекторов в расплавленном состоянии, разогревая до 400°C. В некоторых случаях используют холодную битумизацию, когда в грунт под большим давлением подают битумную эмульсию, состоящую из битума, расщепленного в воде с помощью эмульгатора, превращающего битум в мелкие частицы [82 – 84]. В просадочных грунтах битумизация практически не применима из-за очень малого радиуса распространения битума в пылевато-глинистых грунтах;

– **термический метод (обжиг)** используется при закреплении пылевато-глинистых, в том числе и просадочных грунтов. Этот метод основывается на увеличении прочности структурных связей под действием высоких температур (спекание). Высокие температуры получают с помощью сжигания в пробуренных скважинах (диаметром до 200 мм и глубиной 6... 15 м) горючих материалов, солярного масла, мазута или природного газа. Стоимость термического метода достаточно высока по сравнению с другими методами при диаметре закрепляемого грунта 1,5...3 м [85; 86]. Недостатки – отрицательное влияние на экологию, дороговизна.

Кроме того, в США и Японии для закрепления грунтов применяется химический материал сумисойл, получаемый на основе акриламида. Материал разработан японской фирмой «Сумитомо Кемикал Компани». Сумисойл имеет вид бесцветного порошка, легко растворимого в воде. Подготовленный раствор обладает низкой вязкостью и легко проникает в поры различных тонкозернистых песков и супесей, что определяет достаточно широкие возможности для их закрепления. Однако способ весьма дорогой из-за высокой стоимости сумисойла [87; 88].

## 1.6. Выводы

1. В условиях нового строительства, реконструкции и стесненной застройки на просадочных грунтах конструктивные методы и методы механического уплотнения просадочного грунта не всегда могут обеспечить эксплуатационную

пригодность зданий и сооружений. Существующие химические инъекционные методы позволяют решить имеющиеся проблемы. Однако относительно высокая стоимость и дефицитность химических реагентов не позволяет широко применять их. Поэтому упрочнение структурно-неустойчивых грунтов частичным его закреплением не только по глубине, но и в плане раствором из доступных и экономичных химических реагентов является перспективным методом.

2. Вопросы напряженно-деформированного состояния частично закрепленных (уплотненных) по глубине и в плане грунтовых массивов, проявляющих просадочные свойства, изучены недостаточно. Отсутствует единая теория и методика расчета просадочных грунтов и НДС конструкций зданий и сооружений при частичном устраниении просадочных свойств грунта не только по глубине, но и в плане. Поэтому вопросы постановки экспериментальных испытаний частично закрепленного массива, подбора оптимального закрепляющего раствора, теоретических исследований, вывода расчетных формул для определения прочности и деформативности, проверки достоверности выведенных расчетных формул в сопоставлении с экспериментальными данными для частично закрепленных грунтовых оснований являются актуальными и требуют более глубокого изучения.

3. При обводнении грунтов, обусловленном паводком, разрушением водопроводных коммуникаций, подтоплением территории из-за закрытия шахт и отсутствия откачки шахтных вод, для защиты зданий и сооружений целесообразно использовать эффект Томса [89; 90] и применять водонепроницаемые экраны из силоксановых структур [91; 92]. В этом случае более предпочтительным является использование полимерных присадок, обеспечивающих снижение вязкости жидкости и ускорения процесса обезвоживания.

## РАЗДЕЛ 2. ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОСАДОЧНОГО ГРУНТА, ЗАКРЕПЛЕННОГО РАСТВОРОМ С АНИОНОАКТИВНЫМИ ПОЛИАКРИЛАМИДНЫМИ ДОБАВКАМИ

### 2.1. Математическая модель просадочного грунта

Механизм просадки может быть представлен следующим образом. Вода, проникая в маловлажную высокопористую пылеватую лессовую породу, разрушает водонеустойчивые структурные связи, при этом происходит ее доуплотнение, пористость уменьшается и приходит в соответствие с напряженным состоянием. Крупные агрегаты распадаются, и формируется более плотная упаковка частиц.

Пористость грунта – отношение объема пор ко всему объему грунта, что соответствует объему пор в единице объема грунта:

$$n = (V_2 + V_3)/V, \quad (2.1)$$

где  $V$  – полный объем грунта;

$V_2$  – объем пор, заполненных жидкостью;

$V_3$  – объем пор, заполненных газом.

Внешне этот процесс выражается в уменьшении объема лессовых пород и неравномерном оседании поверхности земли. На поверхности водоразделов, сложенных лессовыми породами, при увлажнении их атмосферными осадками часто формируются просадочные блюдца размерами до 50 – 100 м в поперечнике и глубиной от долей метра до 1 – 2 м.

Несравненно больше просадочные деформации лессовых пород выражены при техногенном замачивании (утечке воды из оросительных каналов, водохранилищ, водонесущих коммуникаций, при интенсивном поливе парков и садов и т. д.).

Одной из основных характеристик просадочного грунта является его просадочность. Просадочность грунта оценивают относительной просадочностью  $\varepsilon_{sl}$ , которую можно определить по данным компрессионных испытаний методом одной или двух кривых [93].

При испытании по методу одной кривой испытание проводится в два этапа: первый этап – образец испытывают при естественной влажности до заданного давления  $P^*$ . Значение  $P^*$  следует принимать равным значению суммарного давления от собственного веса грунта в водонасыщенном состоянии и от проектируемого фундамента или только от веса грунта с учетом веса возможной планировочной насыпи; второй этап – после условной стабилизации осадки образца грунта на последней ступени давления  $h_{n,p}$ , соответствующей  $P^*$ , образец грунта необходимо замочить водой, продолжая замачивание до условной стабилизации просадки  $h_{sat,p}$ . По данным испытаний строят график зависимости высоты образца от давления и характера деформации при замачивании (рис. 2.1).

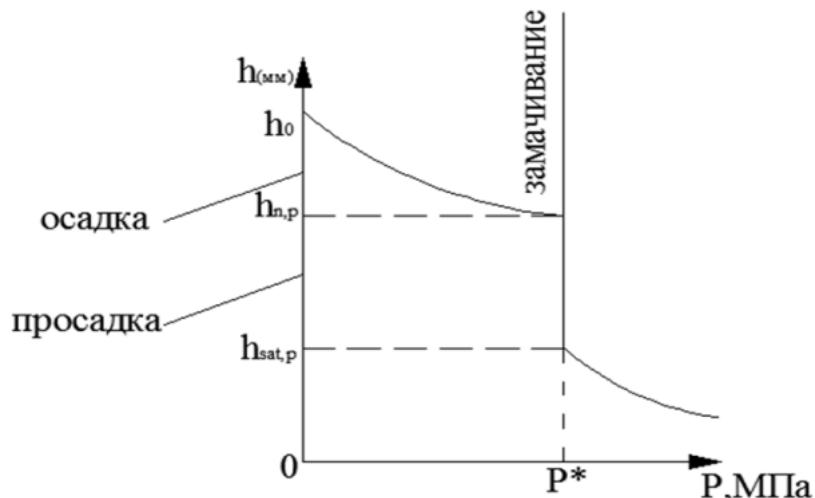


Рис. 2.1. Компрессионная кривая при испытании методом одной кривой.

Относительная просадочность определяется по формуле:

$$\varepsilon_{sl} = \frac{h_{n,p} - h_{sat,p}}{h_0}, \quad (2.2)$$

где  $h_{n,p}$  – высота образца грунта при заданном давлении  $P^*$  до замачивания, мм;  
 $h_{sat,p}$  – высота образца грунта при заданном давлении  $P^*$  после замачивания, мм;  
 $h_0$  – высота образца грунта с природной влажностью при природном давлении, мм.

Просадочность грунта можно также оценить по изменчивости модуля деформации грунта в состоянии природной влажности и в состоянии полного водонасыщения.

Коэффициент жесткости участка основания представляет собой усилие, которое необходимо приложить к единице его поверхности для ее перемещения на величину, равную единице. При определении значений коэффициентов жесткости надлежит учитывать основные параметры физико-механических свойств грунтов, размеры и форму подошвы фундамента, в необходимых случаях неоднородность геологического строения основания, распределительные свойства грунта, характер нагружения, пластические и реологические свойства грунтов.

Коэффициенты жесткости просадочного основания следует определять без учета и с учетом просадочных свойств грунтов, исходя из двух состояний просадочных грунтов по влажности [22].

Коэффициент жесткости основания для грунтовых условий I типа по просадочности:

$$C_I = C \cdot \frac{S}{S + S_d + S_{sl}} \quad (2.3)$$

Коэффициент жесткости основания для грунтовых условий II типа по просадочности:

$$C_{II} = C \cdot \frac{S}{S + S_d + S_{sl,p}}, \quad (2.4)$$

где  $C$  – коэффициент жесткости основания без учета просадочных свойств грунтов;

$S$  – осадка основания без учета просадочных свойств грунтов;

$S_d$  – дополнительная осадка при замачивании непросадочных слоев грунта, находящихся в пределах сжимаемой толщи основания;

$S_{sl}$  – просадка грунтов основания от внешней нагрузки и от собственного веса грунта в пределах сжимаемой толщи основания;

$S_{sl,p}$  – просадка грунтов основания от внешней нагрузки в пределах сжимаемой толщи основания.

Коэффициенты жесткости основания без учета просадочных свойств грунтов:

$$C = \frac{p}{S}, \quad (2.5)$$

где  $S$  – полная осадка основания по рассматриваемой вертикали;

$p$  – нагрузка, приложенная к поверхности основания.

$$S = S_{pl} + S_{el}, \quad (2.6)$$

где  $S_{pl}$  – остаточная осадка;

$S_{el}$  – упругая осадка.

$$S_{pl} = \beta \sum_i^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{z\gamma,i}) \cdot h_i}{E_{pl,i}}, \quad (2.7)$$

где  $\beta$  – безразмерный коэффициент, равный 0,8;

$\sigma_{zp,i}$  – среднее значение вертикального нормального напряжения от внешней нагрузки в  $i$ -ом слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента;

$\sigma_{z\gamma,i}$  – среднее значение вертикального нормального напряжения от веса извлеченного из котлована грунта в  $i$ -ом слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента;

$h_i$  – толщина  $i$ -го слоя грунта;

$E_{pl,i}$  – модуль остаточных деформаций  $i$ -го слоя грунта;

$n$  – число слоев, на которое разбита сжимаемая толща основания.

Упругая осадка основания  $S_{el}$  по расчетной вертикали определяется по формуле:

$$S_{el} = \beta \sum_i^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{z\gamma,i}) \cdot h_i}{E_{el,i}}, \quad (2.8)$$

где  $\sigma_{zp,i}$  – среднее значение дополнительного вертикального нормального напряжения в  $i$ -ом слое грунта по рассматриваемой вертикали;  
 $\sigma_{zg,i}$  – среднее значение вертикального нормального напряжения от веса извлеченного из котлована грунта в  $i$ -ом слое грунта по рассматриваемой вертикали;  
 $E_{el,i}$  – модуль упругих деформаций  $i$ -го слоя грунта.  
 $E_{pl}$ ,  $E_{el}$  определяются по результатам полевых испытаний грунта штампами или лабораторных компрессионных испытаний образцов грунта согласно приложению 12 [22].

При испытании на компрессионном приборе модуль деформации грунтов для заданного интервала давлений рассчитывался по формуле:

$$E = \frac{1 + e_0}{m_0} \beta, \quad (2.9)$$

где  $e_0$  – коэффициент пористости грунта до начала испытаний;

$m_0$  – коэффициент сжимаемости, соответствующий интервалу давления от  $p_i$  до  $p_{i+1}$ ;

$\beta$  – коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения грунта в компрессионном приборе.

При этом для определения модуля общей деформации учитывалась ветвь нагружения компрессионной кривой, а для модуля упругой деформации – ветвь разгрузения.

При нагнетании закрепляющего раствора в грунт происходит заполнение пор раствором, которое сопровождается вытеснением воздуха или воды (при замоченном грунте). Модифицированную пористость в общем виде можно выразить как:

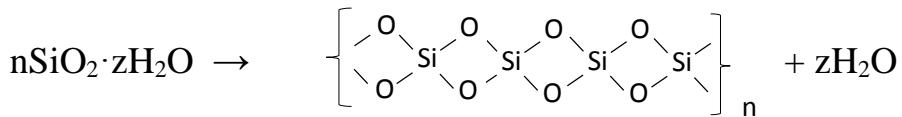
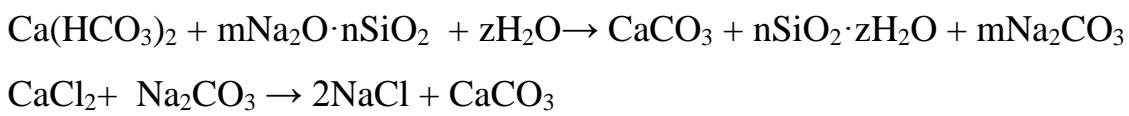
$$V_{ocm} = V_2 + V_3 - V_4, \quad (2.10)$$

где  $V_{ocm}$  – остаточный объем пор, заполненных воздухом и водой,

$V_4$  – объем пор, заполненных раствором.

## 2.2. Исследование и подбор рациональной рецептуры инъекционного раствора

Из научных источников [94; 95] известно применение силикатирования для закрепления слабых грунтов. Однако при использовании силикатирования следует учитывать то, что это мероприятие обеспечит положительный эффект только при полимеризации кремниевой кислоты с образованием силоксановых структур. Согласно химизму процесса жидкое стекло не образует полимерных структур. Полимеризация может происходить при наличии в увлажненном грунте гидрокарбонатных ионов. Процесс происходит по следующей схеме:



Для осуществления полимеризации, очевидно, необходимо наличие кислых ингредиентов. Таким образом, при закреплении грунтов в паводковый период, когда исходная вода практически не содержит кислых соединений, силикатирование не обеспечит положительного эффекта [96; 97].

Возникает необходимость приготовления заранее активированного реагента – активной кремниевой кислоты. Кроме этого, необходимо учитывать требуемую скорость полимеризации. Например, в аварийных ситуациях, когда возникает необходимость создания экрана из силоксановых структур, процесс полимеризации может быть ускорен за счет присадки в закрепляющий раствор катализаторов процесса.

Каталитическим действием обладают ионы фтора. При добавлении указанных ионов в очень малых концентрациях 1 – 2 мг/дм<sup>3</sup> процесс полимеризации ускоряется в несколько раз.

Наиболее подходящей системой, удовлетворяющей всем требованиям, является система, основанная на взаимодействии силикатов натрия с кислотой с образованием SiO<sub>2</sub>. В этой системе, как известно [98], при низких значениях pH

кремнезем вначале полимеризуется до очень небольших дискретных частиц. Этот процесс сопровождается заметным повышением вязкости, что обусловлено связыванием большого количества воды поверхностью частиц. В дальнейшем вязкость системы несколько понижается и после начала процесса агрегации поднимается снова. Помимо этого, образующиеся при взаимодействии силикатов с кислотами коллоидные частицы  $\text{SiO}_2$  представляют собой весьма активные фазы, склонные к адсорбции на поверхности определенных подложек.

Во многих случаях целевые свойства золя определяет размер частиц, например, установлено [99], что оптимальные связующие свойства кремнезоля наблюдаются у частиц с размерами в диапазоне 6÷12 нм, при этом обеспечивается большая поверхность контакта [100].

Одним из важнейших свойств дисперсных систем является их устойчивость [101; 102]. Устойчивость коллоидной системы на основе  $\text{SiO}_2$  характеризуется временем ее жизни в практически неизменном состоянии. Наибольшее теоретическое и практическое значение имеет седиментационная устойчивость, которая характеризует способность системы к равномерному распределению частиц по всему объему системы [103]. Коллоидные системы, особенно лиозоли, имеющие частицы малого размера, обладают достаточно высокой седиментационной устойчивостью [41]. Устойчивое состояние системы достигается за счет уменьшения поверхности (коагуляция) либо уменьшения поверхностного натяжения за счет адсорбции третьего компонента – стабилизатора на границе раздела фаз (стабилизация). Следовательно, присутствие в системе стабилизатора может обеспечивать постоянство размера частиц и служит необходимым условием существования коллоидной системы.

В качестве составляющих для получения активной кремниевой кислоты используются такие компоненты, как жидкое стекло; в качестве активаторов используются кислоты (соляная, ортофосфорная и пр.) или различные варианты их солей [104 – 106].

Эксперимент по подбору рецептур инъекционного раствора проводился в два этапа.

На первом этапе разработка композиционного состава закрепляющего раствора проводилась с использованием метода Бейлиса – смешивание раствора жидкого стекла с раствором реагента, снижением его щелочности на 85%, при появлении золя кремниевой кислоты – его «замораживание» путем добавления воды до определенной концентрации оксида кремния  $\text{SiO}_2$ . «Заморозка» активной кремниевой кислоты проводилась добавлением воды в соотношении 2-х частей к 1-й части золя. Определение щелочности проводилось методом титрования.

Для эксперимента было принято жидкое стекло – силикат натрия  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  по ГОСТ 13078-81 с содержанием  $\text{SiO}_2$  – 24,8 – 34% (средний 29,4%);  $\text{Na}_2\text{O}$  – 8,1 – 13,3% (средний 10,7%), плотностью 1,36 – 1,45 г/см<sup>3</sup> (средний 1,4 г/см<sup>3</sup>); силикатный модуль  $n=2,7 – 3,4$  (средний 3).

Рассматривался ряд кислот и солей (таблица 2.1.) для получения золя, в частности:

- уксусная кислота  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ;
- ортофосфорная кислота  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ;
- соляная кислота  $\text{HCl}$ ;
- сульфат аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ;
- нитрат аммония  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ .

Таблица 2.1. Матрица проведения эксперимента по подбору рецептуры инъекционного раствора

| Реагенты к жидкому стеклу    | % $\text{SiO}_2$ после «заморозки» |   |   |
|------------------------------|------------------------------------|---|---|
|                              | 1                                  | 2 | 3 |
| $\text{CH}_3\text{COOH}$     | +                                  | + | – |
| $\text{H}_3\text{PO}_4$      | +                                  | + | – |
| $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ | +                                  | + | – |
| $\text{NH}_4\text{NO}_3$     | –                                  | – | + |
| $\text{HCl}$                 | –                                  | + | – |

Примечание:

(+) – положительный результат эксперимента;

(–) – отрицательный результат эксперимента (прим. табл. 2.2).

Критерием положительного прохождения эксперимента являлось образование золя активной кремниевой кислоты. При этом фиксировались такие параметры: время золеобразования, мин. и кинематическая вязкость полученного золя,  $\text{мм}^2/\text{с}$ .

Кинематическая вязкость определялась по прибору вискозиметру капиллярному стеклянному ВПЖ-4 (ГОСТ 10028-81).

Перед началом работ была проведена поверка прибора согласно МИ 1748-87 «ГСИ. Вискозиметры капиллярные стеклянные. Методика поверки».

Для исключения случайных ошибок результатов измерения для каждого образца проводилось три параллельных опыта.

Вязкость определялась по формуле:  $V = (g/9,807) * T^* K$ ,  
где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;

$T$  – время истечения жидкости в сек;

$K$  – постоянная вискозиметра по паспорту, равная  $0,9337 \text{ мм}^2/\text{с}$ .

Измерения проводились при температуре среды  $20^{\circ}\text{C}$ .

Результаты эксперимента по подбору состава инъекционного раствора золя по кинематической вязкости сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2. Результаты получения золя кремниевой кислоты при «заморозке» водой

| Реагент получения золя на основе раствора силиката натрия | $C, \%$ | $t^*, \text{мин.}$ | $v, \text{мм}^2/\text{с}$ | Прим.                       |
|---|---------|--------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Уксусная кислота $\text{CH}_3\text{COOH}$                 | 3%      | 176                | 1,976                     |                             |
| Уксусная кислота $\text{CH}_3\text{COOH}$                 | 6%      | 17                 | 1,914                     |                             |
| Уксусная кислота $\text{CH}_3\text{COOH}$                 | 9%      | -                  | -                         | Мгновенное образование геля |
| Ортофосфорная кислота $\text{H}_3\text{PO}_4$             | 3%      | 347                | 1,913                     |                             |
| Ортофосфорная кислота $\text{H}_3\text{PO}_4$             | 6%      | 1,0                | 1,901                     |                             |

## Продолжение таблицы 2.2

|                                    |    |      |       |                                   |
|------------------------------------|----|------|-------|-----------------------------------|
| Ортофосфорная кислота<br>$H_3PO_4$ | 9% | -    | -     | Мгновенное<br>образование геля    |
| Сульфат аммония<br>$(NH_4)_2SO_4$  | 3% | 1412 | 1,948 |                                   |
| Сульфат аммония<br>$(NH_4)_2SO_4$  | 6% | 4    | 1,774 |                                   |
| Сульфат аммония<br>$(NH_4)_2SO_4$  | 9% | -    | -     | Образование<br>хлопьев в растворе |
| Нитрат аммония<br>$NH_4NO_3$       | 3% | -    | -     | Нет процесса<br>золеобразования   |
| Нитрат аммония<br>$NH_4NO_3$       | 6% | -    | -     | Нет процесса<br>золеобразования   |
| Нитрат аммония<br>$NH_4NO_3$       | 9% | 184  | 1,883 |                                   |
| Соляная кислота<br>$HCl$           | 3% | -    | -     | Нет процесса<br>золеобразования   |
| Соляная кислота<br>$HCl$           | 6% | -    | -     | Нет процесса<br>золеобразования   |
| Соляная кислота<br>$HCl$           | 9% | 15   | 2,101 |                                   |

Примечание:

С – содержание оксида кремния в золе до его «замораживания»;

$t^n$  – время получения коллоидного раствора с момента взаимодействия реагентов;

$\nu$  – кинематическая вязкость раствора золя.

На втором этапе по положительным опытам первого этапа был проведен ряд экспериментов получения золя активной кремниевой кислоты с «заморозкой» его раствором поликариламида, который служит для снижения вязкости раствора, укрупнения молекул, и, как следствие, повышаются характеристики закрепленного грунта; также способствует улучшению дегидратации грунтового основания; увеличивает скорость фильтрации жидкости. Появляется эффект Томса [89; 90; 107].

Управляемым фактором при проведении эксперимента являлось содержания оксида кремния (%) в полученном золе активной кремниевой кислоты при различных реагентах золеобразования.

При проведении эксперимента фиксировались следующие параметры:

- время золеобразования, мин;
- кинематическая вязкость,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ;
- концентрация оксида кремния  $\text{SiO}_2$  в золе, %;
- время стабильности раствора золя, дней;
- pH раствора золя.

Значения фактора температуры реагентов и окружающей среды ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) устанавливались постоянными для всех серий экспериментов.

При этом пропорции реагентов подбирались по молекулярной массе из расчета выхода в составе золя 3 – 9%  $\text{SiO}_2$  или в концентрации «замороженного» золя – 1 – 3%.

«Заморозка» активной кремниевой кислоты проводилась с добавлением 0,05% водного раствора анионоактивного полиакриламида Ecofloc (ТУ 2414-002-74301823-2007) [50, 108].

Выделяют молекулярно-кинетические свойства, оптические свойства, электрокинетические свойства коллоидных растворов.

Для обеспечения закрепления грунта интерес представляют следующие факторы:

- кинематическая вязкость,  $\nu$ ,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ;
- проницаемость грунта (рассмотрено в п. 2.4).

С составами, которые дали положительную реакцию на образование золя, были проведены опыты с добавлением анионоактивного полиакриламида Ecofloc (плотность ( $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{г}/\text{см}^3$ : 1,302) в соотношении не более 0,5 мг/литр, вязкость которого составила  $5,129\text{ } \text{мм}^2/\text{с}$ , плотностью 1,302  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Таблица 2.3. План проведения эксперимента по подбору рецептуры инъекционного раствора с «заморозкой» раствором ПАА

| Реагенты к жидкому стеклу                       | % SiO <sub>2</sub> после «заморозки» |   |   |   |
|---|--------------------------------------|---|---|---|
|   | 1                                    | 2 | 3 | 4 |
| CH <sub>3</sub> COOH                            | +                                    | + | – | – |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                  | +                                    | + | – | – |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | +                                    | + | – | – |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                 | –                                    | – | + | + |
| HCl   | –                                    | – | + | – |

Примечание:

(+) – проводился согласно положительным результатам эксперимента с «заморозкой» водой;

(–) – не проводился по отрицательным результатам 1-го этапа эксперимента (таблица 2.2).

Экспериментальные исследования проводились как ряд однофакторных экспериментов с различными составами растворов.

При проверке однородности результатов параллельных опытов математическое ожидание оценивалось средним арифметическим значением:

$$M(x) = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.11)$$

где  $x_i$  – результат отдельного измерения;

$n$  – объем выборки.

Дисперсия оценивается статистической дисперсией:

$$D(x) = S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (2.12)$$

При этом дисперсия составила в интервале  $D(x) [0,0379 \dots 0,00012]$ , а среднеквадратичное отклонение  $\sigma(x) [0,194 \dots 0,011]$ .

Задавшись доверительной вероятностью (надежностью)  $\alpha = 0,95$  и среднеарифметической ошибкой, которая в нашем случае не должна превышать 10% при определении вязкости, определяется критерий Стьюдента [109; 110]:

$$t_{ct} = \frac{K_{\text{доп}}}{S_n^2} \sqrt{n}, \quad (2.13)$$

где  $K_{\text{доп}}$  – среднеарифметическая ошибка (обычно  $K_{\text{доп}} = 0,05 \dots 0,1$ ).

$$t_{cm} = \frac{0,1}{0,0379} \sqrt{3} = 4,570$$

Сравнив результат расчетов с табличным значением коэффициента Стьюдента, определяется необходимое число экспериментов.

Для экспериментов по определению вязкости число повторов составило 3.

Таблица 2.4. Данные проведения эксперимента по подбору рецептуры инъекционного раствора с «заморозкой» раствором ПАА

| Реагенты к жидкому стеклу                       | % SiO <sub>2</sub> после «заморозки» |       |       |       |
|---|--------------------------------------|-------|-------|-------|
|   | 1                                    | 2     | 3     | 4     |
| CH <sub>3</sub> COOH                            | 5,314                                | 4,992 | 0     | 0     |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                  | 2,154                                | 2,076 | 0     | 0     |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 4,896                                | 5,343 | 0     | 0     |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                 | 0                                    | 0     | 4,659 | 2,104 |
| HCl   | 0                                    | 0     | 4,597 | 0     |

Примечание:

- значения в таблице – кинематическая вязкость раствора, мм<sup>2</sup>/с;

- 0 – эксперимент не проводился.

Результаты проведения эксперимента по получению раствора активной кремниевой кислоты с применением ПАА с усредненными показателями представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Результаты получения золя кремниевой кислоты при «заморозке» раствором ПАА

| Реагент получения золя на основе раствора силиката натрия       | C, % | C <sub>3</sub> , % | t <sup>п</sup> , мин. | v, мм <sup>2</sup> /с |
|---|------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| Сульфат аммония (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 6    | 2                  | 4                     | 5,343                 |
| Уксусная кислота CH <sub>3</sub> COOH                           | 3    | 1                  | 176                   | 5,314                 |
| Сульфат аммония (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 3    | 1                  | 1412                  | 4,896                 |
| Нитрат аммония NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                  | 9    | 3                  | 184                   | 4,659                 |
| Нитрат аммония NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                  | 12   | 4                  | 29                    | 4,597                 |
| Ортофосфорная кислота H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>            | 3    | 1                  | 347                   | 2,154                 |
| Соляная кислота HCl   | 9    | 3                  | 15                    | 2,104                 |
| Ортофосфорная кислота H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>            | 6    | 2                  | 1,0                   | 2,076                 |

Примечание:

C – содержание оксида кремния в золе до его «замораживания»;

C<sub>3</sub> – содержание оксида кремния в золе после его «замораживания» раствором ПАА;

t<sup>п</sup> – время получения коллоидного раствора с момента взаимодействия реагентов;

v – кинематическая вязкость раствора золя.

Образование золя при реакции раствора силиката натрия с соляной кислотой преимущественно не рассматривалось из-за первоначального расслоения массы на гель-золь с последующим сложным технологическим процессом получения золя, описанным Л. Н. Нажаровой [111].

Выявлено, что образование золя кремниевой кислоты с реакцией по кислотам оказалось предпочтительней со слабыми кислотами – как по полученной вязкости, так и по времени гелеобразования.

В качестве закрепляющего состава был выбран золь кремниевой кислоты, полученный реакцией жидкого стекла с сульфатом аммония и содержанием оксида кремния 6% в растворе до его «заморозки» [112; 113]. Закрепление раствора

осуществлялось разбавлением полученного золя в соотношении 1:2 с водным раствором анионоактивного полиакриламида Ecofloc.

Химический процесс закрепления просадочных грунтов (рис. 2.2) такими растворами осуществляется за счет силоксановых связей, которые характерны для силикатных полимеров.

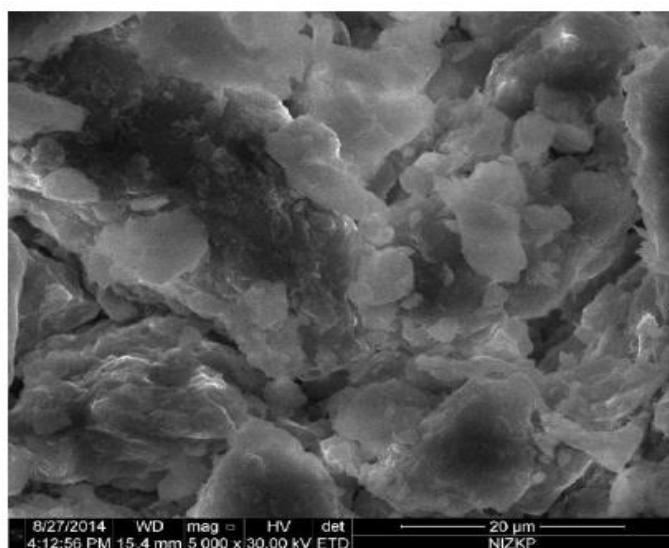
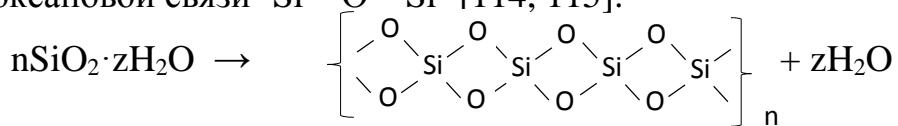


Рис. 2.2. Микроструктура просадочного грунта

Эти связи являются устойчивыми по отношению к гидролизующему действию воды, вследствие чего придают грунтовому массиву твердость, жесткость и водонепроницаемость. Например, поликонденсация кремниевой кислоты по своему молекулярному механизму является процессом образования новой силоксановой связи  $-Si-O-Si-$  [114, 115]:



Конденсация быстро развивается в сторону разветвления, удлинения и циклизации этих кремнекислородных цепей, в результате чего образуются макромолекулы коллоидных размеров. В ходе гидролиза в тонком слое интенсивно протекают процессы поликонденсации силанольных групп с образованием новых силоксановых связей, одновременно образуются поликремневые кислоты с пространственной трехмерной структурой [92; 100; 116] (рис. 2.3).

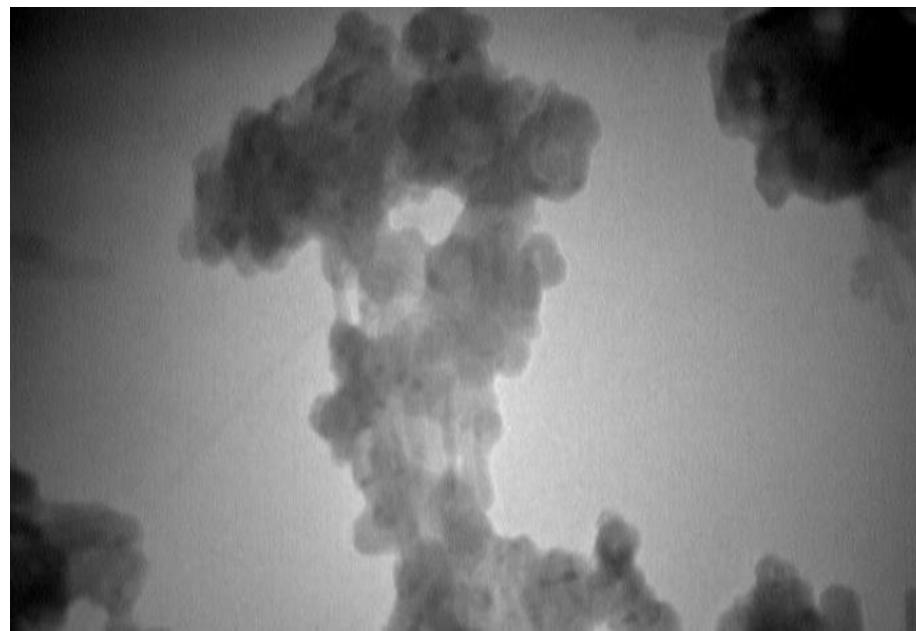
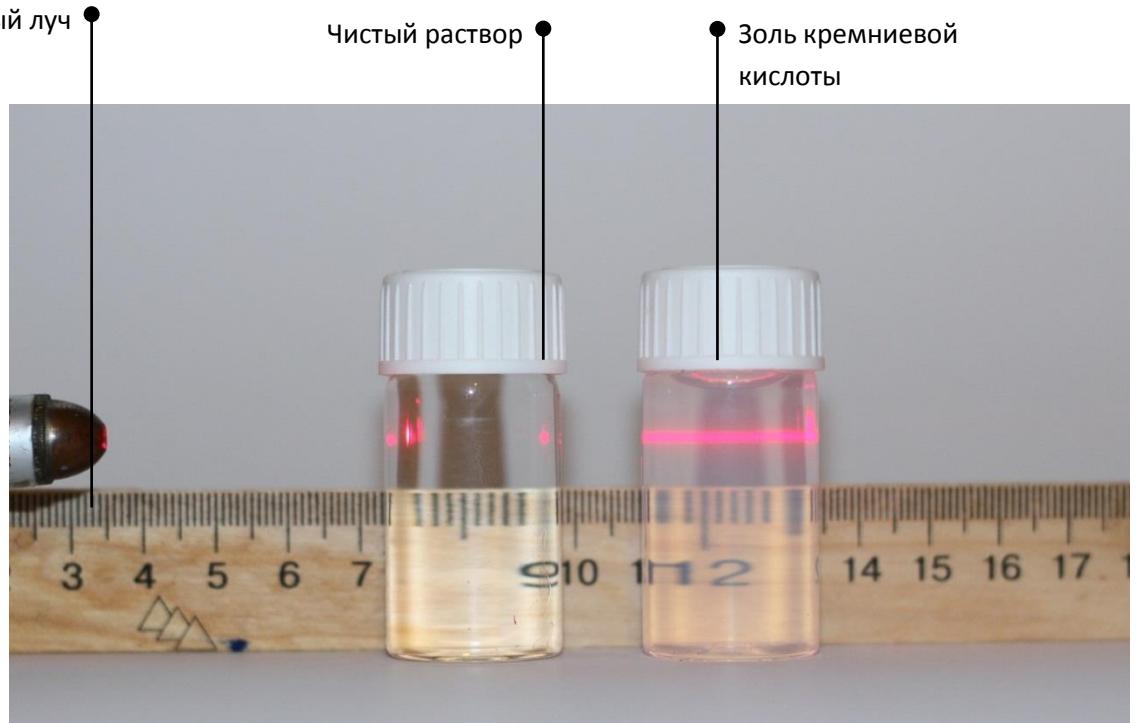


Рис. 2.3. Снимок наночастиц силикагеля (1 см=60 нм). Частицы силикагеля имеют сферическую форму, их размер распределен в области 30 – 60 нм

Реакцию получения в общем виде можно представить так:



Рис.  
2.4.



Наблюдаемый эффект Фарадея-Тиндаля в полученном золе кремниевой кислоты в сравнении с «чистым» раствором ( $\text{H}_2\text{O}$ )

Наблюдаемое явление опалесценции в коллоидном растворе (рис. 2.4) приводит к возникновению эффекта Фарадея-Тиндаля: луч света в дисперсной системе становится видимым [117; 118]. Светорассеяние наблюдается, когда длина световой волны (в эксперименте луч красного лазера 650 – 670 нм) больше размера частиц дисперсной фазы (1 – 100 нм [100; 119]).

### **2.3. Оценка характеристик грунта, закрепленного различными инъекционными растворами**

#### **2.3.1. Методики экспериментальных исследований**

##### **2.3.1.1. Экспериментальные стенды, приборы и оборудование**

Использованное оборудование:

1) установка для исследования тиксотропных характеристик грунтов (рис. 2.5);

2) прогибомер Максимова 6-ПАО-0,1

Цена деления шкалы, мм – 0,1.

Диапазон измерений, мм – 0 – 100;

3) секундомер Счет-1М

Диапазон измеряемых интервалов – от 0,01 с до 99999,9 с. Дискретность – от 0,001 с.

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения в диапазоне рабочих температур – от 0 до 50°C:

– при выпуске секундометра из производства – не более  $\pm (10 \times 10^{-5} \times T + C)$  с,

– в течение срока службы секундометра – не более  $\pm (15 \times 10^{-5} \times T + C)$  с,

где: Т – значение измеряемого интервала в с,

С – дискретность измерений в данном интервале;

4) весы лабораторные 4-го класса точности ТЛТ-200

Предел взвешивания/масса весов, кг – 0,2/3,5.

Дискретность, мг – 20.

### 2.3.1.2. План экспериментальных исследований

При исследовании процессов закрепления грунтов наибольшее распространение получил метод оценки глубины и скорости погружения конуса в закрепленный грунт [120; 121]. Однако при использовании такого метода условия эксперимента не соответствуют практическим условиям. На практике среда, в которой «работают» элементы зданий и сооружений, находится в движении. Поэтому для исследования процесса закрепления возникает необходимость создания конструкции, в которой обеспечивается возможность перемещения элементов по отношению к среде. Для этих целей была разработана установка, представленная на рис. 2.5.

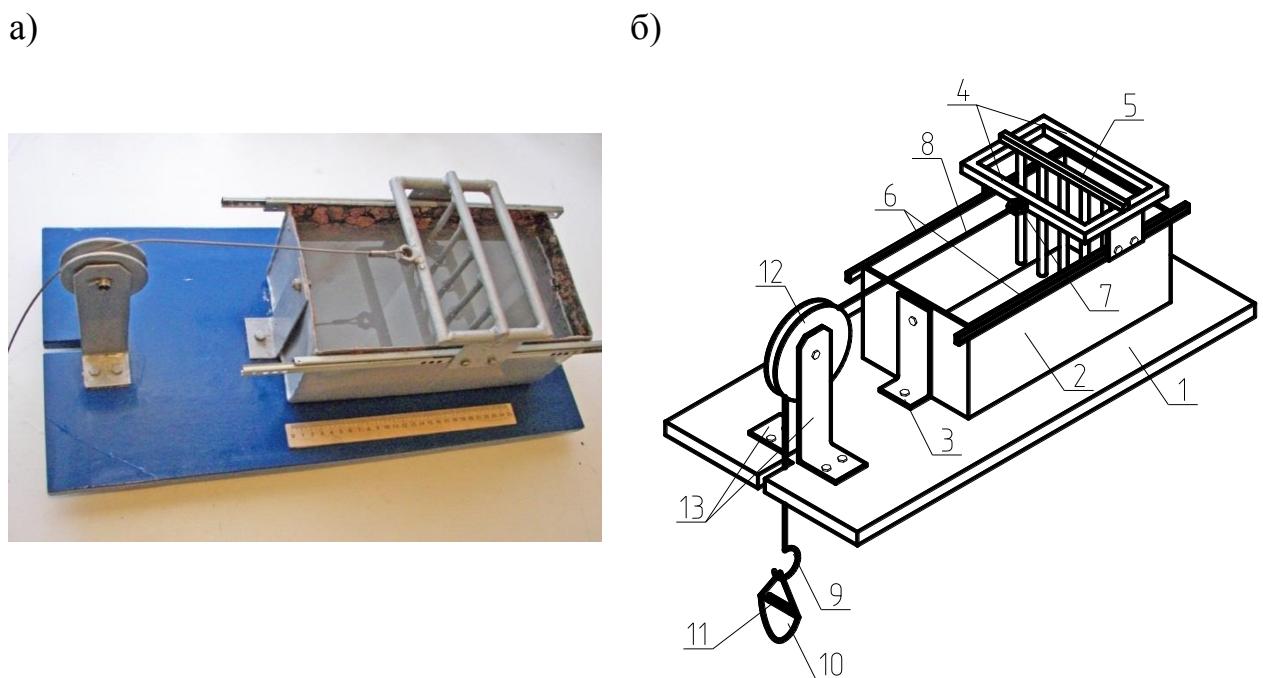


Рис. 2.5. а) фотография экспериментальной установки; б) схема экспериментальной установки по оценке тиксотропных характеристик: 1 – база с размерами в плане 580×280 мм; 2 – короб с гидроизоляцией; 3 – элементы крепления; 4 – каркас; 5 – решетка (металлический прут, 5 шт, диаметром 6 мм, длиной 145 мм); 6 – металлические шариковые направляющие; 7 – буксировочное кольцо; 8 – металлический трос; 9 – крюк; 10 – чаша; 11 – груз; 12 – направляющий ролик; 13 – крепление ролика к базе.

Принцип работы установки заключается в следующем:

- в короб 2 загружается исследуемое вещество определенного объема или массы;
- решетка 5 устанавливается в крайнее правое положение и фиксируется;
- опытным путем определяется начальное сдвиговое значение нагрузки 11;
- нагружение нагрузкой (Р) происходит ступенчато, с определенным шагом, при этом каркас 4 с решеткой 5 под действием фиксированного груза посредством шариковых направляющих выполняет перемещение в закрепленном грунте в пределах короба, тем самым моделируя напряженно- деформируемое состояние исследуемого образца;
- при каждом нагружении фиксировалось время движения решетки до ее остановки (t) и пройденный путь (L). Данные заносились в журнал испытания;
- после каждого замера каркас 4 возвращается в исходное положение, а структура испытываемого образца восстанавливается до однородной.

Серия опытов проводилась при температуре окружающей среды и растворов 20 °C, природной влажности грунта. Масса грунта для каждого опыта была принята 2 кг. Соотношение вводимой массы раствора к грунту и типы исследуемых растворов представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6. План проведения эксперимента по определению характеристик грунта, закрепленного различными инъекционными растворами

| Содержание раствора в грунте | Растворы |               |  |   |   |   |
|------------------------------|----------|---------------|--|---|---|---|
|                              | Вода     | Жидкое стекло | Раствор активной кремниевой кислоты и ПАА с содержанием SiO <sub>2</sub> , % |   |   |   |
|                              |          |               | 0,5  | 1 | 2 | 3 |
| 50%                          | +        | +             | +  | + | + | + |
| 30%                          | +        | +             | +  | + | + | + |
| 15%                          | +        | –             | +  | + | + | – |

Примечание:

(+) – положительный результат эксперимента;

(–) – отрицательный результат эксперимента.

Серия опытов с отрицательным результатом вызвана высокой жесткостью полученной смеси грунта и раствора и неоднородностью полученной массы, ввиду этого – невозможностью проведения замеров на полученном образце.

При этом по полученным данным для образца определяются следующие характеристики:

1. Скорость движения  $V=L/t$ , мм/с.
2. Жесткость образца  $G=P/L$ , Н/м.
3. Количество движения  $K=P*V$ , Н\*м/с.
4. Напряжение  $\sigma=P/S$ , Па,

где  $S$  – рабочее сечение решетки, погруженной в испытуемый образец,  $\text{м}^2$ .

5. Текущая вязкость  $\mu=(P*t)/S$ , Па\*с.

### **2.3.2. Характеристики зон локального закрепления грунта**

Были проведены испытания:

- по закрепляющим растворам (жидкое стекло, раствор жидкого стекла 3:1, золь кремниевой кислоты 1%  $\text{SiO}_2$ , золь кремниевой кислоты 2%  $\text{SiO}_2$ ) при различных температурах раствора;
- по просадочному грунту в водонасыщенном состоянии, а также с закрепляющими растворами жидкого стекла и золя кремниевой кислоты при различных их содержаниях в грунте.

Полученные данные приведены в приложении Б.

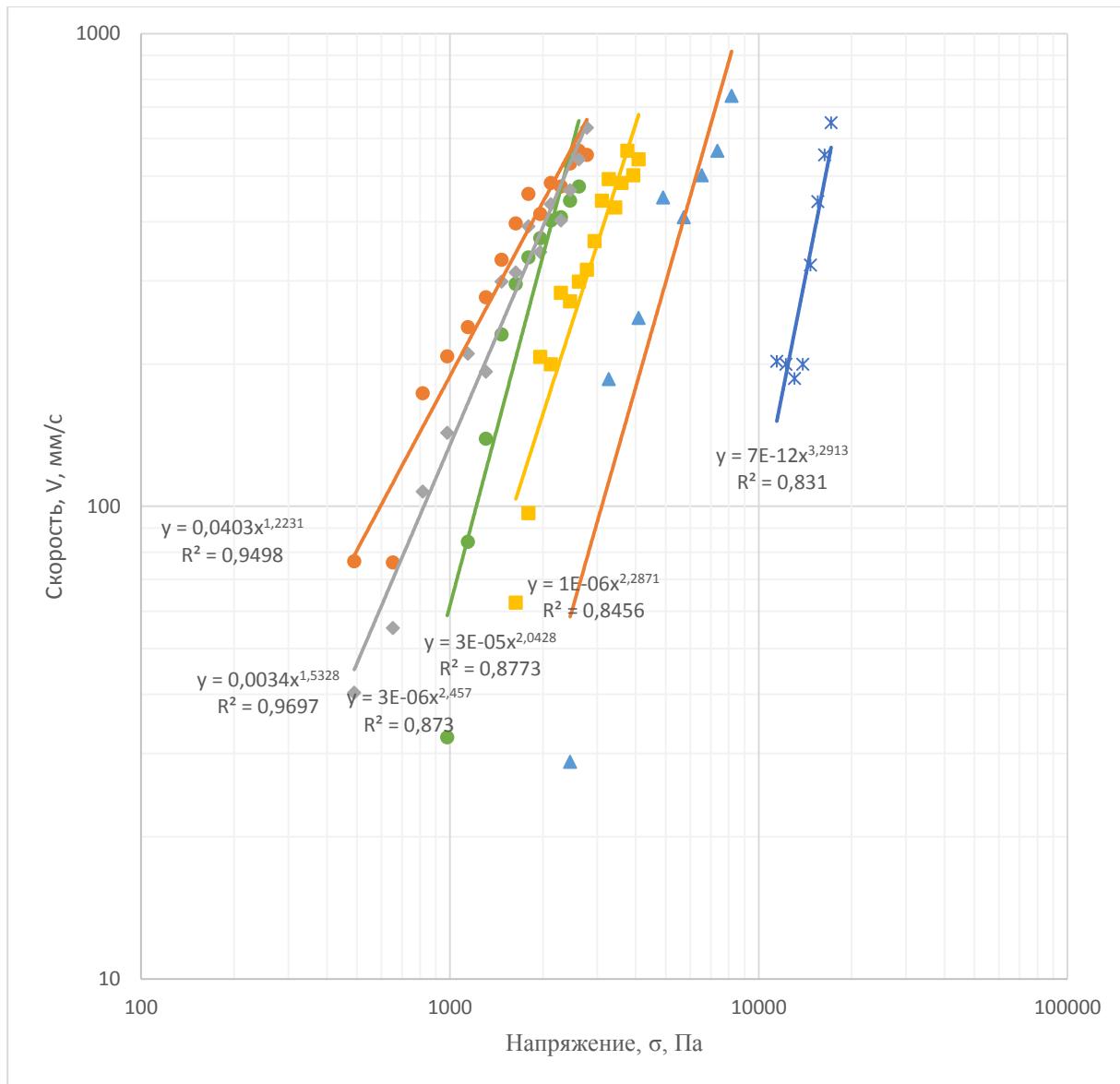


Рис. 2.6. Соотношение скорости смещения грунта от напряжения при различных закрепляющих составах в грунте при 50% отношении, где:

- Хрест 50% кремниевой кислоты (3% SiO<sub>2</sub>); Квадрат 50% кремниевой кислоты (1% SiO<sub>2</sub>); Круг 50% воды; Треугольник 50% кремниевой кислоты (2% SiO<sub>2</sub>); Кружок 50% кремниевой кислоты (0,5% SiO<sub>2</sub>); Шестиугольник 50% жидкого стекла;
- степенная (50% кремниевой кислоты (3% SiO<sub>2</sub>)); Желтый квадрат степенная (50% кремниевой кислоты (1% SiO<sub>2</sub>)); Оранжевый квадрат степенная (50% воды); Синий треугольник степенная (50% кремниевой кислоты (2% SiO<sub>2</sub>)); Зеленый кружок степенная (50% кремниевой кислоты (0,5% SiO<sub>2</sub>)); Серый шестиугольник степенная (50% жидкого стекла)

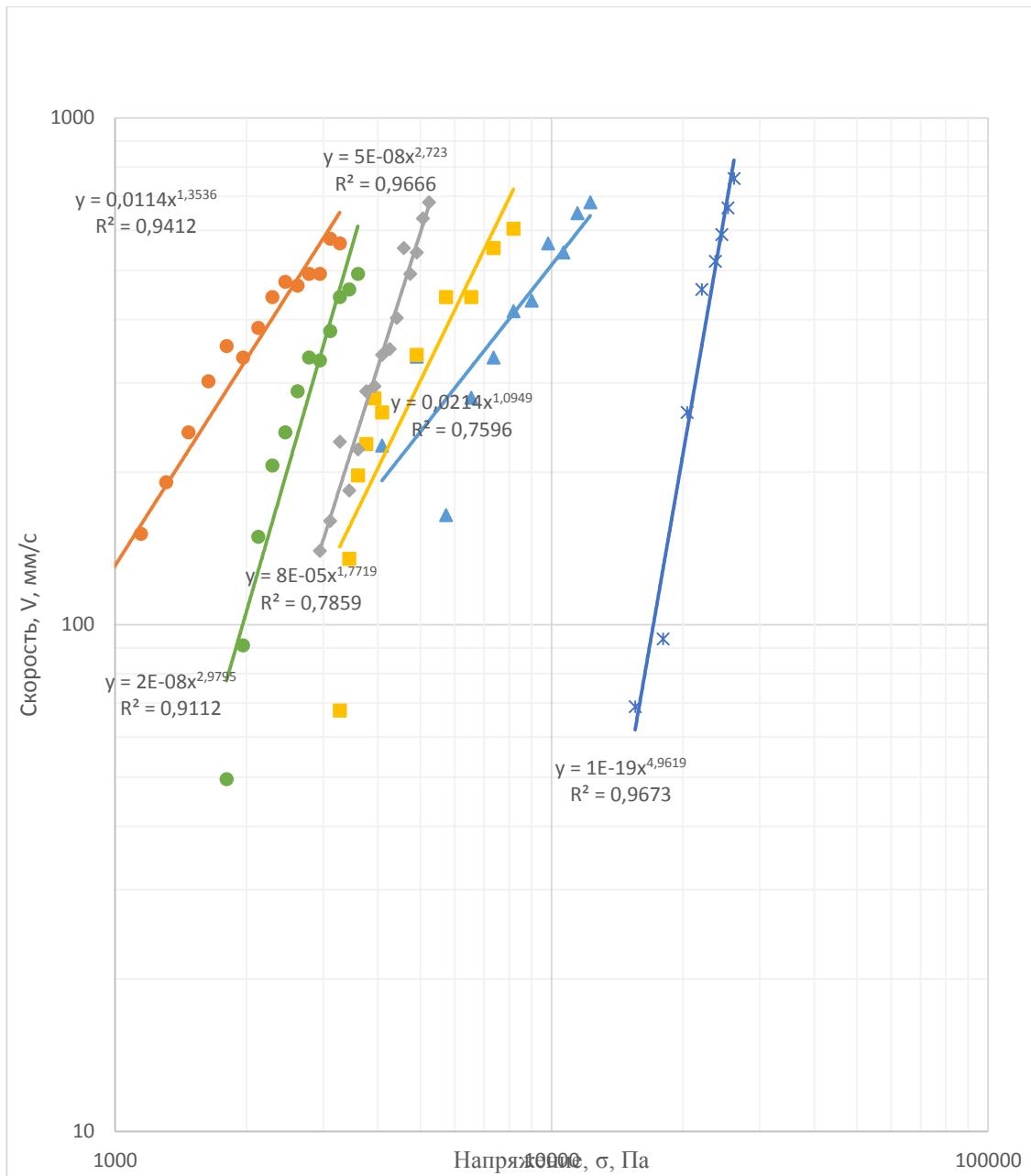


Рис. 2.7. Соотношение скорости смещения грунта от напряжения при различных закрепляющих составах в грунте при 30% отношении, где:

- ✖ 30% кремниевой кислоты (3%  $\text{SiO}_2$ ); ■ 30% кремниевой кислоты (1%  $\text{SiO}_2$ ); ● 30% воды; ▲ 30% кремниевой кислоты (2%  $\text{SiO}_2$ ); ● 30% кремниевой кислоты (0,5%  $\text{SiO}_2$ ); ◆ 30% жидкого стекла; — степенная (30% кремниевой кислоты (3%  $\text{SiO}_2$ )); — степенная (30% кремниевой кислоты (1%  $\text{SiO}_2$ )); — степенная (30% воды); — степенная (30% кремниевой кислоты (2%  $\text{SiO}_2$ )); — степенная (30% кремниевой кислоты (0,5%  $\text{SiO}_2$ )); — степенная (30% жидкого стекла)

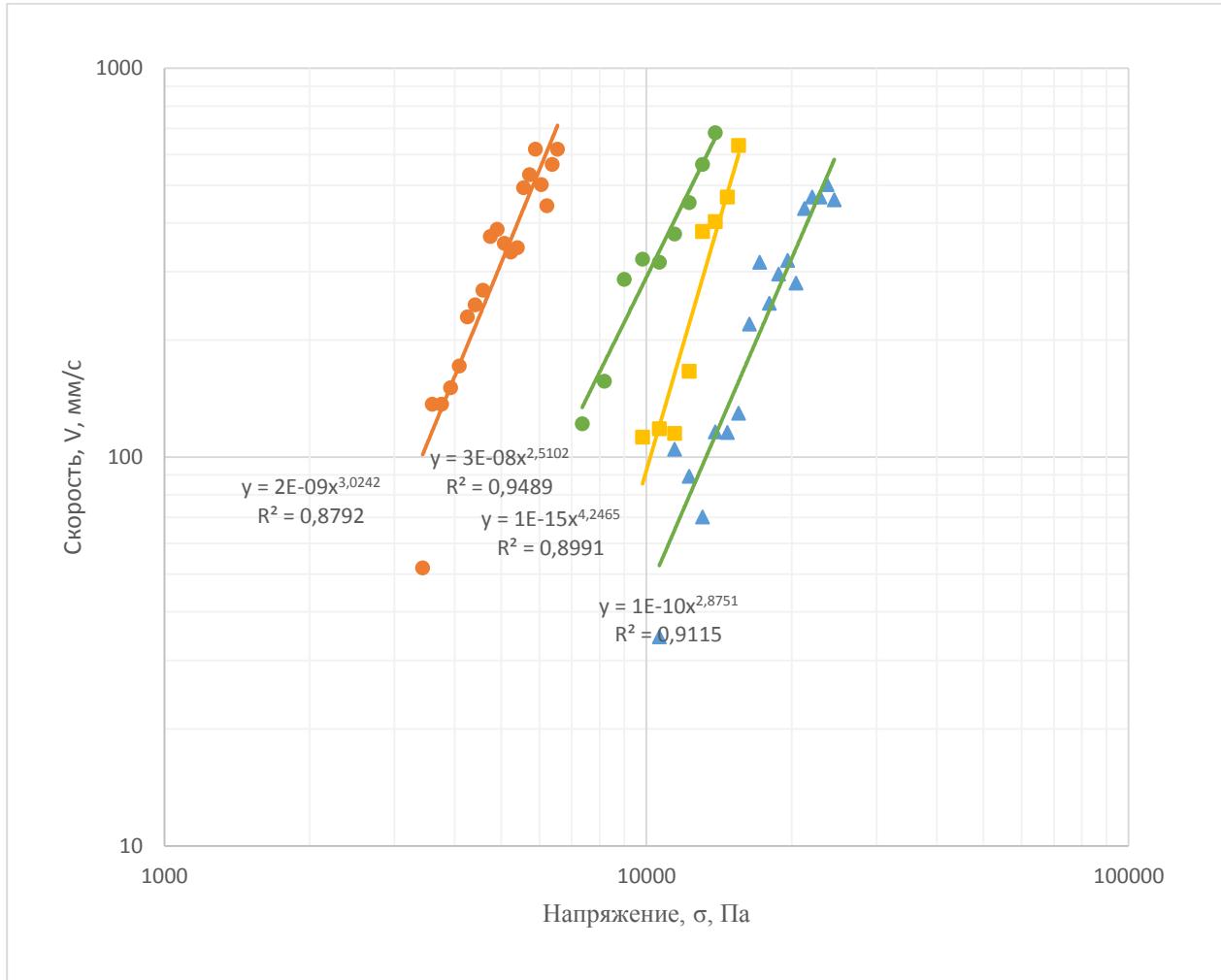


Рис. 2.8. Соотношение скорости смещения грунта от напряжения при различных закрепляющих составах в грунте при 15% отношении, где:

- 15% воды; ● 15% кремниевой кислоты (0,5% SiO<sub>2</sub>); ▲ 15% кремниевой кислоты (2% SiO<sub>2</sub>); ■ 15% кремниевой кислоты (1% SiO<sub>2</sub>);
- степенная (15% воды); — степенная (15% кремниевой кислоты (0,5% SiO<sub>2</sub>)); — степенная (15% кремниевой кислоты (1% SiO<sub>2</sub>));
- степенная (15% кремниевой кислоты (2% SiO<sub>2</sub>))

Так, наблюдаем, что большей скоростью и меньшей вязкостью обладает грунт при водонасыщении водой. Раствор активной кремниевой кислоты обладает большей жесткостью по сравнению с жидким стеклом, притом жесткость раствора увеличивается при увеличении содержания SiO<sub>2</sub> в растворе золя кремниевой кислоты.

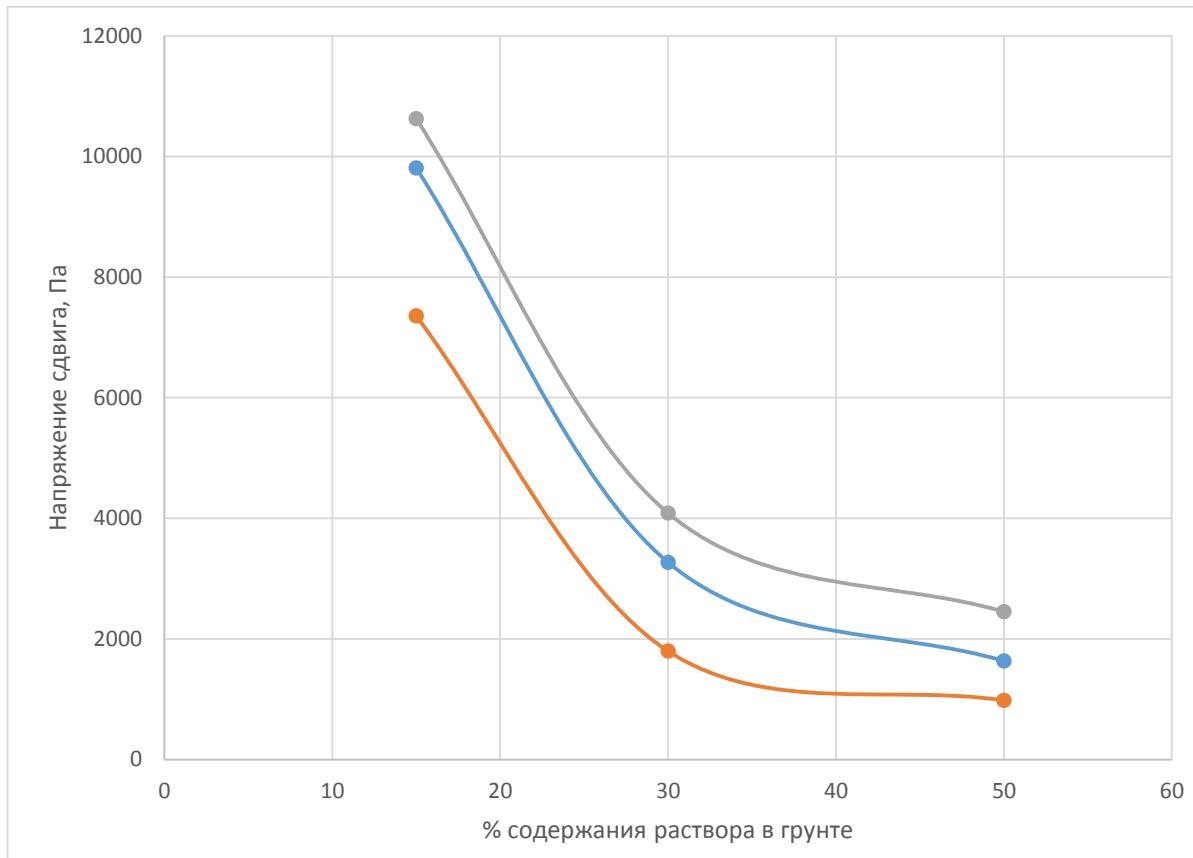


Рис. 2.9. Зависимость напряжения сдвига грунта от процента содержания раствора в грунте при разных концентрациях  $\text{SiO}_2$  в растворе, где: —●— 0,5%  $\text{SiO}_2$ ;  
 —●— 1%  $\text{SiO}_2$ ; —●— 2%  $\text{SiO}_2$ ;

Из рисунка 2.9 видно, что напряжение сдвига при концентрации раствора в грунте выше 30% практически не меняется и резко возрастает при снижении концентрации менее 30%. Характерно, что при равных концентрациях растворов в грунте чем выше содержание  $\text{SiO}_2$ , тем больше напряжение сдвига [122].

## 2.4. Деформационные характеристики закрепленного просадочного грунта

Эксперимент планировался как однофакторный для одного типа просадочного грунта с заданными постоянными характеристиками для относительной оценки влияния закрепляющего раствора на просадочные свойства грунта и модуль деформации.

Таблица 2.7. Эксперимент на приборе КПр-1

| Вид грунта          | Модуль деформации грунта при заданном давлении без закрепления грунта | Модуль деформации грунта при заданном давлении с закреплением грунта |
|---------------------|---|--|
| Просадочный грунт 1 | +   | +  |

(+) – проведенный эксперимент.

Подготовка образцов грунта для испытания производилась в соответствии с требованиями п. 5.4.1.4 ДСТУ Б В.2.1-4-96 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» [123 – 126].

Определение характеристик просадочного грунта выполнялось по методике ГОСТ 23161-2012. «Грунты. Метод лабораторного определения характеристик просадочности» [93, 127].

Образцы грунта отбирались из монолита рабочим кольцом компрессионного прибора методом режущего кольца по ГОСТ 5180.

Рабочее кольцо прибора КПр-1 (рис. 2.11, 2.12) имеет высоту 25 мм, внутренний диаметр 87,4 мм и площадь 60 см<sup>2</sup>. Нагрузка на штамп прикладывалась ступенями с полной стабилизацией осадки и просадки от предыдущей ступени.

Нагружение образца проводилось пошагово, с первоначальным весом 1,5 кг и с учетом веса штанги с давлением 0,02842 МПа и в дальнейшем – с увеличением нагрузки по 3 кг, увеличивая каждый раз давление на штамп на 0,049 МПа. Испытания проводились по трем образцам грунта с закреплением и без закрепления раствором.

Определение осадки образца и модуля деформации для просадочного грунта проводилось по схеме одной кривой для заданного проектного давления в следующей последовательности:

- определялся коэффициент пористости грунта до испытания  $e_0$ ;
- испытуемый образец в кольце помещался в одометр на перфорируемых фильтрах острой кромкой кольца вверх;

– одометр в собранном виде устанавливался на базу прибора. На стойках штампа с помощью держателей закреплялись два индикатора часового типа. Отчеты по индикаторам выставлялись нулевые, при этом рама фиксировалась так, чтобы не было передачи нагрузки на грунт, заключённый в одометре;

– нагружение образца проводилось ступенчато до заданного давления  $P_3$  (224 кПа). В качестве расчетного давления было принято давление под подошвой фундамента здания, принятого в качестве модели и рассмотренного в Разделе 4;

– после условной стабилизации осадки образца грунта на последней ступени давления образец грунта замачивался водой, замачивание продолжалось до условной стабилизации просадки. Замачивание осуществлялось снизу вверх через поддон прибора;

– данные по индикаторам после каждой ступени нагружения при условной стабилизации заносились в журнал испытания.



Рис. 2.10. Общий вид компрессионного прибора КПр-1, Гидропроект

Рабочее кольцо  
прибора КПр-1



Рис. 2.11. Образец грунта в одометре после проведения испытания

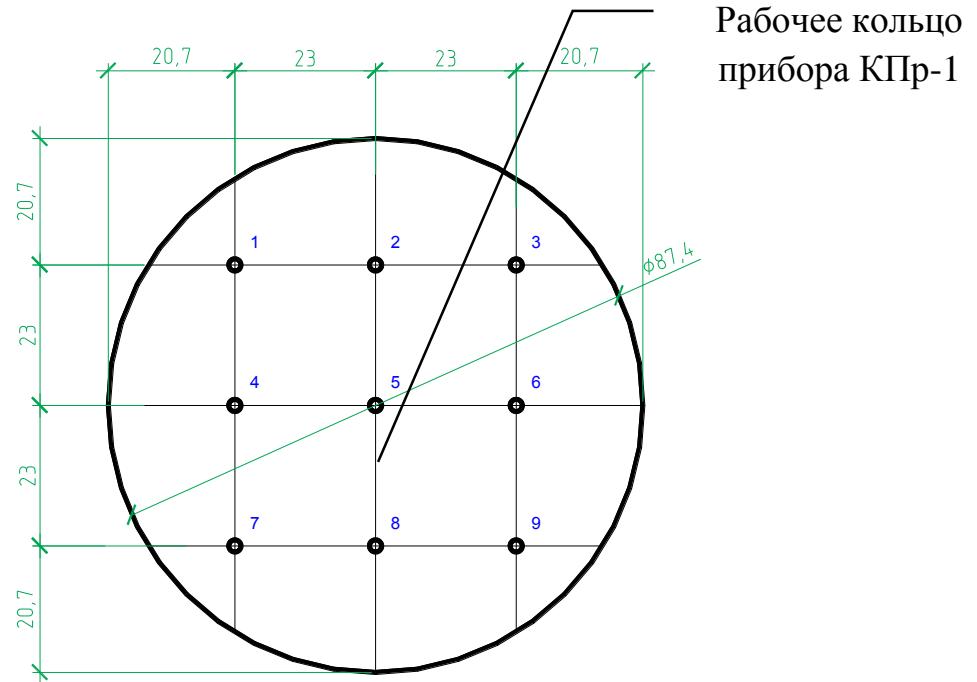


Рис. 2.12. Схема закрепления образца грунта раствором (размеры указаны в мм):

1 – 9 – точки инъекции раствором

В качестве закрепляющего состава использовался золь кремниевой кислоты, полученный реакцией жидкого стекла с сульфатом аммония, с содержанием оксида кремния 2% в водном растворе полиакриламида после его «заморозки», разработка которого описана выше [128].

Закрепление образца грунта проводилось равномерно по 9-ти точкам согласно схеме рис. 3.3 в объеме 1 мл раствора на каждую точку (9 мл раствора на 150 см<sup>3</sup> образца или 6% объема). Ввод раствора осуществлялся иглой медицинской со шприца с раствором в верхнюю зону грунта. Выдержка раствора после его введения в грунт составляла 30 мин. Температура раствора составляла 18 °C.

Для замачивания применялась вода питьевая водопроводная с температурой 18 °C. Испытания проводились при комнатной температуре +20 °C.

По полученным данным по методике, изложенной в ДСТУ Б В.2.1-4-96 п. 5.4.7, определялся модуль деформации грунта для заданного давления для закрепленного и незакрепленного образца.

Модуль деформации грунта определялся на компрессионном приборе КПр-1. Было выполнено три замера модуля деформации закрепленного грунта ( $E_1$ ) и незакрепленного ( $E_2$ ). При этом была получена зависимость относительной деформации образцов грунта от давления  $\varepsilon = f(P)$  (рис. 2.13).

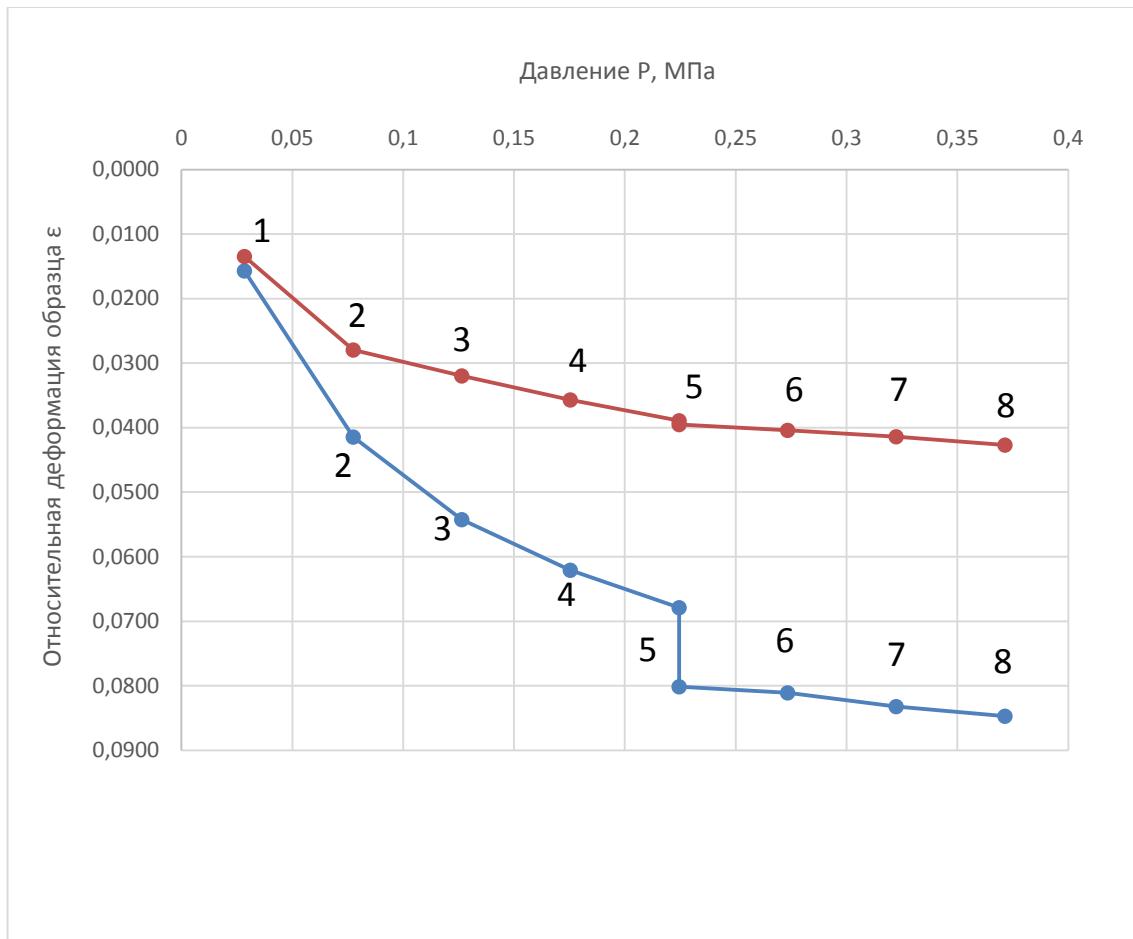


Рис. 2.13. Соотношение относительной деформации от давления закрепленного и незакрепленного грунта:- 1-9 – этапы нагружения образца грунта на приборе КПр-1, где: —●— образец без закрепления (по усредненным показателям 3-х испытаний); —●— образец с закреплением (по усредненным показателям 3-х испытаний)

Нагружение этапов 1 – 5 проводилось без замачивания образцов. По достижению расчетного давления (этап 5) проводилось замачивание образцов. От этапа 5 до 8 проводилось нагружение образцов в водонасыщенном состоянии. На этапе 1 у закрепленного образца наблюдаем увеличение относительной деформации в сравнении с незакрепленным из-за присутствия частичного замачивания от введенного закрепляющего раствора. На этапе 2 происходит выравнивание деформаций образцов и последующий рост деформаций незакрепленного образца в сравнении с закрепленным. На этапе 5 происходит замачивание образцов, причем у незакрепленного образца наблюдается резкое

увеличение деформаций в сравнении с закрепленным образцом (на 93%). Экспериментальные данные по испытаниям на приборе КПр-1 представлены в приложении В.

Модуль деформации грунтов для интервала давлений рассчитывался по формуле 2.14. Результаты сведены в таблицу 2.8.

$$E = E_k \cdot m_k \quad (2.14)$$

Таблица 2.8. Расчетный модуль деформации просадочного грунта без закрепления и с закреплением

| № i измерения                   | Расчетный модуль деформации закрепленного грунта, $E_1$ , МПа | Расчетный модуль деформации незакрепленного грунта, $E_2$ , МПа |
|---------------------------------|---|---|
| 1                               | 13.76   | 5.48  |
| 2                               | 13.98   | 5.96  |
| 3                               | 14.52   | 5.60  |
| Среднее значение из n измерений | 14.1  | 5.68  |

#### Расчет модуля деформации закрепленного грунта

Для измерений определим среднеарифметическое значение и границы доверительного интервала. Для удобства расчетов выберем число  $E_{10}$ , удобное для расчетов ( $E_{10}=13,98$  МПа), и определим разности ( $E_{1i} - E_{10}$ ) и квадраты этих разностей. Результаты сведены в таблицу 2.9.

Таблица 2.9. Определение разностей и квадратов разностей по значениям опытных данных  $E_{1i}$  закрепленного грунта

| № i-го измерения | Расчетный модуль деформации закрепленного грунта, $E_{1i}$ , МПа | $E_{1i} - E_{10}$ | $(E_{1i} - E_{10})^2$ |
|------------------|--|-------------------|-----------------------|
| 1                | 13,74  | -0,24             | 0,0576                |
| 2                | 13,98  | 0                 | 0                     |
| 3                | 14,52  | 0,54              | 0,2916                |
| $\sum_{i=1}^3$   |  | 0,3               | 0,3492                |

Найдем среднее значение  $E_1$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma_1(x)$  [109]:

$$E_1 = E_{10} + \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (E_{1i} - E_{10}) = 13,98 + \frac{0,3}{3} = 14,08$$

$$E_1 - E_{10} = 14,08 - 13,98 = 0,1$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{n(n-1)} \left[ \sum_{i=1}^n (E_{1i} - E_{10})^2 - n(E_1 - E_{10})^2 \right]$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{3(2)} [0,3492 - 3 * 0,01] = 0,0532$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_1^2} = 0,2306$$

Для надежности  $\alpha = 0,95$  и  $n = 3$   $t_{ct1} = 4,30$ . Абсолютная погрешность измерения

$\Delta x$ :

$$\Delta x = t_{ct1} \times \sigma_1 = 4,30 \times 0,2306 = 0,99 \text{ МПа.}$$

Результат измерений можно представить в виде:

$$14,08 - 0,99 \leq E \leq 14,08 + 0,99 \text{ МПа}$$

$$13,09 \leq E \leq 15,07 \text{ или } E = (14,08 \pm 0,99) \text{ МПа}$$

$$\text{Относительная погрешность } e = \pm \frac{\Delta x}{E_1} \cdot 100\% = \pm \frac{0,99}{14,08} \cdot 100\% = 7,0\%$$

Аналогично – для незакрепленного грунта.

Для измерений определим среднеарифметическое значение и границы доверительного интервала. Для удобства расчетов выберем число  $E_{20}$ , удобное для расчетов ( $E_{20}=5,60$  МПа), и определим разности ( $E_{2i} - E_{20}$ ) и квадраты этих разностей. Результаты сведены в таблицу 2.10.

Таблица 2.10. Определение разностей и квадратов разностей по значениям опытных данных  $E_{2i}$  незакрепленного грунта

| № i-го измерения | Расчетный модуль деформации закрепленного грунта, $E_{1i}$ , МПа | $E_{2i} - E_{20}$ | $(E_{2i} - E_{20})^2$ |
|------------------|--|-------------------|-----------------------|
| 1                | 5,48   | -0,12             | 0,0144                |
| 2                | 5,96   | 0,36              | 0,1296                |
| 3                | 5,60   | 0                 | 0                     |
| $\sum_{i=1}^3$   |  | 0,24              | 0,1152                |

Найдем среднее значение  $E_2$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma_2(x)$  [109]:

$$E_2 = E_{20} + \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (E_{2i} - E_{20}) = 5,60 + \frac{0,24}{3} = 5,68$$

$$E_1 - E_{10} = 5,68 - 5,60 = 0,08$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{n(n-1)} \left[ \sum_{i=1}^n (E_{2i} - E_{20})^2 - n(E_2 - E_{20})^2 \right]$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{3(2)} [0,1152 - 3 * 0,0064] = 0,016$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_1^2} = 0,1265$$

Для надежности  $\alpha = 0,95$  и  $n = 3$   $t_{ct1} = 4,30$ . Абсолютная погрешность измерения  $\Delta x$ :

$$\Delta x = t_{ct1} \times \sigma_1 = 4,30 \times 0,1265 = 0,54 \text{ МПа.}$$

Результат измерений можно представить в виде:

$$5,68 - 0,54 \leq E \leq 5,68 + 0,54 \text{ МПа}$$

$$5,14 \leq E \leq 6,22 \text{ или } E = (5,68 \pm 0,54) \text{ МПа}$$

$$\text{Относительная погрешность } e = \pm \frac{\Delta x}{E_2} \cdot 100\% = \pm \frac{0,54}{5,68} \cdot 100\% = 9,5\%$$

При закреплении грунта составом наблюдаем увеличение модуля деформации грунта в 2,3 – 2,6 раза (в среднем в 2,45 раза).

Ниже рассмотрены параметры закрепления аналогичными существующими методами (однорастворная силикатизация с различными составами раствора).

В работах В. М. Антонова, В. В. Леденева, В. И. Скрылева [129] рассмотрены вопросы усиления грунтов силикатизацией, смолизацией одно- и двухрастворными компонентами. Так, для однорастворной силикатизации просадочных грунтов приводятся данные по прочности закрепленного грунта в зависимости от радиуса закрепления и коэффициента фильтрации, которые приведены в таблице 3.3. При этом при силикатизации рассматривается помещение в грунт силиката натрия и хлористого кальция или ортофосфорной кислоты (двурастворная силикатизация) или только силиката натрия (однорастворная силикатизация).

Таблица 2.11. Прочность закрепленного грунта и радиус закрепления в зависимости от коэффициента фильтрации просадочного грунта [130]

| Способ силикатизации | Вид грунта           | Коэффициент фильтрации, м/сут             | Радиус закрепления, $R_s$ , м           | Прочность закрепленного грунта, $R$ , МПа |
|----------------------|----------------------|---|---|---|
| Одно-растворная      | Просадочный лессовый | 0,2 ... 0,3<br>0,3 ... 0,5<br>0,5 ... 2,0 | 0,4 ... 0,6<br>0,6 ... 0,8<br>0,8 ... 1 | 0,5 ... 3,5                               |

При этом для расчета рекомендуется принимать характеристики закрепленного основания в зависимости от прочности закрепленного основания, которые приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12. Рекомендованные характеристики закрепленного основания [130]

| Вид грунта | Характеристики грунта | Значения характеристик при прочности закрепленного грунта, $R$ , МПа |      |       |       |       |      |       |      |
|------------|-----------------------|--|------|-------|-------|-------|------|-------|------|
|            |                       | 0,4  | 0,5  | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 1,0  | 1,2   | 1,5  |
| Суглинки   | $c$ , МПа             | 0,04   | 0,05 | 0,061 | 0,068 | 0,075 | 0,09 | 0,095 | 0,11 |
|            | $\phi$ , град         | 24   | 26   | 28    | 30    | 32    | 34   | 38    | 42   |
|            | $E$ , МПа             | 38   | 50   | 60    | 70    | 80    | 95   | 115   | 145  |

В пособии по химическому закреплению грунтов [131] рассматривается преимущественно закрепление песчаных грунтов методом одно- и двухрастворной

силикатизации, смолизации и цементации. По закреплению просадочных грунтов приведен способ однорастворной силикатизации и силикатизации с применением газа. Данные приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.13. Значения прочности закрепленного просадочного грунта [131]

| Наименование способов и исходных реагентов  | Реакция среды закрепляющих реагентов | Область применения  |                                       | Экстремальные и средние значения прочности при одноосном сжатии, МПа |
|---|--------------------------------------|---|---------------------------------------|--|
|   |                                      | Номенклатура и некоторые характеристики грунтов   | Коэффициент фильтрации грунтов, м/сут |  |
| Однорастворная силикатизация просадочных грунтов на основе раствора силиката натрия | Щелочная                             | Просадочные лессовые грунты с емкостью поглощения не менее 10 мг /100 г грунта и степенью влажности не более 0,7* | Не менее 0,2*                         | (0,5 – 3,5)/2  |
| Газовая силикатизация на основе раствора силиката натрия и углекислого газа         | Щелочная                             | То же, но степень влажности не более 0,75*  | Не менее 0,2                          | (0,5 – 3,5)/2  |

\* При других значениях характеристик возможность применения силикатизации устанавливается опытным путем.

Видно, что параметры закрепленного основания по прочности в рассмотренных источниках совпадают, а из рассматриваемых закрепляющих растворов предлагается только силикат натрия.

Закрепление просадочных грунтов силикатом натрия рассматривается в работах В. И. Крутова [33], среднее значение прочности закрепленного грунта составляет 0,33 МПа.

В нормативной литературе [132] и в работе В. А. Хамаляйнена [133] представлены общие сведения по используемому составу растворов при

однорастворной силикатизации и соответствующее общее значение прочности закрепленного грунта. Данные приведены в таблице 2.14.

Таблица 2.14. Значения прочности закрепленного просадочного грунта при однорастворной двухкомпонентной силикатизации на основе силиката натрия [132]

| Состав раствора                        | Плотность раствора, г/см <sup>3</sup> | Соотношение компонентов <sup>1</sup> | Время схватывания, ч | Подвижность, см | Мпа <sup>2</sup> |
|--|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------|------------------|
| Силикат натрия                         |                                       | 1                                    |                      |                 |                  |
| Отвердители:<br>фосфорная<br>кислота   | 1,04-1,19                             | 3 – 4                                |                      |                 |                  |
| Серная кислота                         | 1,025                                 | 0,87                                 |                      |                 |                  |
| Сернокислый<br>алюминий                | 1,060                                 | 0,47                                 | 0,5 / 16             | (1,5–3,0)       | 2 – 4            |
| Алюминат<br>натрия                     | 1,060                                 | 2,00 – 0,35                          |                      |                 |                  |
| Кремнефторис-<br>товородная<br>кислота | 1,037                                 | 0,01 – 0,02                          |                      |                 |                  |

Примечание: <sup>1</sup> – весовое для суспензий, объемное для растворов

<sup>2</sup> – прочность укрепленного грунта.

## 2.5. Механизм формирования упрочненной зоны просадочного грунта раствором с анионоактивными полиакриламидными добавками

Подача раствора осуществляется участками по 0,5 – 1 м снизу вверх. Распространение раствора осуществляется по окружности на примерно равное расстояние от инъектора. Радиус зависит от пористости грунта, вязкости раствора и нагнетаемого давления. Согласно научным источникам [11; 131; 134] для силикатизации радиус принимается 0,8 – 1,0 м.

При помощи инъекторов, которые размещаются в массиве грунта, нагнетают силиказоль под давлением 3 – 6 атмосфер. Вода, которая находится в порах грунта, вытесняется и замещается золем, который по истечении определенного времени

превращается в гель. Гель закупоривает поры грунта, в результате чего грунт становится водонепроницаемым и приобретает механическую прочность [68, 78, 135].

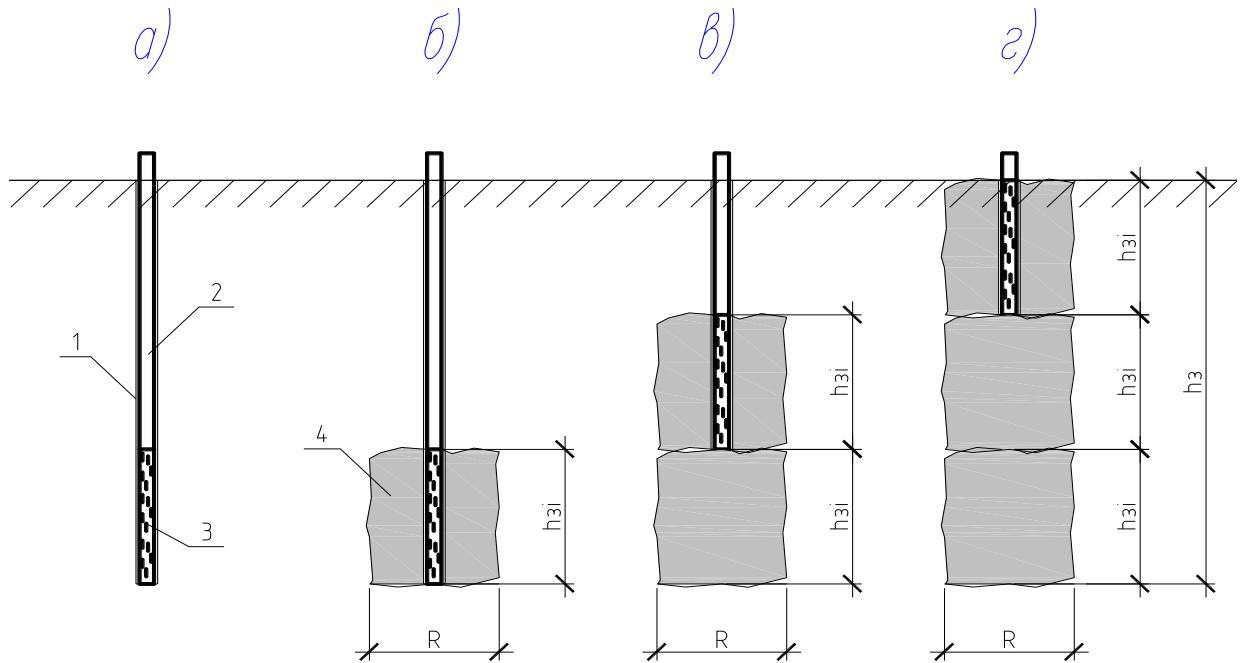


Рис. 2.14. Этапы локального закрепления основания. а – инъектор в скважине; б – 1-й этап нагнетания раствора; в – 2-й этап нагнетания раствора; г – 3-й этап нагнетания раствора. 1 – скважина; 2 – инъектор; 3 – оголовок инъектора; 4 – зона закрепления грунта.  $R$  – радиус закрепленной зоны;  $h_{3i}$  – высота закрепленной зоны  $i$ -го шага рабочей зоны инъектора;  $h_3$  – высота закрепленной зоны

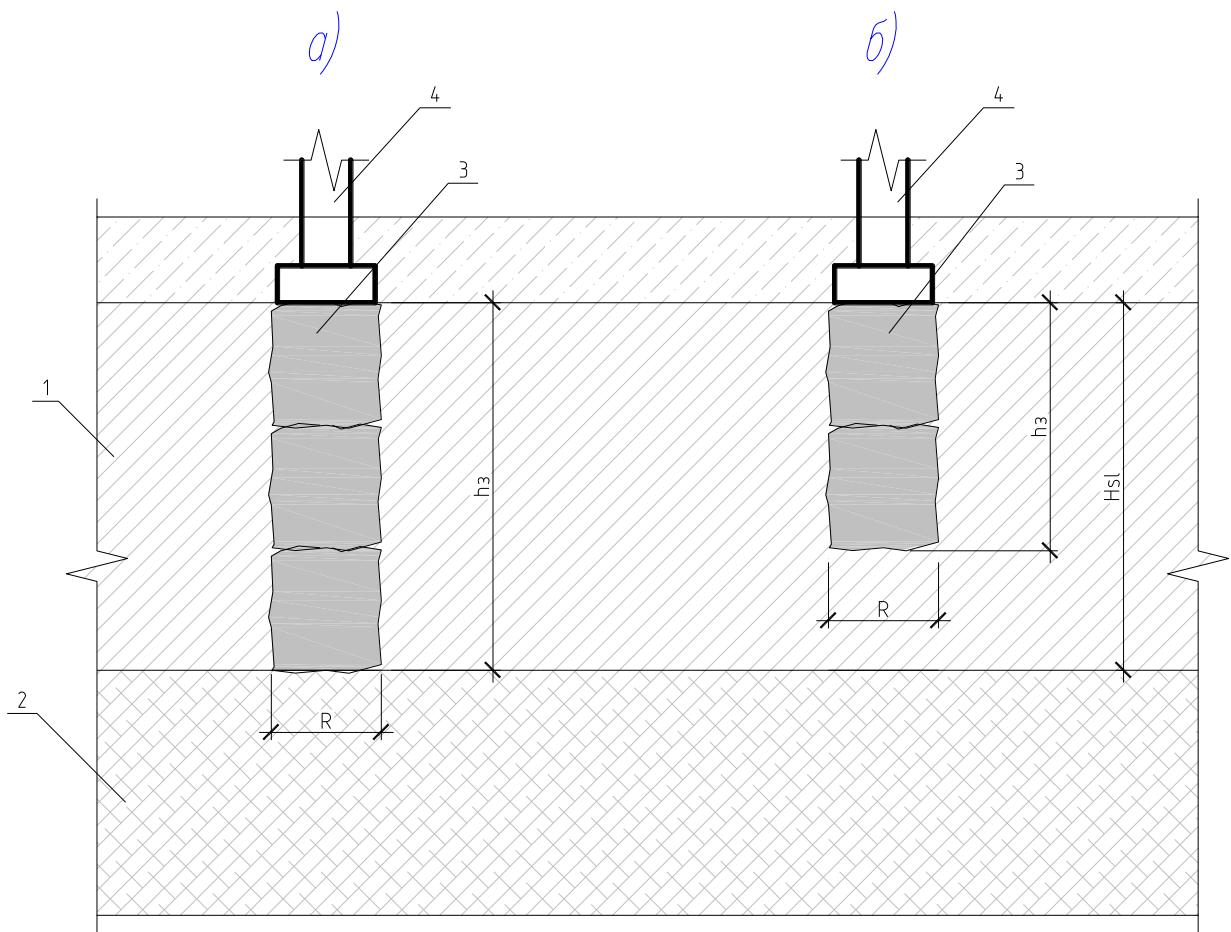


Рис. 2.15. Схема локального закрепления фундамента по высоте. а – закрепление всей толщи просадочного грунта по принципу сквозной сваи; б – закрепление части просадочного грунта по принципу висячей сваи.  $h_3$  – зона локального закрепления по высоте;  $H_{sl}$  – высота просадочного слоя грунта. 1 – просадочный грунт; 2 – непросадочный грунт; 3 – зона локального закрепления фундамента; 4 – фундамент здания или сооружения.

Исходя из описанных технологических процессов, для частичного закрепления грунта принята модульная система конструирования локальной зоны укрепления фундаментов.

Модуль в архитектуре и конструкциях принимается как некая исходная мера, принятая для выражения кратных соотношений размеров комплексов, сооружений и их частей. В качестве модуля принимают меру длины (фут, метр), размер одного из элементов здания или размер строительного изделия.

В рассматриваемом случае за модуль принята одна заходка процесса локального усиления, обусловленная рабочей зоной инъектора, принятой равной 1 м.

При этом размер модуля определяется по формуле [132]:

$$h_{si} = 1 + kR = 1 + 0,5 \cdot 0,9 = 1,45 \text{ м,}$$

где 1 – длина действующей части инъектора (1 м);  $k$  – коэффициент, принимаемый равным 0,5 для песков и лессовых грунтов;

$R$  – расчетный радиус закрепления от одиночной инъекции, равный 0,9 м.

Такие модули позволяют конструировать зону укрепления по высоте – модульный столб, и в плане – зона локального усиления из модульных столбов.

При этом радиус модуля в первом приближении принимается по нормативной и научной литературе 0,8 – 1,0 м. В дальнейшем для каждого объекта согласно технологии ведения работ по химическому упрочнению оснований радиус модуля подлежит уточнению в натурных условиях на каждом объекте.

Количество модулей по высоте в одном модульном столбе определяется по глубине толщи просадочного слоя  $H_{sl}$  и необходимой расчетной величины его упрочнения по высоте  $h_3$ .

Формирование зоны локального усиления из модульных элементов представлено на рисунке 2.16.

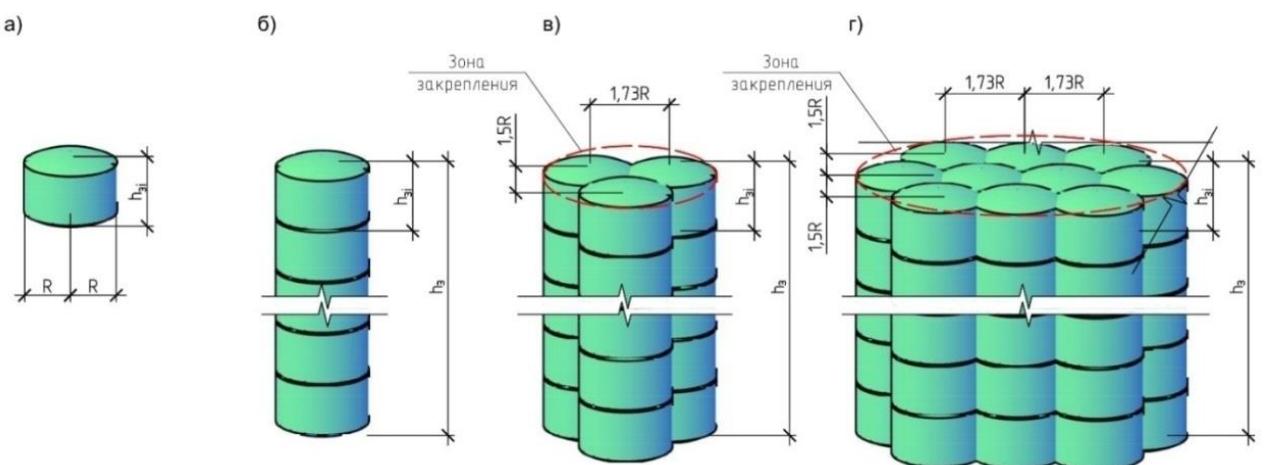


Рис. 2.16. Модульные элементы зоны локального усиления: а) модуль локального усиления; б) модульный столб локального усиления из  $n=i$  модулей; в) зона локального закрепления из 3-х модульных столбов; г) зона локального закрепления из  $n=i$  количества столбов

## 2.6. Коэффициент жесткости основания с частичным закреплением просадочного грунта в плане и по глубине

Повышение жесткости основания в зоне частичного закрепления обусловлено устранением просадочных свойств и увеличением модуля деформации грунта.

Коэффициент жесткости основания с частичным закреплением просадочного грунта определяется по формулам 2.15 и 2.16, в которых осадка и просадка имеют функциональную зависимость от характеристик зоны частичного закрепления:  $F_3$  – площадь зоны закрепления;  $h_3$  – высота закрепления:

$$S = f(F_3, h_3) \quad (2.15)$$

$$S_{sl} = f(F_3, h_3) \quad (2.16)$$

Расчет осадок и просадок частично закрепленного грунта можно выполнять методом послойного суммирования с использованием приведенных модулей деформации грунта в каждом элементарном слое.

Приведенный модуль деформации грунта при частичном закреплении определяется по формулам 2.17 и 2.19:

– в пределах элементарного  $i$ -того слоя грунта:

$$E_{np,i} = \frac{E_{закр,i} \cdot V_{закр,i} \cdot A_{закр,i}^2 + E_i \cdot (V_i - V_{закр,i}) \cdot (A_i^2 - A_{закр,i}^2)}{V_i \cdot A_i^2}, \quad (2.17)$$

где  $E_{закр,i}$ ,  $E_i$  – модули деформации соответственно закрепленного и незакрепленного грунта;

$V_i$  – объем грунта, воспринимающего внешнюю нагрузку в элементарном  $i$ -том слое;

$V_{закр,i}$  – объем закрепленного грунта в объеме  $V_i$ ;

$A_i^2$  – площадь эпюры вертикальных напряжений от внешней нагрузки  $\sigma_{zp}$  в

горизонтальном сечении на глубине  $z_i$  в пределах условной ширины фундамента  $b_{z,i}$  (рис. 2.17);

$A_{закр,i}^2$  – площадь эпюры вертикальных напряжений от внешней нагрузки  $\sigma_{zp}$  в горизонтальном сечении на глубине  $z_i$ , соответствующая закрепленному грунту в пределах условной ширины фундамента  $b_{z,i}$ .

Условная ширина ленточного фундамента на глубине  $z_i$  определяется по формуле:

Объем грунта, воспринимающего внешнюю нагрузку, в  $i$ -том элементарном слое для ленточного фундамента  $V_i = b_{z,i} \cdot h_i \cdot 1$ .

Объем закрепленного грунта принимается в соответствии с принятой схемой частичного закрепления.

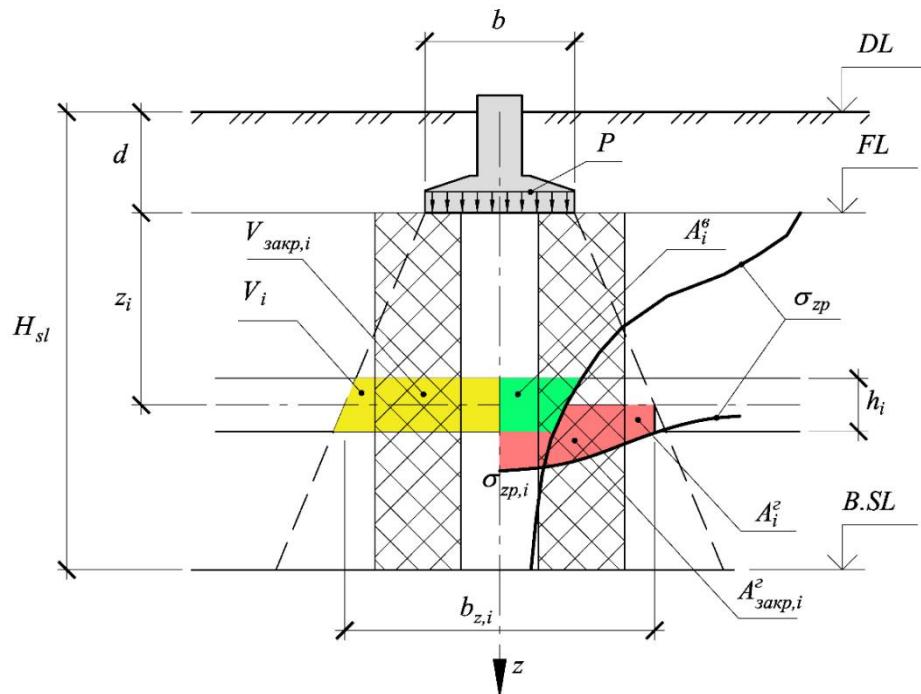


Рис. 2.17. Расчетная схема для определения приведенного модуля деформации в пределах элементарного  $i$ -того слоя грунта в основании ленточного фундамента – в пределах сжимаемой или просадочной толщи грунта :

$$E_{np} = \frac{\sum_1^n E_{np,i} \cdot A_i^6}{\sum_1^n A_i^6}, \quad (2.19)$$

где  $A_i^6$  – площадь эпюры вертикальных напряжений от внешней нагрузки  $\sigma_{zp}$  в вертикальном сечении в пределах  $i$ -того элементарного слоя.

Осадка и просадка частично закрепленного основания определяются методом послойного суммирования с использованием приведенного модуля деформации для каждого элементарного слоя  $E_{np,i}$ . При определении осадки модули деформации закрепленного и незакрепленного грунта принимаются в состоянии природной влажности, а при определении просадки модули деформации закрепленного и незакрепленного грунта принимаются в водонасыщенном состоянии (в соответствии с зоной обводнения). За величину просадки от внешней нагрузки можно принимать разницу осадок, определенных для водонасыщенного состояния грунта и состояния природной влажности.

Коэффициенты жесткости просадочного основания определяются без учета и с учетом просадочных свойств грунтов, исходя из двух состояний просадочных грунтов по влажности.

Для грунтовых условий I типа по просадочности при условии, что верхняя зона просадки  $h_{sl,p}$  не превышает сжимаемой толщины  $H_c$ , коэффициент жесткости частично закрепленного основания допускается определять по формуле 2.20:

$$C_z = \frac{E_{np}}{\beta \cdot H_c} \quad (2.20)$$

## 2.7. Выводы

1. Разработан и экспериментально исследован закрепляющий состав на основе активной кремниевой кислоты из доступных и распространенных в производстве материалов. Вязкость предложенного раствора в 12,3 раза меньше вязкости жидкого стекла, традиционно используемого при силикатизации, что позволяет увеличить радиус закрепления просадочного грунта от оси инъектора и

тем самым уменьшить количество точек инъектирования для получения требуемых размеров закрепленной зоны.

2. Экспериментально установлено, что модуль деформации закрепленного грунта в водонасыщенном состоянии незначительно отличается от модуля деформации грунта при природной влажности, не превышающей начальной просадочной влажности. При этом полностью устраняются просадочные свойства грунта и изменчивость сжимаемости грунта при водонасыщении. Невысокие жесткостные характеристики закрепленного грунта по сравнению с применением традиционного состава закрепляющего раствора, предположительно, позволяют снизить концентрацию напряжений в местах резкого изменения жесткости основания при частичном закреплении грунта в плане.

3. Модуль деформации грунта  $E$ , закрепленного предложенным раствором, увеличивается в 2,3 – 2,6 раза (в среднем 2,45 раза) в сравнении с модулем незакрепленного грунта.

## **РАЗДЕЛ 3. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНО ЗАКРЕПЛЕННОГО ОСНОВАНИЯ, СЛОЖЕННОГО ПРОСАДОЧНЫМ ГРУНТОМ**

Неравномерные деформации основания, вызванные локальной просадкой грунта, приводят к возникновению в конструкциях здания дополнительных усилий (напряжений). Для определения этих дополнительных усилий необходимо выполнять, как правило, статический расчет здания как плоской или пространственной системы, взаимодействующей с деформируемым основанием. Особое внимание при подготовке исходных данных к этому расчету следует обращать на жесткостные характеристики конструкций и основания, так как жесткость элементов системы влияет на перераспределение усилий (напряжений) как в основании, так и в конструкциях.

### **3.1. Методика численного моделирования системы «здание – фундамент – просадочное основание» при частичном закреплении основания**

#### **3.1.1. Основные положения методики**

Основными положениями методики численного моделирования являются:

- решение задачи выполняется методом конечных элементов (МКЭ);
- в качестве модели основания принимается модель переменного коэффициента жесткости по С. Н. Клепикову [4; 26]. Как уже указывалось в Разделе 1, наиболее эффективно использование модели переменного коэффициента жесткости при расчете зданий и сооружений в сложных грунтовых условиях, где в общем случае необходим учет переменной жесткости основания в плане, а также неравномерных вынужденных вертикальных и горизонтальных перемещений поверхности основания, вызванных просадкой грунтов от собственного веса при замачивании;
- коэффициент жесткости основания назначается для каждого участка основания дифференцированно в зависимости от ожидаемых осадок и просадок по вертикали, проходящей через его центр, определенных с учетом влияния

остальных участков загруженного основания, а также приведенных деформационных характеристик частично закрепленного основания. Расчет выполняется методом последовательных приближений путем уточнения на последующих этапах величин коэффициента жесткости на каждом участке дискретного основания с учетом полученных реактивных давлений;

– просадочные деформации от действия внешней нагрузки моделируются изменением коэффициента жесткости основания. Определение коэффициента жесткости просадочного основания изложено в нормативной литературе [22; 42; 43]. Для частично закрепленного просадочного основания коэффициент жесткости определяется с учетом приведенных деформационных характеристик в соответствии с методикой, изложенной в Разделе 2;

– просадочные деформации от действия собственного веса для II типа грунтовых условий моделируются вынужденными перемещениями, которые воздействуют на фундамент здания посредством промежуточных стержневых или плоских элементов, моделирующих основание и имеющих соответствующую жесткость;

– для системы "здание – фундамент – основание" соблюдаются условия совместности перемещений на контакте. При этом реактивные давления под подошвой фундамента определяются в предпосылке односторонних связей между конструкцией фундамента и основанием, т. е. при отрицательных значениях реактивных давлений делается перерасчет, при котором жесткость основания на этом участке принимается близкой к нулю;

– здание и фундаменты моделируются конечными элементами в соответствии с пространственной либо упрощенной плоской расчетной схемой. При этом конструкции, даже обладающие одинаковым по длине поперечным сечением, разбиваются на несколько участков, что позволяет учесть в процессе нелинейного расчета локальное изменение жесткости в зависимости от уровня нагрузления (возникновение повреждений);

– жесткость элементов системы "здание – фундамент – основание" принимается переменной, зависящей от уровня их нагружения, и может в процессе расчета неоднократно уточняться в зависимости от требуемой точности расчета.

### 3.1.2. Расчетные схемы бескаркасных зданий на просадочных грунтах I типа

Рассматриваются две общепринятые наиболее неблагоприятные схемы локального замачивания просадочного грунта [14; 33]:

- под центром здания (рис. 3.1 а);
- под торцом здания (рис. 3.1 б).

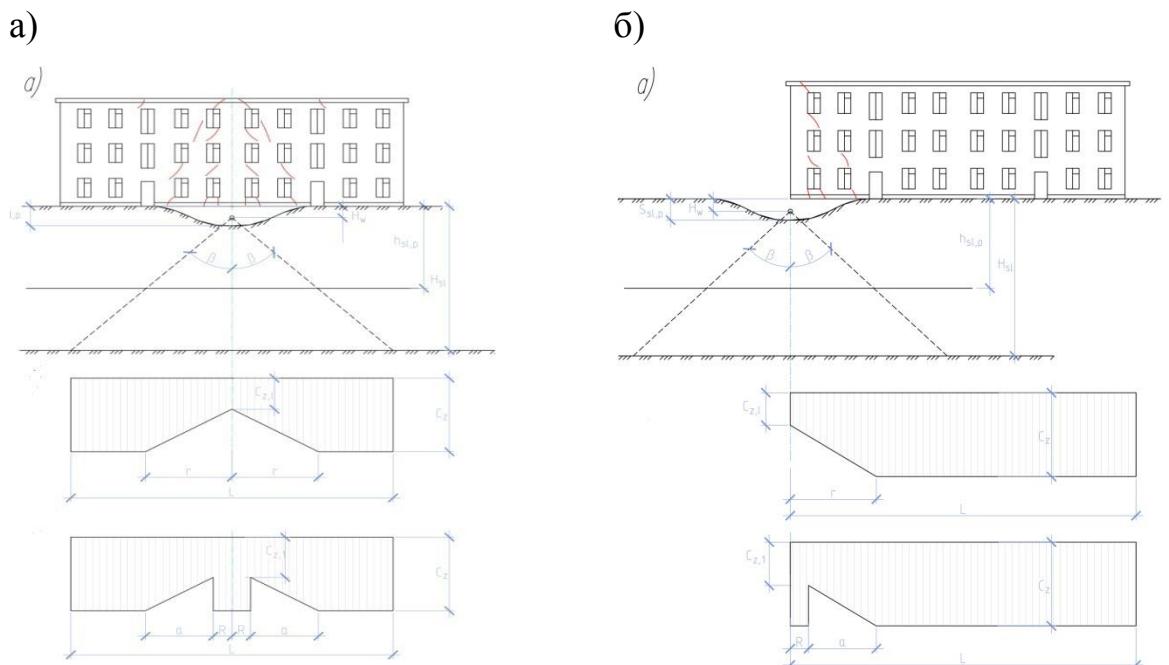


Рис. 3.1. Схемы локального замачивания: а – под центром здания; б – под торцом здания

Максимальная просадка основания от внешней нагрузки  $S_{sl,p}$  для незакрепленного основания возникает по вертикали, проходящей через источник замачивания. По краям зоны замачивания просадка основания равна нулю. Размеры зоны замачивания определяются по формуле:

$$r = (d + h_{sl,p} - H_w) \cdot m_\beta \cdot \tan \beta, \quad (3.1)$$

где  $d$  – глубина заложения подошвы фундамента;  $h_{sl,p}$  – зона просадки грунта от внешней нагрузки;  $H_w$  – глубина расположения источника замачивания;  $\beta$  – угол растекания воды, принят  $50^\circ$  для суглинка;  $m_\beta$  – коэффициент, учитывающий возможное изменение угла растекания воды многослойного основания, принят 1,4, так как просадочная толща подстилается грунтом с меньшим коэффициентом фильтрации.

Схемы изменения жесткости основания при местном его замачивании принимались по линейному закону от минимального  $C_{z,1}$  до максимального  $C_z$  значений коэффициентов жесткости, определяемых по формулам:

$$C_z = \frac{P}{s}; \quad C_{z,1} = \frac{P}{s + s_{sl,p}}, \quad (3.2)$$

где  $P$  – среднее давление по подошве фундамента;  $s$  – осадка основания от внешней нагрузки, определяемая без учета просадочных свойств грунтов как для обычных условий строительства;  $s_{sl,p}$  – просадка грунта от внешней нагрузки (в зоне  $h_{sl,p}$ ).

### **3.1.3. Порядок выполнения расчета здания, взаимодействующего с частично закрепленным просадочным основанием**

1. Определение деформаций основания дискретных участков фундамента в плане с учетом конструктивных параметров, инженерно-геологического строения массива грунта и действия внешних нагрузок. Определение соответствующих переменных коэффициентов жесткости основания и участков с максимальной неравномерностью осадок без учета просадочных деформаций. Выполняется при помощи ПО «DesCon».

2. Определение НДС здания путем решения системы "здание – фундамент – основание" и выявление элементов с максимальным уровнем напряженно-деформированного состояния по отношению к допустимым значениям. Предварительная оценка резервов прочности и жесткости несущих конструкций.

3. Повторение пунктов 1 и 2 с учетом просадочных деформаций по наиболее неблагоприятным для здания схемам.

4. Если без учета просадочных деформаций несущие конструкции имеют существенный резерв прочности и жесткости, а при реализации просадочных деформаций уровень напряжений и деформаций превышает допустимые значения, то для снижения усилий в конструкциях и неравномерных деформаций основания до допустимого уровня целесообразно применять частичное закрепление просадочного грунта.

5. Выбор схемы частичного закрепления просадочного грунта производится с учетом напряженного состояния грунтового массива. При этом зоны закрепленного грунта целесообразно располагать в местах с наибольшим уровнем вертикальных сжимающих напряжений. Размер зоны закрепления принимается в соответствии с модульной системой (см. Раздел 2). Процент частичного закрепления определяется из отношения объема закрепленного просадочного грунта к объему просадочного грунта, воспринимающего нагрузку от фундамента, и является варьируемой величиной за счет изменения размеров зон закрепления. Коэффициенты жесткости частично закрепленного просадочного грунта определяются в соответствии с методикой, изложенной в Разделе 2.

6. Выполняются расчеты по пунктам 1 и 2 с учетом нескольких значений процента частичного закрепления просадочного грунта и реализацией остаточных просадочных деформаций по принятым наиболее неблагоприятным схемам. Для ранее выявленных участков фундаментов с максимальными неравномерными осадками и элементов несущих конструкций с максимальными усилиями (напряжениями) строятся графики зависимости их НДС от процента частичного закрепления, по которым определяется требуемая величина закрепляемого грунта.

### 3.2. Напряженно-деформированное состояние конструкций зданий и сооружений на просадочных грунтах без закрепления и с частичным закреплением просадочного грунта

Для численного моделирования здания приняты:

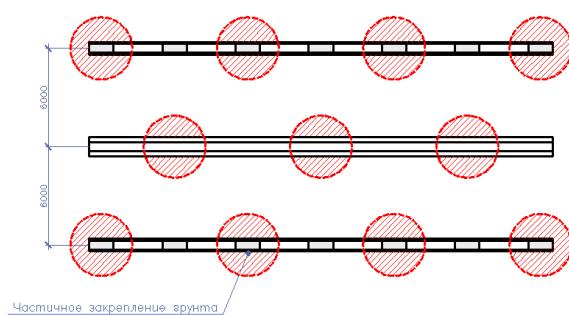
- бескаркасное здание с продольными несущими стенами;
- нагрузки на здание, принятые согласно ДБН [136];
- данные по инженерно-геологическим изысканиям;
- закрепляющий раствор и рассчитанные на основе его характеристик коэффициенты жесткости основания.

В качестве основы для моделирования НДС конструкций здания на частично закрепленном грунте была выбрана часть здания школы №3 г. Мариуполя. Детальное описание объемно-планировочного и конструктивного решения здания приведено в Разделе 4.

При этом рассматривались следующие варианты частичного закрепления просадочного грунта:

- частичное закрепление основания по глубине на 50, 75 и 100% просадочной толщи;
- частичное (прерывистое) закрепление основания в плане, преимущественно под простенками, в местах резких перепадов нагрузок и мощности просадочной толщи (рис. 3.2).

а)



б)

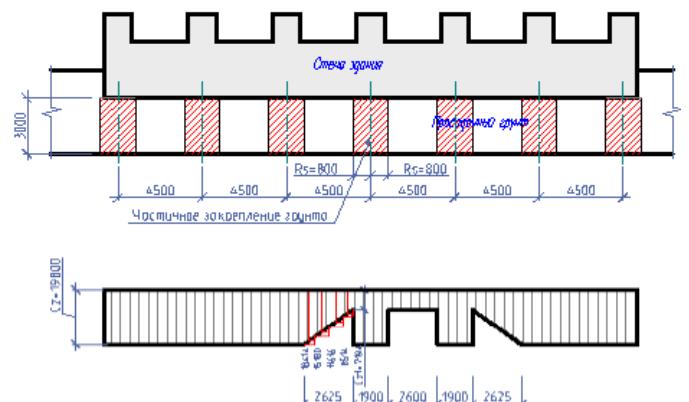


Рис. 3.2. Расчетная схема частичного (прерывистого) закрепления просадочного грунта на фрагменте здания: а – в плане; б – в разрезе

Участки закрепленного просадочного грунта моделировались соответствующим изменением коэффициента жесткости основания, определенным по формуле 3.2.

Деформационные характеристики закрепленного грунта определялись в соответствии со стандартной методикой [27; 124].

По полученным данным изменения модуля деформации грунта в Разделе 2 и с учетом физико-механических свойств грунтов можно определить осадки и коэффициент жесткости грунта при его частичном закреплении.

Схемы локального закрепления фундаментов по высоте, выраженные через коэффициент жесткости основания, можно представить так:

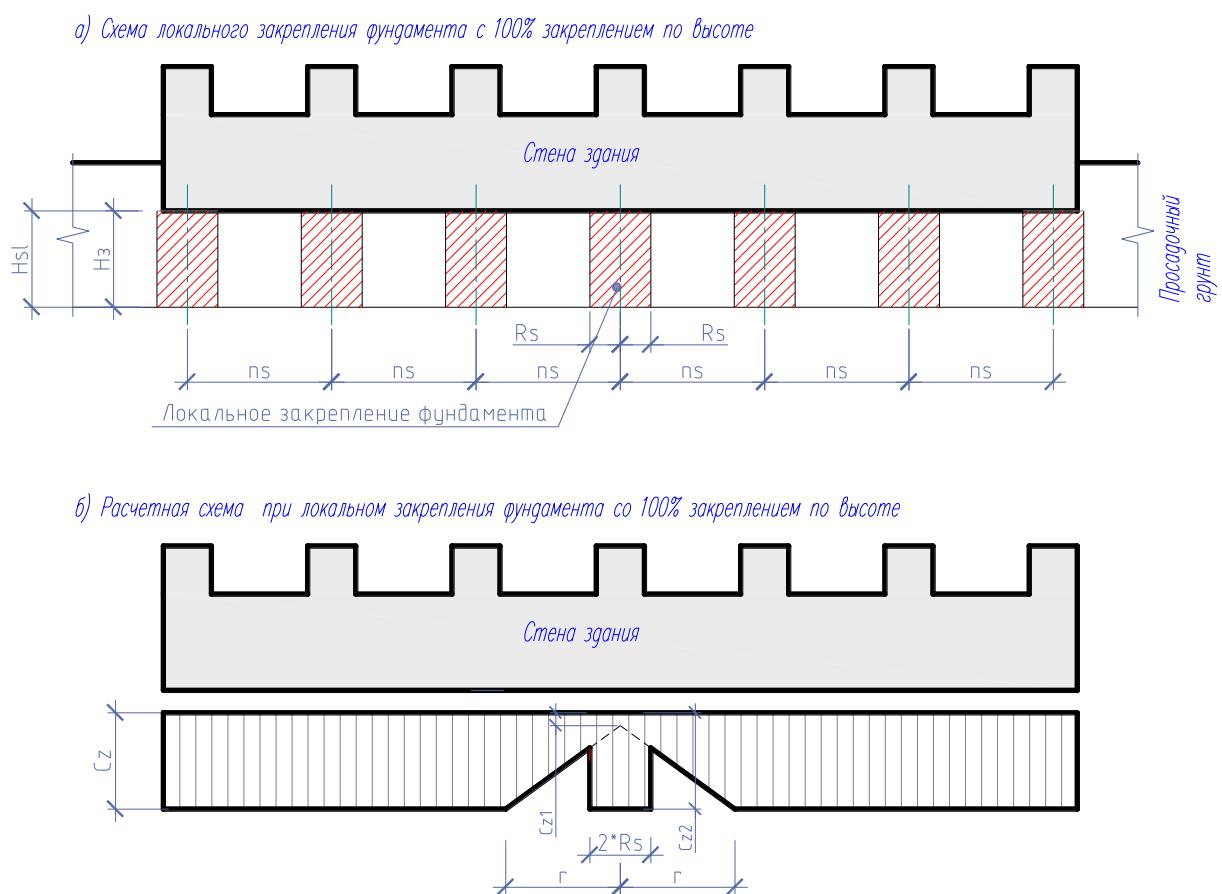
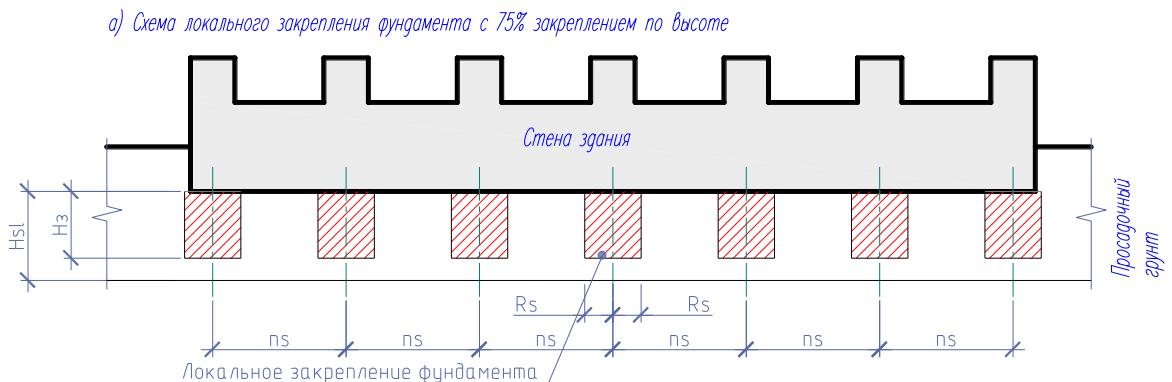


Рис. 3.3. Схема локального закрепления фундамента при 100% закреплении по высоте просадочного слоя



б) Расчетная схема при локальном закреплении фундамента с 75% закреплением по высоте

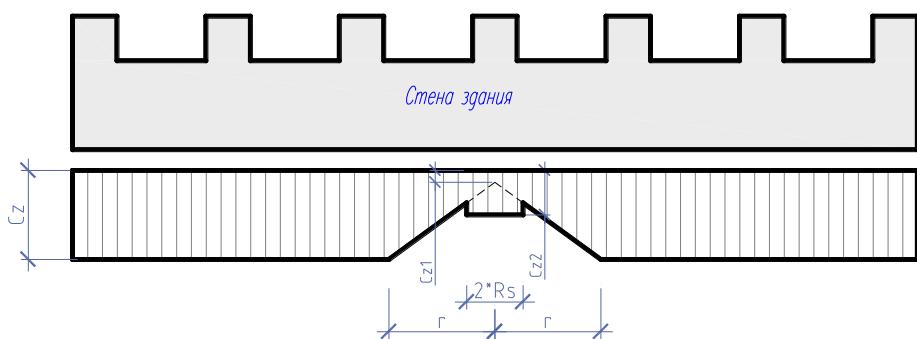


Рис. 3.4. Схема локального закрепления фундамента при 75% закреплении по высоте просадочного слоя

$H_{sl}$  – толщина просадочного слоя от подошвы фундамента;

$H_3$  – высота локального закрепления фундамента;

$n_s$  – шаг локальных зон закрепления фундамента;

$R_s$  – радиус локальной зоны закрепления;

$r$  – размер зоны замачивания (просадки);

$C_z$  – коэффициент жесткости основания вне зоны замачивания;

$C_{z1}$  – минимальный коэффициент жесткости основания в зоне замачивания;

$C_{z2}$  – коэффициент жесткости основания в зоне локального закрепления.

Моделирование коэффициента жесткости основания позволяет путем задания свойств элементов в расчетных программах МКЭ решать такие задачи, как модель

«основание – фундамент – здание» для моделирования и оценки НДС конструкций зданий.

Определение характеристик частично закрепленного просадочного грунта (осадки и коэффициента жесткости) проводилось в программе Descon, разработанной В. В. Яркиным на основе методики, изложенной в работе [22].

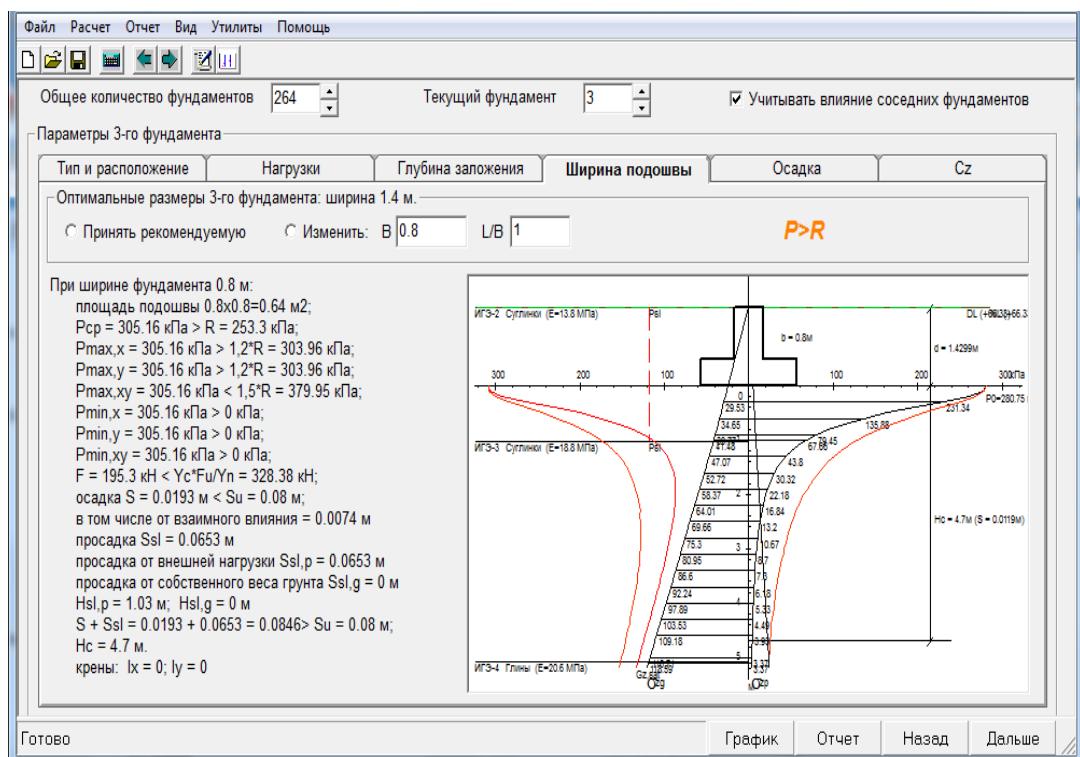


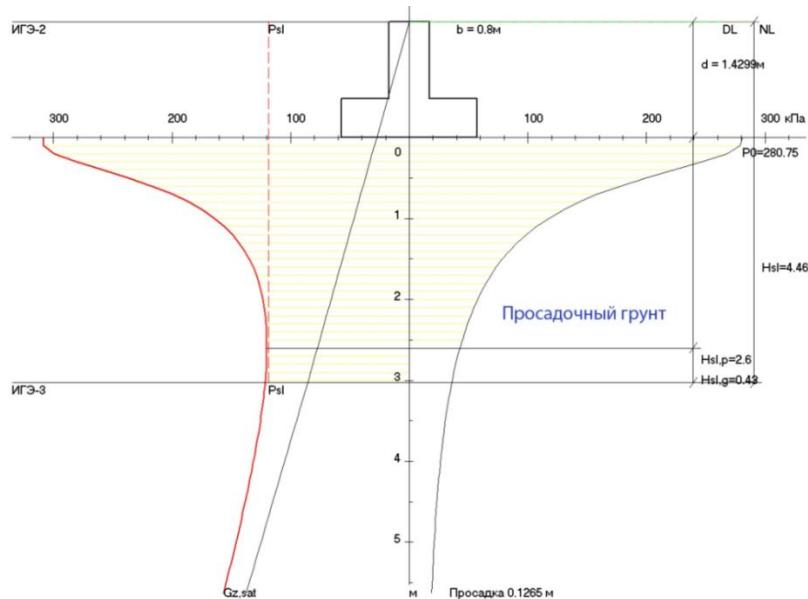
Рис. 3.5. Интерфейс программы DesCon

Частичное закрепление просадочного основания по высоте моделировалось изменением процентного отношения просадочного и закрепленного слоя в пределах толщи просадочного грунта (от подошвы фундамента до конца просадочной толщи) (рис. 3.6).

Результаты, полученные при помощи программы DesCon (приложение Г) дают возможность оценить общую картину неравномерных деформаций по всему зданию и определить наиболее неблагоприятные схемы замачивания просадочных грунтов, при которых неравномерность деформаций без учета жесткости здания достигает максимальных значений, а также позволяют выявить влияние частичного закрепления грунта как на величину деформаций, так и на их неравномерность.

Возможно определение требуемого процента закрепления грунта по условию выполнения допустимых средних и относительных неравномерных осадок согласно норм [131] без учета жесткости здания, однако для получения более точного и экономичного варианта следует выполнять совместный расчет системы «здание – фундамент – основание».

а)



б)

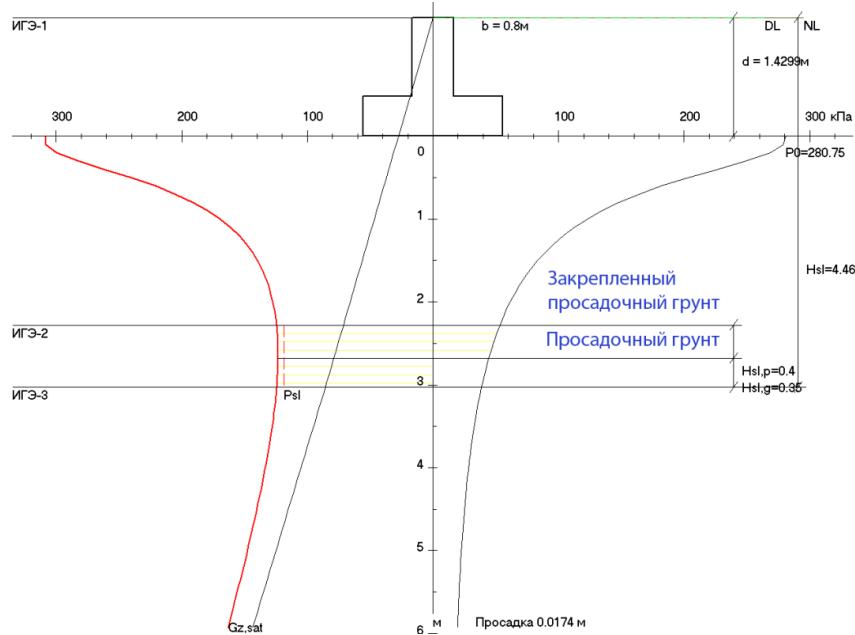


Рис. 3.6. Расчетная схема для определения просадки под элементом фундамента №3: а – без закрепления основания; б – с частичным закреплением на 75% от просадочной толщины.

Для расчета системы «здание – фундамент – основание» был выбран метод конечных элементов (МКЭ) как один из наиболее распространенных, который обладает такими важными свойствами, как устойчивость, сходимость и точность в решении поставленных задач [137 – 140].

Моделирование осуществлялось в ПК ЛИРА-САПР 2013 [141].

Ввиду того, что рассматривалась возможность образования просадочности грунтов в локальном месте (от замачивания), а не по всей площади здания, моделирование было выполнено для части здания школы длиной 28,5 м (рис. 3.7).

Границные условия заданы следующим образом. Для пластин ленточного фундамента заданы коэффициенты жесткости основания согласно расчетным данным и в соответствии с геологией.

Рассматривались следующие варианты оценки НДС конструкций:

- при возникновении деформаций от осадки и просадки посередине крайней стены здания, на углу крайней стены здания;
- при частичном закреплении основания по высоте на 100, 75 и 50% просадочной толщи.

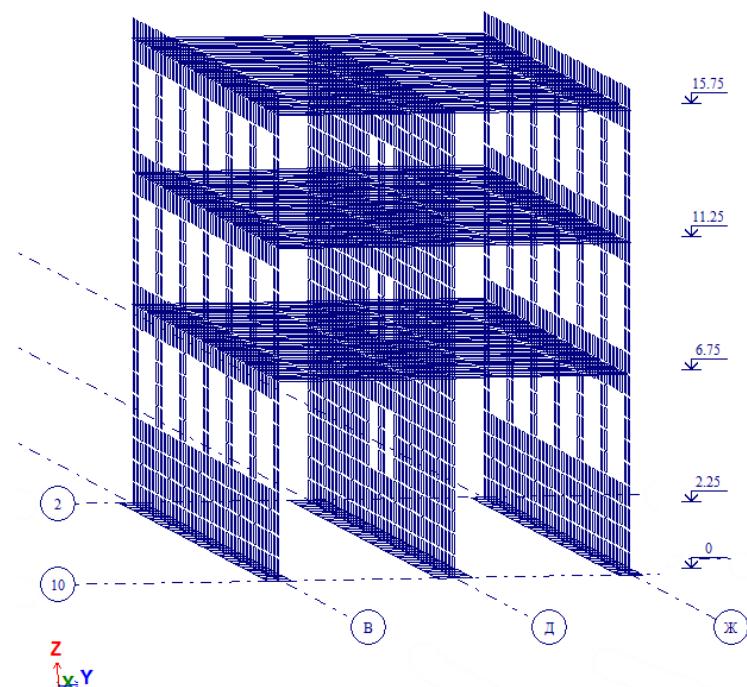


Рис. 3.7. Расчетная схема фрагмента здания в программном комплексе ЛИРА-САПР 2013

Моделирование осуществлялось путем изменения коэффициента жесткости основания при частичном закреплении по схемам, представленным ниже (рис. 3.8).

а) Схема просадки стены при замачивании посередине

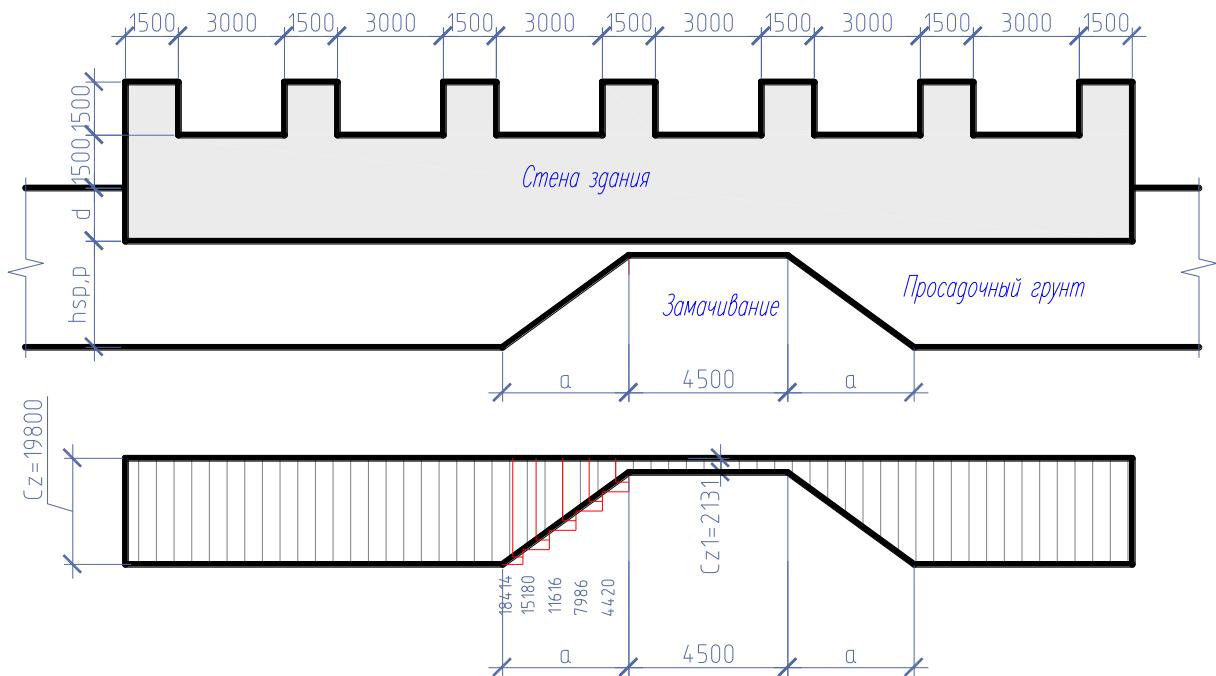
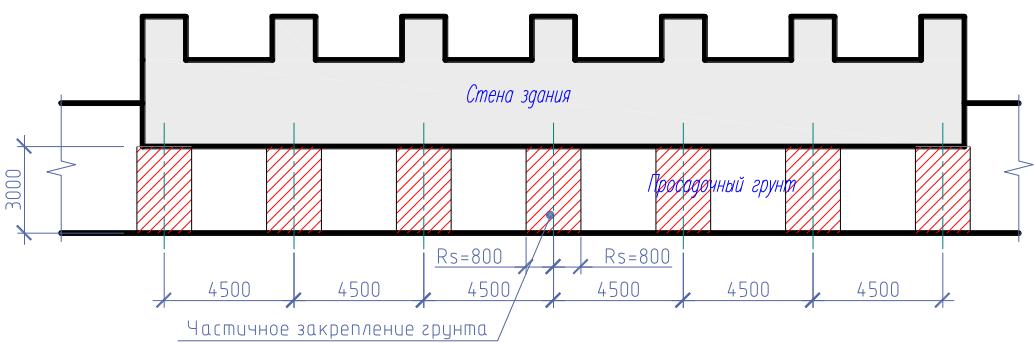


Рис. 3.8. Расчетная схема при замачивании стены здания посередине, где  $d$  – глубина залегания подошвы фундамента, 1,5 м;  
 $h_{sp,p}$  – толщина просадочного слоя грунта, 3 м;  
 $C_z$  – коэффициент жесткости основания без учета просадки, 19800 кН/м<sup>3</sup>;  
 $C_{z1}$  – коэффициент жесткости основания с учетом просадки, 2131 кН/м<sup>3</sup>;  
 $a$  – расстояние растекания воды под подошвой фундамента при угле растекания 50 градусов, 3,575 м.

На рисунках ниже представлены расчетные схемы при различном частичном закреплении основания по высоте (рис. 3.9 – 3.11).

б1) Схема частичного закрепления грунта со 100% по высоте



б2) Расчетная схема при частичном закреплении грунта со 100% по высоте

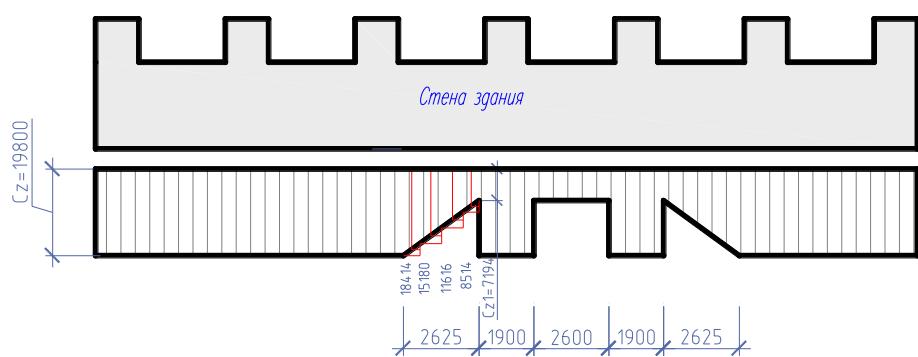
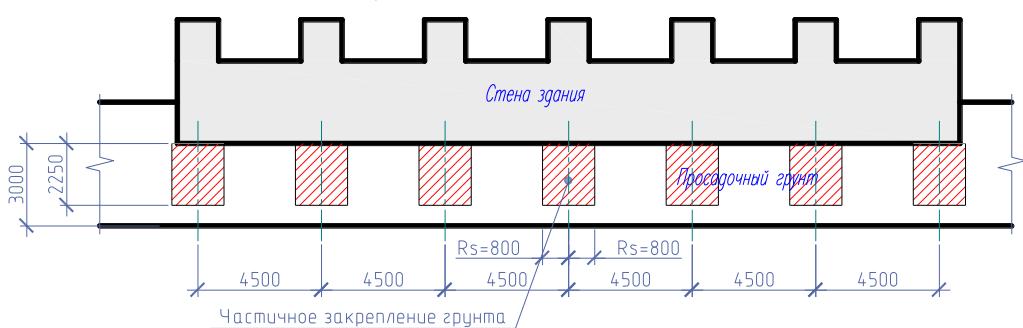


Рис. 3.9. Частичное закрепление грунта при 100% закреплении по высоте

б1) Схема частичного закрепления грунта с 75% по высоте



б2) Расчетная схема при частичном закреплении грунта с 75% по высоте

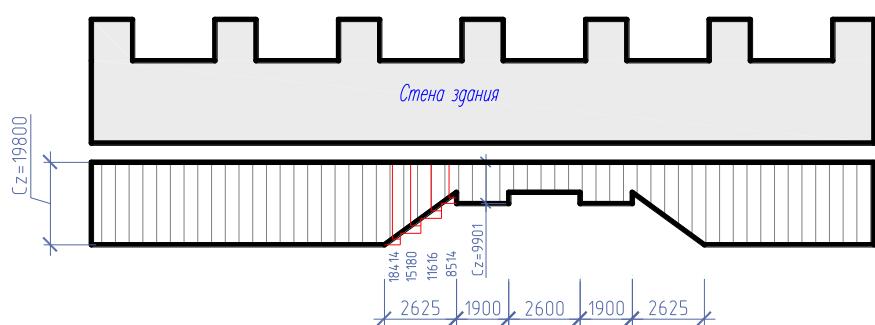
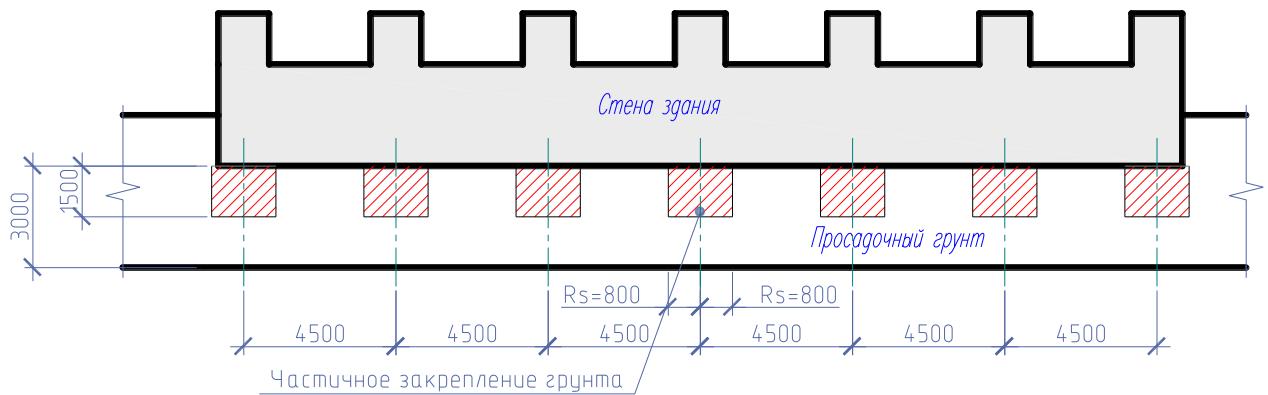


Рис. 3.10. Частичное закрепление грунта при 75% закреплении по высоте

21) Схема частичного закрепления грунта с 50% по высоте



22) Расчетная схема при частичном закреплении грунта с 50% по высоте

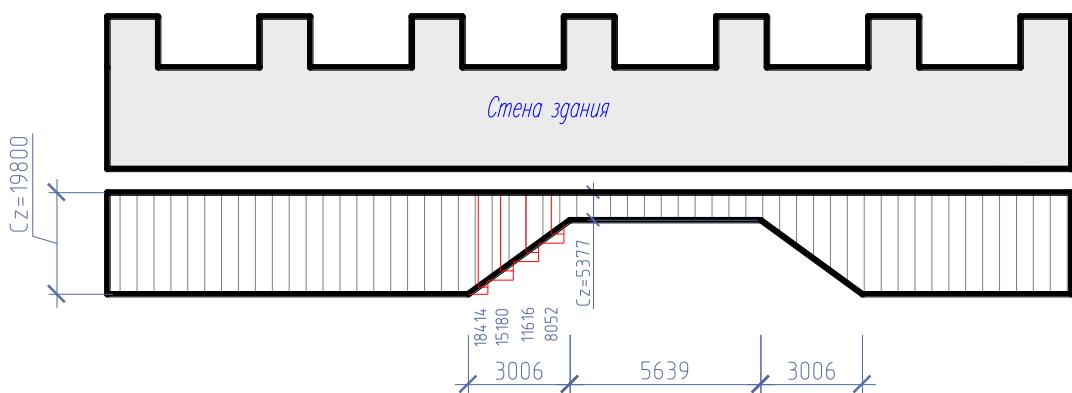


Рис. 3.11. Частичное закрепление грунта при 50% закреплении по высоте

Также для каждого элемента фундамента при всех вариантах частичного закрепления был просчитан коэффициент жесткости основания  $C_z$ . Данные по расчетным фундаментам по осям В, Д, Ж) сведены в таблицы 3.1 – 3.3.

Таблица 3.1. Коэффициент жесткости основания и осадки и просадки при частичном закреплении основания для фундамента по оси В

| №<br>п/п | Глубина укрепленного<br>грунта по высоте, % | Коэффициент<br>жесткости грунта<br>$C_z$ , кН/м <sup>3</sup> | $S + S_{sl}$ , м |
|----------|---|--|------------------|
| 1        | 0   | 2131   | 0.1476           |
| 2        | 25  | 3300   | 0.0961           |
| 3        | 50  | 5377   | 0.061            |
| 4        | 75  | 9901   | 0.0345           |
| 5        | 100   | 19800  | 0.0165           |

Таблица 3.2. Коэффициент жесткости основания и осадки и просадки при частичном закреплении основания для фундамента по оси Д

| №<br>п/п | Глубина укрепленного<br>грунта по высоте, % | Коэффициент<br>жесткости грунта<br>$C_z$ , кН/м <sup>3</sup> | $S + S_{sl}$ , м |
|----------|---|--|------------------|
| 1        | 0   | 2617   | 0.0839           |
| 2        | 25  | 3583   | 0.0608           |
| 3        | 50  | 5302   | 0.0426           |
| 4        | 75  | 9105   | 0.0259           |
| 5        | 100   | 13620  | 0.0152           |

Таблица 3.3. Коэффициент жесткости основания и осадки и просадки при частичном закреплении основания для фундамента по оси Ж

| №<br>п/п | Глубина укрепленного<br>грунта по высоте, % | Коэффициент<br>жесткости грунта<br>$C_z$ , кН/м <sup>3</sup> | $S + S_{sl}$ , м |
|----------|---|--|------------------|
| 1        | 0   | 1880   | 0.1699           |
| 2        | 25  | 2709   | 0.119            |
| 3        | 50  | 4072   | 0.0764           |
| 4        | 75  | 7483   | 0.0443           |
| 5        | 100   | 18400  | 0.0173           |

По полученным данным представлены зависимости осадок, просадок ( $S + S_{sl}$ , м) и коэффициента жесткости основания ( $C_z$ , кН/м<sup>3</sup>) в зависимости от частичного закрепления основания (рис. 3.12 – 3.13) [142, 143].

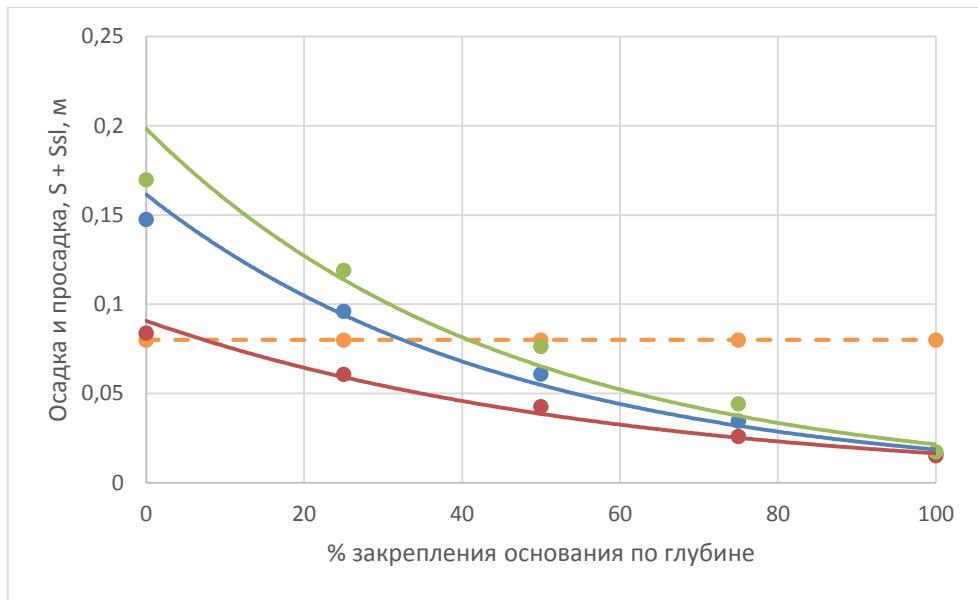


Рис. 3.12. Изменение осадки и просадки для расчетных фундаментов при различных значениях закрепления основания, где: ● элемент фундамента 3; ● элемент фундамента 4; — экспоненциальная (элемент фундамента 3); — экспоненциальная (элемент фундамента 167); ● элемент фундамента 103; — экспоненциальная (элемент фундамента 103); — ● —  $S_u$

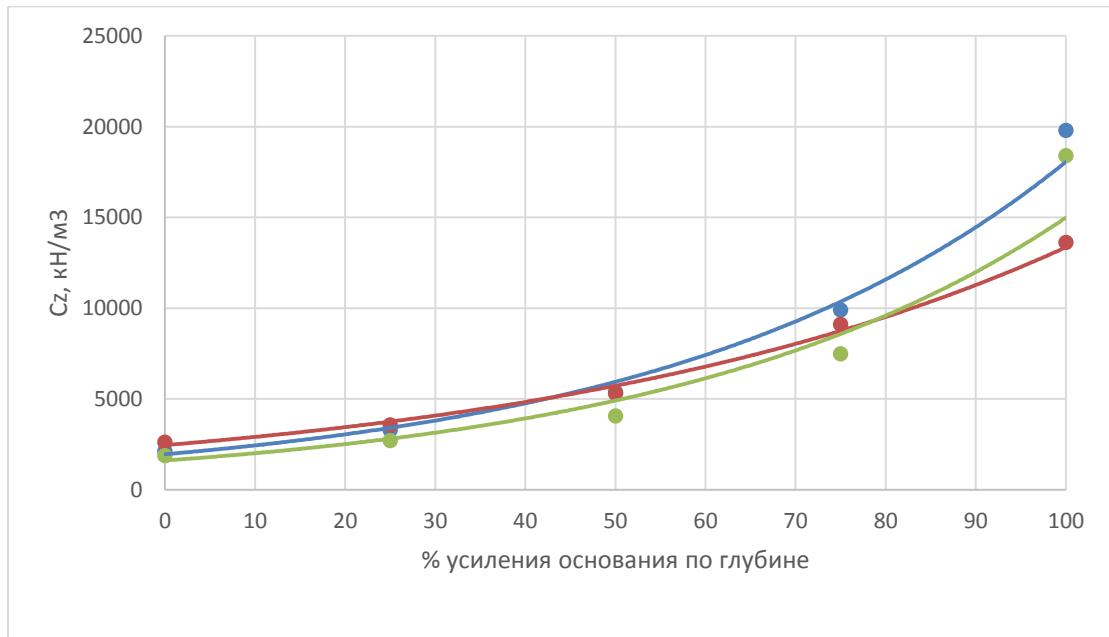


Рис. 3.13. Изменение коэффициента жесткости основания  $C_z$  для расчетных фундаментов при различных значениях закрепления основания; где:

- элемент фундамента 3; ● элемент фундамента 167; — экспоненциальная (элемент фундамента 3); — экспоненциальная (элемент фундамента 167);
- элемент фундамента 103; — экспоненциальная (элемент фундамента 103)

Графики имеют экспоненциальную зависимость просадки от процента усиления основания. Притом значительные уменьшения просадок наблюдаются при усилении до 50% основания. При дальнейшем усилении уменьшение просадок незначительно [144].

Решая экспоненциальные уравнения для условия  $S + S_{sl} < S_u = 8$  см как достаточного, получим необходимый процент закрепления основания:

- для фундамента по оси В – 31,94%;
- для фундамента по оси Д – 7,32%;
- для фундамента по оси Ж – 41,26%.

Изменение коэффициентов жесткости основания при частичном закреплении происходит по экспоненциальной зависимости. Притом для крайних фундаментов (оси В и Ж) имеют практически одинаковый степенной показатель 0.0222 и 0.0223. Для среднего фундамента экспоненциальная кривая более пологая ввиду меньшего давления под подошвой фундамента. При этом до усиления 50% наблюдаем незначительное увеличение коэффициента жесткости – на 17%, и при усилении от 75 до 100% наблюдается увеличение на 50%.

Для выполнения условия  $S + S_{sl} < S_u = 8$  см, зная необходимый процент усиления основания, определим достаточный коэффициент жесткости:

- для фундамента по оси В – 3948 кН/м<sup>3</sup>;
- для фундамента по оси Д – 2782 кН/м<sup>3</sup>;
- для фундамента по оси Ж – 3988 кН/м<sup>3</sup>.

Таким образом, для фундаментов среднего ряда требуемый коэффициент жесткости основания для выполнения условий просадки можно записать как:

$$c_{z,sr} = 2457,2 \cdot e^{-0,017 \frac{\ln \frac{S_u}{0,0906}}{0,017}} \quad (3.3)$$

Упростив выражение, получим:

$$c_{z,sr} = \frac{222,62}{S_u}, \text{ кН/м}^3, \quad (3.4)$$

где  $S_u$  – нормативное значение осадки и просадки здания или сооружения, см.  
Для крайнего ряда по фундаменту оси В:

$$c_{z,kr1} = 1955,8 \cdot e^{-0,022 \frac{\ln \frac{S_u}{0,1615}}{0,022}} \quad (3.5)$$

$$c_{z,kr1} = \frac{315,86}{S_u}, \text{ кН/м}^3 \quad (3.6)$$

Для крайнего ряда по фундаменту по оси Ж:

$$c_{z,kr2} = 1609,2 \cdot e^{-0,022 \frac{\ln \frac{S_u}{0,1983}}{0,022}} \quad (3.7)$$

$$c_{z,kr2} = \frac{319,10}{S_u}, \text{ кН/м}^3 \quad (3.8)$$

В ином виде требуемый коэффициент жесткости для выполнения условий по просадке можно представить графически (рис. 3.14).

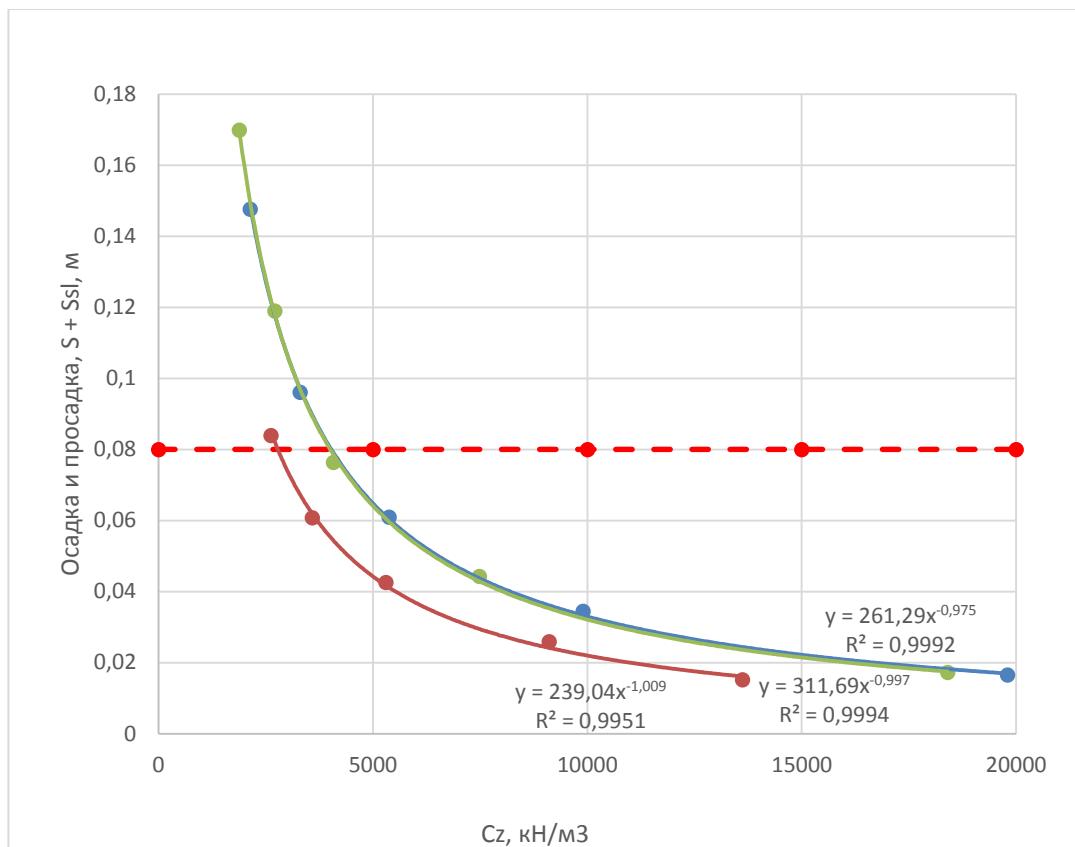
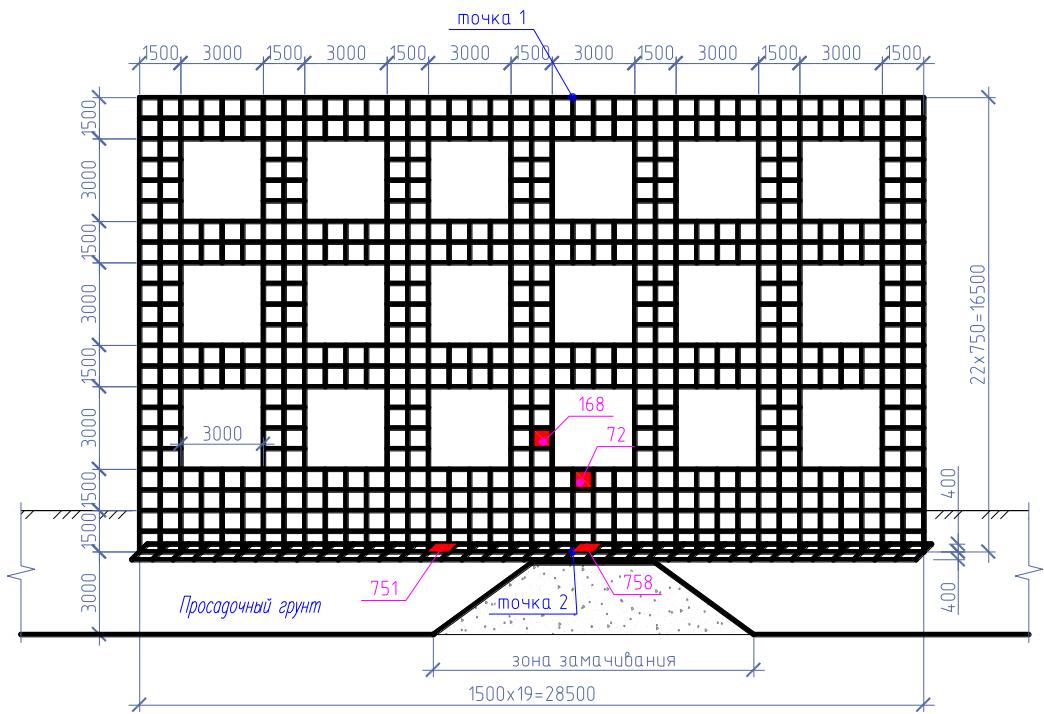


Рис. 3.14. Изменение коэффициента жесткости основания  $C_z$  для расчетных фундаментов при различных значениях осадки и просадки основания, где:  
 ● элемент фундамента 3; ● элемент фундамента 167; — степенная (элемент фундамента 3); — ● —  $S_u$ ; ● элемент фундамента 103; — степенная (элемент фундамента 103)

При анализе НДС конструкций зданий были выбраны расчетные сечения (для оценки полей напряжений) и точки (для оценки деформаций) – рис. 3.15, так же сечения по фундаментам крайней стены посередине участка замачивания (элемент 758) и с краю (элемент 751), а также по предполагаемо наиболее нагруженным участкам стены в простенке (элемент 168) и под максимальной просадкой под окном (элемент 72). Для оценки перемещений были выбраны точки 1 (узел 754) и 2 (узел 800) как наиболее подверженные перемещениям под участком максимальной просадки наверху стены и по фундаменту соответственно. Для анализа влияния при просадке крайней стены посередине на НДС соседних смежных конструкций была рассмотрена средняя стена.

a)



6)

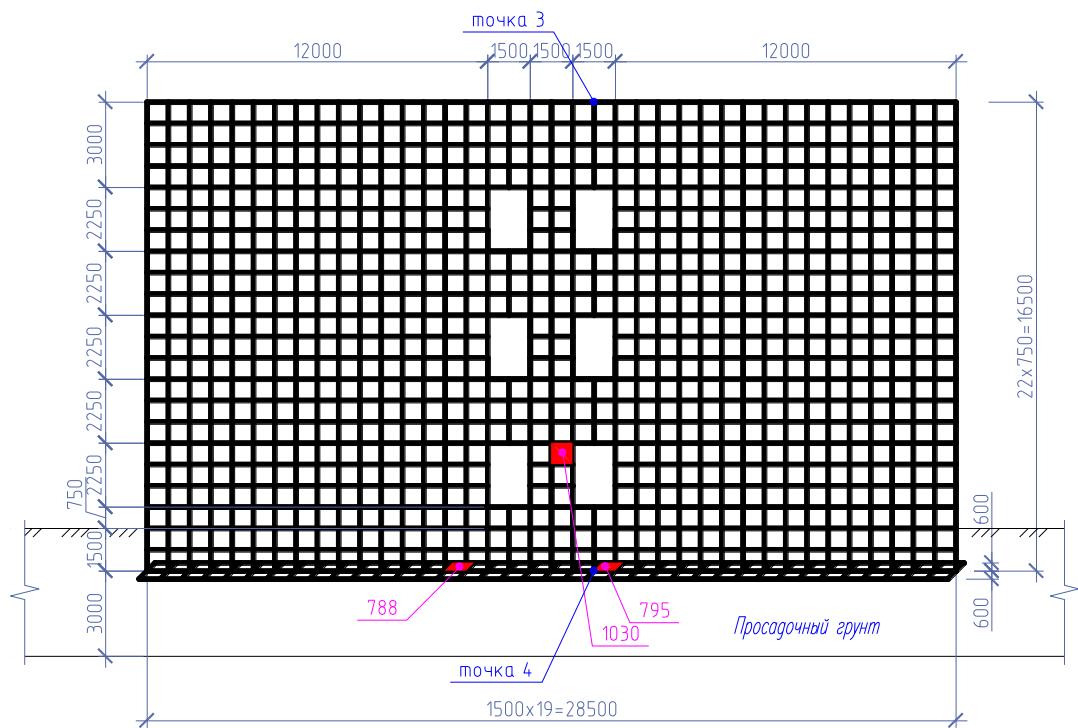


Рис. 3.15. Расчетные сечения для анализа НДС: а) крайней стены при просадке посередине б) средней стены при просадке посередине

Были рассмотрены сечения по фундаментам (элемент 788 и 795), соответствующие крайней стене, а также наиболее нагруженный участок стены – простенок между проемами (элемент 1030). Для оценки перемещений были выбраны точки по фундаменту – 4 (узел 843) и сверху стены – 5 (узел 2401) в плоскости проемов стены как в местах ожидаемых максимальных деформаций.

По аналогичным схемам замачивания (рис. 3.15) была рассмотрена схема здания при просадке с краю стены (на углу здания) как одна из неблагоприятных схем по деформациям. Расчетные сечения и точки по крайней стене при просадке с краю представлены на рис. 3.16.

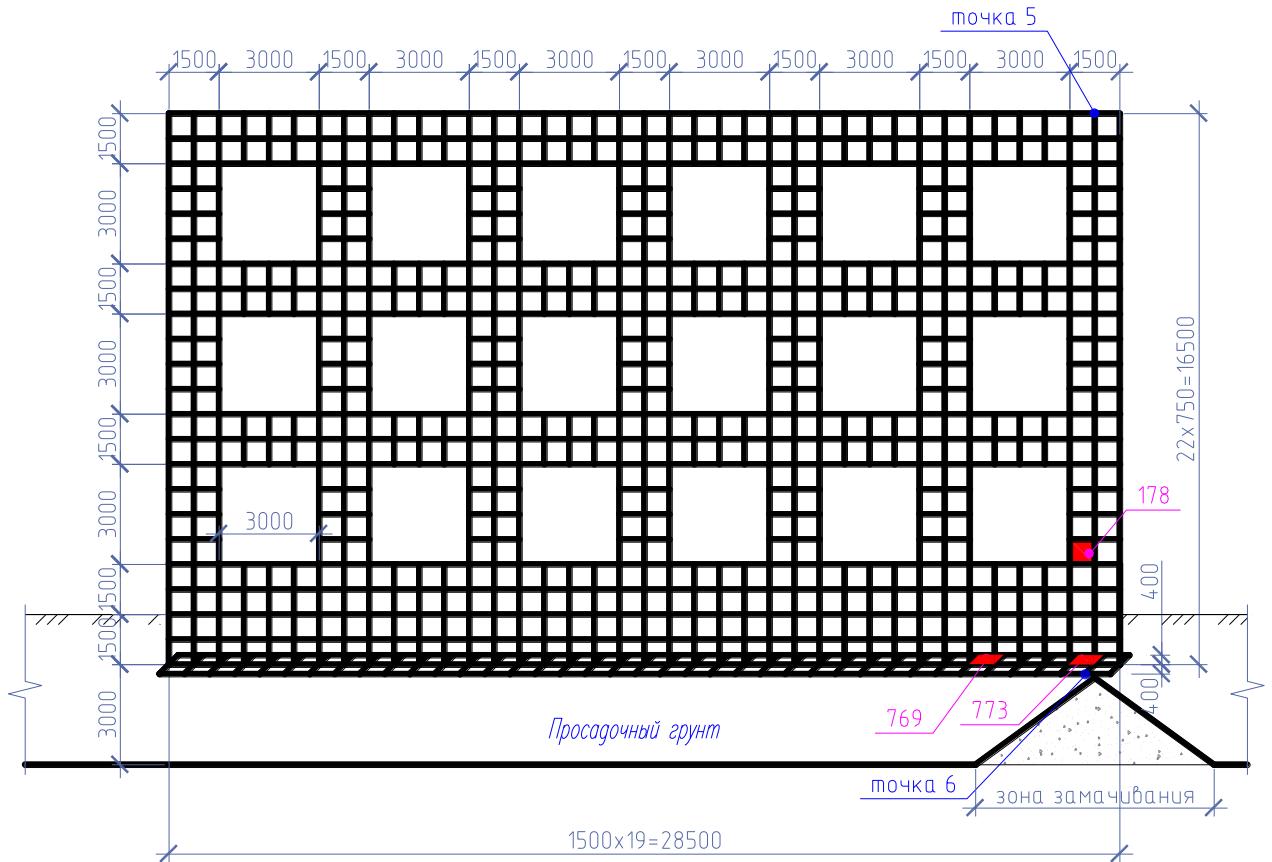


Рис. 3.16. Расчетные сечения для анализа НДС крайней стены при просадке с краю

Для анализа НДС конструкций были выбраны сечения по фундаментам посередине зоны замачивания (элемент 733) как наибольший по просадке элемент и с краю зоны просадки (элемент 769) как наименьший элемент, попадающий в зону влияния, а также сечение по стене здания в простенке как наиболее нагруженное (элемент 178). Для оценки перемещений были выбраны точки с максимально предполагаемыми деформациями по фундаменту – 6 (узел 2822) и сверху стены – 5 (узел 606) под центром максимальной просадки здания.

Рассмотренные схемы просадок оснований посередине и с краю стены, а также частичное закрепление по высоте были просчитаны в ЛИРА-САПР 2013. Моделирование свойств частично закрепленного основания рассмотрено в следующем подразделе.

На основании модели частичного закрепления просадочного основания по высоте и определенных ранее характеристик просадочного грунта были просчитаны варианты моделей в программном комплексе ЛИРА-САПР 2013. В расчетной модели по выбранным ранее элементам были получены поля напряжений, характеризующие НДС конструкции здания.

Результаты вычислений по расчетным сечениям приведены в приложениях Д и Е.

Для оценки и анализа полученные данные по полученным напряжениям при частичном закреплении основания были представлены графически в сравнении с основанием без появления просадочных свойств (рис. 3.17 – 3.24).

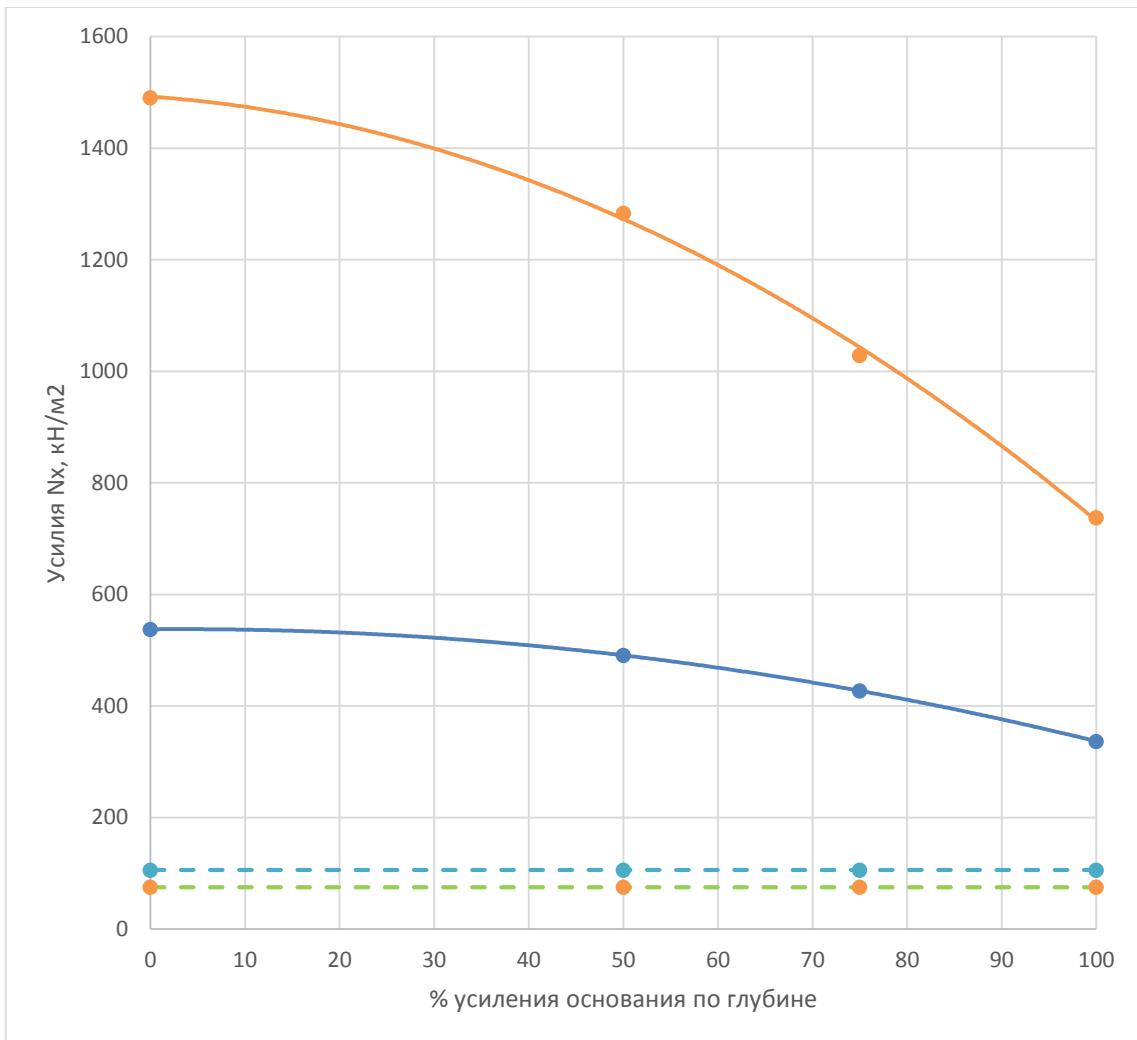


Рис. 3.17. Изменение значений  $N_x$  при различной степени усиления основания при просадке посередине стены, где: ● — элемент фундамента 758;  
 — ● — элемент фундамента 758 без просадки; ● — элемент фундамента 751;  
 — ● — элемент фундамента 751 без просадки; — оранжевая (элемент фундамент 758); — синяя (элемент фундамент 751)

При просадке фундамента и отсутствии усиления в зоне максимальной просадки (элемент 758) наблюдаем резкое увеличение продольных напряжений  $N_x$  с 75 кН/м<sup>2</sup> до 1490 кН/м<sup>2</sup> или около 20 раз. В крайнем сечении под зоной просадки (элемент 751) также наблюдаем увеличение напряжений  $N_x$  со 106 до 537 кН/м<sup>2</sup>, или в 5 раз. Усиление основания оказывается незначительно на крайнем сечении, напряжения снижаются с 537 до 336 кН/м<sup>2</sup>, или в 1,6 раза. На этапе усиления до 50% по среднему сечению (элемент 758) также наблюдается незначительное

изменение напряжений и более значительное – после 75%, а в общей сложности с 1490 до 737, или в 2 раза.

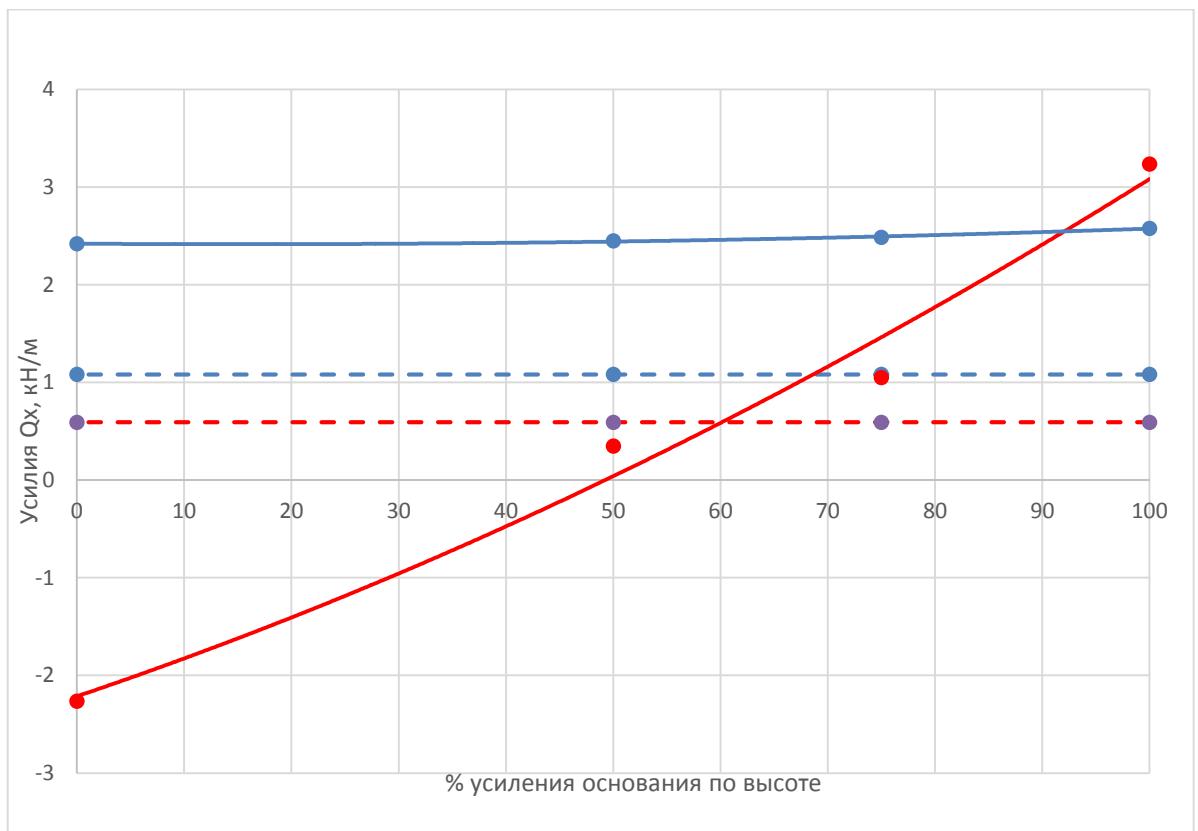


Рис. 3.18. Изменение значений  $Q_x$  при различной степени усиления основания при просадке посередине стены, где: ● элемент фундамента 758; —●— элемент фундамента 758 без просадки; ● элемент фундамента 751; —●— элемент фундамента 751 без просадки; — красная линия — полиномиальная (элемент фундамент 758); — синяя линия — полиномиальная (элемент фундамент 751)

При практически равных значениях продольных напряжений  $Q_x$  для среднего (элемент 758) и крайнего (элемент 751) сечений 0,59 и 1,08 кН/м соответственно при просадке наблюдается возрастание усилий, притом с равноположными знаками. В крайнем сечении (элемент 751) напряжение увеличивается с 1,08 до 2,57 кН/м, в среднем сечении (элемент 758) наблюдается изменение направления напряжений и увеличение нагрузки с 0,59 до -2,26 кН/м или более чем в 5 раз. При усилении основания по крайнему сечению (элемент 751) усилия практически не изменяются, и после 75% идет небольшое увеличение. По среднему сечению

(элемент 758) при усилении основания наблюдается снижение напряжений, которые в интервале 50 – 75% усиления попадают в зону нулевых и первоначальных напряжений до деформации. При последующем усилении наблюдается увеличение напряжений до 3,23 кН/м, или в 5 раз по сравнению с первоначальными.

Таким образом, для нормализации напряжений  $Q_x$  можно считать оптимальным частичное закрепление основания в пределах 50 – 75%.

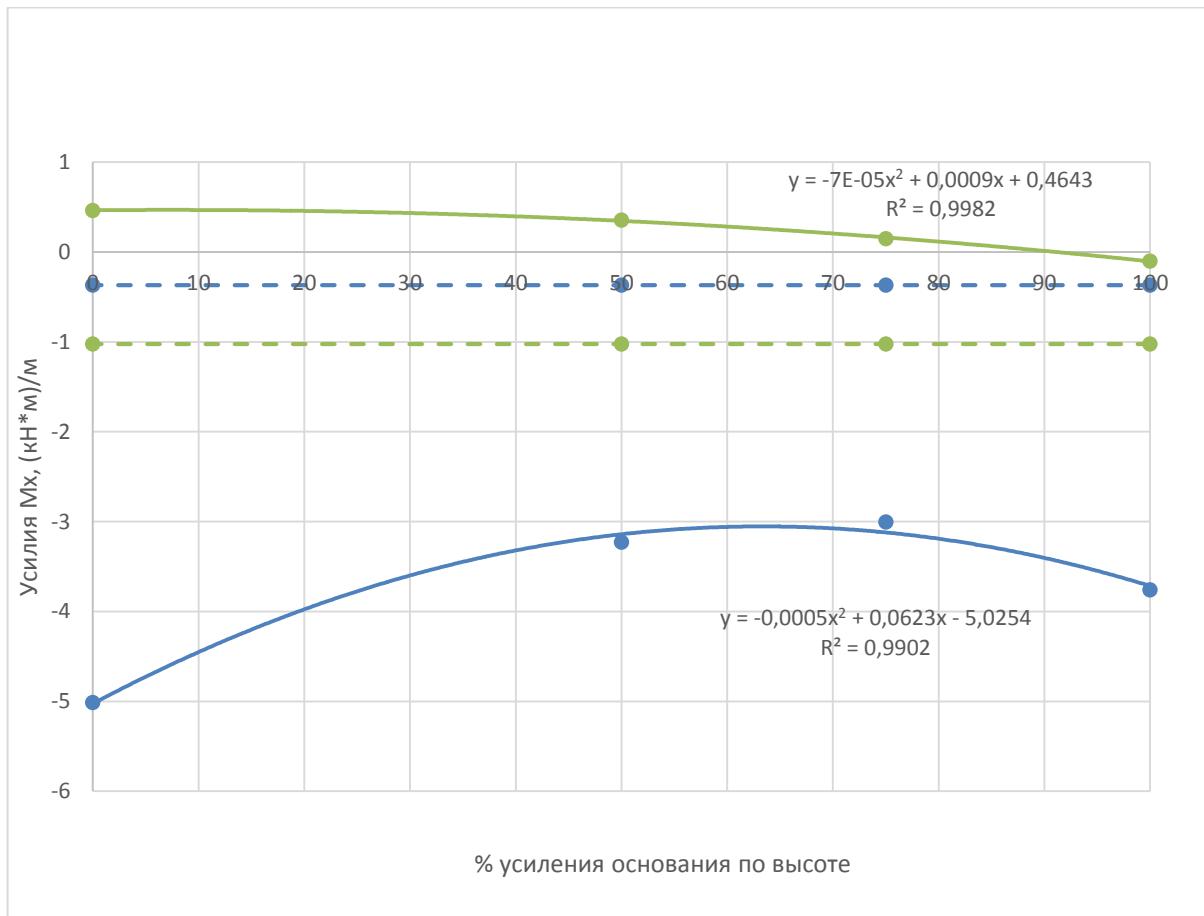


Рис. 3.19. Изменение значений  $M_x$  при различной степени усиления основания при просадке посередине стены, где: ● элемент фундамента 758; — ● — элемент фундамента 758 без просадки; ● — элемент фундамента 751; — ● — элемент фундамента 751 без просадки; — полиномиальная (элемент фундамент 758); — полиномиальная (элемент фундамент 751)

Продольные напряжения  $M_x$  при просадке изменяются для крайнего сечения (элемент 751) с -1,02 до 0,46 (кН\*м)/м с изменением знака усилия. В среднем сечении (элемент 758) происходит увеличение напряжения с 0,36 до 5,01 (кН\*м)/м, или в 14 раз. При усилении основания до 75% наблюдается снижение напряжений и приближение к первоначальным. Но при дальнейшем усилении в среднем сечении наблюдается опять увеличение напряжений с 3,00 до 3,76 (кН\*м)/м, или на 25%.

Для нормализации напряжений  $M_x$  можно считать оптимальным частичное закрепление основания в пределах 75%.

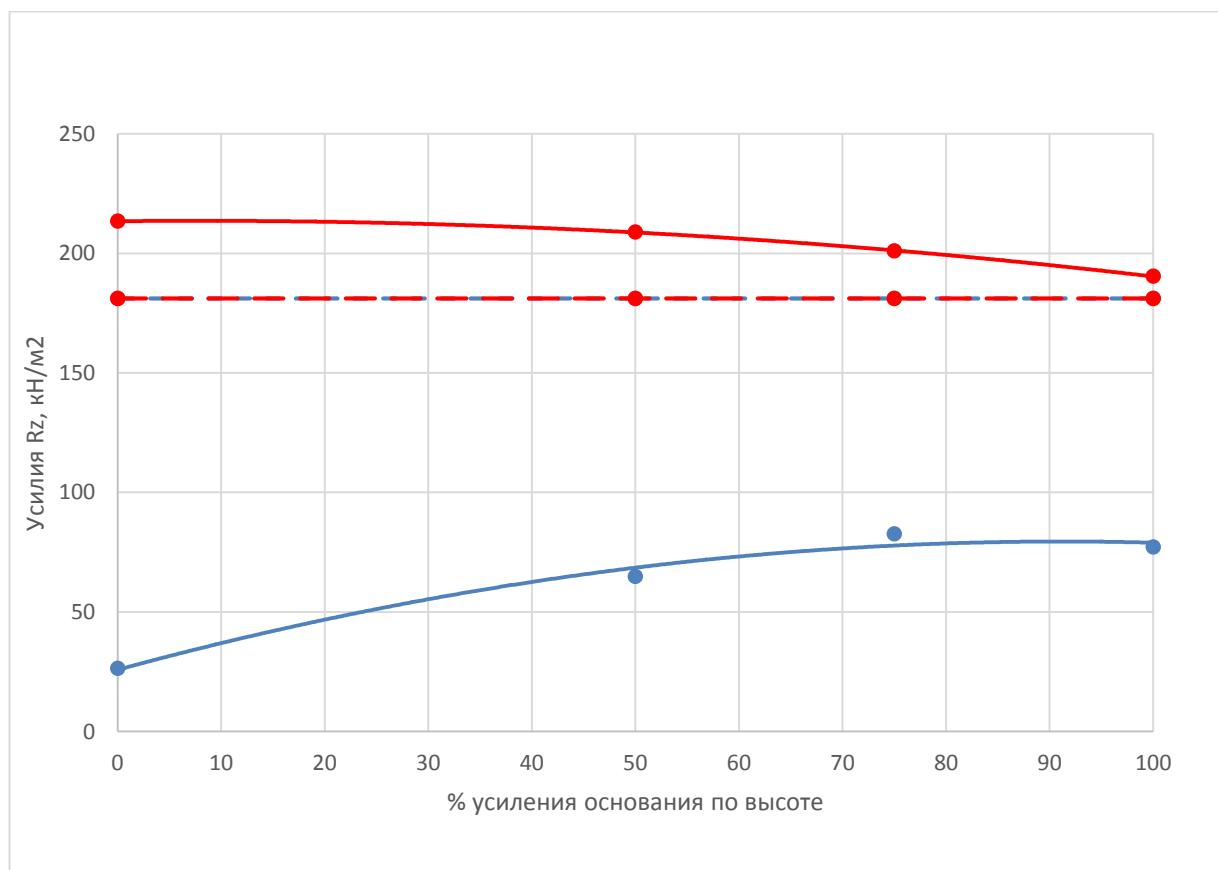


Рис. 3.20. Изменение значений  $R_z$  при различной степени усиления основания при просадке посередине стены, где: ● элемент фундамента 758;  
 — ● — элемент фундамента 758 без просадки; ● — элемент фундамента 751;  
 — ● — элемент фундамента 751 без просадки; — полиномиальная (элемент фундамент 758); — полиномиальная (элемент фундамент 751)

При просадке без закрепления реакция  $R_z$  для крайнего сечения (элемент 751) возрастает со 181 до 213 кН/м<sup>2</sup>, или на 17%, для среднего сечения (элемент 758) ввиду его просадки уменьшается со 181 до 26 кН/м<sup>2</sup>, или в 7 раз. Для крайнего сечения (элемент 751) усиление основания до 50% особого эффекта не дает, и приближение к первоначальным значениям  $R_z$  наступает при 100% усилении. Для среднего сечения наибольшее выравнивание к первоначальному значению наблюдается при 75% усилении – 82 кН/м<sup>2</sup>, дальнейшее усиление приводит к снижению реакции  $R_z$  до 77 кН/м<sup>2</sup> ввиду перераспределения усилий и неравномерной схемы частичного закрепления.

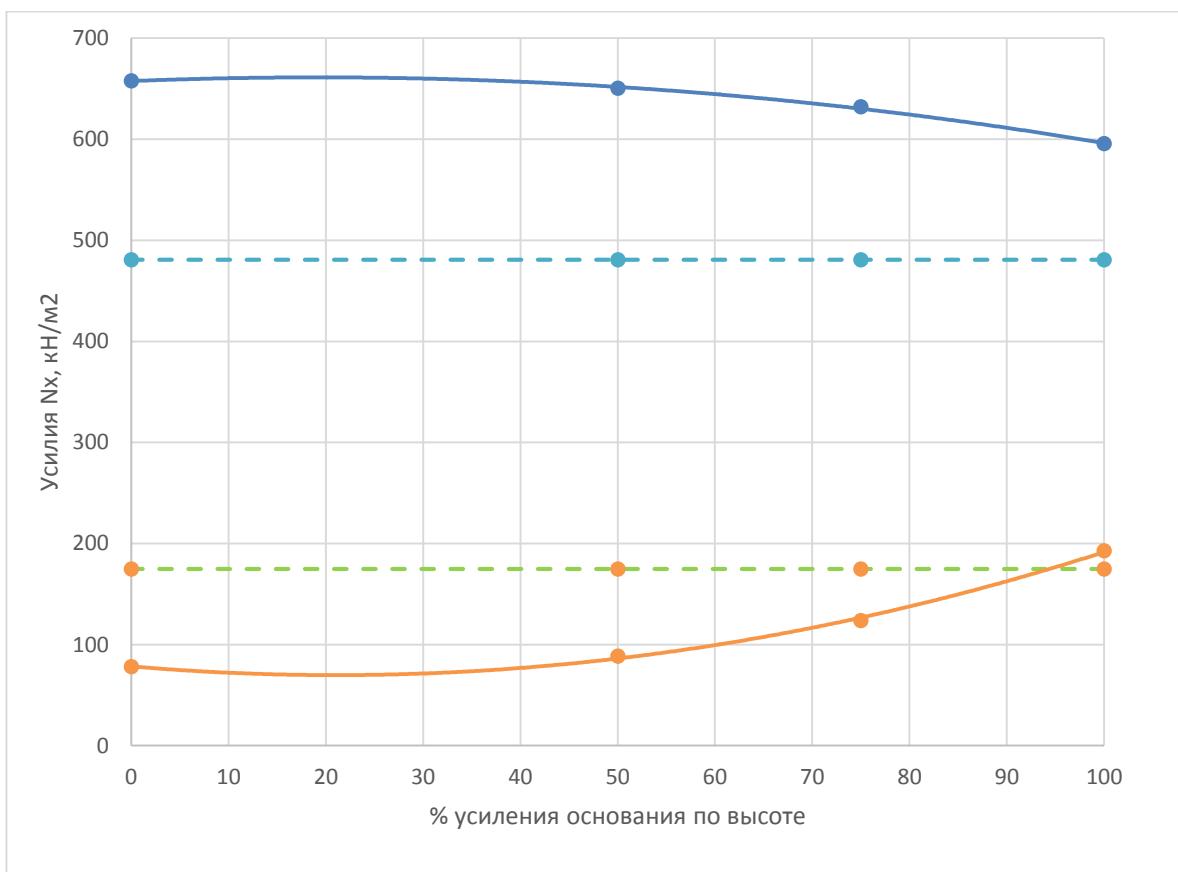


Рис. 3.21. Изменение значений  $N_x$  при различной степени усиления основания при просадке с краю стены, где: ● элемент фундамента 769;  
 ● элемент фундамента 773; — полиномиальная (элемент фундамент 769);  
 — ● — элемент фундамента 769 без просадки; — ● — элемент фундамента 773 без просадки; — полиномиальная (элемент фундамент 773)

При просадке основания по среднему сечению зоны просадки (элемент 773) наблюдается увеличение продольных напряжений  $N_x$  с 480 до 657 кН/м<sup>2</sup>, или на 37%, по крайнему сечению (элемент 769) наблюдается уменьшение напряжений со 174 до 78 кН/м<sup>2</sup>. Усиление основания до 50% значительных изменений по напряжениям не дает. При дальнейшем усилении значения напряжений приближаются к первоначальным (до просадки) и для крайнего сечения достигают его в пределах 90% усиления. Для среднего сечения при 100% усилении напряжение составляет 595 кН/м<sup>2</sup> и не достигает первоначальных значений в 480 кН/м<sup>2</sup>.

Для нормализации напряжений  $N_x$  можно считать частичное закрепление в интервале 75 – 100%.

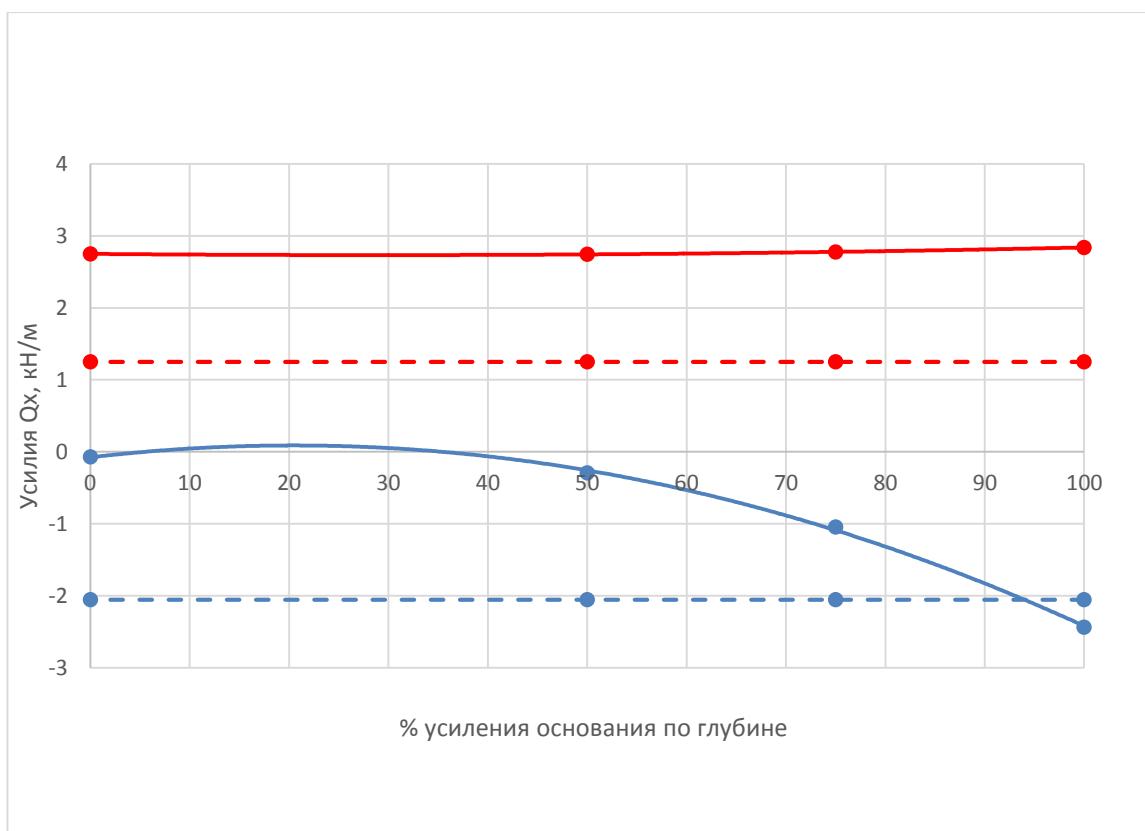


Рис. 3.22. Изменение значений  $Q_x$  при различной степени усиления основания при просадке с краю стены, где: ● элемент фундамента 769; ● – элемент фундамента 773; – полиномиальная (элемент фундамент 769); – ● – элемент фундамента 769 без просадки; – ● – элемент фундамента 773 без просадки; – – полиномиальная (элемент фундамент 773)

При просадке основания без закрепления поперечные напряжения  $Q_x$  в крайнем сечении зоны просадки (элемент 769) возрастают с 1,25 до 2,74 кН/м. В среднем сечении (элемент 773) напряжения падают с 2,05 до нуля. При усилении основания до 50% значительных изменений в напряжениях не наблюдается. При увеличении процента закрепления по крайнему сечению наблюдается небольшое увеличение напряжений до 2,83 кН/м, в среднем сечении происходит выравнивание напряжений с первоначальными в районе 90% закрепления, а при 100% – увеличение до 2,43 кН/м.

Для нормализации напряжений  $Q_x$  можно считать частичное закрепление в интервале 75 – 100%.

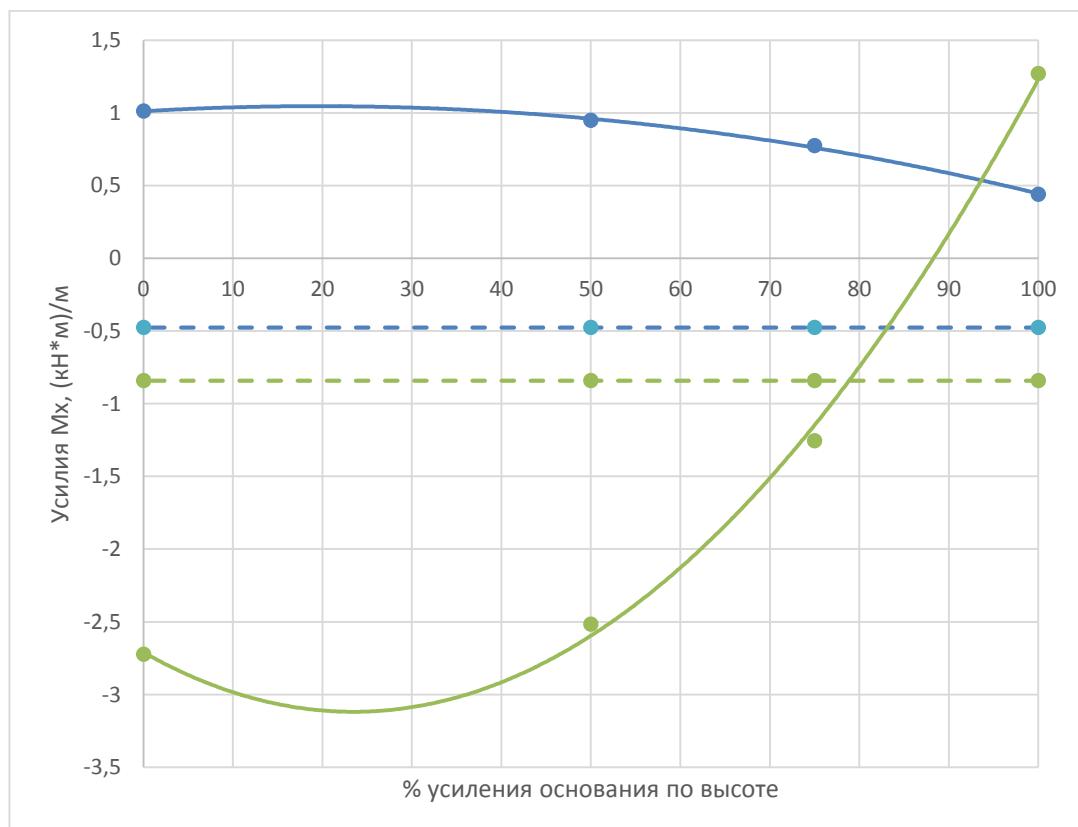


Рис. 3.23. Изменение значений  $M_x$  при различной степени усиления основания при просадке с краю стены, где: ● элемент фундамента 769; ● элемент фундамента 773; — полиномиальная (элемент фундамент 769); —●— элемент фундамента 769 без просадки; —●— элемент фундамента 773 без просадки; — полиномиальная (элемент фундамент 773)

При просадке поперечные напряжения  $M_x$  в крайнем сечении зоны просадки (элемент 769) увеличиваются с -0,47 до 1,01 (кН\*м)/м с изменением знака напряжения. В среднем сечении (элемент 773) также наблюдается увеличение напряжения с -0,8 до -2,72 (кН\*м)/м. При закреплении до 50% основания значительных изменений по напряжениям не наблюдается. При закреплении от 50 до 100% идет плавное выравнивание напряжений по крайнему сечению к первоначальным и резкое изменение напряжений по среднему сечению от -2,51 (кН\*м)/м при 50% до 1,27 (кН\*м)/м при 100%. Выравнивание с первоначальными напряжениями по среднему сечению достигается при 75 – 80% закрепления основания, а нулевые напряжения достигаются при 88%.

Для нормализации напряжений  $M_x$  можно считать частичное закрепление в интервале 75 – 90%.

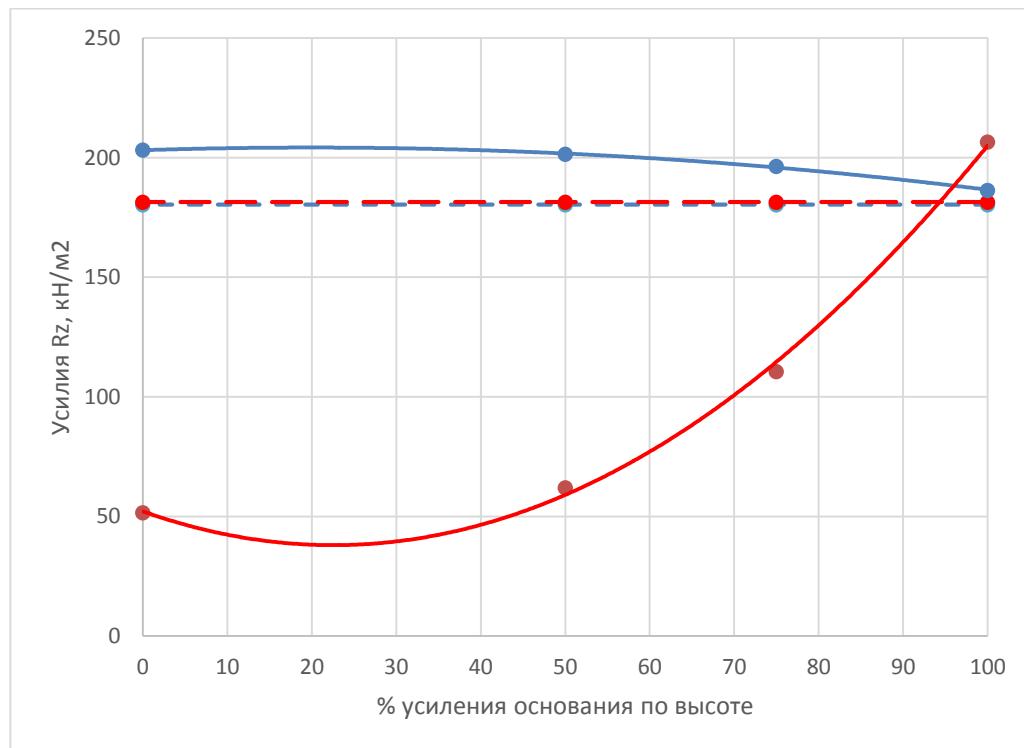


Рис. 3.24. Изменение значений  $R_z$  при различной степени усиления основания при просадке с краю стены, где: ● элемент фундамента 769; ● элемент фундамента 773; — полиномиальная (элемент фундамент 769); —●— элемент фундамента 769 без просадки; —●— элемент фундамента 773 без просадки; — полиномиальная (элемент фундамент 773)

Без закрепления в зоне просадки по крайнему сечению (элемент 769) наблюдается незначительное увеличение реакции  $R_z$  со 180 до 203 кН/м<sup>2</sup>, в среднем сечении (элемент 773) наблюдается значительное снижение реакции со 181 до 51 кН/м<sup>2</sup>. В крайнем сечении при усилении основания значительных изменений в реакции не наблюдается и значение реакции достигает при 100% 186 кН/м<sup>2</sup>. В среднем сечении до усиления 50% значительных изменений реакции не наблюдается. При усилении более 50% наблюдается резкое увеличение реакции, которое при 95% достигает первоначального значения в 181 кН/м<sup>2</sup>, а при 100% – 206 кН/м<sup>2</sup>.

Для нормализации реакций  $R_z$  можно считать частичное закрепление в интервале 90 – 100%.

При анализе перемещений, вызванных деформацией просадочного грунта, наблюдается увеличение перемещений до 36% по фундаменту в месте просадки и до 30% по стене. При этом наблюдается изменение центра деформаций с крайней дальней стены на стену с участком просадочности. При частичном закреплении происходит уменьшение деформаций до 16%. Незначительные абсолютные значения по деформациям обусловлены локальным участком просадочности, жесткостью рассматриваемой конструкции, а также перераспределением усилий в конструкциях без учета возможной потери их несущей способности.

### 3.3. Выводы

1. На основании характеристик закрепленного грунта, полученных в Разделе 2, выполнено моделирование свойств частично закрепленного основания, получены его характеристики, по которым была смоделирована работа бескаркасного здания и определены НДС его конструкций при частичном закреплении основания.

2. Разработана методика определения свойств грунта (осадка, просадка, коэффициент жесткости) при его локальном закреплении. Согласно этой методике определены необходимый процент частичного закрепления основания по высоте,

что составляет в интервале 7 – 42%. Для этого интервала определен коэффициент жесткости основания для среднего ряда в элементе 2782, для крайнего ряда в элементе 3948, что составляет 20% от максимального при закреплении 100% толщи просадочного основания для выполнения условия по просадке и осадке  $S + S_{sl} < S_u = 8$  см.

Задачи по локальному закреплению основания, определению требуемого процента усиления и коэффициента жесткости по условию выполнения минимальных осадок согласно норм [43] решаются аналогично с другими исходными данными.

3. При анализе НДС конструкций зданий и критериев по возникающим напряжениям (снижение до нулевых или первоначальных значений) определено, что для нормализации напряжений  $Q_x$  достаточным можно считать частичное закрепление в пределах 75%; для  $M_x$  – 75 – 90%,  $N_x$  – 75 – 100%. В зависимости от приоритета возникающих усилий точный требуемый процент усиления основания необходимо определять расчетом индивидуально для каждого случая.

4. Деформации, вызванные просадками под одной частью здания, могут оказывать изменение НДС конструкций и на другие части здания, так, при просадке здания посередине стены наблюдается увеличение напряжений  $N_x$  и появление таких напряжений, как  $M_x$ ,  $Q_x$  на соседней средней стене. Даже при наличии локальных зон просадки НДС конструкций здания необходимо рассматривать в комплексе всего здания.

5. При усилении основания существующего здания оценка необходимого процента усиления производится по фактическим значениям усилий, которые конструкция способна воспринять. Так, например, для ленточного фундамента с учетом характеристик бетона и класса арматуры (его геометрии), выполняется расчет нагрузок, которые здание способно воспринять по  $N$ ,  $M$ ,  $Q$ . По принятым формулам или графически определяется требуемый процент закрепления.

При проектировании нового здания процент частичного закрепления необходимо определять исходя из технико-экономического обоснования по расходу материалов на конструкции и на усиление основания.

6. Установлена закономерность изменения коэффициента жесткости основания  $C_z$  от процента частичного закрепления просадочного основания по глубине. Полученная экспоненциальная зависимость показывает незначительное увеличение (на 30%)  $C_z$  при закреплении основания до 50%, а при закреплении 75 – 100% основания – увеличение  $C_z$  на 50%.

## **РАЗДЕЛ 4. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НДС БЕСКАРКАСНОГО ЗДАНИЯ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С ЧАСТИЧНО ЗАКРЕПЛЕННЫМ ПРОСАДОЧНЫМ ОСНОВАНИЕМ**

Численные исследования НДС бескаркасного здания, взаимодействующего с просадочным основанием, при его частичном закреплении выполнены на примере здания средней школы №3, расположенной в Жовтневом районе г. Мариуполя.

### **4.1. Краткая конструктивная характеристика объекта**

Здание школы выполнено по типовому проекту 2Р-02-1/64, привязанному к конкретным инженерно-геологическим условиям, Ждановским отделением Донецкого филиала института Гипроград в 1966 году [145; 146]. Год постройки – 1968.

Нормативный срок эксплуатации – 75 лет. Фактически на момент обследования эксплуатировалось 33 года. Общая площадь – 4,2 тыс. м<sup>2</sup>, строительный объем – 13,6 тыс. м<sup>3</sup>.

Здание представляет собой комплекс Н-образной формы (рис. 4.1), имеющий габаритные размеры в плане 82x42 м и состоящий из основного трехэтажного учебного корпуса (размеры в плане 82x15,1 м) и вспомогательного двухэтажного корпуса (размеры в плане 57,8x12 м), соединенных двухэтажным переходом (размеры в плане 14,8x9 м).

Конструктивная схема здания – бескаркасная с несущими продольными наружными и внутренними стенами.

За относительную отметку ±0,000 принят уровень чистого пола первого этажа трехэтажного учебного корпуса с абсолютной отметкой 67,0 м. Уровень чистого пола первого этажа вспомогательного корпуса и перехода соответствует относительной отметке – 0,500 м. Относительная отметка чистого пола цокольного этажа – 3,300 м.

Фундаменты под стены здания ленточные из сборных железобетонных плит высотой 300 мм (рис. 4.2). Ширина фундаментных плит (по проекту) составляет: 800 мм под продольные наружные стены; 800 мм под поперечные наружные и внутренние стены; 1200 мм под продольную внутреннюю стену по оси Д.

Фундаментные стены здания – из сборных бетонных блоков высотой 600 мм и шириной 500 мм на цементно-песчаном растворе.

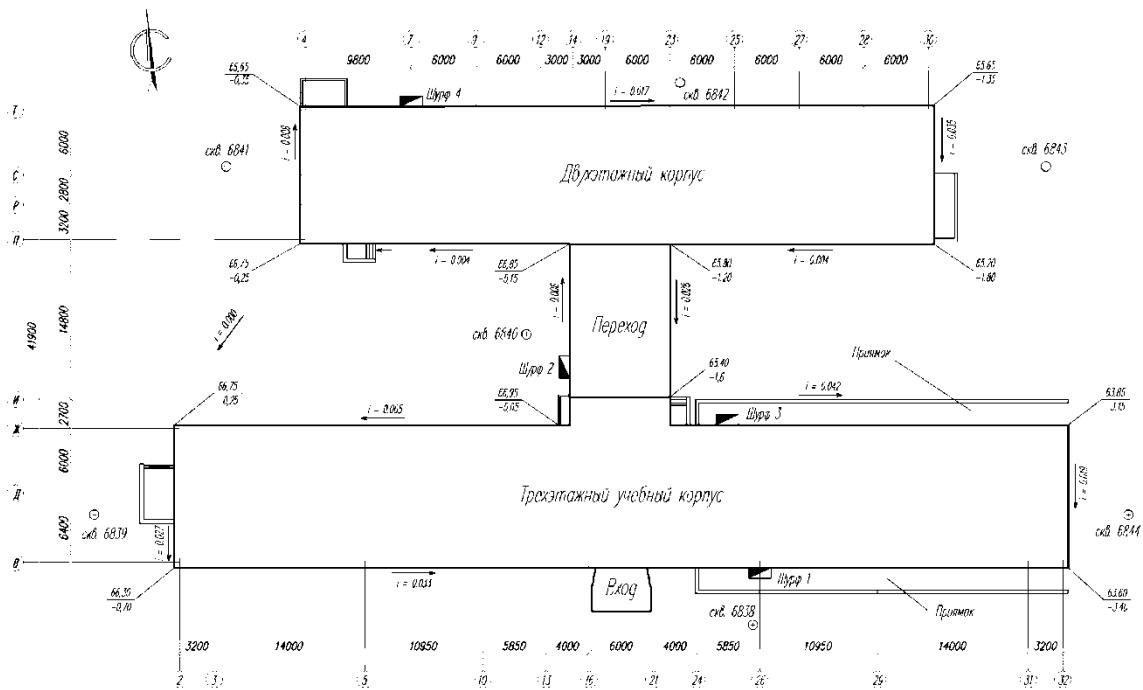


Рис. 4.1. Общий вид здания школы №3 в г. Мариуполе

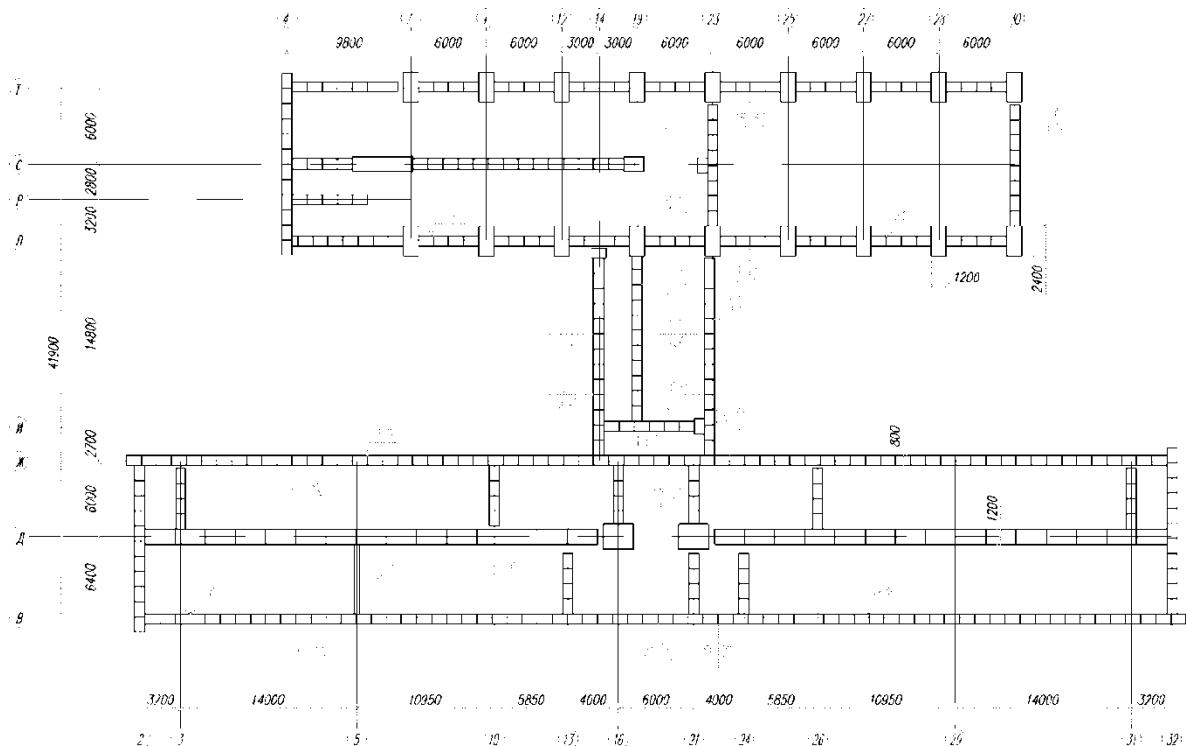


Рис. 4.2. План фундаментов школы №3 в г. Мариуполе

Относительная отметка заложения подошвы фундаментов по длине здания изменяется от – 2,10 до – 4,50 в соответствии с уклоном рельефа местности. При этом глубина заложения ленточного фундамента под наружные стены здания изменяется в диапазоне от 1,5 м до 3,2 м от поверхности планировки.

Стены цокольного этажа выполнены из красного керамического полнотелого кирпича марки 100 на известковом растворе с оштукатуренной наружной поверхностью.

Наружные стены 1 – 3 этажей из силикатного кирпича марки 50 на известковом растворе марки 4 толщиной 510 мм, с учетом штукатурки внутренней поверхности – 540 мм. Внутренние несущие стены из керамического кирпича марки 100 на известковом растворе марки 4 толщиной 380 мм, с учетом штукатурки – 400 мм.

Несущие конструкции перекрытий и покрытия трехэтажного учебного корпуса – сборные железобетонные круглопустотные плиты длиной 3 и 6 м, толщиной 220 мм и шириной 800, 1000, 1200 и 1500 мм.

Перемычки над оконными и дверными проемами – сборные, железобетонные.

Кровля – совмещенная, рулонная. Крыша – плоская с внутренним водостоком.

Окна и двери – деревянные.

Конструктивные меры защиты здания СШ №3 от влияния неравномерных деформаций основания проектом не предусмотрены и в натуре не реализованы.

По степени чувствительности к неравномерным осадкам здание СШ №3 принадлежит к третьей группе – «высокочувствительные» [147]. Это обуславливается наличием следующих факторов:

- бескаркасная конструктивная схема;
- сложная конфигурация здания в плане в сочетании с большой протяженностью и наличием разновысотных и, соответственно, разногруженных частей здания, изначально создающая предпосылки для возникновения неравномерных деформаций основания;

- низкая изгибная жесткость и, соответственно, высокая деформативность продольных стен здания, обусловленная их высокой проёмностью (площадь проемов по главному фасаду составляет около 50% от общей площади фасада);
- невысокие прочностные характеристики стенового материала;
- отсутствие конструктивных мероприятий по защите здания от неравномерных деформаций основания, таких как деформационные швы, поэтажные железобетонные поясы и т.д.

#### **4.2. Инженерно-геологические условия объекта**

Площадка средней школы №3 расположена в Жовтневом районе г. Мариуполя по ул. Апатова, 132 в 50-ти м северо-западнее пересечения ее с ул. Осипенко.

В геоморфологическом отношении площадка расположена в верхней части левого склона б. Кленовой, в геоструктурном – восточный борт Причерноморской впадины.

Рельеф площадки с уклоном на юго-восток. Абсолютные отметки земной поверхности возле здания колеблются в пределах 67,0 – 63,6 м.

Уклон природного рельефа в пределах застройки составляет:

- со стороны главного (южного) фасада в осях 2 – 32  $i = 0,033$ ;
- со стороны (северного) фасада в осях 30 – 4  $i = 0,017$ ;
- в поперечном направлении от 0,012 до 0,048.

В соответствии с инженерно-геологическими изысканиями, выполненными в 1991 году Мариупольским отделением Донецкого филиала института «УкрвостокГИИТИЗ» [148] естественным основанием фундаментов школы служат суглинки ИГЭ-3 и ИГЭ-4, в сжимаемой толще залегают грунты ИГЭ-4 и ИГЭ-5. Инженерно-геологическое строение участка в продольном направлении здания показано на рис. 4.3 (расположение скважин в плане – см. рис. 4.1).

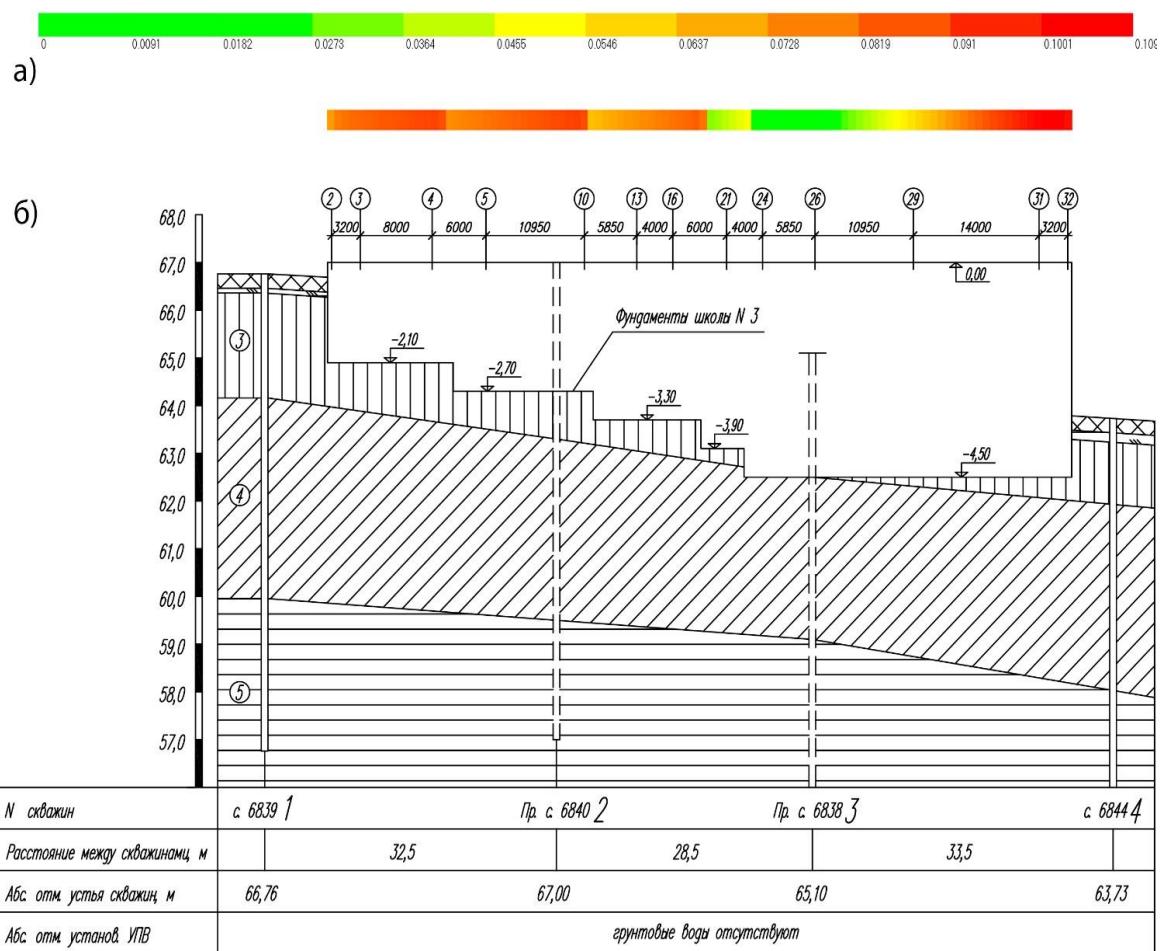


Рис. 4.3. а – инженерно-геологический разрез вдоль главного фасада школы; б – изополя вертикальных деформаций основания по длине фундамента

Сверху от поверхности земли залегают насыпной слой и почвенно-растительный слой общей мощностью от 0,4 до 1,2 м. Ниже, считая сверху вниз, залегают:

ИГЭ-3 – суглинки желто-серые, макропористые, с гнездами карбонатов, полутвердые, вскрытой мощностью до 2,2 м;

ИГЭ-4 – суглинки желто-бурые, коричневато-бурые, твердые с включением мучнистых карбонатов, практически непросадочные, вскрытой мощностью в диапазоне 3,4 – 4,2 м;

ИГЭ-5 – глины бурые, твердые, с примазками гидроокислов  $M_n$ , к основанию слоя желтоватые с включениями кристаллического гипса, пройденной мощностью до забоя скважин 2,5 – 4,0 м.

По данным работы [148], значения физико-механических, прочностных и деформационных характеристик элемента ИГЭ-3 представлены в таблице 4.1, а элементов ИГЭ-4, ИГЭ-5 – в таблице 4.2. При этом характеристики, описывающие просадочные свойства ИГЭ-3, приводятся в двух вариантах:

- начальные (приняты как наиболее неблагоприятные по результатам проведенных в 1996 году инженерно-геологических изысканий участка, расположенного на 40 метров западнее от школы №3 [149]);
- остаточные (приняты по результатам компрессионных испытаний грунта, отобранного в зоне влияния фундаментов в шурфах 2, 4 [148]).

На период изысканий [148] в январе 1991 года вплоть до глубины 10 м грунтовые воды не встречены. По схеме природных условий площадка относится к IV типу по степени потенциальной подтопляемости. Однако при интенсивных аварийных утечках из водонесущих коммуникаций, а также инфильтрации атмосферных осадков в осенне-весенние периоды не исключается возможность образования линз временного водоносного горизонта типа «Верховодки» в толще просадочных грунтов ИГЭ-3.

Тип грунтовых условий площадки по просадочности – первый, так как просадка от собственного веса при замачивании грунта не произойдет в связи с тем, что давления от собственного веса грунта  $\sigma_{zg}$  в пределах всей просадочной толщи не превышают начального просадочного давления  $P_{sl}$ .

Мощность просадочных суглинков, залегающих непосредственно под подошвой фундаментов, изменяется в диапазоне от 0 до 1,35 м. При этом глубиной заложения фундаментов, соответствующей базовому проекту привязки, обеспечивается полное прохождение просадочной толщи на участке между осями «В» – «Ж» и «24» – «26». Учитывая то, что указанные участки находятся практически по центру здания, даже незначительная реализация просадочных свойств основания, расположенного по обе стороны от них, способствует возникновению существенной концентрации растягивающих усилий в вышерасположенных стенах и, как следствие, может привести к образованию разлома здания на этих участках.

Таблица 4.1. Значения физико-механических, прочностных и деформационных характеристик элемента ИГЭ-3

| №                             | Наименование характеристики, обозначение и размерность   | Значение ИГЭ-3   |  |
|-------------------------------|--|--|--|
|                               |  | нач.   | остат.   |
| 1                             | 2  | 3  | 4  |
| <b>Нормативные показатели</b> |  |  |  |
| 1                             | Удельный вес частиц грунта, $\gamma_s$ , кН/м <sup>3</sup>   | 26,39  | 26,39  |
| 2                             | Удельный вес грунта, $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>  | 17,07  | 17,27  |
| 3                             | Удельный вес сухого грунта, $\gamma_d$ , кН/м <sup>3</sup>   | 14,62  | 14,16  |
| 4                             | Удельный вес водонасыщенного грунта, $\gamma_{sat}$ , кН/м <sup>3</sup>  | 18,84  | 18,47  |
| 5                             | Коэффициент пористости, $e$  | 0,81   | 0,86   |
| 6                             | Влажность природная, $W$ , д.е.  | 0,17   | 0,22   |
| 7                             | Влажность на границе раскатывания, $W_P$ , д.е.  | 0,22   | 0,21   |
| 8                             | Влажность на границе текучести, $W_L$ , д.е.   | 0,36   | 0,35   |
| 9                             | Полная влагоемкость, $W_{sat}$ , д.е.  | 0,30   | 0,31   |
| 10                            | Число пластичности, $I_P$ , д.е.   | 0,14   | 0,14   |
| 11                            | Показатель текучести, $I_L$ ,  | -0,36  | 0,07   |
| 12                            | Показатель текучести водонасыщенного грунта, $I_{Lsat}$  | 0,47   | 0,69   |
| 13                            | Степень влажности, $S_r$   | 0,57   | 0,67   |
| 14                            | Относительная просадочность, $\varepsilon_{sl}$ , при давлении 0,05 МПа<br>при давлении 0,10 МПа<br>при давлении 0,15 МПа<br>при давлении 0,20 МПа<br>при давлении 0,25 МПа<br>при давлении 0,30 МПа | 0,0040<br>0,0085<br>0,0125<br>0,0158<br>0,0207<br>0,0245 | 0,0030<br>0,0060<br>0,0090<br>0,0130<br>0,0150<br>0,0200 |
| 15                            | Начальное просадочное давление, $P_{sl}$ , МПа   | 0,1185   | 0,1590   |
| <b>Расчетные показатели*</b>  |  |  |  |
| 1                             | Удельный вес грунта, $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>  | $\frac{17,00}{16,95}$                                    | $\frac{16,84}{16,45}$                                    |
| 2                             | Удельный вес водонасыщенного грунта, $\gamma_{sat}$ , кН/м <sup>3</sup>  | $\frac{18,76}{18,70}$                                    | $\frac{18,34}{18,21}$                                    |
| 3                             | Удельный вес взвешенного в воде грунта, $\gamma_{sb}$ , кН/м <sup>3</sup>  | $\frac{9,11}{9,05}$                                      | $\frac{8,76}{8,64}$                                      |
| 4                             | Модуль деформации грунта в природном состоянии, $E$ , МПа  | 21   | 18   |

## Продолжение таблицы 4.1

| 1 | 2   | 3                     | 4                     |
|---|---|-----------------------|-----------------------|
| 5 | Модуль деформации грунта в заданном состоянии, $E_{sat}$ , МПа            | 8,5                   | 11                    |
| 6 | Степень изменчивости сжимаемости, $\alpha$                                | 2,47                  | 1,64                  |
| 7 | Удельное сцепление грунта в заданном состоянии, $c_{sat}$ , МПа           | $\frac{0,020}{0,013}$ | $\frac{0,016}{0,014}$ |
| 8 | Угол внутреннего трения грунта в заданном состоянии, $\phi_{sat}$ , град. | $\frac{20,0}{17}$     | $\frac{19}{19}$       |

Примечание:

\* В числителе – показатели для расчета по деформациям, в знаменателе – показатели для расчета по несущей способности.

Таблица 4.2. Значения физико-механических, прочностных и деформационных характеристик элемента ИГЭ-4, ИГЭ-5

| №                             | Наименование характеристики, обозначение и размерность                                       | Среднее значение      |                       |
|-------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
|                               |  | ИГЭ-4                 | ИГЭ-5                 |
| 1                             | 2  | 3                     | 4                     |
| <b>Нормативные показатели</b> |  |                       |                       |
| 1                             | Удельный вес частиц грунта, $\gamma_s$ , кН/м <sup>3</sup>                                   | 26,51                 | 26,71                 |
| 2                             | Удельный вес грунта в естественном состоянии, $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>                   | 18,82                 | 18,79                 |
| 3                             | Удельный вес сухого грунта, $\gamma_d$ , кН/м <sup>3</sup>                                   | 15,82                 | 15,55                 |
| 4                             | Удельный вес водонасыщенного грунта, $\gamma_{sat}$ , кН/м <sup>3</sup>                      | 19,58                 | 19,44                 |
| 5                             | Удельный вес взвешенного в воде грунта, $\gamma_{sb}$ , кН/м <sup>3</sup>                    | 9,94                  | 9,80                  |
| 6                             | Коэффициент пористости природного сложения, $e$  | 0,67                  | 0,72                  |
| 7                             | Влажность природная, $W$ , д.е.  | 0,19                  | 0,21                  |
| 8                             | Влажность на границе раскатывания, $W_p$ , д.е.  | 0,23                  | 0,24                  |
| 9                             | Влажность на границе текучести, $W_L$ , д.е.   | 0,39                  | 0,42                  |
| 10                            | Полная влагоемкость, $W_{sat}$ , д.е.  | 0,24                  | 0,25                  |
| 11                            | Число пластичности, $I_p$ , д.е.   | 0,16                  | 0,18                  |
| 12                            | Показатель текучести, $I_L$ ,  | -0,25                 | -0,17                 |
| 13                            | Показатель текучести водонасыщенного грунта, $I_{Lsat}$                                      | 0,05                  | 0,07                  |
| 14                            | Степень влажности, $S_r$   | 0,76                  | 0,79                  |
| <b>Расчетные показатели*</b>  |  |                       |                       |
| 1                             | Удельный вес грунта в естественном состоянии, $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>                   | $\frac{18,68}{18,58}$ | $\frac{18,62}{18,50}$ |
| 2                             | Удельный вес водонасыщенного грунта в естественном состоянии, $\gamma_w$ , кН/м <sup>3</sup> | $\frac{19,48}{19,41}$ | $\frac{19,31}{19,22}$ |
| 3                             | Удельный вес взвешенного в воде грунта, $\gamma_{sb}$ , кН/м <sup>3</sup>                    | $\frac{9,84}{9,80}$   | $\frac{9,70}{9,61}$   |
| 4                             | Модуль деформации грунта в заданном состоянии, $E$ , МПа                                     | 19                    | 21,8                  |

| 1 | 2   | 3                     | 4                     |
|---|---|-----------------------|-----------------------|
| 5 | Удельное сцепление грунта в заданном состоянии, $c_w$ , МПа           | $\frac{0,030}{0,029}$ | $\frac{0,058}{0,039}$ |
| 6 | Угол внутреннего трения грунта в заданном состоянии, $\phi_w$ , град. | $\frac{19}{18}$       | $\frac{19}{17}$       |

### Примечание:

\* В числителе – показатели для расчета по деформациям, в знаменателе – показатели для расчета по несущей способности.

#### 4.3. Результаты натурного обследования

В результате натурного освидетельствования стен и простенков здания СШ №3 обнаружены многочисленные трещины, имеющие ярко выраженную осадочную природу происхождения. Ширина раскрытия основной массы трещин изменяется в диапазоне от 0,05 до 10 мм, отдельные трещины имеют ширину раскрытия от 10 до 25 мм. Схема расположения трещин по главному фасаду и зафиксированная их ширина раскрытия на момент обследования приведены на рис. 4.4.

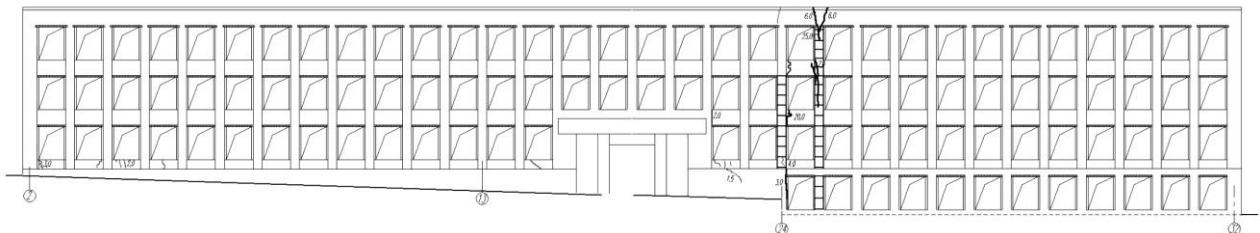


Рис. 4.4 Главный фасад школы №3

Трещины с шириной раскрытия от 10 до 25 мм имеют характер развития преимущественно сверху вниз и расположены на наружных поверхностях стен:

- по осям «В» и «Ж» на участке между осями «24» – «26»;
  - по осям «14» и «22» на участке между осями «Ж» – «И»;
  - по осям «П» и «Т» на участке между осями «4» – «7».

Трещины проходят по растворным швам и камню вертикально и наклонно с образованием в сочетании с более мелкими трещинами прерывистых линий,

распространяющихся по всей высоте здания. Простенки, по которым проходят подобные трещины, усилены металлическими обоймами в соответствии с рекомендациями [150], однако визуальный осмотр конструкций усиления показал, что работы по устройству обойм в некоторых случаях выполнены некачественно, в результате чего усиление не выполняет своих функций.

Трещины с шириной раскрытия от 3 до 10 мм имеют вертикальную или наклонную ориентацию, проходят преимущественно по растворным швам с образованием уступовидных сплошных линий и расположены в основном в местах примыкания двухэтажного перехода к главному и вспомогательному корпусу, на стенах лестничных клеток, а также на наружных и внутренних продольных стенах трехэтажного учебного корпуса между осями «21» – «26». При этом необходимо отметить, что трещины в стенах учебного корпуса на участке в осях «21» – «26» начинаются в уровне плит покрытия третьего этажа в окрестности оси «24» и проходят по всей высоте здания, реализуясь в швах между плитами перекрытий, разветвляясь на внутренней продольной стене и смещаясь по мере развития в сторону центральной лестничной клетки. Отдельные ответвления выходят на лестничную клетку в уровне перекрытий над первым этажом.

Трещины с раскрытием менее 3 мм расположены как в уже указанных местах, так и в наружных и внутренних продольных и поперечных стенах двухэтажного вспомогательного корпуса.

Волосные трещины с шириной раскрытия до 0,2 мм наблюдаются на оштукатуренных (внутренних) поверхностях стен практически во всех частях здания, однако наиболее четкая картина из трещин этого типа просматривается на третьем этаже восточного крыла учебного корпуса, где эти трещины имеют наклонную ориентацию, нисходящую к центру здания, и расположены на внутренней поверхности в верхней части всех простенков.

Характерным повреждением для конструкций перекрытия и покрытия, не снижающим его прочности и устойчивости, является раскрытие горизонтальных швов между плитами, наблюдающееся преимущественно в покрытии трехэтажного учебного корпуса, а также в перекрытиях всех этажей на участках между осями

«21» – «26» и «31» – «32». При этом ширина раскрытия этих швов составляет 0,5 – 1 мм, однако за счет образующихся местами выпадений раствора создается впечатление более значительных повреждений. Полная ширина раскрытых швов, накопленная за весь период эксплуатации, достигает в отдельных случаях 10 – 12 мм.

#### **4.4. Обоснование необходимости закрепления основания**

Защита здания от просадочных деформаций основания в соответствии с проектом осуществляется путем недопущения увлажнения основания фундаментов, что в сложившихся условиях эксплуатации является ненадежным и трудно осуществимым методом. Исходя из практического опыта эксплуатации зданий и сооружений в аналогичных условиях, можно сделать вывод о дальнейшем последовательном и неотвратимом увеличении влажности грунтового массива под пятном здания в результате нарушения его естественной аэрации и периодическими подпитками поверхностными водами. С учетом того, что давления, действующие по подошве большинства фундаментов, превышают начальное просадочное давление, уместно предположить дальнейшее развитие просадочных деформаций грунта во времени вплоть до полной реализации его просадочных свойств.

Реализованное в натуре в соответствии с рекомендациями [150] усиление отдельных простенков наружных стен металлической обоймой, безусловно, повысило надежность усиленных конструкций, однако не устранило объективных причин деформирования опорного остова здания. Реализация рекомендованной в работе [148] силикатизации грунтов ИГЭ-3 в соответствии с проектом [151] в случае качественного выполнения работ позволила бы исключить неравномерные деформации основания, вызванные просадками грунта, однако по ряду объективных причин работы по улучшению основания фундаментов не были выполнены. Учитывая вышеизложенное, а также то, что продолжающиеся деформации опорного остова здания способны существенно ухудшить его состояние вплоть до аварийного (состояние IV), необходимо применение

рационального комплекса мероприятий, обеспечивающих дальнейшие, как минимум удовлетворительные, условия эксплуатации здания СШ №3.

#### 4.5. Предложения по частичному закреплению просадочного грунта

Далее в работе рассматривается часть здания школы №3, представленная трехэтажным корпусом (рис. 4.5), как наиболее подверженного деформациям от просадки грунта.

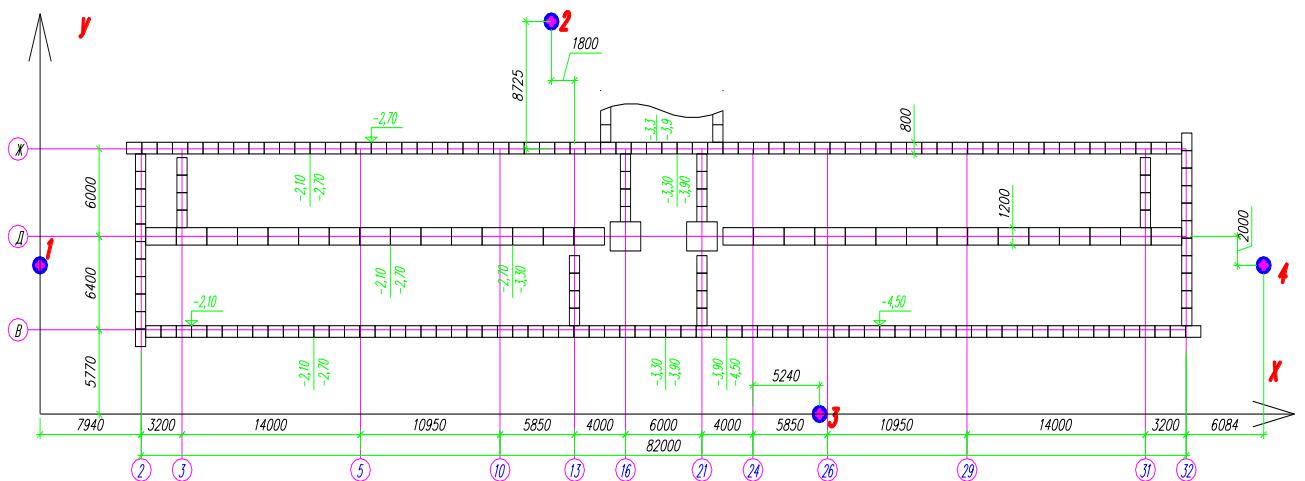


Рис. 4.5. Фундаменты трехэтажного корпуса здания школы №3 и расположение скважин инженерно-геологических изысканий

Для данного объекта Ростовским ПромстройНИИпроектом в 1991 году был разработан проект по химическому закреплению (силикатизации) основания [151]. Схема закрепления основания фундаментов в соответствии с этим проектом представлена на рис. 4.6.

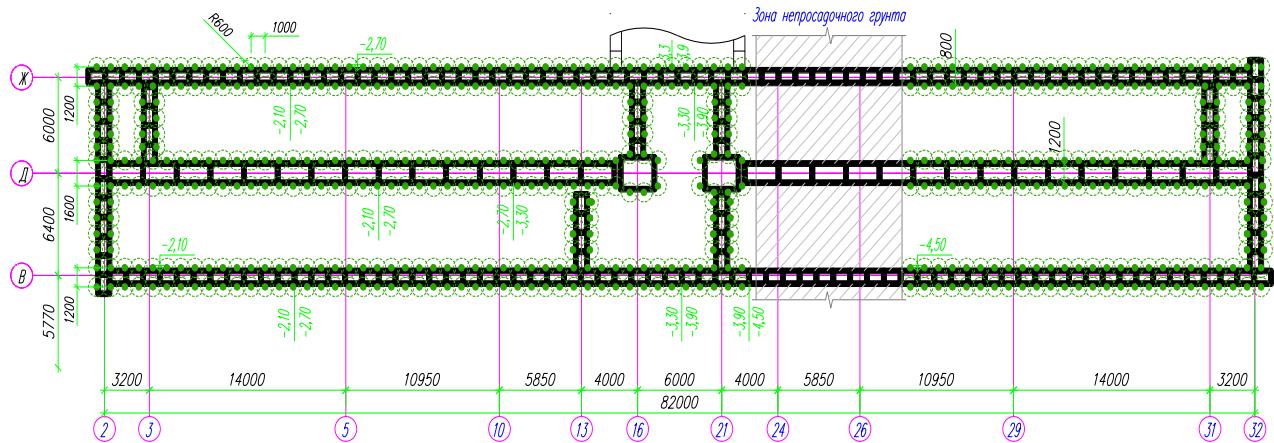


Рис. 4.6. План зон закрепления фундаментов по проекту Ростовского  
ПромстройНИИпроекта

Основные проектные характеристики химического закрепления:

- радиус инъектирования – 0,6 м;
  - расстояние между инъекциями в ряду – 1,0 м;
  - высота закрепления одной заходки – 1,30 м;
  - расход раствора на заходку (раствор силиката натрия с водой плотностью 1,2 г/см<sup>3</sup>) – 370 л;
  - объем закрепления от одной заходки – 1,47 м<sup>3</sup>;
  - закрепляющий раствор – водный раствор силиката натрия (жидкое стекло) плотностью 1200 кг/м<sup>3</sup>.

Стоимость закрепляющего раствора активной кремниевой кислоты с ПАА представлена в таблице 4.4. Расчет стоимости работ по данному варианту закрепления представлен в таблице 4.7.

На основании данного проекта был рассмотрен вариант частичного закрепления основания фундаментов разработанным закрепляющим составом по предложенной методике.

Разработка и анализ частичного закрепления велось в соответствии с нормативными документами [43; 124] и методикой, разработанной в Разделе 3, по следующей схеме:

- а) моделирование в программе DesCon частичного закрепления по высоте и в плане просадочного основания соответственно 100, 75, 50 и 25%, определение

осадок, остаточных просадок и коэффициентов жесткости основания для каждого варианта;

б) моделирование в программе ЛИРА-САПР 2013 частичного закрепления в плане и по высоте с заданием соответствующих коэффициентов жесткости в зонах закрепления;

в) оценка результатов моделирования по требованиям первой и второй группы предельных состояний и выбор оптимального варианта;

г) технико-экономическое сравнение выбранного варианта с вариантом сплошного закрепления, предложенного Ростовским ПромстройНИИпроектом [151].

Исходными данными для моделирования являются:

- общие сведения: назначение объекта, конструктивная схема, город строительства;
- требования к расчету: относительная разность осадок, максимальная осадка;
- характеристики грунтов по слоям на основании инженерно-геологических изысканий; задание слоев и расположение скважин в координатах программы;
- для оценки общей картины деформаций на просадочном основании и для соответствия полученных результатов данным проекта закрепления Ростовского ПромстройНИИпроекта был рассмотрен вариант полного замачивания просадочного основания по всей площади здания.

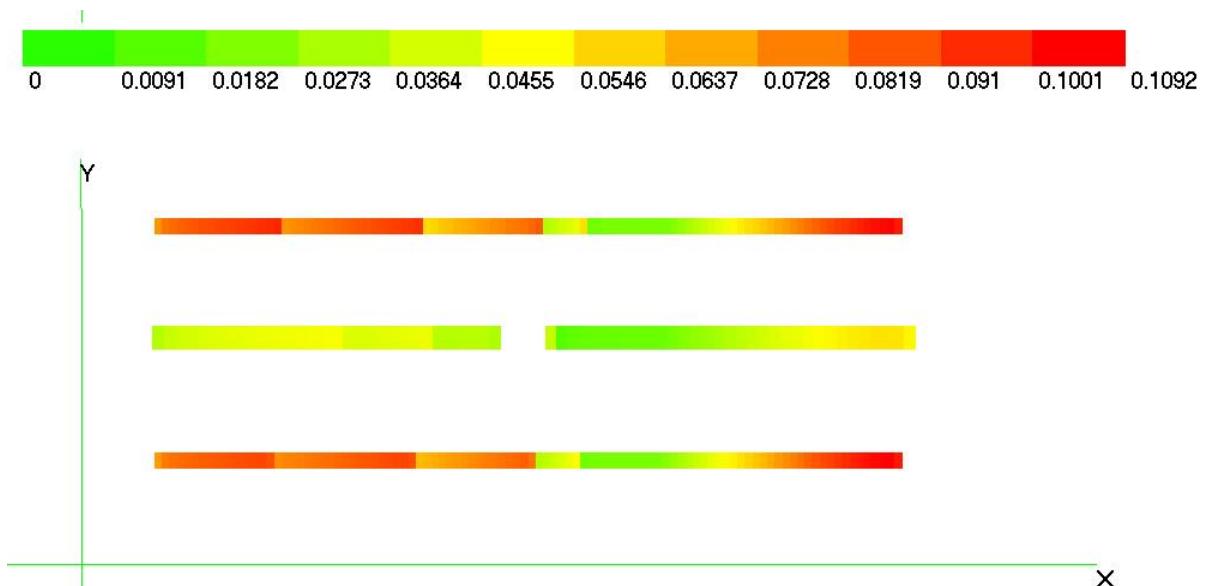
Критерием оценки локального закрепления в плане и по высоте служили:

- согласно ДСТУ Б.В.1.2.-3:2006 «Прогибы и перемещения», п. 4.6 вертикальные и горизонтальные прогибы и перемещения от постоянных, длительных и кратковременных конструкций не должны превышать 1/150 пролета, т. е.  $1/150 \times 6000 = 30$  мм;
- согласно нормативной литературе [43] величины деформаций здания совместно с основанием не должны превышать: максимальная осадка  $S + S_{sl} < S_u = 8$  см; относительная разность осадок  $\Delta S/l < 0,002$ ;
- величина закрепления по высоте принималась с шагом 1 м согласно длине рабочей (перфорированной) части инъектора.

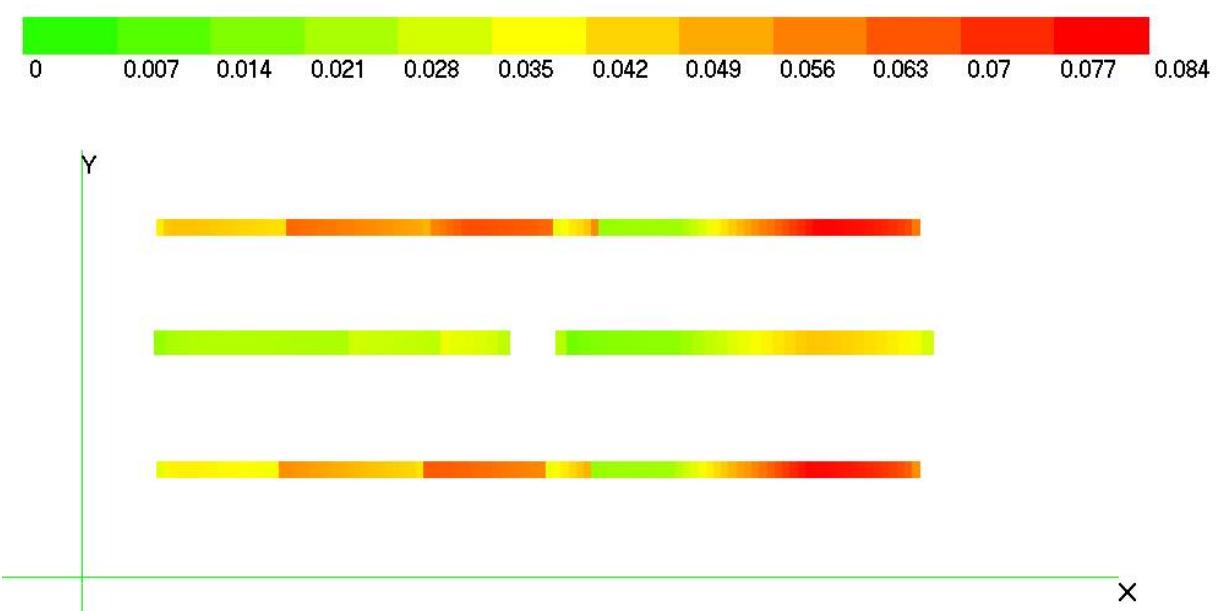
#### 4.6. Результаты численных исследований при частичном закреплении просадочного грунта по глубине

Вследствие выполненного расчета по осадкам и просадкам фундаментов без закрепления и с частичным закреплением в программе Descon, были получены величины вертикальных деформаций основания фундаментов продольных стен здания школы, представленных ниже на рис. 4.7.

а)



б)



в)

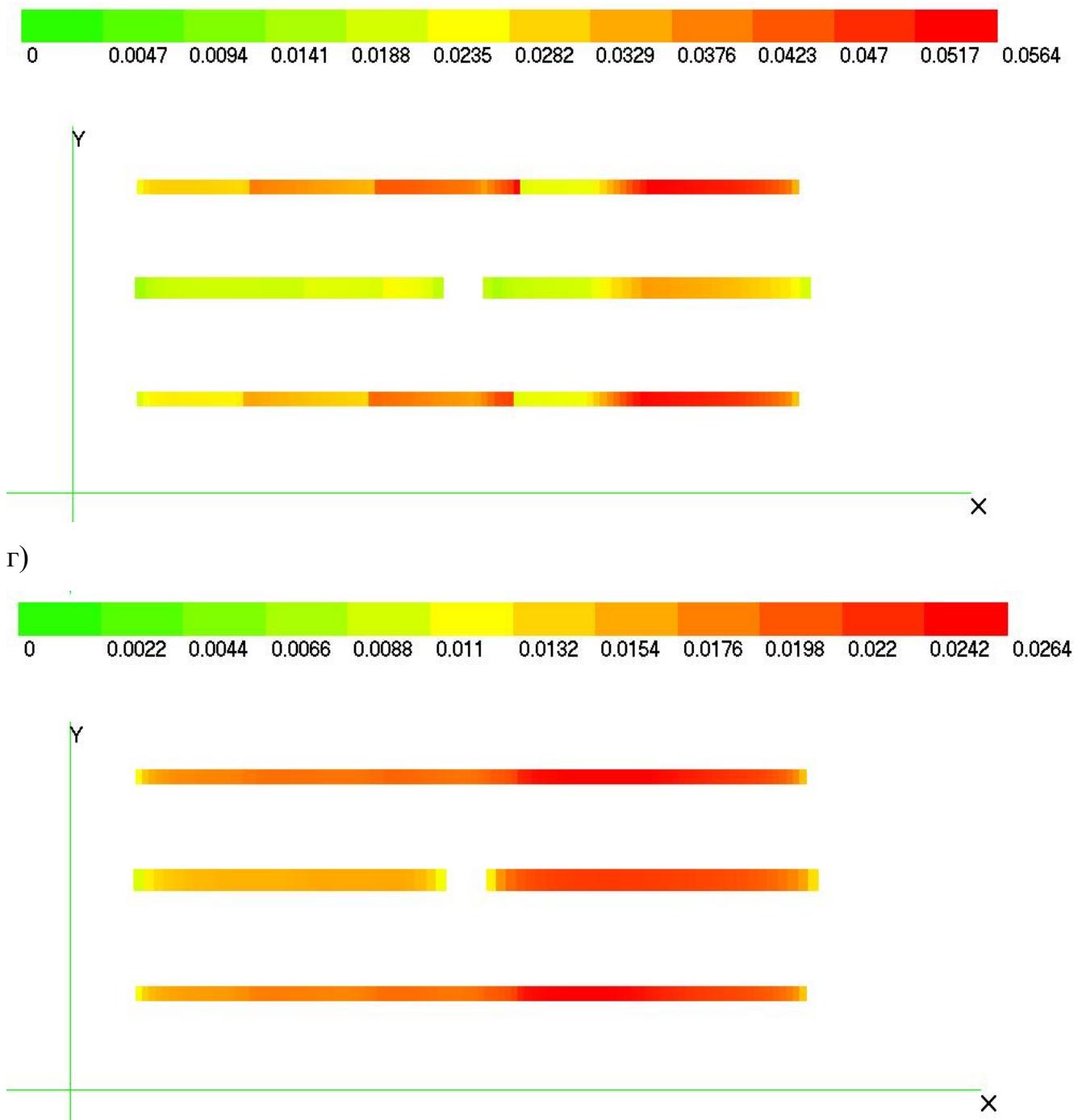


Рис. 4.7. Вертикальные деформации основания продольных стен: а) – без закрепления; б) – с закреплением 50% просадочного слоя в основании; в) – с закреплением 75% просадочного слоя в основании; г) – с закреплением 100% просадочного слоя в основании.

В ПК ЛИРА-САПР 2013 по коэффициентам жесткости основания (табл. 4.3) была смоделирована трехмерная модель здания школы (рис. 4.8).

Таблица 4.3. Коэффициент жесткости основания осадки и просадки при частичном закреплении основания для фундаментов

| №<br>п/п | Глубина укрепленного<br>грунта по высоте, % | Коэффициент<br>жесткости грунта<br>$C_z$ , кН/м <sup>3</sup> |
|----------|---|--|
| 1        | 2   | 3  |
| По оси В |   |  |
| 1        | 0   | 2130   |
| 2        | 50  | 6967   |
| 3        | 75  | 10487  |
| 4        | 100   | 18273  |
| По оси Д |   |  |
| 1        | 0   | 2610   |
| 2        | 50  | 7005   |
| 3        | 75  | 9351   |
| 4        | 100   | 13412  |
| По оси Ж |   |  |
| 1        | 0   | 1880   |
| 2        | 50  | 6121   |
| 3        | 75  | 9648   |
| 4        | 100   | 18186  |

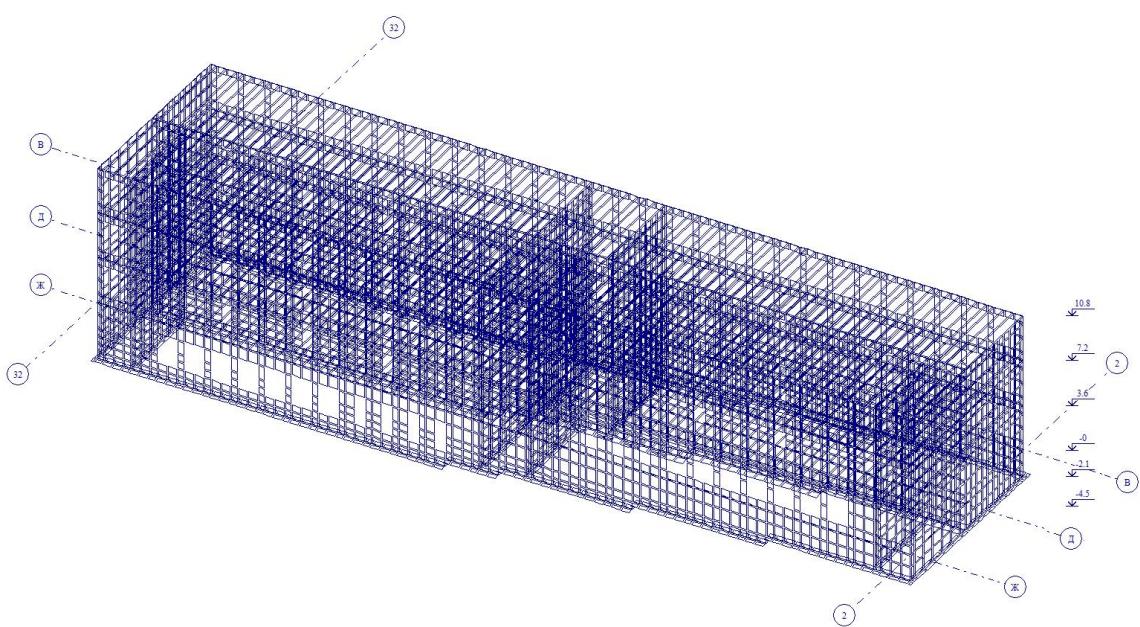


Рис. 4.8. Схема трехмерной модели здания школы в ПК ЛИРА-САПР 2013

Инъекторы при закреплении грунтов оснований под фундаменты располагались с учетом радиуса закрепления массива грунта инъекционными растворами, который был принят 90 см, в местах наибольших вертикальных нагрузок – под простенками здания.

Были рассмотрены варианты локального закрепления по высоте с закреплением 50, 75 и 100% просадочного слоя. В связи с небольшой толщиной просадочного слоя, сопоставимой с длиной рабочей части инъектора, и с учетом результатов перемещений был принят вариант со 100% закреплением просадочного слоя по глубине (рис. 4.9).

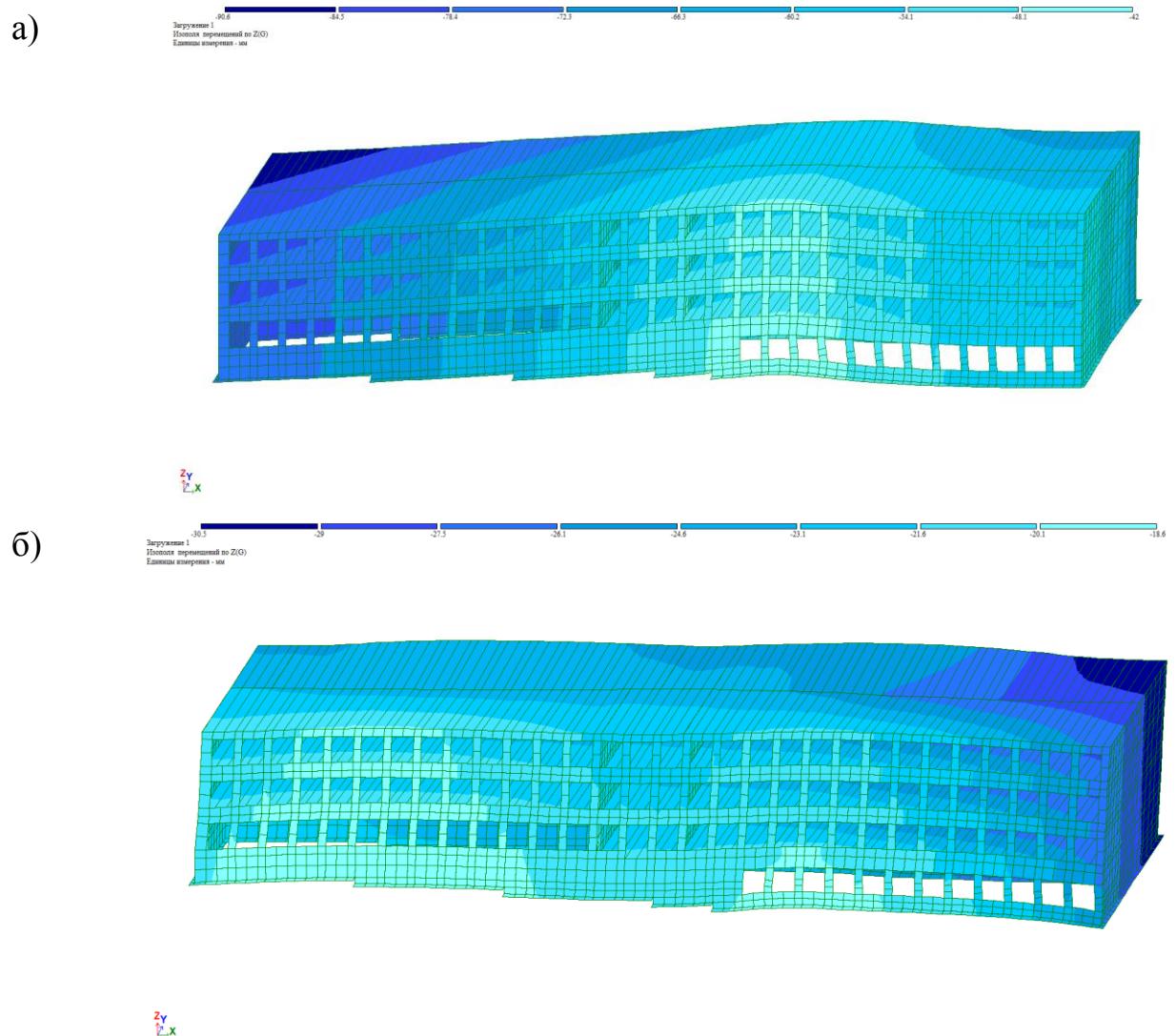


Рис. 4.9. Мозаика перемещений узлов здания школы: а) без локального усиления; б) с локальным усилением

Деформации основания без закрепления составляли до 90 мм, после сплошного закрепления на 100% по глубине снизились до 30 мм, что существенно меньше допустимых значений. В связи с этим предложено частичное закрепление просадочного грунта в плане.

#### 4.7. Результаты численных исследований при частичном закреплении просадочного грунта в плане

Схема частичного закрепления основания фундаментов в плане показана на рис. 4.10, при этом зоны закрепленного грунта располагаются в наиболее нагруженных местах основания (под простенками), а объем закрепленного грунта в основании регулируется количеством модулей в плане.

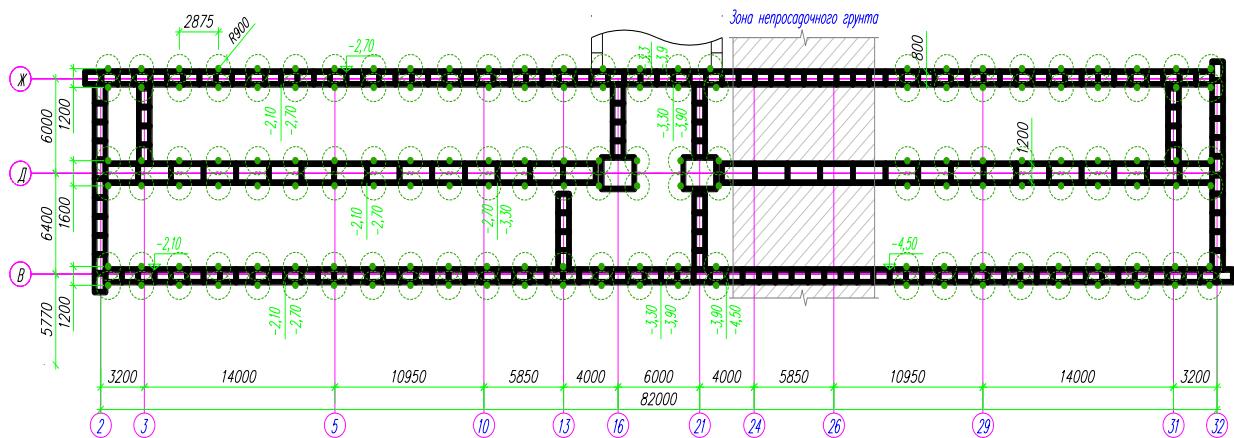


Рис. 4.10. План зон локального закрепления фундаментов

Характеристики принятой схемы локального усиления составили:

- радиус инъецирования – 0,9 м;
- расстояние между инъекциями в ряду – 2,875 м;
- высота закрепления одной заходки – 1,00 м;
- расход раствора на заходку – 638 л;
- объем закрепления от одной заходки – 2,55 м<sup>3</sup>.

Были рассмотрены варианты локального закрепления в плане с закреплением 25, 50, 62 и 100% просадочного слоя в объеме условного фундамента.

Численные исследования выполнялись в соответствии с методикой, изложенной в Разделе 3. Результаты представлены на рис. 4.11 – 4.13.

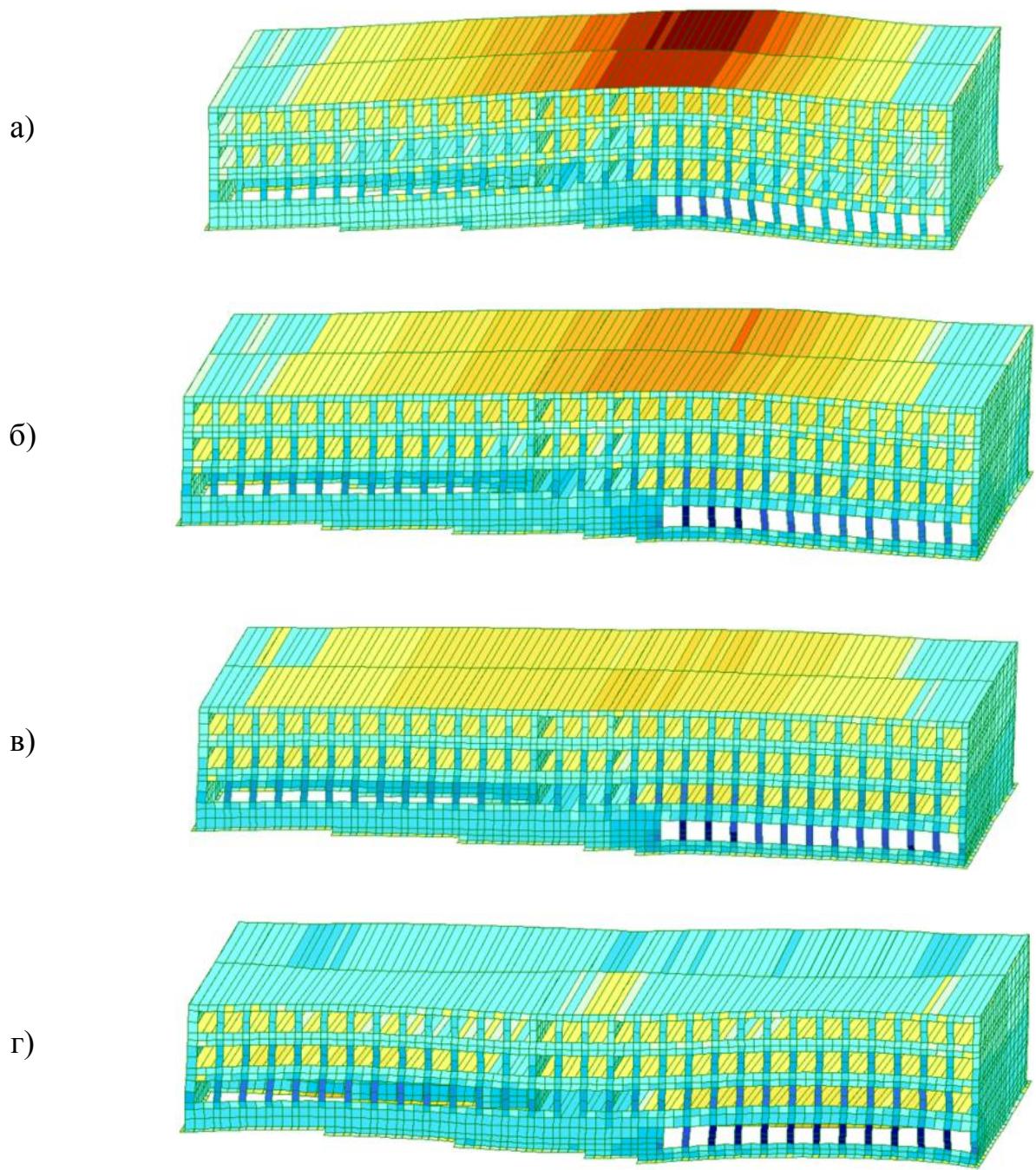


Рис. 4.11. Изополя горизонтальных напряжений в конструкциях здания школы №3 при равномерном замачивании: а – без закрепления; б – с частичным 25% закреплением в плане; в – с частичным 50% закреплением в плане; г – со сплошным 100% закреплением в плане

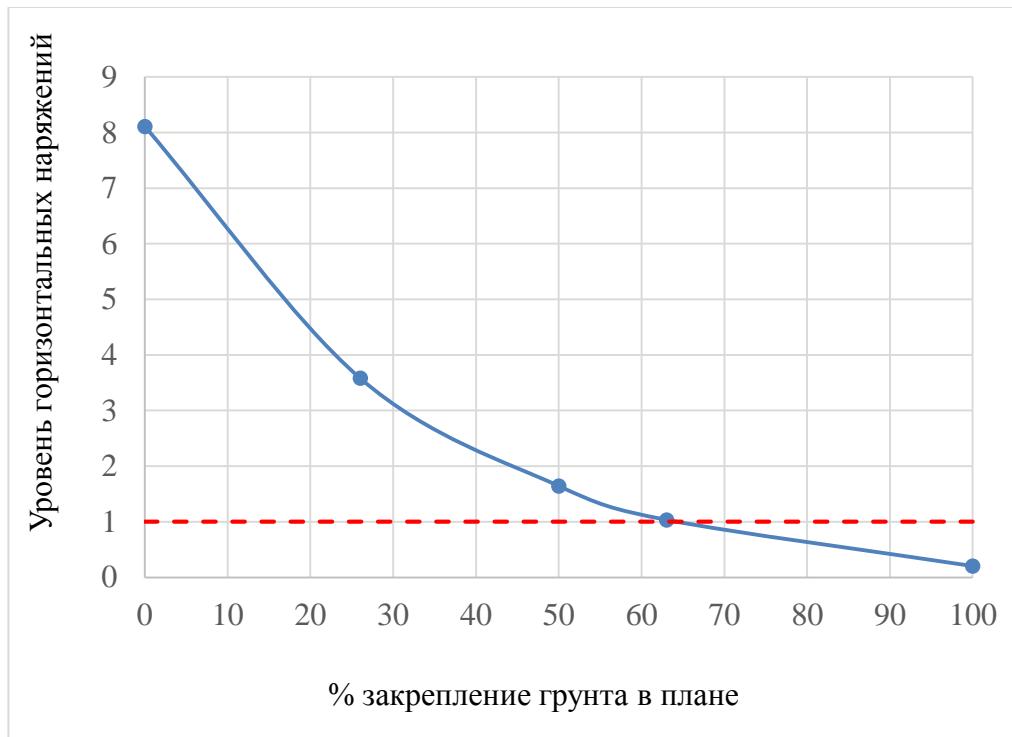


Рис. 4.12 Влияние частичного закрепления на уровень горизонтальных напряжений в наиболее растянутом элементе, где:  $—\bullet— N_x/N_{x,u}$ ;  $—\cdots— N_x/N_{x,u}=1$

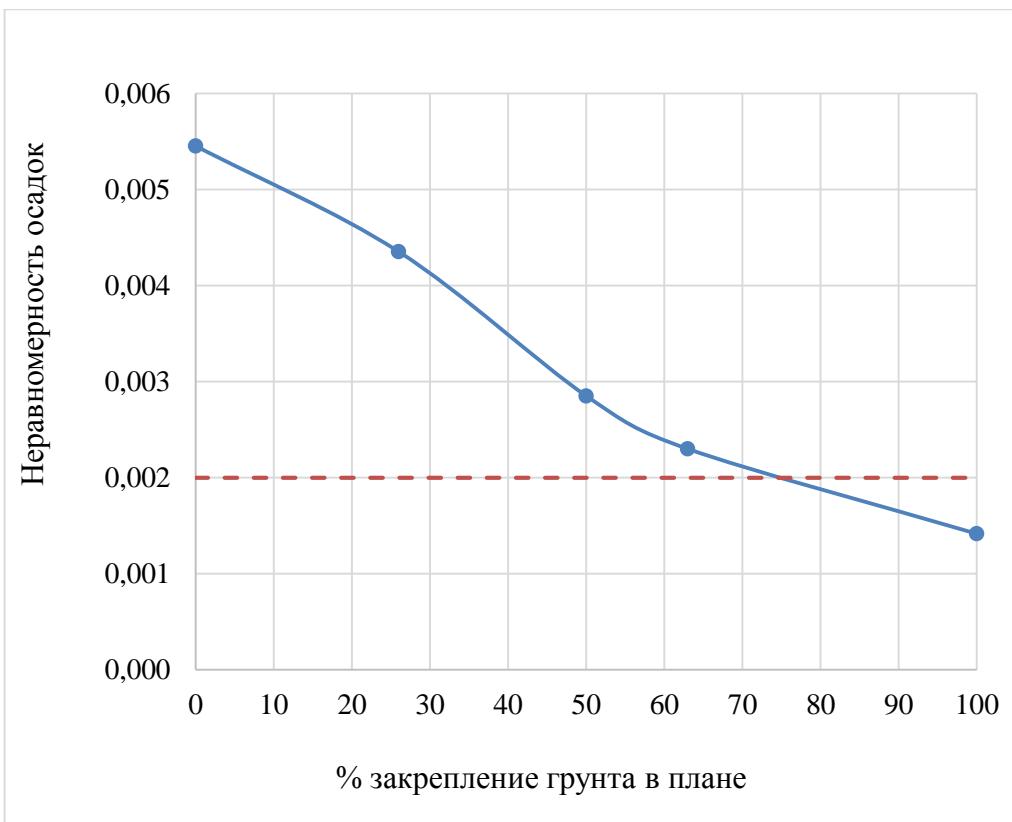


Рис. 4.13 Влияние частичного закрепления на неравномерность осадок фундаментов, без учета жесткости здания, где:  $—\bullet— \Delta S/L$ ;  $—\cdots— [\Delta S/L]u$

Полученные результаты напряжений в стенах здания для незакрепленного основания соответствуют схеме трещинообразования, выявленного при его натурном обследовании.

Для обеспечения допустимого уровня напряжений в стене и допустимой неравномерности осадок для данного объекта достаточно выполнения частичного закрепления просадочного грунта в плане от 63% до 75%. При этом определение схемы частичного закрепления просадочного основания по допустимому уровню напряжений в стене позволяет уменьшить процент закрепляемого грунта, однако требует выполнения более трудоемких расчетов системы «здание – фундамент – основание».

#### 4.8. Технико-экономическое сравнение вариантов

Технико-экономические характеристики принятого метода и сравнение вариантов представлено в таблицах 4.4 – 4.7.

Таблица 4.4. Стоимость реагентов раствора активной кремниевой кислоты с ПАА на 1 м<sup>3</sup> (1000 л)

| Состав                                    | Ед. изм. | Кол-во | Стоимость ед., руб.  | Стоимость всего, руб.         |
|---|----------|--------|----------------------|-------------------------------|
| 1   | 2        | 3      | 4                    | 5                             |
| Вода                                      | л        | 941,16 | 9 руб/м <sup>3</sup> | 8470,44                       |
| Силикат натрия (1400/м <sup>3</sup> )     | кг       | 70,7   | 15 руб/кг            | 1060,50                       |
| Сульфат аммония (1769 кг/м <sup>3</sup> ) | кг       | 14,29  | 18 руб/кг            | 255,42                        |
| Полиакриламид (1302 кг/м <sup>3</sup> )   | кг       | 0,38   | 200 руб/кг           | 76,0                          |
| ВСЕГО:                                    |          |        |                      | 9863,00 руб.<br>9,86 руб/литр |

Таблица 4.5. Стоимость реагентов приготовления раствора силиката натрия (1200 кг/м<sup>3</sup>) на 1 м<sup>3</sup>

| Состав                                   | Ед. изм. | Кол-во        | Стоимость ед., руб   | Стоимость всего, руб.          |
|--|----------|---------------|----------------------|--------------------------------|
| 1  | 2        | 3             | 4                    | 5                              |
| Вода (1000 кг/м <sup>3</sup> )           | л        | 500           | 9 руб/м <sup>3</sup> | 4500,00                        |
| Силикат натрия (1400 кг/м <sup>3</sup> ) | кг       | 700<br>(500л) | 15 руб/кг            | 10500,00                       |
| ВСЕГО:                                   |          |               |                      | 15000,00 руб.<br>15,0 руб/литр |

Таблица 4.6. Технико-экономическое сравнение вариантов

| Характеристики  | Раствор золя кремниевой кислоты с ПАА | Раствор жидкого стекла |
|---|---------------------------------------|------------------------|
| 1   | 2                                     | 3                      |
| Количество инъекционных скважин, шт.                          | 156                                   | 510                    |
| Объем закрепленного массива от одной скважины, м <sup>3</sup> | 2,55                                  | 1,47                   |
| Объем раствора на одну скважину, л                            | 638                                   | 370                    |
| Объем закрепленного массива грунта, м <sup>3</sup>            | 397,8                                 | 749,7                  |
| Общий расход раствора, м <sup>3</sup>                         | 99,53                                 | 188,70                 |
| Стоимость 1 м <sup>3</sup> закрепленного массива, руб.        | 3 054,00                              | 4 639,00               |
| Общая стоимость закрепленного массива, руб.                   | 1 214 629,00                          | 3 475 610,00           |
| Экономия, %   | 65                                    |                        |
| Общая сметная трудоемкость, тыс. чел.ч.                       | 1,5488                                | 2,8708                 |
| Продолжительность работ, мес.                                 | 1                                     | 1,8                    |

Таблица 4.7. Расчет стоимости работ по закреплению основания

| №<br>п/п | Наименование<br>затрат  | Стоимость работ, руб.           |                                      | Обоснование                               |
|----------|---|---------------------------------|--------------------------------------|---|
|          |   | Базовый<br>вариант <sup>1</sup> | Предлагаемый<br>вариант <sup>2</sup> |   |
| 1        | 2   | 3                               | 4                                    | 5   |
| 1        | Стоимость сырья<br>для приготовления<br>раствора              | 188,7x15000,00<br>= 2830500,00  | 99,53x9863,00<br>= 981665,00         | Табл. 4.7, 4.8                            |
| 2        | Бурение скважин<br>под инъекторное<br>нагнетание раствора     | 360664,00                       | 84862,00                             | Сборник цен<br>Е35-69-2                   |
| 3        | Приготовление<br>раствора и<br>нагнетание через<br>инъектор   | 63266,00                        | 66782,00                             | Сборник цен<br>Е5-130-1                   |
| 4        | Средства на<br>возведения<br>временных зданий и<br>сооружений | 111520,00                       | 39400,00                             | ДСТУ Б<br>Д.1.1-<br>1:2013<br>п.5.8.11    |
| 5        | Средства на<br>содержание служб<br>заказчика 2,5%             | 92720,00                        | 32760,00                             | ДСТУ Б<br>Д.1.1-<br>1:2013 Дод.<br>К п.44 |
| 6        | Сметная прибыль   | 16940,00                        | 9160,00                              | ДСТУ Б<br>Д.1.1-<br>1:2013<br>п.5.8.16    |
| 7        | Полная стоимость<br>(без НДС)                                 | 3 475 610,00                    | 1 214 629,00                         |   |

Примечание: <sup>1</sup> – жидкое стекло;

<sup>2</sup> – золь активной кремниевой кислоты с ПАА.

Таким образом, согласно таблице 4.7 экономический эффект закрепления 1м<sup>3</sup> грунтового массива от применения методики локального закрепления просадочных грунтов вместо традиционно применяемого способа сплошного закрепления раствором силиката натрия составляет:

$$\Delta = 4639,00 - 3054,00 = 1585,00 \text{ руб/м}^3$$

Принимая во внимание тот факт, что рост цен на импортную продукцию с каждым годом возрастает, делая вопрос импортозамещения все более актуальным,

а применяемые в составе предложенного раствора компоненты являются доступными и распространеными, и метод частичного закрепления снижает расход материалов и трудоемкость работ, можно считать предложенную методику обладающей высокой конкурирующей способностью.

#### **4.9. Выводы**

1. Полученные результаты напряжений в стенах здания для незакрепленного основания соответствуют схеме трещинообразования, выявленного при его натурном обследовании.
2. Для обеспечения допустимого уровня напряжений в стене и допустимой неравномерности осадок для данного объекта достаточно выполнения частичного закрепления просадочного грунта в плане от 63% до 75%. При этом определение схемы частичного закрепления просадочного основания по допустимому уровню напряжений в стене позволяет уменьшить процент закрепляемого грунта, однако требует выполнения более трудоемких расчетов системы «здание – фундамент – основание».
3. По результатам технико-экономического сравнения вариантов предложенный метод частичного закрепления просадочного грунта в основании фундаментов разработанным закрепляющим составом позволяет снизить расходы на 65% в сравнении с методом сплошного химического закрепления раствором силиката натрия по проекту Ростовского ПромстройНИИпроекта [151].

## **5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЧАСТИЧНОМУ ЗАКРЕПЛЕНИЮ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, СЛОЖЕННЫХ ПРОСАДОЧНЫМ ГРУНТОМ**

В Разделе 2 разработан закрепляющий раствор просадочного основания на основе активной кремниевой кислоты и полиакриламида (ПАА), определены его необходимые физические характеристики (кинематическая, динамическая вязкость, напряжение сдвига, жесткость и др.). Определены характеристики закрепленного просадочного грунта (модуль деформации, коэффициент жесткости, осадка и просадка), его работа на модели «основание – фундамент» через коэффициент жесткости основания. В Разделе 3 было проведено исследование работы численной модели «основание – фундамент – здание» при частичном закреплении основания. Были получены зависимости НДС конструкций здания при вариантах частичного закрепления основания.

На основании выполненной работы, а также существующих рекомендаций в научной и нормативной литературе [131; 132; 152] были разработаны рекомендации по частичному закреплению оснований зданий и сооружений, сложенных просадочными грунтами.

Проведено численное моделирование существующего здания на просадочных грунтах с учетом частичного закрепления основания. На основании данных, полученных в Разделе 3, выполнено моделирование свойств частичного закрепления грунта для численного моделирования.

### **5.1. Рецептура состава химического закрепляющего раствора**

Для усиления грунтов используется однорастворный метод химического закрепления составом на основе активной кремниевой кислоты с содержанием  $\text{SiO}_2$  – 2%. Основными компонентами суспензии являются:

- вода техническая водопроводная по ГОСТ 23732-79;
- силикат натрия (жидкое стекло) по ГОСТ 13078-81 с силикатным модулем  $n=3$ ;
- сульфат аммония – белый порошок без запаха по ГОСТ 9097-82;

– полиакриламид – сухой белый гранулированный порошок по ТУ 2414-002-74301823-2007.

Подача компонентов и приготовление суспензии должны осуществляться в следующей последовательности:

- подготовка водного раствора силиката натрия;
- подготовка водного раствора сульфата аммония;
- подготовка водного раствора ПАА для «заморозки» активной кремниевой кислоты;
- добавление в водный раствор силиката натрия в смесителе водного раствора сульфата аммония (с перемешиванием в течение 4 минут при температуре растворов  $t=18^{\circ}\text{C}$ ), при этом контролируется процесс образования золя кремниевой кислоты – появление молочного оттенка раствора;
- добавление к полученному золю для «заморозки» процесса гелеобразования в смеситель раствор ПАА с перемешиванием в течение нескольких минут.

Составные части растворов представлены в таблице 5.1.

Для контроля времени перехода раствора из состояния золя в гелеобразное (схватывание) отбираются пробы из приготовленного раствора каждой партии [132].

При приготовлении золя кремниевой кислоты с 6%  $\text{SiO}_2$  до «заморозки» соотношение реагентов следует принимать по формуле: сульфат аммония : жидкое стекло : вода = 1 : 6,4 : 33,6. «Заморозка» осуществляется 0,04% водным раствором ПАА в соотношении 1:2 до 2% содержания  $\text{SiO}_2$ . При «заморозке» в соотношении 1:1 получаем раствор с содержанием 3%  $\text{SiO}_2$ .

Таблица 5.1. Состав раствора активной кремниевой кислоты при содержании  $\text{SiO}_2$  – 2% (расход материалов на 1  $\text{m}^3$  раствора)

| №<br>п/п | Компоненты  | Расход<br>материалов на<br>1 м <sup>3</sup> раствора | Количество<br>растворов<br>реагентов на 1 м <sup>3</sup><br>золя |
|----------|---|--|--|
| 1        | 2   | 3  | 4  |
| 1        | Силикат натрия плотностью<br>1400 кг/м <sup>3</sup> | 70,7 кг  | 244,42 л   |
|          | Вода (1000 кг/м <sup>3</sup> )                      | 193,92 л   |  |
| 2        | Сульфат аммония (1769<br>кг/м <sup>3</sup> )        | 14,29 кг   | 88,88 л  |
|          | Вода (1000 кг/м <sup>3</sup> )                      | 80,8 л   |  |
| 3        | Полиакриламид (1302 кг/м <sup>3</sup> )             | 0,38 кг  | 666,7 л  |
|          | Вода (1000 кг/м <sup>3</sup> )                      | 666,44 л   |  |

При этом раствор должен обладать следующими характеристиками:

– кинематическая вязкость – 5,2 – 5,4 мм<sup>2</sup>/с;

– плотность – 1,2 – 1,3 г/см<sup>3</sup>;

– однородность – золь представляет собой однородную массу без комков, хлопьев и иных включений, белёсого цвета, в просвете луча лазера дающую плотную структуру, с размерами части 6 – 12 нм.

Время перехода из состояния золя в гелеобразное (при t=18 °C) составляет:

– 7 дней при содержании SiO<sub>2</sub> – 2%;

– 1 день при содержании SiO<sub>2</sub> – 3%.

## 5.2. Оборудование, необходимое для проведения процедуры закрепления просадочного грунта

Выбор оборудования для частичного закрепления просадочного основания однорастворным химическим методом обусловлен, как правило, небольшой глубиной бурения и диаметром скважин. Для забивки или вдавливания инъекторов оборудование назначается в зависимости от глубины установки инъекторов и

сопротивления грунтов пенетрации, а также с учетом физико-механических свойств грунта, удельного расхода. Общая технологическая схема приготовления и подачи раствора представлена на рис. 5.1.

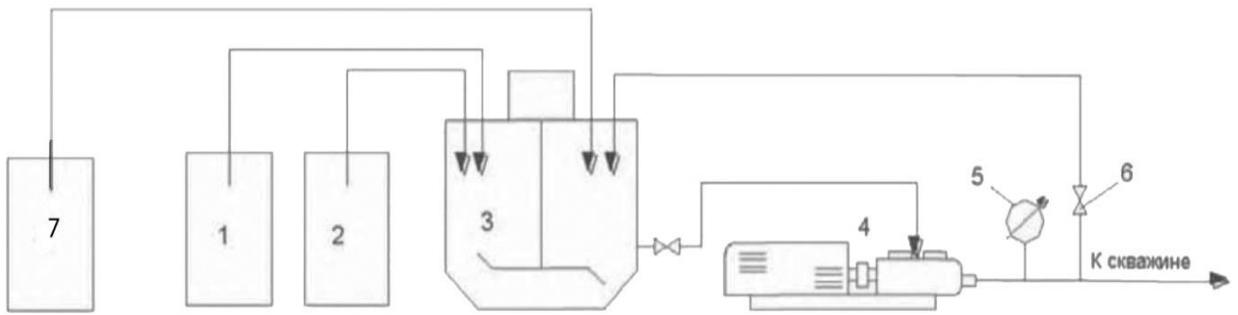


Рис. 5.1. Технологическая схема приготовления и подачи раствора при закреплении грунтов: 1 – емкость раствора с сульфатом аммония; 2 – емкость раствора с силикатом натрия; 3 – растворомешалка; 4 – растворонасос; 5 – манометр; 6 – кран шаровой; 7 – емкость раствора с ПАА

Для закрепления грунтов используются [131; 153; 154]:

- для работы с инъекторами – установки и механизмы для забивки или вдавливания инжекторов, инъекторы (рис. 5.2), гидравлические домкраты грузоподъемностью 5 – 10 т для извлечения инжекторов, насосы;
- для приготовления растворов необходим растворный узел со смесителями и емкостями для хранения реагентов; рекомендуемые параметры смесительного оборудования: производительность 5 м<sup>3</sup>/ч, вместимость – 50–750 л;
- для нагнетания раствора в грунт применяют диафрагменные, плунжерные или поршневые насосы, которые обеспечивают давление нагнетания до 0,5 МПа и подачу до 10 м<sup>3</sup>/час. При этом давление нагнетания следует назначать таким образом, чтобы не происходило прорыва твердеющего раствора на поверхность. Давление нагнетания не должно превышать величины природного давления от собственного веса грунта [155]. При этом время нагнетания не должно превышать время гелеобразования раствора. Также необходима вспомогательная оснастка: шланги, соединительные части, трубы, краны, хомуты, ниппели, ерши для

шлангов, а также закрытые емкости для хранения реагентов и контрольно-измерительная аппаратура (расходомеры, манометры, термометры, ареометры). Шланги и соединения должны быть рассчитаны на давление до 3,0 МПа. Насосы рекомендованы со следующими характеристиками: производительность 0 – 15 л/мин, давление – 0 – 5 МПа;

– для бурения инъекционных скважин предпочтительны установки на основе вращательного или ударно-вращательного действия, которые будут оказывать наименьшее воздействие на существующие конструкции зданий и сооружений. Буровое оборудование должно обеспечивать требуемую глубину, направление и диаметр скважин в данных инженерно-геологических условиях, а также чистоту и целостность стенок скважины. Рекомендованы следующие характеристики бурового оборудования: глубина бурения – до 50 м, диаметр бурения – 46 – 151 мм, частота вращения – 0 – 150 об/мин.

Ориентировочный перечень рекомендованного оборудования представлен в таблице 5.2.

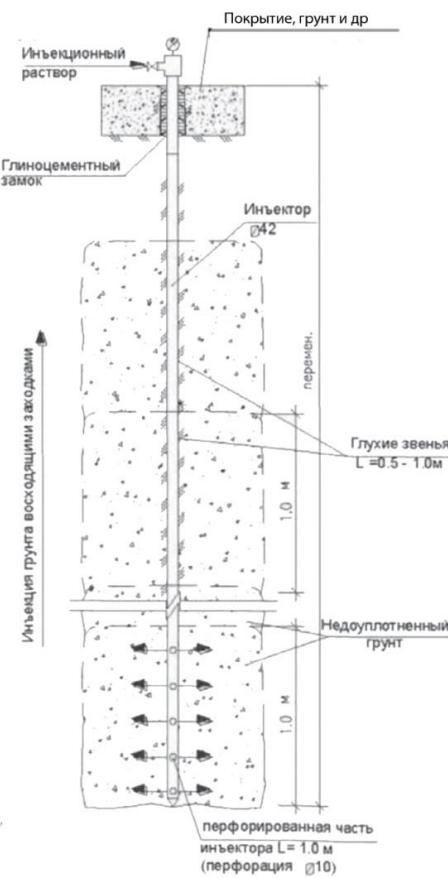


Рис. 5.2. Схема работы инъектора при частичном закреплении основания

Рекомендуется погружение инъектора в грунт в заранее пробуренную инъекторную скважину. Хотя также может быть рассмотрен вариант забивки инъектора или его задавливание [131].

Таблица 5.2. Рекомендованное оборудование при производстве работ по частичному закреплению просадочного основания

| Наименование | Марки  | Характеристика                            | Кол-во      |
|--------------|--------|---|-------------|
| 1            | 2      | 3   | 4           |
| Бетонолом    | С-358  | Рабочее давление воздуха, МПа             | 0,6         |
| Перфоратор   | ПР-24  | Глубина бурения, м                        | 5           |
| Инъектор     | ИТГ-58 | Диаметр скважины, мм                      | 68          |
|              |        | Диаметр перфорированной части, мм         | 32          |
|              |        | Рабочее давление при запоре скважины, МПа | 0,12 – 0,35 |

Продолжение таблицы 5.2

| 1  | 2                                    | 3  | 4          |
|--|--------------------------------------|--|------------|
| Установки для бурения скважин<br>КБУ-50  | Станок колонкового бурения<br>КБУ-50 | Диаметр скважин, мм                      | 52, 60, 65 |
|  |                                      | Глубина бурения, м                       | 25         |
| Компрессор                               | ПКС-3,5                              | Производительность, м <sup>3</sup> /мин. | 3,5        |
|  |                                      | Рабочее давление, МПа                    | 0,7        |
| Плунжерный насос с регулируемым клапаном | НБ-3, НБ-4                           | Производительность, л/мин.               | 0..40      |

Рекомендуется погружение инъектора в грунт в заранее пробуренную инъекторную скважину. Хотя также может быть рассмотрен вариант забивки инъектора или его задавливание [131].

Для хранения реагентов и приготовления закрепляющего раствора используются емкости следующей вместимости:

- 10 – 20 м<sup>3</sup> – для хранения силиката и водного раствора сульфата аммония;
- 2 – 5 м<sup>3</sup> – для приготовления растворов;
- 1 – 2 м<sup>3</sup> – для промывки инъекторов;
- 0,1 – 0,5 м<sup>3</sup> – для чистой воды.

### 5.3. Технологические схемы подачи раствора при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений

Для обеспечения проектного качества работ при закреплении оснований зданий и сооружений должна быть разработана проектная документация с учетом особенностей производства работ на площадках со слабыми грунтами в соответствии с действующими нормами и правилами [131; 132; 152].

Перед началом проектных работ необходимо выполнение:

- инженерно-геологических изысканий площадки с определением таких характеристик, как плотность, гранулометрический состав, пористость, коэффициент фильтрации, степень трещиноватости, проницаемость, гидростатическое давление и химический состав грунтовых вод [156];

– лабораторного исследования по закреплению грунта (приложение 10 [132]) и опытного закрепления в натурных условиях [157], что позволяет уточнить объем и радиус закрепления раствора, физико-механические свойства закрепленного грунта, технологические параметры инъекции.

Проект на закрепление основания разрабатывается в составе строительной и технологической частей. В соответствии с решаемой задачей выбирают тот или иной тип или вид заглубленных устройств для закрепления грунтов, назначают конструктивную схему закрепления, расчетом определяют местоположение и размеры создаваемых закрепленных массивов и устанавливают соответствующие технические требования к закрепленным грунтам.

Проектом по частичному закреплению просадочного основания предусматривается:

- удельный расход раствора, давление нагнетания, порядок приготовления инъекционного раствора;
- выбор и обоснование технологических схем частичного закрепления просадочного основания, инженерно-геологические планы и разрезы с нанесенным контуром и указанием расчетных размеров закрепленного основания;
- данные о количестве материалов и механизмов, используемых при закреплении основания;
- мероприятия по контролю качества работ, технике безопасности, охране окружающей среды.

Технологическая схема частичного закрепления основания включает в себя:

- расположение в плане участков закрепления, количество скважин на участке и их привязка в плане к конструктивным элементам здания;
- данные по частичному закреплению основания по глубине с указанием глубин скважин, их наклонов, диаметров, допускаемых отклонений, радиусов закрепления.

На основании ряда опытных исследований [131; 132; 158 – 161] были определены основные технологические параметры инъекционного закрепления:

радиус распространения раствора, расстояние между скважинами, длина инъекционной заходки, количество инъектируемого раствора, давление нагнетания.

Коэффициент фильтрации для просадочных грунтов должен составлять не более 5 м/сут. [34], но предпочтительней в пределах 0,2... 2 м/сут. [131].

Раствор нагнетается заходками снизу вверх из расчета в среднем (155 –530) 350 л/м<sup>3</sup> закрепляемого грунта под давлением 0,3 – 0,5 МПа в условиях его естественного залегания и без нарушения его структуры [132; 153].

Величина заходки определяется:

$$l_s = 1 + kR, \quad (5.1)$$

где 1 – длина действующей части инъектора (0,5 ... 1 м);

$k$  – коэффициент, принимаемый для песков и лессовых грунтов равным 0,5;

$R$  – расчетный радиус закрепления от одиночной инъекции.

Радиус распространения укрепляющего раствора (радиус закрепления) вокруг одиночной скважины (инъектора) определялся по формуле:

$$R = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot v \cdot P_u \cdot t_h}{\beta \cdot v_p \cdot e}}, \quad (5.2)$$

где  $R$  – радиус распространения, м;

$k$  – коэффициент фильтрации, м/сут.;

$v$ ,  $v_p$  – вязкость воды и раствора, Па·с;

$P_u$  – давление инъекции, м вод. ст.;

$t_h$  – время нагнетания, с;

$\beta$  – коэффициент заполнения пор,  $\beta = 0,9$ ;

$e$  – коэффициент пористости грунта, д. ед.

Радиус закрепления  $R$  от одного инъектора для просадочных грунтов с коэффициентом фильтрации 0,2 – 2 с/сут. можно принять равным 0,8 – 1,0 м [131].

Расстояние между рядами инъекторов:

$$l_d = 1,5R \quad (5.3)$$

Количество раствора в литрах на одну заходку рассчитывается по формуле:

$$Q = \pi \cdot R^2 (1.33R + l) e \cdot a \cdot 1000, (\text{л}), \quad (5.4)$$

где  $a$  – коэффициент насыщения грунта раствором, принимаемый в зависимости от степени влажности грунта и коэффициента фильтрации по таблице 5.3;

$R$  – радиус закрепления, м;

$l$  – длина перфорированной части инъектора, м;

$e$  – пористость грунта в долях единицы.

Объем закрепленного грунта от одиночной инъекции:

$$V = \pi \cdot R \cdot l \quad (5.5)$$

При этом расход на одну скважину с учетом перекрытия заходок по высоте скважины:

$$Q_c = \pi \cdot R^2 \cdot l_3 \cdot e \cdot a \cdot 1000, (\text{л}), \quad (5.6)$$

где  $l_3$  – длина скважины, м;

Таблица 5.3. Зависимость коэффициента насыщения грунта ( $a$ ) от коэффициента фильтрации и влажности грунта

| Коэффициент фильтрации, м/сут. | Коэффициент насыщения грунта ( $a$ ) при влажности грунта $< 0,3$ | Коэффициент насыщения грунта ( $a$ ) при влажности грунта $\geq 0,3$ |
|--------------------------------|---|--|
| 0.1                            | 0.89  | 0.69   |
| 0.3                            | 0.75  | 0.59   |
| 0.5                            | 0.66  | 0.52   |
| 1                              | 0.59  | 0.44   |
| 2                              | 0.50  | 0.39   |

Общий расход раствора подсчитывается с учетом 10% потерь реагентов при их транспортировке и производстве работ.

При этом зона закрепления в плане должна выходить за габариты фундамента на минимальное значение, которое для столбчатого и ленточного фундамента составляет 5 – 35% ширины подошвы и назначается в зависимости от давления на подошву фундамента и начального просадочного давления грунта [129]. Данные приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4. Зона закрепленного основания за габаритами фундамента в долях от ширины подошвы

| Начальное просадочное давление, $P_{sl}$ , МПа | Минимальный вынос зоны закрепления в долях от ширины фундамента, при $P$ , МПа |      |     |      |
|--|--|------|-----|------|
|  | 0,2  | 0,25 | 0,3 | 0,35 |
| 0,05   | 0,2  | 0,25 | 0,3 | 0,35 |
| 0,1  | 0,15   | 0,15 | 0,2 | 0,30 |
| 0,15   | 0,1  | 0,15 | 0,2 | 0,25 |
| 0,2  | 0,05   | 0,05 | 0,1 | 0,1  |

До начала работ по закреплению грунта выполняется ряд подготовительных мероприятий [129; 131]: подвоз материалов, комплектование, подключение и опробование оборудования, приготовление инъекционного раствора, разбивка сетки скважин с указанием очередности инъекций, глубины и расхода раствора, бурение отверстий в асфальтовом покрытии, пробное нагнетание в скважины с уточнением режима работы и радиуса распространения раствора, отбор проб закрепленного грунта для испытания на прочность. При этом уточняются схемы размещения оборудования в зависимости от конкретных условий строительства, наличия горнoproходческого оборудования, конструктивных параметров применяемого для упрочнения грунтов оборудования, организационно-технических условий ведения работ.

Ниже приведены основные варианты технологических схем проведения работ по частичному усилению просадочного основания (рис. 5.3 – 5.6).

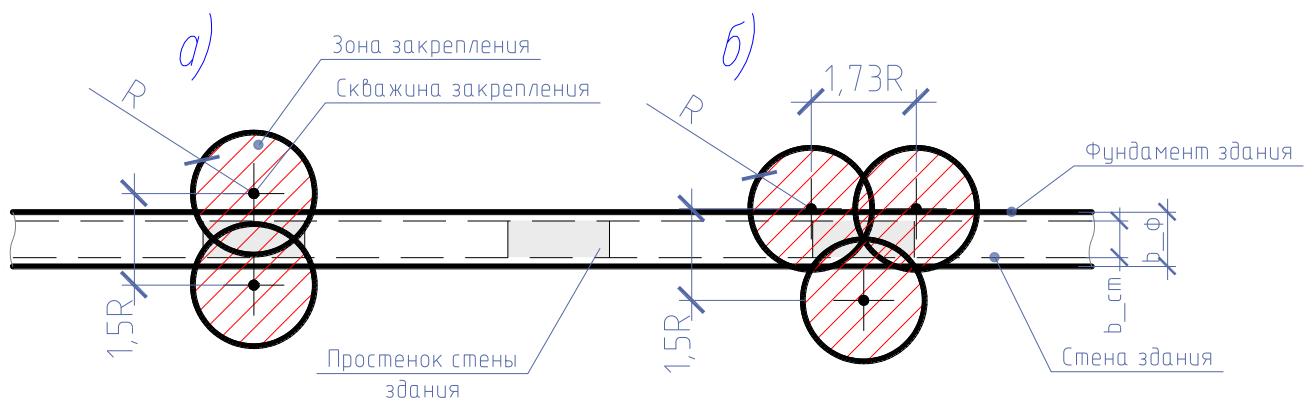


Рис. 5.3. Схема 1. Частичное усиление ленточного фундамента: а) усиление двумя скважинами; б) усиление тремя скважинами

Схема усиления предусматривает частичное закрепление основания по длине ленточного фундамента в наиболее нагруженных по расчету и конструктивной схеме участках. Является однорядной линейной схемой. Применяется для усиления оснований ленточных фундаментов бескаркасных зданий и сооружений, трубопроводов в земле.

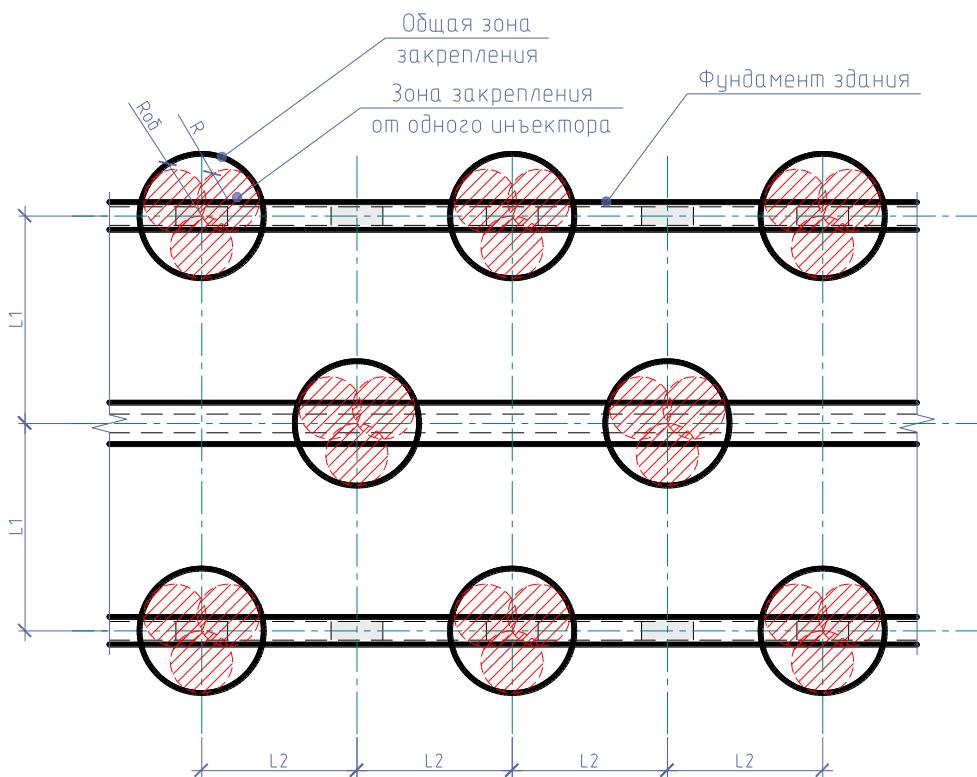


Рис. 5.4. Схема 2. Частичное усиление грунта в плане для ленточного фундамента

Схема усиления предусматривает частичное закрепление основания по всему зданию для ленточных фундаментов. Является многорядной схемой в шахматном порядке. Применяется для усиления оснований ленточных фундаментов бескаркасных зданий и сооружений.

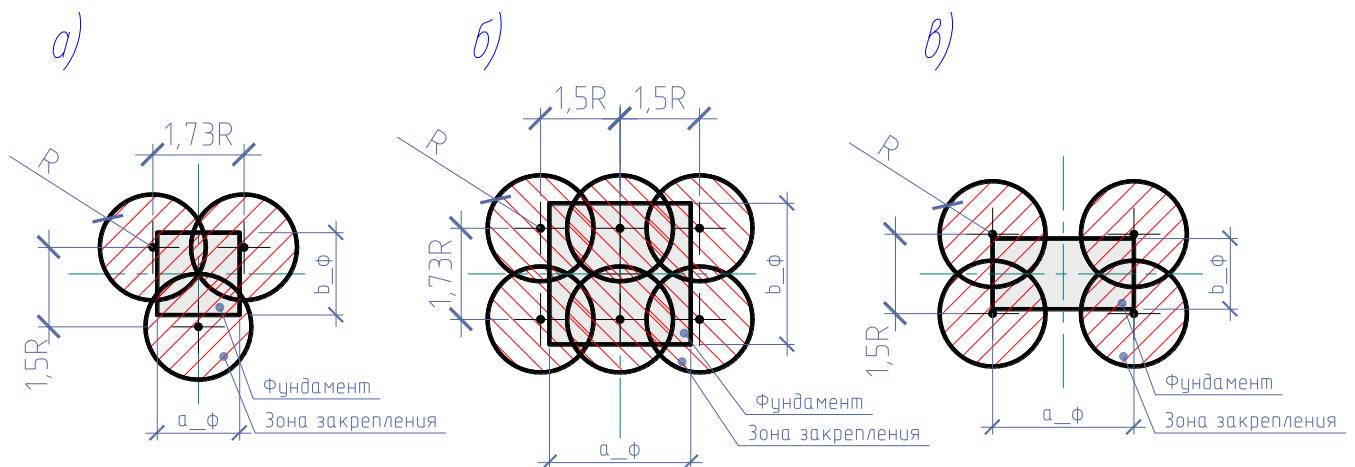


Рис. 5.5. Схема 3. Частичное усиление грунта в плане для столбчатых фундаментов: а, б – закрепление столбчатых фундаментов при равномерном загружении при разных размерах подошвы фундамента; в – закрепление столбчатых фундаментов при неравномерном нагружении в зонах максимального давления по подошве фундамента

Схема усиления предусматривает частичное закрепление основания по подошве столбчатого фундамента как в плане, так и по высоте. Является точечной схемой закрепления. Применяется для усиления оснований столбчатых фундаментов каркасных зданий и сооружений, фундаментов технологического оборудования, фундаментов одиночных инженерных сооружений.

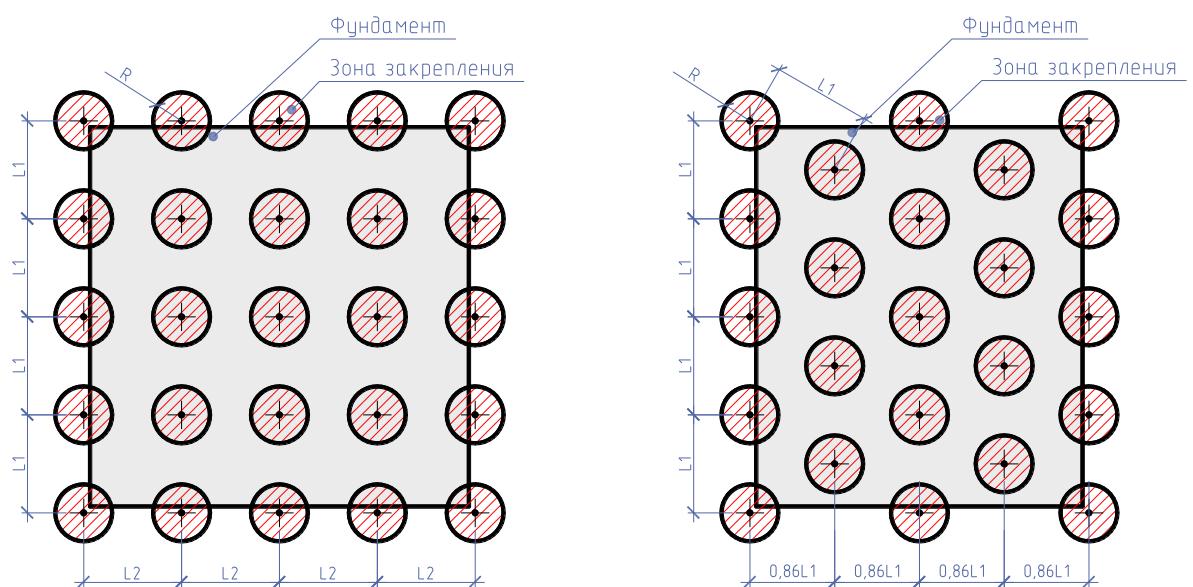


Рис. 5.6. Схема 4. Частичное усиление грунта в плане для плитных фундаментов:

- а – закрепление плитного фундамента по линейной схеме при  $L_1 \approx L_2$ ; б – закрепление плитного фундамента в шахматном порядке

Схема усиления предусматривает частичное закрепление основания по подошве плитного фундамента как в плане, так и по высоте. Применяется для усиления оснований плитных фундаментов каркасных и бескаркасных зданий и сооружений, фундаментов технологического оборудования, оснований дорожного полотна.

При производстве работ по рассмотренным схемам должен соблюдаться технологический порядок производства работ и обеспечение контроля качества.

Нагнетание раствора в каждую зону (скважину) должно производиться до «отказа» [154], а именно:

- поглощение скважиной расчетного объема раствора при давлении, не превышающем расчетное;
- снижение расхода раствора до 0,5 – 1,0 л/мин. с одновременным повышением давления выше проектного;
- инъекция не позволяет выработать проектный объем раствора в одну зону в течение времени годности раствора.

При достижении «отказа» инъекция прекращается, и оставшийся объем раствора добавляется к объему инъекции следующей зоны или соседнего инъектора.

Также проектом назначаются мероприятия по контролю качества работ по закреплению грунтов, которые включают три основных этапа [162]:

1. Соответствие ГОСТам и ТУ поступающих партий реагентов приготовления раствора, контроль установленных сроков и правил его хранения.
2. Характеристики суспензии и их соответствие проектным параметрам (вязкость, однородность, плотность, температура).
3. Контроль правильности производства инъекционных работ: проверка точности разбивки и глубины инъекционных скважин, соблюдение

технологического регламента, который устанавливается проектом и уточняется на основании результатов инъекции опытных скважин.

#### **5.4. Техника безопасности при выполнении процедуры закрепления просадочного грунта**

При производстве работ должны соблюдаться правила по технике безопасности при строительных и инженерно-геологических работах, при работах на компрессионных установках, гидравлических и электротехнических установках [132; 133; 160; 163].

Работы по закреплению должны выполняться строго по проекту специальной бригадой, прошедшей обучение, а также при выполнении всех необходимых подготовительных этапов. Все рабочие и служащие, занятые на инъекционных работах, должны получить на рабочем месте от мастера или производителя работ вводный инструктаж по технике безопасности.

Строительная площадка должна быть оборудована соответствующим образом, а именно: ограждены участки производства работ, защищены от ветра и осадков растворный и инъекционный агрегаты, выезд оборудован мойкой колес и организованным стоком, организован сбор строительного и производственного мусора, предусмотрено освещение в темное время суток. Химические реагенты необходимо хранить в специально отведенных местах под навесами. В складских помещениях, растворном узле и бытовых помещениях должны быть аптечки, раствор питьевой соды и питьевая вода.

Ввиду особой клейкости и вязкости раствора на основе ПАА необходимо уделить внимание чистоте рабочего места. Следует не допускать утечек раствора на землю и рабочие поверхности. В случае утечек поверхности необходимо зачистить, а участок земли присыпать слоем грунта толщиной 5 – 10 см. Рабочее место должно быть сухим и чистым, без посторонних предметов. При промывке шлангов остатки растворов, а также раствор, остающийся после чистки инъекторов, должны сбрасываться в специальную емкость, оборудованную

крышкой и расположенную вне рабочей зоны. Из емкости отходы вывозят на утилизацию.

До начала работ по нагнетанию растворов все оборудование должно быть испытано при давлении, превышающем в 1,5 раза максимальное рабочее давление.

При нагнетании раствора инъектором необходимо соблюсти:

- закрепление соответствующим образом для обеспечения выдерживания требуемого давления нагнетания;
- установку на инъекторе пробкового (шарового) крана, а на нагнетаемом трубопроводе – предохранительного клапана на расчетное давление;
- надежное закрепление концы шлангов, исключающих возможность их срыва;
- отсоединение шлангов от инъектора разрешается производить только после сброса давления в системе.

При проведении инъекционных работ запрещается:

- проводить бурение скважин неисправными буровыми установками, проводить какой-либо ремонт или техническое обслуживание во время работы установки;
- выполнять разборку и ремонт инъекционной системы под давлением;
- устанавливать давление нагнетания выше максимально допустимого давления для используемого оборудования;
- пользоваться шлангом, имеющим вздутия, и неисправными манометрами; допускать возможность перегибов шлангов под давлением;
- производить быстрое перекрывание кранов на коммуникациях растворов; краны следует перекрывать плавно, они должны быть снабжены указателями направлений "открыто – закрыто".

В закрытых помещениях перед началом работ по закреплению основания необходимо проверить состав воздуха, состояние вентиляционных устройств и освещение рабочих мест. Производство работ в стесненных закрытых помещениях должно производиться с применением принудительной вентиляции и контролем

углекислого газа в воздухе по общим требованиям при ведении горных выработок ( $\text{CO}_2 < 0,5\%$ ) [131].

Ввиду особенностей закрепляющего состава активной кремниевой кислоты на основе сульфата аммония, когда некоторое время происходит выделение аммиака, необходимо контролировать его ПДК (IV класс опасности): в рабочей зоне ПДК не должна превышать  $20 \text{ мг}/\text{м}^3$ ; в атмосферном воздухе населенных мест: разовая –  $0,2 \text{ мг}/\text{м}^3$ , среднесуточная –  $0,04 \text{ мг}/\text{м}^3$  [164; 165].

При приготовлении раствора и работе с ПАА (IV класс опасности) ввиду высокой гигроскопичности материала следует применять индивидуальные средства защиты, не допускать попадание на слизистые оболочки, дыхательные пути, кожные покровы.

Рабочие и служащие, занятые на работах по химическому закреплению, должны быть обеспечены специальной одеждой и снабжены индивидуальными средствами защиты: непромокаемой спецодеждой и обувью (брезентовый костюм, резиновая обувь, рукавицы, каски, предохранительные пояса, защитные очки, респираторы, перчатки). Применяемые респираторы должны соответствовать ГОСТ [166].

Ввиду наличия мокрых процессов особое внимание следует уделять технике безопасности при работе с электрооборудованием. Электродвигатели, пусковые аппараты, рубильник должны быть защищены от попадания в них раствора. Кожухи рубильников и электромеханизмы должны быть заземлены. Работы по монтажу и ремонту электроустановок и электросетей должны выполняться ответственным лицом, имеющим допуск и индивидуальные средства защиты.

Ведение буровых и инъекционных работ вблизи существующих линий подземных и надземных сетей и коммуникаций должны производиться с учетом дополнительных требований техники безопасности.

В остальных аспектах техники безопасности при производстве работ следует руководствоваться нормативной литературой, такой как СНиП 12-03-2001 «Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования», СНиП 12-04-

2002 «Безопасность труда в строительстве. Часть 2. Строительное производство» и др.

### **5.5. Контроль качества производства работ**

При закреплении массивов просадочного грунта химическими растворами возникает необходимость ведения постоянного контроля качества химических материалов, из которых состоит закрепляющий раствор и качества закрепляемого грунта.

Контроль качества химических растворов и гелеобразующих смесей осуществляется пробным закреплением грунтов в лабораторных условиях и последующим испытанием закрепленных образцов на прочность и водонепроницаемость. Для достоверности результатов испытаний необходимо отбирать пробы химических составляющих закрепляющих растворов непосредственно из емкостей, расположенных на строительной площадке.

Контроль качества закрепляемого грунта производится путем определения его прочности и водонепроницаемости при помощи следующих мероприятий:

- бурение контрольных скважин диаметром не меньше 84 мм с отбором кернов;
- вскрытие шурфов в закрепленном грунте с отбором монолитов;
- нагнетание воды в грунт через контрольные инъекторы или скважины;
- наблюдение за изменением режима грунтовых вод;
- наблюдение за осадками фундаментов при помощи геодезических инструментов.

К вскрытию контрольных шурфов и бурению контрольных скважин следует приступать не менее чем через 7 суток после окончания инъекционных работ.

Мероприятия по контролю качества закрепляющего раствора и качества закрепляемого грунта должны быть заложены в проект.

## **5.6. Выводы**

1. На основании исследований, выполненных в разделах 2, 3 и 4, разработаны рекомендации по частичному закреплению оснований, сложенных просадочным грунтом.

2. В рекомендациях даны указания по подготовке закрепляющего раствора; применяемому оборудованию при производстве работ, основные его характеристики; рассмотрены основные критерии технологического процесса и технологические схемы усиления основания для различных конструктивных условий; освещены основные требования по технике безопасности при производстве работ.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Полученные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют утверждать, что поставленная цель, а именно: установление влияния частичного закрепления просадочного грунта основания в плане и по глубине на НДС бескаркасных зданий, достигнута.

2. Теоретически обоснована целесообразность частичного закрепления просадочного грунта для бескаркасных зданий, у которых при полном устраниении просадочности грунтов основания фундаментов несущие конструкции имеют существенный неиспользованный потенциал прочности и жесткости.

3. Разработан и экспериментально исследован закрепляющий состав на основе активной кремниевой кислоты из доступных и распространенных в производстве материалов. Вязкость предложенного раствора в 12,3 раза меньше вязкости жидкого стекла, традиционно используемого при силикатизации, что позволяет увеличить радиус закрепления просадочного грунта от оси инъектора.

4. Экспериментально установлено, что модуль деформации закрепленного грунта в водонасыщенном состоянии незначительно отличается от модуля деформации грунта при природной влажности, не превышающей начальной просадочной влажности. При этом полностью устраняются просадочные свойства грунта и изменчивость сжимаемости грунта при водонасыщении.

5. Установлена закономерность изменения коэффициента жесткости основания  $C_z$  от процента частичного закрепления просадочного основания по глубине. Полученная экспоненциальная зависимость показывает незначительное увеличение (на 30%)  $C_z$  при закреплении основания до 50%.

6. Предварительное определение рациональной схемы и процентного содержания частичного закрепления просадочного грунта без учета жесткости здания по допустимым неравномерным деформациям основания при наиболее неблагоприятных схемах замачивания позволяет существенно уменьшить объем вычислительной работы и количество рассматриваемых вариантов при решении системы ОФС. Уточнение схемы частичного закрепления по результатам совместного расчета системы ОФС даже в линейной постановке позволяет

дополнительно снизить процентное содержание закрепления на величину до 13% по сравнению с предварительной.

7. Выполненные численные исследования на фрагменте стены бескаркасного здания показали, что для обеспечения допустимого уровня напряжений в стене и допустимой неравномерности осадок в ряде случаев достаточно выполнения частичного закрепления просадочного грунта от 50% до 75%.

8. Результаты теоретического исследования НДС здания школы №3 в г. Мариуполе, полученные для незакрепленного основания, качественно соответствуют схеме трещинообразования, выявленной при его натурном обследовании.

9. Частичное закрепление просадочного грунта, выполненное на примере школы №3 в г. Мариуполе разработанным закрепляющим составом, позволило снизить затраты на 65% по сравнению со сплошным (100%) закреплением традиционным раствором силиката натрия.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абелев, Ю. М.** Основы проектирования и строительства на просадочных грунтах [Текст] / Ю. М. Абелев, М. Ю. Абелев. – М. : Стройиздат, 1979. – 272 с.
2. **Гольдштейн, М. Н.** Об определении просадочных свойств лессовых грунтов [Текст] / М. Н. Гольдштейн, Н. М. Макаренко // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1970. – № 6. – С. 10–13.
3. **Григорян, А. А.** Вопросы прогноза величины просадки в основании сооружений. Вопросы строительства на лессовых грунтах [Текст]. – Воронеж, 1963. – 89 с.
4. **Клепиков, С. Н.** Расчет сооружений на просадочном основании [Текст] / С. Н. Клепиков. – К. : НИИСК, 1996. – 250 с.
5. **Крутов, В. И.** Устройство подземных этажей на просадочных и насыпных грунтах [Текст] / В. И. Крутов, Ю. А. Багдасаров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2005. – № 5. – С. 22–27.
6. **Литвинов, И. М.** Укрепление и уплотнение просадочных грунтов в жилищном и промышленном строительстве [Текст] / И. М. Литвинов. – Киев : Будівельник, 1977. – 288 с.
7. **Ломизе, Г. М.** Зависимость просадочности от напряженного состояния лессового грунта [Текст] / Г. М. Ломизе // Гидротехн.стр-во. – 1959. – № 11. – С. 8–10.
8. **Мустафаев, А. А.** Расчет оснований и фундаментов на просадочных грунтах [Текст]: учеб. пособие для вузов / А. А. Мустафаев. – М. : Высш. школа, 1979. – 368 с.
9. **Тер-Мартиросян, З. Г.** Механика грунтов [Текст] : учеб. пособие / З. Г. Тер-Мартиросян. – М. : АСВ, 2005. – 488 с.
10. **Цытович, Н. А.** Механика грунтов [Текст] / Н. А. Цытович. – М. : Высшая школа, 1983. – 288 с.
11. **Гильман, Я. Д.** Основания и фундаменты на лессовых просадочных грунтах [Текст] / Я. Д. Гильман. – Ростов на Дону : СевкавНИПИагропром, 1991. – 218 с.

12. **Буслов, А. С.** К уточнению расчета зданий на просадочных грунтах при точечных источниках увлажнения [Текст] / А. С. Буслов, В. А. Межеровский // Архитектура и строительство Узбекистана. – 1982. – № 10. – С. 65–76.
13. **Попсуенко, И. К.** Осадки зданий, возведенных на грунтах со II типом по просадочности [Текст] / И. К. Попсуенко, А. А. Руденко, А. И. Марков // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1980. – № 1. – С. 6–8.
14. **Хасанов, А. З.** Деформации кирпичных зданий на просадочных грунтах Зерафшанского оазиса [Текст] / А. З. Хасанов, Г. С. Стриго, В. Р. Мустакимов // Основания, фундаменты и механика фунтов. – 1993. – № 6. – С. 23–26.
15. **Шагин, П. П.** Прочность и устойчивость бескаркасных жилых зданий из сборных элементов на сильно и неравномерно сжимаемых грунтах [Текст] / П. П. Шагин. – М. : Госстройиздат, 1961. – 120 с.
16. **Кушнер, С. Г.** Влияние техногенных факторов на оползнеобразование в лессовых грунтах [Текст] / С. Г. Кушнер // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2001. – № 2. – С. 2–5.
17. **Коновалов П. А.** Основания и фундаменты реконструируемых зданий [Текст] / П. А. Коновалов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ВНИИНТПИ, Изд-во «Бумажная Галерея», 2000. – 320 с.
18. **Coduto Donald, P.** Foundation Design: Principles and Practices [Текст] / Donald P. Coduto. – 2<sup>nd</sup> ed. – New Jersey : Prentice Hall, 2001. – 883 pp.
19. **Frank, R.** Some aspects of soil-structure interaction according to Eurocode 7 «Geotechnical design» [Текст] / R. Frank // Engenharia Civil. – Vol. 25, 2006. – PP. 5–16.
20. **Tomlinson, M. J.** Foundation design and construction [Текст] / M. J. Tomlinson, R. Boorman. – 7<sup>th</sup> ed. – Edinburgh : Prentice Hall, 2001. – 583 p.
21. **Дерягин, Б. В.** Вода в дисперсных системах [Текст] / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, Ф. Д. Овчаренко и др. – М. : Химия, 1989. – 288 с.

22. **СНиП 2.01.09-91.** Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах [Текст]. – Взамен гл. СНиП II-8-78 ; введ. 1992-01-01. – М. : Госстрой СССР, 1992. – 46 с.
23. **СНиП 2.02.01-83.** Основания зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП II-15-74 и СН 475-75 ; введ. 1985-01-01. – М. : Госстрой СССР, 1985. – 49 с.
24. **СП 22.13330.2011.** Основания зданий и сооружений [Текст]. – Введ. 2011-05-20. – М. : Минрегион России, 2011. – 166 с.
25. **ДБН В.2.1-10-2009.** Основи та фундаменти споруд. Основні положення проєктування [Текст]. – Введ. 2009-07-01. – К. : Минрегион України, 2009. – 161 с.
26. **Трегуб, А. С.** Расчет зданий и сооружений на просадочных грунтах [Текст] / А. С. Трегуб, С. Н. Клепиков. – К. : Будівельник, 1987. – 200 с.
27. **Розенфельд, И. А.** К вопросу о расчетной модели системы «просадочное основание – здание» [Текст] / И. А. Розенфельд, А. С. Вайенберг // Межведомственный респ. науч. сб. «Основания и фундаменты». – Вып. 3. – Киев. – 1970. – С. 78–86.
28. **Яркин, В. В.** Определение просадочных деформаций по нормативным документам России и Украины [Текст] / В. В. Яркин, А. В. Кухарь // Современное промышленное и гражданское строительство, 2017. – Т. 13. – Вып. 2. – С. 111–119.
29. **Клепиков, С. Н.** Расчет зданий и сооружений на просадочных грунтах [Текст] / С. Н. Клепиков, А. С. Трегуб, И. В. Матвеев. – Киев : Будивельник, 1987. – 200 с.
30. **Пшеничкин, А. П.** Надежность зданий и оснований в особых условиях [Текст] : учеб. пособие / А. П. Пшеничкин, В. А. Пшеничкина. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2009. – 218 с.
31. **Галай, Б.Ф.** Критические замечания к положениям нормативных документов по оценке просадочности лёссовых грунтов по их физическим характеристикам [Текст] / Б. Ф. Галай, В. В. Сербин, В. С. Плахтикова и др. // Инженерные изыскания – 2016. – № 14. – С. 18–23.
32. **Хоменко, А. А.** Сопоставление методов оценки дополнительных осадок зданий при их взаимном влиянии [Текст] / А. А. Хоменко, Е. В. Емец // Сборник

науч. тр. студентов ДонГТУ. – Алчевск : ИПЦ ДонГТУ, 2017. – Вып. 10. – С. 259–268.

33. **Крутов, В. И.** Основания и фундаменты на просадочных грунтах [Текст] / В. И. Крутов. – Киев : Будівельник, 1982. – 224 с.
34. **Метелюк, Н. С.** Совершенствование расчета сооружений, возводимых в сложных грунтовых условиях [Текст] / Н. С. Метелюк. – Киев : Будівельник, 1980. – 144 с.
35. **Подольский, Д. М.** О возможных методах конечных элементов в задачах расчёта зданий на просадочных грунтах [Текст] / Д. М. Подольский // Сб. научн. трудов. – Киев : ЗНИИЭП, К. – 1975. – С. 25-36.
36. **Марков, А. И.** Практика моделирования напряженно-деформированного состояния зданий на просадочных грунтах [Текст] / А. И. Марков, П. В. Кокошуев и др. // Тр. междунар. кон-ции по геотехнике : Взаимодействие сооружений и оснований: методы расчета и инженерная практика. – СПб. : [Б. и.], 2005. – С. 129–132.
37. **Марков, А. И.** Определение напряженно-деформированного состояния просадочных грунтов во взаимодействии с уплотненными массивами [Текст] / А. И. Марков, С. П. Клепиков, В. И. Гупаленко // Фундаментостроение в сложных грунтовых условиях. – Алма-Ата, 1977. – С. 15–22.
38. **Попов, И. В.** Исследование природы структурных связей в лессах [Текст] / И. В. Попов, Л. К. Танкаева // Вестник МГУ. – 1961. – № 1. – С. 25–30.
39. **Попсуенко, И. К.** Исследование взаимодействия уплотненных массивов лессовых грунтов с окружающим их лессовым грунтом естественной структуры при просадке его от собственного веса [Текст] : автореф. диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук : (05.23.02) / Попсуенко Иван Константинович. – М. : [Б. и.], 1978. – 23 с.
40. **Емец, Е. В.** Анализ влияния продольных усилий на напряженно-деформированное состояние многоэтажных рам на неравномерно деформируемом основании [Текст] / Е. В. Емец, О. А. Коняшкина,

- И. А. Никишина // Сб. науч. трудов студентов ДонГТУ. – Алчевск : ИПЦ ДонГТУ, 2017. – Вып. 6 (49). – С. 95–99.
41. **Урьев, Н. Б.** Структурированные дисперсные системы [Текст] / Н. Б. Урьев // Соровский образовательный журнал. – 1998. – № 6. – С. 42–47.
42. **СП 21.13330.2012.** Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах [Текст]. – Введ. 2013-01-01. – М. : Минрегион России, 2011. – 74 с.
43. **ДБН В.1.1-5-2000.** Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах [Текст]. – Введ. 2000-06-01. – Киев : Госстрой Украины, 2000. – 75 с.
44. **Зарецкий, Ю. К.** Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений [Текст] / Ю. К. Зарецкий. – М. : Стройиздат, 1988. – 350 с.
45. **Бугров, А. К.** Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия [Текст] / А. К. Бугров, Р. М. Нарбут, В. П. Сипидин. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л. : Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 184 с.
46. **Шapiro, Д. М.** Расчет конструкций и оснований методом конечных элементов [Текст] : учебное пособие / Д. М. Шapiro. – Воронеж : ВГАСА, 1996. – 80 с.
47. **Малышев, М. В.** Критерии несущей способности и различные фазы деформирования состояния [Текст] / М. В. Малышев, С. А. Елизаров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1993. – № 4. – С. 2–5.
48. **Петраков, А. А.** Учебное пособие по курсу «Механика грунтов» [Текст] / А. А. Петраков, В. В. Яркин, Р. А. Таран, Т. В. Казачек ; под ред. А. А. Петракова. – Макеевка : ДонНАСА, 2004. – 164 с.
49. Методические рекомендации по определению коэффициентов жесткости оснований зданий и сооружений [Текст] / НИИ строит. кон-ций Госстроя СССР ; [разр. С. Н. Клепиковым]. – Киев : НИИСК, 1977. – 33 с.
50. **Винников, Ю. Л.** Моделирование напряженно-деформированного состояния системы «реконструируемое здание – фундаменты – основание» [Текст] / Ю. Л. Винников, А. В. Суходуб, О. В. Кичаева // Вестник ПНИПУ. – 2015. – № 2. – С. 50–63.

51. **Кашеварова, Г. Г.** Численное моделирование деформирования и разрушения системы «Здание-Фундамент-Основание» [Текст] / Г. Г. Кашеварова, Н. А. Труфанов. – Екатеринбург-Пермь : УрО РАН. – 2005. – 225 с. – ISBN 5-7691-1591-2.
52. **Гарагаш, Б. А.** Аварии и повреждения системы «здание – основание» и регулирование надежности ее элементов [Текст] / Б. А. Гарагаш. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2000. – 378 с.
53. **Northey, R. D.** Engineering properties of loess and other collapsible soils [Текст] / R. D. Northey. – Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. Mechanics. Mexico, 1969, v. 3. – P. 445–452.
54. **Крутов, В. И.** Расчет армированных массивов [Текст] / В. И. Крутов, И. К. Попсуенко // Труды института. – М. : Стройиздат. – 1980. – № 70. – С. 46–57.
55. **Федоровский, В. Г.** Метод расчета свайных полей и других вертикально армированных грунтовых массивов [Текст] / В. Г. Федоровский, С. Г. Безволев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М. : Стройиздат. – 1994. – № 3. – С. 11–15.
56. **Джоунс, Д. К.** Сооружения из армированного грунта [Текст] / Д. К. Джоунс. – М. : Стройиздат, 1989. – 280 с.
57. **Швецов, Г. И.** Основания и фундаменты [Текст] : справочник / Г. И. Швецов, И. В. Носков, А. Д. Слободян, Г. С. Госькова ; под ред. Г. И. Швецов. – М. : Высш. шк., 1991. – 383 с.
58. **Гончарова, Л. В.** Основы искусственного улучшения грунтов [Текст] / Л. В. Гончарова. – М. : МГУ, 1973. – 250 с.
59. **Гоц, М. А.** Рациональные приемы укрепления оснований деформированных зданий [Текст] / М. А. Гоц. – М. : Стройиздат, 1986. – 212 с.
60. Рекомендации по предпостроечному уплотнению слабых грунтов временной нагрузкой с применением песчаных и бумажных дрен [Текст] / М-во стр-ва СССР [и др.]. – Ярославль : Отд-ние НТИ Ин-та орг., механизации и техн. помощи стр-ву, 1978. – 22 с.

61. **Бекетов, А. К.** Улучшение строительных свойств лёссовых грунтов аммонизацией [Текст] / А. К. Бекетов // Конструкции промзданий. – Ростов н/д, 1971. – 180 с.
62. **Ржаницын, Б. А.** Закрепление и уплотнение просадочных лессовых грунтов [Текст] / Б. А. Ржаницын // Сб. НИИОСП им. Н. М. Герсеванова. – № 50, 1962. – С. 4–10.
63. **Bell, F. G.** Engineering treatment of soils (lstedn) [Текст] / F. G. Bell. –London : E and FN Spon, 1993. – 290 p.
64. **Галай, Б. Ф.** Пособие по уплотнению просадочных грунтов грунтовыми взрывами в условиях Северного Кавказа (изыскания, проектирование, производство работ) [Текст] / Б. Ф. Галай, В. В. Сербин, В. С. Плахтикова. – Ставрополь : Сервисшкола, 2016. – 96 с.
65. **Аскалонов, В. В.** Силикатизация лессовых грунтов [Текст] / В. В. Аскалонов. – М. : Госстройиздат, 1959. – 78 с.
66. **Шевченко, Л. М.** Закрепление лессовых грунтов нарушенной структуры методом силикатизации [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Шевченко Любовь Михайловна. – Ростов н/Д, 1984. – 192 с.
67. **Karol, R. H.** Chemical Grouting and Soil Stabilization [Текст] / R. H. Karol. – N.–Y. : Dekker, 2003. – 584 p.
68. **Воронкевич, С. Д.** Моделирование методом конечных элементов влияния постинъекционных процессов на эффективность противофильтрационной завесы [Текст] / С. Д. Воронкевич, С. Н. Емельянов, Н. Г. Максимович // Приложение численных методов к задачам геомеханики : Межвуз. сб. науч. тр. МИСИ. – М., [МИСИ], 1986. – С. 90–99.
69. **Фурсов, С. Г.** Прогрессивные технологии укрепления грунтов [Текст] / С. Г. Фурсов // Транспортное строительство. – 2011. – № 2. – С. 10–14.
70. **Шумилов, С. И.** Особенности производства работ при укреплении грунтов оснований и усилении фундаментов реконструируемых зданий на слабых грунтах [Текст] / С. И. Шумилов, К. М. Абелев, Р. Р. Бахронов и др. // Вестник Московского гос. строит. ун-та. – 2009. – № 1. – С. 86–89.

71. **Broms, B. B.** Stabilization of soil with lime columns [Текст] / B. B. Broms // Foundation Engineering Handbook (2<sup>nd</sup>edn). – H.-Y. Fang – ed. N.-Y. : Van Nostrend Reinhold, 1991. – P. 833–855.
72. **Безрук, В.М.** Теоретические основы укрепления грунтов цементами [Текст] / В. М. Безрук. – М. : Автостройиздат, 1956. – 241 с.
73. **Ржаницын, Б. А.** Силикатизация песчаных грунтов [Текст] / Б. А. Ржаницын. – М. : Изд-во стр-ва предприятий машиностроения, 1949. – 143 с.
74. **Ржаницын, Б. А.** Химическое закрепление грунтов в строительстве [Текст] / Б. А. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1986. – 264с.
75. **Соколович, В. Е.** О силикатизации лессовых грунтов [Текст] / В. Е. Соколович // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1965. – № 1. – С. 2–5.
76. **Соколович, В. Е.** Химическое закрепление грунтов [Текст] / В. Е. Соколович. – М. : Стройиздат, 1980. – 118 с.
77. **Высоцкий, С. П.** Закрепление слабых грунтов с использованием активированного силиката натрия [Текст] / С. П. Высоцкий, А. В. Писаренко // Вестник Луганского гос. ун-та имени Владимира Даля. – Луганск : ЛГУ им. В. Даля. – №2(2), 2016. – С. 28–31.
78. **Высоцкий, С. П.** Пути решения вопросов строительства в сложных инженерно-геологических условиях при помощи химических растворов [Текст] / С. П. Высоцкий, А. В. Писаренко // Вісник ДонНАБА : Інженерні системи та техногенна безпека. – Вип. 2015–5(115), 2015. – С. 82–87.
79. **Аскаров, Х. А.** Химическое закрепление оснований сооружений, возводимых на лессовых просадочных грунтах [Текст] / Х. А. Аскаров, Р. Кенджиаев // Материалы VI Всесоюз. совещания по закреплению и уплотнению грунтов. – М. : Изд-во МГУ, 1968. – С. 313–315.
80. **Родькина, И. А.** Возможности использования карбамидных смол для создания искусственных грунтов с высокой сорбционной емкостью [Текст] / И. А. Родькина, Е. Н. Самарин // Вест. Московского университета. Серия 4: Геология. – 2009. – № 6. – С. 59–62.

81. **Белевитина, Н. Ш.** Новая рецептура для закрепления грунтов на основе карбамидной смолы [Текст] / Н. Ш. Белевитина // Материалы к VI Всес. совещ. по закреплению и уплотнению грунтов («Теория и методы искусств. улучшения грунтов различных петрографич. типов»). – М. : Изд-во МГУ, 1968. – С. 406–407.
82. **Иерусалимская, М. Ф.** Опыт применения битумных эмульсий для укрепления грунтов [Текст] / М. Ф. Иерусалимская // Материалы к VI Всес. совещ. по закреплению и уплотнению грунтов («Теория и методы искусств. улучшения грунтов различных петрографич. типов»). – М. : Изд-во МГУ, 1968. – С. 421–424.
83. **Толстопятов, Б. В.** Адсорбционные явления при укреплении грунтов битумированием [Текст] / Б. В. Тослопятов // Дорога и автомобиль, 1937. – № 5. – С. 10–15.
84. **Попандопуло, Г. А.** Использование тяжелых нефтей для укрепления грунтов [Текст] / Г. А. Попандопуло, З. Э. Рацен // Материалы к VI Всес. совещ. по закреплению и уплотнению грунтов («Теория и методы искусств. улучшения грунтов различных петрографич. типов»). – М. : Изд-во МГУ, 1968. – С. 162–165.
85. **Осташев, Н. А.** О термическом методе укрепления лессовых оснований под промышленными сооружениями [Текст] / Н. А. Осташев // Строительная промышленность. – 1953. – № 5. – С. 15–21.
86. **Подъяконов, В. С.** Термическое упрочнение грунтов в основаниях зданий и сооружений [Текст] / В. С. Подъяконов. – М. : Стройиздат, 1968 – 89 с.
87. Секреты строительства нового дома [Электронный ресурс] // Все о строительстве. – [Б. м. : б. и.], [2011]. – Режим доступа : <http://buildings-up.ru/stroitelstvo-zdanij/1283-sekrety-stroitelstva-novogo-domu.html>.
88. **Рафиенко, И. И.** Синтетические смолы в разведочном бурении [Текст] / И. И. Рафиенко. – М. : Недра, 1975. – 128 с.
89. **Toms, B. A.** Some observations of the flow of linear polymer solution through straight tubes at large Reynolds numbers [Текст] / B. A. Toms // Proc. First Intern. Congr. on Rheology. – Amsterdam, 1948. – Р. 135–141.
90. **Пат. 2297574 Российская Федерация, МПК F 17D001/16, C08F 010/00.** Неводные суспензии, используемые в качестве агентов, снижающих сопротивление течению, и способ производства таких суспензий [Текст] / Иатон

Геральд Б., Иберт Алан К. ; заяв. и патентооблад. Энерджи Энд Энвиронментал Интернэшил, Л. К. – № 2003133281/04 ; заявл. 15.01.02 ; опубл. 27.07.07, Бюл. № 11. – 2 с.

91. **Zlochevskaya, R. I.** Peculiarities of the aqueous migration in clay soils during their chemical drainage [Текст] / R. I. Zlochevskaya, S. D. Voronkevich, V. A. Korolev, T. G. Makeeva, V. I. Divisilova // Proc. X International Conf. «Surfaceforces». – Moscow : Nauka, 1992. – P. 91.
92. **Касаткин, Ю. Н.** Механизм формирования коллоидных экранов на промышленных бассейнах [Текст] / Ю. Н. Касаткин // Известия Всерос. научно-исслед. ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2001. – Т. 239. – С. 33–41.
93. **ГОСТ 23161-2012.** Грунты. Метод лабораторного определения характеристик просадочности [Текст]. – Взамен ГОСТ 23161-78 ; введ. 2013-07-01. – М. : Стандартинформ, 2013. – 12 с.
94. **Исаев, В. С.** Особенности производства работ при газовой силикатизации грунтов [Текст] / В. С. Исаев, В. Ю. Зеленский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1981. – № 6. – С. 7–97.
95. **Мулюков, Э. И.** Из опыта химического закрепления грунтов в Германии [Текст] / Э. И. Мулюков // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – № 5. – С. 44.
96. **Неймарк, И. Е.** Силикагель, его получение, свойства и применение [Текст] / И. Е. Неймарк, Р. Ю. Шейнфайн. – М. : Наукова думка, 1973. – 201 с.
97. **Brinker, C. J.** The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing [Текст] / C. J. Brinker, G. W. Scherer. – [S. l.] : Academic Press, Inc., Am Imprint of Elsevier, 1990. – 908 p.
98. **Айлер, Р.** Химия кремнезема [Текст] : в 2 т. / под ред. д-ра техн. н. проф. В. П. Прянишникова. – М. : Мир, 1982. – 712 с. (в пер.).
99. **Дзисько, В. А.** Основы методов приготовления катализаторов [Текст] / В. А. Дзисько. – Новосибирск : Новосибирска Наука, 1983. – 263 с.

100. **Кнатько, В. М.** Элементы нанотехнологий в комплексных методах укрепления глинистых грунтов и производстве алюмосиликатных гидроизоляционных материалов [Текст] / В. М. Кнатько, Е. В. Щербакова, М. В. Кнатько // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология. География. – 2008. – № 4. – С. 82–85.
101. **Литвинов, А. И.** Возможность продления срока технологической активности кремниевой кислоты [Текст] / А. И. Литвинов, Е. В. Вильсон, А. В. Бутко // Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Строительство-2000». Ростов н/Д, 2000. – С. 12.
102. **Логанина, В. И.** Золь-гель-технология для синтеза кремнийсодержащей добавки известковых отделочных составов [Текст] / В. И. Логанина, Н. А. Прошина, О. А. Давыдова // Строительные материалы. – 2009. – № 7. – С. 48–50.
103. **Писаренко А. В.** Некоторые аспекты повышения прочности просадочных грунтов коллоидным раствором с добавлением полиакриламида [Текст] / А. В. Писаренко, В. В. Яркин, С. П. Высоцкий // «Строительство-2016» : материалы II Брянского междунар. инновац. форума (Брянск, 1 декабря 2016 г.) Т. 1 / БГИТУ и др.; ред. кол. : Н. П. Лукутцова, М. Ю. Прокуров, М. А. Сенющенков. – Брянск : БГИТУ, 2016.– С. 117–121.
104. **Фролов, Ю. Г.** Получение гидрозолей кремнезема, используемых в качестве связующего [Текст] / Ю. Г. Фролов, Е. Н. Лебедев, А. Н. Федосеев, Г. А. Дубровская и др. // Химическая промышленность. – 1985. – № 10. – С. 610–613.
105. **Егорова, Е. Н.** Методы выделения кремневой кислоты и аналитического определения кремнезёма [Текст] / Е. Н. Егорова. – М. : Наука, 1959. – 148 с.
106. **Фридрихсберг, Д. А.** Курс коллоидной химии [Текст] : учебник для вузов / Д. А. Фридрихсберг. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1984. – 368 с.
107. **Писаренко, А. В.** Разработка и оценка работы закрепляющего состава на основе активной кремниевой кислоты для просадочных грунтов [Текст] / А. В. Писаренко, В. В. Яркин // Материалы XX Междунар. межвузовской научно-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» – Москва : МГСУ, 2017. – С. 360–362.

108. **Мягченков, В. А.** Полиакриламидные флокулянты [Текст] / В. А. Мягченков [и др.]. – Казань : Государ. техн. ун-т, 1998. – 288 с.
109. **Губин, С. В.** Теория планирования экспериментов в энергетике [Текст] / С. В. Губин, А. И. Яковлев // Курс лекций для высших технических учебных заведений. – Киев : Миллениум, 2009. – 158 с.
110. **Мухачёв, В. А.** Планирование и обработка результатов эксперимента [Текст] : учеб. пособие / В. А. Мухачёв. – Томск : ТГУСУР, 2007. – 118 с.
111. Нажарова, Л. Н. Нанопроцессы в технологии высокодисперсного кремнезема [Текст] / Л. Н. Нажарова // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 8. – С. 288–290.
112. **Писаренко, А. В.** Метод химического закрепления просадочного грунта коллоидным раствором на основе золя кремниевой кислоты с добавлением полиакриламида [Текст] / А. В. Писаренко, В. В. Яркин, С. П. Высоцкий // Сб. материалов межд. науч. конф-ии «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании» (16–17 ноября 2016 г., г. Москва). – С. 282–286.
113. **Писаренко, А. В.** Анализ свойств закрепляющего раствора на основе активной кремниевой кислоты и полиакриламида для усиления просадочных грунтов [Текст] / А. В. Писаренко, В. И. Братчун // Вестник ДонНАСА : Современные строительные материалы, выпуск 2017-2(124). – С. 154–160.
114. **Писаренко, А. В.** Повышение надежности эксплуатации строительных сооружений за счет обработки почв химическими растворами [Текст] / А. В. Писаренко // Материалы 4-й междун. научно-практ. конф-ии, посвященной 55-летию строит. фак. и 85-летию БГИТУ «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах». – Брянск : БГИТУ, 1–2 декабря 2015. – С. 275–279.
115. **Писаренко, А. В.** Повышение безопасности эксплуатации сооружений в сложных инженерных и геологических условиях [Текст] / А. В. Писаренко, С. П. Высоцкий // Вестник ДонНТУ АДИ, № 1. – Горловка, 2016. – С. 44–53.

116. **Круглицкий, Н. Н.** Очерки по физико-химической механике [Текст] / Н. Н. Круглицкий. – Киев : Наук.думка, 1988. – 224 с.
117. **Щукин, Е. Д.** Коллоидная химия [Текст] : учебник / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1992. – 414 с.
118. **Руцков, А. П.** Краткий курс коллоидной химии [Текст] / А. П. Руцков, проф. д-р хим. наук ; М-во высш. образ-я СССР ; Арханг. лесотехн. ин-т им. В. В. Куйбышева. – Ленинград : Госхимиздат. 1958. – 280 с.
119. **Власова, Л. В.** Коллоидная химия [Текст] : учебное пособие / Л. В. Власова. – Киров : КГМА, 2009. – 100 с.
120. **Кригер, Н. И.** Косвенные методы оценки просадочных свойств лесовых пород [Текст] / Н. И. Кригер, А. Г. Кузнецов, О. И. Мунц / Труды ПНИИС. – М. : Стройиздат, 1971. – Т. 12. – С. 191–260.
121. **Mahajan, S. P.** Shear Viscosity of Clays to Compute Viscous Resistance [Текст] / S. P. Mahajan, Muniram Budhu // The 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 1–6 October, 2008. – Goa, India. – PP. 1516–1523.
122. **Высоцкий, С. П.** Методы увеличения структурной прочности грунтов [Электронный ресурс] / С. П. Высоцкий, А. В. Писаренко // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк : НИИГД «Респиратор», 2017. – № 4(54). – С. 52–59.
123. Методика работы с компрессионным прибором КПР-1 [Текст] / ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия и строительства и архитектуры». – Макеевка, 2016. – 6 с.
124. **ДСТУ Б В.2.1-4-96.** Грунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості [Текст]. – На заміну ГОСТ 12248-78, ГОСТ17245-79, ГОСТ 23908-79, ГОСТ 24586-90, ГОСТ 25585-83, ГОСТ 26518-85 ; надано чинності 1996-11-01 / Внесено Мінбуд Росії, Держкоммістобудування. – К. : Укрархбудінформ, 1996. – 107 с.
125. **Болдырев, Г. Г.** Сравнение методов лабораторных и полевых испытаний грунтов [Текст] / Г. Г. Болдырев, А. В. Мельников,

- Е. В. Меркульев и др. // Инженерные изыскания. Всероссийский научно-аналитический журнал. – 2013. – № 14. – С. 28–44.
126. **ГОСТ 30416-2012.** Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения [Текст]. – На заміну ОСТ 30416-96 ; введ. 2013-07-01. – М. : Мин-во регион. развития, 2013. – 76 с.
127. **Сидоров Н. Н.** Современные методы определения характеристик механических свойств грунтов [Текст] / Н. Н. Сидоров, В. П. Сипидин. – Л. : Стройиздат, 1972. – 136 с.
128. **Писаренко А. В.** Влияние частично закрепленного просадочного грунта на напряженно-деформируемое состояние конструкций [Текст] / А. В. Писаренко // Современное промышленное и гражданское строительство, 2017. – Том 13, Вып. 2. – С. 103–110.
129. **Антонов, В. М.** Проектирование зданий при особых условиях строительства и эксплуатации [Текст] : учеб. пособ. / В. М. Антонов, В. В. Леденев, В. И. Скрылев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – 240 с.
130. **Мавлянов, Г. А.** Генетические типы лессов и лессовидных пород центральной и южной частей Средней Азии и их инженерно-геологические свойства [Текст]. – Ташкент : Изд. АН Уз ССР, 1958. – 90 с.
131. Пособие по химическому закреплению грунтов инъекцией в промышленном и гражданском строительстве (к СНиП 3.02.01-83) [Текст]. – Введ. 1985-02-01 / НИИОСП им. Н. М. Герсеванова. – М. : Стройиздат, 1986.
132. **СТО НОСТРОЙ 2.3.18-2011.** Укрепление грунтов инъекционными методами в строительстве [Текст]. – Введ. 2011-12-05. – М. : Изд-во БСТ, 2012. – 71 с.
133. **Хямляйнен, В. А.** Физико-химическое укрепление пород при сооружении выработок [Текст] / В. А. Хямляйнен, В. И. Митраков, П. С. Сыркин. – М. : Недра, 1996. – 352с.
134. **Горбунов, Б. П.** К расчету параметров и формы закрепленного грунта вокруг одиночного инъектора [Текст] / Б. П. Горбунов, В. М. Марголин // Мат-лы VII Всесоюзн. сов. по закреплению и уплотнению грунтов. – Л. : Энергия, 1971. – 67 с.

135. **Бройд, И. И.** Струйная геотехнология [Текст] / И. И. Бройд. – М. : Изд-во АСВ, 2004. – 156 с.
136. **ДБН В.1.2-2:2006.** Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]. – На заміну СНиП 2.01.0785 ; надано чинності 2007-01-01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 78 с.
137. **Фадеев, А. Б.** Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / А. Б. Фадеев. – М. : Недра, 1982. – 494, с ил.
138. **Розин, Л. А.** Метод конечных элементов [Текст] / Л. А. Розин. – Л. : Энергия, 1971. – 260 с.
139. **Ухов, С. Б.** Расчёт сооружений и оснований методом конечных элементов [Текст] / С. Б. Ухов. – М. : Стройиздат, 1973.
140. **Ухов, С. Б.** Расчет и проектирование оснований и фундаментов на ЭВМ [Текст] / С. Б. Ухов, Е. В. Щербина, А. З. Попов. – Белгород : БТИСМ, 1988. – 145 с.
141. Программный комплекс ЛИРА-САПР [Текст] : учеб. пособие / Д. А. Городецкий, М. С. Барабаш, Р. Ю. Водопьянов и др. ; под ред. ак. РААСН А. С. Городецкого. – К.-М. : Электронное издание, 2013. – 376 с.
142. **Алексеев, С. И.** Автоматизированный метод расчета фундамента по двум предельным состояниям [Текст] / С. И. Алексеев / СПГТУ, ППИ. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1996. – 205 с.
143. **Румшинский, Л. З.** Математическая обработка результатов эксперимента [Текст] : справ. пособие / Л. З. Румшинский. – М. : Наука, 1971. – 192 с.
144. **Писаренко, А. В.** Численное исследование напряженно-деформированного состояния конструкций здания, взаимодействующего с просадочным основанием при его частичном закреплении [Текст] / А. В. Писаренко, В. В. Яркин // Вестник ДонНАСА : Научно-технические достижения студентов строит.-архит. отрасли. – 2017. – Вып. 2017–3(125). – С. 86–93.
145. Выборка рабочих чертежей типового проекта 2Р-02-01/64 «Одннадцатилетняя школа на 964 учащихся» [Текст] / ЦНИИЭП учебных зданий, 1964. – 2 с.

146. Выборка рабочих чертежей «Привязка школы на 964 учащихся в ЖМР №3 г. Жданова» [Текст] / Ждановское отделение Донецкого филиала института «Гипроград», 1966. – 4 с.
147. **Шутенко, Л. Н.** Основания и фундаменты [Текст] / Л. Н. Шутенко, А. Д. Гильман, Ю. Т. Лупан. – Киев : Высшая школа, 1989. –328 с.
148. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на объекте: «Средняя школа № 3 по ул. Апатова в г. Мариуполе» [Текст]. – Мариуполь : Шифр 7808-01 / УкрвостокГИИНТИЗ, 1991. – 22 с.
149. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на объекте: «Жилой дом по ул. Апатова в г. Мариуполе» [Текст]. – Мариуполь : УкрвостокГИИНТИЗ, 1996. – 22 с.
150. Техническое заключение по обследованию здания СШ № 3 в г. Мариуполе [Текст]. – Мариуполь : ДПП РППО «Укржилремпроект», 1991. – 12 с.
151. Проект химического закрепления грунтов основания фундаментов средней школы № 3 Жовтневого района г. Мариуполя [Текст]. – Ростов/на Дону : Ростовский ПромстройНИИпроект, 1991. – 14 с.
152. Рекомендации по укреплению глинистых пород оснований зданий и сооружений защелачиванием [Текст] / ГУП институт «БашНИИстрой». – Уфа, 2005. – 36 с.
153. Рекомендации по устройству оснований и фундаментов в лессовых грунтах с применением аммиачных композиций и барьерного закрепления [Текст]. – М. : Изд-во ПЭМ ВНИИИС Госстроя СССР, 1988. – 82 с.
154. СТО 17466563-001-2011. Рекомендации по инъекционному закреплению грунтов с применением особо тонкодисперсного минерального вяжущего (ОТДВ) «Микродур» [Текст] / НИИОСП ИМ. Н. М. Герсеванова совместно с ООО «ВЕСТА-ИНЖ». – Москва : [Б. и.], 2011. – 37 с.
155. **Ашихмин, П. С.** Армирование рыхлых пород инъецированием через сваи [Текст] / П. С. Ашихмин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – №3/2011, 2001. – С. 386–392.

156. **СП 47.13330.2012.** Инженерные изыскания для строительства. Основные положения [Текст]. – Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. – Введ. 2013-07-01 / Федер. агентство по строит. и жил.-ком. хоз-ву. – М. : Госстрой России, 2013. – 120 с.
157. **СП 3.02.01-83.** Пособие по производству работ при устройстве оснований и фундаментов (к СНиП 3.02.01-83) [Текст] : часть 1 / НИИОСП им. Н. М. Герсеванова. – М. : ГосстройССР, 1986. – 213 с.
158. **Рубцов, И. В.** Закрепление грунтов земляного полотна автомобильных и железных дорог [Текст] / И. В. Рубцов, В. И. Митраков, О. И. Рубцов. – М. : АСВ, 2007. – 184 с.
159. **Байбурин, А. Х.** Усиление методом цементации основания ленточного фундамента здания торгового комплекса в г. Челябинске [Текст] / А. Х. Байбурин, Е. Н. Серебренникова, Д. В. Куличкин, Д. А. Байбурин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2015, том 15, № 1, С. 18–24.
160. Технологические схемы предварительного упрочнения грунтов при преодолении зон тектонических разломов выработками Северо-Муйского ж/д тоннеля [Текст] / Времен. науч.-техн. колл. на стр-ве тоннелей Байкало-Амур. ж/д. магистр. и специал. упр. стр-ва «БАМтоннельстрой». – М. : [Б. и.], 1988. – 78 с.
161. **Кугушева, И. В.** Методика и результаты закрепления грунтов оснований исторических сооружений [Текст] / И. В. Кугушева // Инженерные изыскания. – 2009. – № 1. – С. 58–61.
162. **Черняков, А. В.** Контроль качества геотехнических конструкций, созданных методом струйной цементации [Текст] / А. В. Черняков, О. В. Богомолова, В. В. Капустин, М. Л. Владов и др. // Технологии сейсморазведки. – 2008. – № 3. – С. 97–102.
163. **Глебов, Н. В.** Экологические риски химического закрепления в городском строительстве [Текст] / Н. В. Глебов, Е. Ю. Куликова // Научный вестник МГГУ. – 2011. – № 9. – С. 9–15.
164. **ГОСТ 12.1.007-76.** Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности [Текст]. – Введен впервые 1997-01-01. – М. : Госстандарт ССР, 1997. – 4 с.

165. **ГН 2.1.6.695-98.** Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [Текст]. – На замену ГН 2.1.6.565а-96; ГН 2.1.6.574а-96; ГН 2.1.6.584а-96; ГН 2.1.6.716-98; введ. 2003-06-25. – М. : Минздрав России, 1998. – 41 с.
166. **ГОСТ Р 12.4.279-2012 ССБТ.** Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Рекомендации по выбору, применению и техническому обслуживанию [Текст]. – Введен впервые 2012-12-29 / Фед. агентство по технич. регулированию и метрологии. – М. : Стандартинформ, 2014. – 38 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ И СПРАВКИ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**



**Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики**

**Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры»**

86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, тел.: (062) 340-15-80,  
(0623) 22-24-67, факс (0623) 22-77-19, email: mailbox@donnasa.ru, идент. код 02070795

от 06.11.17 № 4-04-107  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.006.02  
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры»

**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы в учебный процесс  
Писаренко А.В. на тему "Взаимодействие бескаркасных зданий с основанием из частично  
закрепленного просадочного грунта" предоставленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности  
05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Аспирант кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» Писаренко А.В. предложила метод частичного закрепления просадочного грунта в основании бескаркасных зданий закрепляющим раствором на основе активной кремниевой кислоты. Экспериментально были определены деформационные характеристики просадочного грунта, закрепленного предложенным раствором и доказано, что данный раствор полностью устраняет просадочные свойства грунта и практически устраняет изменчивость сжимаемости грунта при водонасыщении. Предложена методика определения коэффициента жесткости основания из частично закрепленного просадочного грунта с использованием приведенных деформационных характеристик, определенных с учетом напряженного состояния грунтового массива под фундаментом.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению подготовки 08.04.01 Строительство по программе подготовки – теория и проектирование зданий и сооружений в дисциплине «Здания и сооружения в сложных инженерно-геологических и горно-геодинамических условиях»

Проректор по учебной работе  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры»  
д.т.н., профессор

Декан строительного факультета,  
к.т.н., доцент

Начальник учебного отдела,  
к.э.н., доцент



Н.М. Зайченко

А.М. Алексин

А.А. Сухина



**УКРАЇНА**  
**ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО**  
**«ІНСТИТУТ ДОНБАСРЕКОНСТРУКЦІЯ»**

83015, м. Донецьк,  
 вул. Челюскінців, 167<sup>а</sup>  
 тел. (062) 311-81-57

п/р 26008010077947 в ПАТ  
 "Укросцбак" м. Київ  
 МФО 300023 ЄДРПОУ 03328988

№ 075 от 11.12.2015

Диссертационный совет Д 01.06.02  
 при Донбасской национальной академии  
 строительства и архитектуры

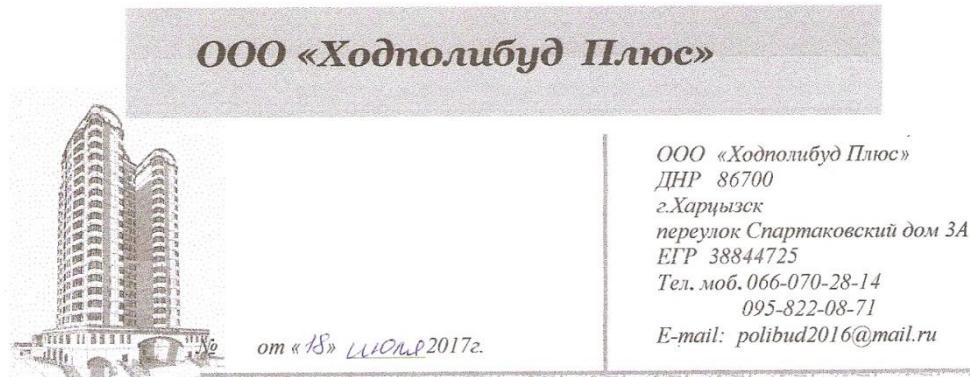
**СПРАВКА**  
**о внедрении результатов исследования**  
**диссертационной работы Писаренко Анастасии Валерьевны**  
**в практику проектирования и строительства**

В ЧАО «Институт Донбассреконструкция» внедрены результаты исследований Писаренко Анастасии Валерьевны:

- при выполнении частичного закрепления основания фундаментов здания поликлиники ИНВХ им. В.К. Гусака в г. Донецке;
- при разработке проекта усиления основания и конструкций здания ДЮСШ №2, расположенного по ул. Кронштадская, 11а в г. Мариуполе.

и.о. директора  
 ЧАО «Институт Донбассреконструкция»





Диссертационный совет Д 01.006.02  
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры»

**СПРАВКА**  
о внедрении результатов исследований диссертационной работы  
Писаренко Анастасии Валерьевны на тему «Взаимодействие  
бескаркасных зданий с основанием из частично закрепленного  
просадочного грунта», представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные  
конструкции, здания и сооружения».

При выполнении работ по реконструкции здания ОШ №12 по ул. Ярославского, 5а в г. Иловайск были использованы следующие результаты диссертационной работы Писаренко А.В.:

- метод частичного закрепления просадочного грунта в основании бескаркасных зданий закрепляющим раствором на основе активной кремниевой кислоты.

Предложенный закрепляющий раствор обладает повышенной проникающей способностью, о чем свидетельствуют предоставленные результаты экспериментальных исследований. Это дало возможность уменьшить количество точек инъецирования и выполнить работы по реконструкции со снижением материальных и трудозатрат.

Внедрение результатов исследований диссертационной работы Писаренко А.В. позволило получить социальный эффект, повысить эксплуатационный уровень, надежность и безопасность эксплуатации здания.

Директор ООО «Ходполибуд Плюс»



Е.В. Гнилицкая

Главный инженер ООО «Ходполибуд Плюс»



А.В. Гнилицкий

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ТАБЛИЦА ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ**

|   |                            |           |                      |                  |                |                          |                       |                        |                |
|---|----------------------------|-----------|----------------------|------------------|----------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| <b>30% кремниевой кислоты (2% SiO<sub>2</sub>)</b>    |                            |           |                      |                  |                |                          |                       |                        |                |
| t=20C, Грунт 2 кг, раствора 600 гр. Выдержка 30 мин.  |                            |           |                      |                  |                |                          |                       |                        |                |
| Нагрузка, P, кг                                       | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, P/l | Количество движения, m*V | Вязкость, P*t/S, Па*с | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
| 0.500   | 70.000                     | 0.070     | 0.310                | 0.226            | 7.143          | 0.113                    | 1267.125              | 4087.500               | 225.806        |
| 0.600   | 115.000                    | 0.115     | 0.340                | 0.338            | 5.217          | 0.203                    | 1667.700              | 4905.000               | 338.235        |
| 0.700   | 140.000                    | 0.140     | 0.850                | 0.165            | 5.000          | 0.115                    | 4864.125              | 5722.500               | 164.706        |
| 0.800   | 230.000                    | 0.230     | 0.820                | 0.280            | 3.478          | 0.224                    | 5362.800              | 6540.000               | 280.488        |
| 0.900   | 266.000                    | 0.266     | 0.790                | 0.337            | 3.383          | 0.303                    | 5812.425              | 7357.500               | 336.709        |
| 1.000   | 266.000                    | 0.266     | 0.640                | 0.416            | 3.759          | 0.416                    | 5232.000              | 8175.000               | 415.625        |
| 1.100   | 266.000                    | 0.266     | 0.610                | 0.436            | 4.135          | 0.480                    | 5485.425              | 8992.500               | 436.066        |
| 1.200   | 266.000                    | 0.266     | 0.470                | 0.566            | 4.511          | 0.679                    | 4610.700              | 9810.000               | 565.957        |
| 1.300   | 266.000                    | 0.266     | 0.490                | 0.543            | 4.887          | 0.706                    | 5207.475              | 10627.500              | 542.857        |
| 1.400   | 266.000                    | 0.266     | 0.410                | 0.649            | 5.263          | 0.908                    | 4692.450              | 11445.000              | 648.780        |
| 1.500   | 266.000                    | 0.266     | 0.390                | 0.682            | 5.639          | 1.023                    | 4782.375              | 12262.500              | 682.051        |
| <b>50% кремниевой кислоты (2% SiO<sub>2</sub>)</b>    |                            |           |                      |                  |                |                          |                       |                        |                |
| t=20C, Грунт 2 кг, раствора 1000 гр. Выдержка 30 мин. |                            |           |                      |                  |                |                          |                       |                        |                |
| Нагрузка, P, кг                                       | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, P/l | Количество движения, m*V | Вязкость, P*t/S, Па*с | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
| 0.300   | 15.000                     | 0.015     | 0.520                | 0.029            | 20.000         | 0.009                    | 1275.300              | 2452.500               | 28.846         |

Продолжение таблицы

|  |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
|--|----------------------------|-----------|----------------------|------------------|----------------|--------------------------|-------------|------------------------|----------------|
| 0.400  | 134.000                    | 0.134     | 0.720                | 0.186            | 2.985          | 0.074                    | 2354.400    | 3270.000               | 186.111        |
| 0.500  | 238.000                    | 0.238     | 0.950                | 0.251            | 2.101          | 0.125                    | 3883.125    | 4087.500               | 250.526        |
| 0.600  | 266.000                    | 0.266     | 0.590                | 0.451            | 2.256          | 0.271                    | 2893.950    | 4905.000               | 450.847        |
| 0.700  | 266.000                    | 0.266     | 0.650                | 0.409            | 2.632          | 0.286                    | 3719.625    | 5722.500               | 409.231        |
| 0.800  | 266.000                    | 0.266     | 0.530                | 0.502            | 3.008          | 0.402                    | 3466.200    | 6540.000               | 501.887        |
| 0.900  | 266.000                    | 0.266     | 0.470                | 0.566            | 3.383          | 0.509                    | 3458.025    | 7357.500               | 565.957        |
| 1.000  | 266.000                    | 0.266     | 0.360                | 0.739            | 3.759          | 0.739                    | 2943.000    | 8175.000               | 738.889        |
| <hr/>  |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| <b>15% кремниевой кислоты (2% SiO<sub>2</sub>)</b>   |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| t=20C, Грунт 2 кг, раствора 300 гр. Выдержка 30 мин. |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| Нагрузка, P, кг                                      | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, P/l | Количество движения, m*V | P*t/S, Па*с | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
| 1.300  | 10.000                     | 0.010     | 0.290                | 0.034            | 130.000        | 0.045                    | 3081.975    | 10627.500              | 34.483         |
| 1.400  | 22.000                     | 0.022     | 0.210                | 0.105            | 63.636         | 0.147                    | 2403.450    | 11445.000              | 104.762        |
| 1.500  | 33.000                     | 0.033     | 0.370                | 0.089            | 45.455         | 0.134                    | 4537.125    | 12262.500              | 89.189         |
| 1.600  | 40.000                     | 0.040     | 0.570                | 0.070            | 40.000         | 0.112                    | 7455.600    | 13080.000              | 70.175         |
| 1.700  | 72.000                     | 0.072     | 0.620                | 0.116            | 23.611         | 0.197                    | 8616.450    | 13897.500              | 116.129        |
| 1.800  | 89.000                     | 0.089     | 0.770                | 0.116            | 20.225         | 0.208                    | 11330.550   | 14715.000              | 115.584        |
| 1.900  | 188.000                    | 0.188     | 1.450                | 0.130            | 10.106         | 0.246                    | 22522.125   | 15532.500              | 129.655        |
| 2.000  | 266.000                    | 0.266     | 1.210                | 0.220            | 7.519          | 0.440                    | 19783.500   | 16350.000              | 219.835        |
| 2.100  | 266.000                    | 0.266     | 0.840                | 0.317            | 7.895          | 0.665                    | 14420.700   | 17167.500              | 316.667        |
| 2.200  | 266.000                    | 0.266     | 1.070                | 0.249            | 8.271          | 0.547                    | 19243.950   | 17985.000              | 248.598        |
| 2.300  | 266.000                    | 0.266     | 0.900                | 0.296            | 8.647          | 0.680                    | 16922.250   | 18802.500              | 295.556        |
| 2.400  | 266.000                    | 0.266     | 0.830                | 0.320            | 9.023          | 0.769                    | 16284.600   | 19620.000              | 320.482        |
| 2.500  | 266.000                    | 0.266     | 0.950                | 0.280            | 9.398          | 0.700                    | 19415.625   | 20437.500              | 280.000        |

## Продолжение таблицы

Продолжение таблицы

| Нагрузка, Р, кг                                       | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, Р/1 | Количество движения, m*V | P*t/S, Па*с | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
|---|----------------------------|-----------|----------------------|------------------|----------------|--------------------------|-------------|------------------------|----------------|
| 0.400   | 42.000                     | 0.042     | 0.620                | 0.068            | 9.524          | 0.027                    | 2027.400    | 3270.000               | 67.742         |
| 0.420   | 143.000                    | 0.143     | 1.060                | 0.135            | 2.937          | 0.057                    | 3639.510    | 3433.500               | 134.906        |
| 0.440   | 266.000                    | 0.266     | 1.350                | 0.197            | 1.654          | 0.087                    | 4855.950    | 3597.000               | 197.037        |
| 0.460   | 266.000                    | 0.266     | 1.170                | 0.227            | 1.729          | 0.105                    | 4399.785    | 3760.500               | 227.350        |
| 0.480   | 266.000                    | 0.266     | 0.950                | 0.280            | 1.805          | 0.134                    | 3727.800    | 3924.000               | 280.000        |
| 0.500   | 265.000                    | 0.265     | 1.010                | 0.262            | 1.887          | 0.131                    | 4128.375    | 4087.500               | 262.376        |
| 0.600   | 266.000                    | 0.266     | 0.780                | 0.341            | 2.256          | 0.205                    | 3825.900    | 4905.000               | 341.026        |
| 0.700   | 266.000                    | 0.266     | 0.600                | 0.443            | 2.632          | 0.310                    | 3433.500    | 5722.500               | 443.333        |
| 0.800   | 266.000                    | 0.266     | 0.600                | 0.443            | 3.008          | 0.355                    | 3924.000    | 6540.000               | 443.333        |
| 0.900   | 266.000                    | 0.266     | 0.480                | 0.554            | 3.383          | 0.499                    | 3531.600    | 7357.500               | 554.167        |
| 1.000   | 266.000                    | 0.266     | 0.440                | 0.605            | 3.759          | 0.605                    | 3597.000    | 8175.000               | 604.545        |
| <hr/>   |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| <b>50% кремниевой кислоты (1% SiO<sub>2</sub>)</b>    |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| t=20C, Грунт 2 кг, раствора 1000 гр. Выдержка 30 мин. |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| Нагрузка, Р, кг                                       | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, Р/1 | Количество движения, m*V | P*t/S, Па*с | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
| 0.200   | 67.000                     | 0.067     | 1.070                | 0.063            | 2.985          | 0.013                    | 1749.450    | 1635.000               | 62.617         |
| 0.220   | 152.000                    | 0.152     | 1.570                | 0.097            | 1.447          | 0.021                    | 2823.645    | 1798.500               | 96.815         |
| 0.240   | 255.000                    | 0.255     | 1.230                | 0.207            | 0.941          | 0.050                    | 2413.260    | 1962.000               | 207.317        |
| 0.260   | 266.000                    | 0.266     | 1.330                | 0.200            | 0.977          | 0.052                    | 2826.915    | 2125.500               | 200.000        |
| 0.280   | 266.000                    | 0.266     | 0.940                | 0.283            | 1.053          | 0.079                    | 2151.660    | 2289.000               | 282.979        |
| 0.300   | 266.000                    | 0.266     | 0.980                | 0.271            | 1.128          | 0.081                    | 2403.450    | 2452.500               | 271.429        |

Продолжение таблицы

| 0.320                       | 266.000                    | 0.266     | 0.890                | 0.299            | 1.203          | 0.096                    | 2328.240    | 2616.000               | 298.876        |
|-----------------------------|----------------------------|-----------|----------------------|------------------|----------------|--------------------------|-------------|------------------------|----------------|
| 0.340                       | 266.000                    | 0.266     | 0.840                | 0.317            | 1.278          | 0.108                    | 2334.780    | 2779.500               | 316.667        |
| 0.360                       | 266.000                    | 0.266     | 0.730                | 0.364            | 1.353          | 0.131                    | 2148.390    | 2943.000               | 364.384        |
| 0.380                       | 266.000                    | 0.266     | 0.600                | 0.443            | 1.429          | 0.168                    | 1863.900    | 3106.500               | 443.333        |
| 0.400                       | 266.000                    | 0.266     | 0.540                | 0.493            | 1.504          | 0.197                    | 1765.800    | 3270.000               | 492.593        |
| 0.420                       | 266.000                    | 0.266     | 0.620                | 0.429            | 1.579          | 0.180                    | 2128.770    | 3433.500               | 429.032        |
| 0.440                       | 266.000                    | 0.266     | 0.550                | 0.484            | 1.654          | 0.213                    | 1978.350    | 3597.000               | 483.636        |
| 0.460                       | 266.000                    | 0.266     | 0.470                | 0.566            | 1.729          | 0.260                    | 1767.435    | 3760.500               | 565.957        |
| 0.480                       | 266.000                    | 0.266     | 0.530                | 0.502            | 1.805          | 0.241                    | 2079.720    | 3924.000               | 501.887        |
| 0.500                       | 266.000                    | 0.266     | 0.490                | 0.543            | 1.880          | 0.271                    | 2002.875    | 4087.500               | 542.857        |
| <b>15% воды</b>             |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| t=20C, Грунт 2 кг, вода 15% |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| Нагрузка, P, кг             | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, P/l | Количество движения, m*V | P*t/S, Па*с | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
| 0.420                       | 42.000                     | 0.042     | 0.810                | 0.052            | 10.000         | 0.022                    | 2781.135    | 3433.500               | 51.852         |
| 0.440                       | 93.000                     | 0.093     | 0.680                | 0.137            | 4.731          | 0.060                    | 2445.960    | 3597.000               | 136.765        |
| 0.460                       | 145.000                    | 0.145     | 1.060                | 0.137            | 3.172          | 0.063                    | 3986.130    | 3760.500               | 136.792        |
| 0.480                       | 223.000                    | 0.223     | 1.480                | 0.151            | 2.152          | 0.072                    | 5807.520    | 3924.000               | 150.676        |
| 0.500                       | 266.000                    | 0.266     | 1.550                | 0.172            | 1.880          | 0.086                    | 6335.625    | 4087.500               | 171.613        |
| 0.520                       | 266.000                    | 0.266     | 1.160                | 0.229            | 1.955          | 0.119                    | 4931.160    | 4251.000               | 229.310        |
| 0.540                       | 266.000                    | 0.266     | 1.080                | 0.246            | 2.030          | 0.133                    | 4767.660    | 4414.500               | 246.296        |
| 0.560                       | 266.000                    | 0.266     | 0.990                | 0.269            | 2.105          | 0.150                    | 4532.220    | 4578.000               | 268.687        |
| 0.580                       | 266.000                    | 0.266     | 0.720                | 0.369            | 2.180          | 0.214                    | 3413.880    | 4741.500               | 369.444        |
| 0.600                       | 266.000                    | 0.266     | 0.690                | 0.386            | 2.256          | 0.231                    | 3384.450    | 4905.000               | 385.507        |
| 0.620                       | 266.000                    | 0.266     | 0.750                | 0.355            | 2.331          | 0.220                    | 3801.375    | 5068.500               | 354.667        |

Продолжение таблицы

| 0.640                       | 266.000                    | 0.266     | 0.790                | 0.337            | 2.406          | 0.215                    | 4133.280    | 5232.000               | 336.709        |
|-----------------------------|----------------------------|-----------|----------------------|------------------|----------------|--------------------------|-------------|------------------------|----------------|
| 0.660                       | 266.000                    | 0.266     | 0.770                | 0.345            | 2.481          | 0.228                    | 4154.535    | 5395.500               | 345.455        |
| 0.680                       | 266.000                    | 0.266     | 0.540                | 0.493            | 2.556          | 0.335                    | 3001.860    | 5559.000               | 492.593        |
| 0.700                       | 266.000                    | 0.266     | 0.500                | 0.532            | 2.632          | 0.372                    | 2861.250    | 5722.500               | 532.000        |
| 0.720                       | 266.000                    | 0.266     | 0.430                | 0.619            | 2.707          | 0.445                    | 2530.980    | 5886.000               | 618.605        |
| 0.740                       | 266.000                    | 0.266     | 0.530                | 0.502            | 2.782          | 0.371                    | 3206.235    | 6049.500               | 501.887        |
| 0.760                       | 266.000                    | 0.266     | 0.600                | 0.443            | 2.857          | 0.337                    | 3727.800    | 6213.000               | 443.333        |
| 0.780                       | 266.000                    | 0.266     | 0.470                | 0.566            | 2.932          | 0.441                    | 2996.955    | 6376.500               | 565.957        |
| 0.800                       | 266.000                    | 0.266     | 0.430                | 0.619            | 3.008          | 0.495                    | 2812.200    | 6540.000               | 618.605        |
| <hr/>                       |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| <b>30% воды</b>             |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| t=20C, Грунт 2 кг, вода 30% |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| Нагрузка, P, кг             | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, P/l | Количество движения, m*V | P*t/S, Па*c | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
| 0.120                       | 110.000                    | 0.110     | 1.150                | 0.096            | 1.091          | 0.011                    | 1128.150    | 981.000                | 95.652         |
| 0.140                       | 183.000                    | 0.183     | 1.210                | 0.151            | 0.765          | 0.021                    | 1384.845    | 1144.500               | 151.240        |
| 0.160                       | 262.000                    | 0.262     | 1.370                | 0.191            | 0.611          | 0.031                    | 1791.960    | 1308.000               | 191.241        |
| 0.180                       | 266.000                    | 0.266     | 1.110                | 0.240            | 0.677          | 0.043                    | 1633.365    | 1471.500               | 239.640        |
| 0.200                       | 266.000                    | 0.266     | 0.880                | 0.302            | 0.752          | 0.060                    | 1438.800    | 1635.000               | 302.273        |
| 0.220                       | 266.000                    | 0.266     | 0.750                | 0.355            | 0.827          | 0.078                    | 1348.875    | 1798.500               | 354.667        |
| 0.240                       | 266.000                    | 0.266     | 0.790                | 0.337            | 0.902          | 0.081                    | 1549.980    | 1962.000               | 336.709        |
| 0.260                       | 266.000                    | 0.266     | 0.690                | 0.386            | 0.977          | 0.100                    | 1466.595    | 2125.500               | 385.507        |
| 0.280                       | 266.000                    | 0.266     | 0.600                | 0.443            | 1.053          | 0.124                    | 1373.400    | 2289.000               | 443.333        |
| 0.300                       | 266.000                    | 0.266     | 0.560                | 0.475            | 1.128          | 0.143                    | 1373.400    | 2452.500               | 475.000        |
| 0.320                       | 266.000                    | 0.266     | 0.570                | 0.467            | 1.203          | 0.149                    | 1491.120    | 2616.000               | 466.667        |
| 0.340                       | 266.000                    | 0.266     | 0.540                | 0.493            | 1.278          | 0.167                    | 1500.930    | 2779.500               | 492.593        |

Продолжение таблицы

| 0.360                       | 266.000                    | 0.266     | 0.540                | 0.493            | 1.353          | 0.177                    | 1589.220    | 2943.000               | 492.593        |
|-----------------------------|----------------------------|-----------|----------------------|------------------|----------------|--------------------------|-------------|------------------------|----------------|
| 0.380                       | 266.000                    | 0.266     | 0.460                | 0.578            | 1.429          | 0.220                    | 1428.990    | 3106.500               | 578.261        |
| 0.400                       | 266.000                    | 0.266     | 0.470                | 0.566            | 1.504          | 0.226                    | 1536.900    | 3270.000               | 565.957        |
|                             |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| <b>50% воды</b>             |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| t=20C, Грунт 2 кг, вода 50% |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| Нагрузка, P, кг             | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, P/l | Количество движения, m*V | P*t/S, Па*c | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
| 0.060                       | 62.000                     | 0.062     | 0.810                | 0.077            | 0.968          | 0.005                    | 397.305     | 490.500                | 76.543         |
| 0.080                       | 70.000                     | 0.070     | 0.920                | 0.076            | 1.143          | 0.006                    | 601.680     | 654.000                | 76.087         |
| 0.100                       | 257.000                    | 0.257     | 1.480                | 0.174            | 0.389          | 0.017                    | 1209.900    | 817.500                | 173.649        |
| 0.120                       | 266.000                    | 0.266     | 1.280                | 0.208            | 0.451          | 0.025                    | 1255.680    | 981.000                | 207.813        |
| 0.140                       | 266.000                    | 0.266     | 1.110                | 0.240            | 0.526          | 0.034                    | 1270.395    | 1144.500               | 239.640        |
| 0.160                       | 266.000                    | 0.266     | 0.960                | 0.277            | 0.602          | 0.044                    | 1255.680    | 1308.000               | 277.083        |
| 0.180                       | 266.000                    | 0.266     | 0.800                | 0.333            | 0.677          | 0.060                    | 1177.200    | 1471.500               | 332.500        |
| 0.200                       | 266.000                    | 0.266     | 0.670                | 0.397            | 0.752          | 0.079                    | 1095.450    | 1635.000               | 397.015        |
| 0.220                       | 266.000                    | 0.266     | 0.580                | 0.459            | 0.827          | 0.101                    | 1043.130    | 1798.500               | 458.621        |
| 0.240                       | 266.000                    | 0.266     | 0.640                | 0.416            | 0.902          | 0.100                    | 1255.680    | 1962.000               | 415.625        |
| 0.260                       | 266.000                    | 0.266     | 0.550                | 0.484            | 0.977          | 0.126                    | 1169.025    | 2125.500               | 483.636        |
| 0.280                       | 266.000                    | 0.266     | 0.560                | 0.475            | 1.053          | 0.133                    | 1281.840    | 2289.000               | 475.000        |
| 0.300                       | 266.000                    | 0.266     | 0.500                | 0.532            | 1.128          | 0.160                    | 1226.250    | 2452.500               | 532.000        |
| 0.320                       | 266.000                    | 0.266     | 0.470                | 0.566            | 1.203          | 0.181                    | 1229.520    | 2616.000               | 565.957        |
| 0.340                       | 266.000                    | 0.266     | 0.480                | 0.554            | 1.278          | 0.188                    | 1334.160    | 2779.500               | 554.167        |

### Продолжение таблицы

Продолжение таблицы

| Нагрузка, Р, кг                                      | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, Р/1 | Количество движения, m*V | P*t/S, Па*с | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
|--|----------------------------|-----------|----------------------|------------------|----------------|--------------------------|-------------|------------------------|----------------|
| 0.060  | 44.000                     | 0.044     | 1.090                | 0.040            | 1.364          | 0.002                    | 534.645     | 490.500                | 40.367         |
| 0.080  | 68.000                     | 0.068     | 1.230                | 0.055            | 1.176          | 0.004                    | 804.420     | 654.000                | 55.285         |
| 0.100  | 157.000                    | 0.157     | 1.460                | 0.108            | 0.637          | 0.011                    | 1193.550    | 817.500                | 107.534        |
| 0.120  | 229.000                    | 0.229     | 1.600                | 0.143            | 0.524          | 0.017                    | 1569.600    | 981.000                | 143.125        |
| 0.140  | 257.000                    | 0.257     | 1.220                | 0.211            | 0.545          | 0.029                    | 1396.290    | 1144.500               | 210.656        |
| 0.160  | 266.000                    | 0.266     | 1.380                | 0.193            | 0.602          | 0.031                    | 1805.040    | 1308.000               | 192.754        |
| 0.180  | 266.000                    | 0.266     | 0.890                | 0.299            | 0.677          | 0.054                    | 1309.635    | 1471.500               | 298.876        |
| 0.200  | 266.000                    | 0.266     | 0.850                | 0.313            | 0.752          | 0.063                    | 1389.750    | 1635.000               | 312.941        |
| 0.220  | 266.000                    | 0.266     | 0.680                | 0.391            | 0.827          | 0.086                    | 1222.980    | 1798.500               | 391.176        |
| 0.240  | 266.000                    | 0.266     | 0.770                | 0.345            | 0.902          | 0.083                    | 1510.740    | 1962.000               | 345.455        |
| 0.260  | 266.000                    | 0.266     | 0.610                | 0.436            | 0.977          | 0.113                    | 1296.555    | 2125.500               | 436.066        |
| 0.280  | 266.000                    | 0.266     | 0.660                | 0.403            | 1.053          | 0.113                    | 1510.740    | 2289.000               | 403.030        |
| 0.300  | 266.000                    | 0.266     | 0.570                | 0.467            | 1.128          | 0.140                    | 1397.925    | 2452.500               | 466.667        |
| 0.320  | 266.000                    | 0.266     | 0.490                | 0.543            | 1.203          | 0.174                    | 1281.840    | 2616.000               | 542.857        |
| 0.340  | 266.000                    | 0.266     | 0.420                | 0.633            | 1.278          | 0.215                    | 1167.390    | 2779.500               | 633.333        |
| <b>30% кремниевой кислоты (3% SiO<sub>2</sub>)</b>   |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| t=20C, Грунт 2 кг, раствора 600 гр. Выдержка 30 мин. |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| Нагрузка, Р, кг                                      | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, Р/1 | Количество движения, m*V | P*t/S, Па*с | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
| 1.900  | 20.000                     | 0.020     | 0.290                | 0.069            | 95.000         | 0.131                    | 4504.425    | 15532.500              | 68.966         |
| 2.200  | 30.000                     | 0.030     | 0.320                | 0.094            | 73.333         | 0.206                    | 5755.200    | 17985.000              | 93.750         |

## Продолжение таблицы

Продолжение таблицы

|  |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
|--|----------------------------|-----------|----------------------|------------------|----------------|--------------------------|-------------|------------------------|----------------|
| <b>15% кремниевой кислоты (0,5% SiO<sub>2</sub>)</b> |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| t=20C, Грунт 2 кг, раствора 300 гр. Выдержка 30 мин. |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| Нагрузка, P, кг                                      | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, P/l | Количество движения, m*V | P*t/S, Па*с | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
| 0.900  | 78.000                     | 0.078     | 0.640                | 0.122            | 11.538         | 0.110                    | 4708.800    | 7357.500               | 121.875        |
| 1.000  | 94.000                     | 0.094     | 0.600                | 0.157            | 10.638         | 0.157                    | 4905.000    | 8175.000               | 156.667        |
| 1.100  | 192.000                    | 0.192     | 0.670                | 0.287            | 5.729          | 0.315                    | 6024.975    | 8992.500               | 286.567        |
| 1.200  | 226.000                    | 0.226     | 0.700                | 0.323            | 5.310          | 0.387                    | 6867.000    | 9810.000               | 322.857        |
| 1.300  | 266.000                    | 0.266     | 0.840                | 0.317            | 4.887          | 0.412                    | 8927.100    | 10627.500              | 316.667        |
| 1.400  | 266.000                    | 0.266     | 0.710                | 0.375            | 5.263          | 0.525                    | 8125.950    | 11445.000              | 374.648        |
| 1.500  | 266.000                    | 0.266     | 0.590                | 0.451            | 5.639          | 0.676                    | 7234.875    | 12262.500              | 450.847        |
| 1.600  | 266.000                    | 0.266     | 0.470                | 0.566            | 6.015          | 0.906                    | 6147.600    | 13080.000              | 565.957        |
| 1.700  | 266.000                    | 0.266     | 0.390                | 0.682            | 6.391          | 1.159                    | 5420.025    | 13897.500              | 682.051        |
| <b>30% кремниевой кислоты (0,5% SiO<sub>2</sub>)</b> |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| t=20C, Грунт 2 кг, раствора 600 гр. Выдержка 30 мин. |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| Нагрузка, P, кг                                      | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, P/l | Количество движения, m*V | P*t/S, Па*с | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
| 0.220  | 60.000                     | 0.060     | 1.210                | 0.050            | 3.667          | 0.011                    | 2176.185    | 1798.500               | 49.587         |
| 0.240  | 123.000                    | 0.123     | 1.350                | 0.091            | 1.951          | 0.022                    | 2648.700    | 1962.000               | 91.111         |
| 0.260  | 240.000                    | 0.240     | 1.610                | 0.149            | 1.083          | 0.039                    | 3422.055    | 2125.500               | 149.068        |

Продолжение таблицы

| 0.280   | 266.000                    | 0.266     | 1.290                | 0.206            | 1.053          | 0.058                    | 2952.810    | 2289.000               | 206.202        |
|---|----------------------------|-----------|----------------------|------------------|----------------|--------------------------|-------------|------------------------|----------------|
| 0.300   | 266.000                    | 0.266     | 1.110                | 0.240            | 1.128          | 0.072                    | 2722.275    | 2452.500               | 239.640        |
| 0.320   | 266.000                    | 0.266     | 0.920                | 0.289            | 1.203          | 0.093                    | 2406.720    | 2616.000               | 289.130        |
| 0.340   | 266.000                    | 0.266     | 0.790                | 0.337            | 1.278          | 0.114                    | 2195.805    | 2779.500               | 336.709        |
| 0.360   | 266.000                    | 0.266     | 0.800                | 0.333            | 1.353          | 0.120                    | 2354.400    | 2943.000               | 332.500        |
| 0.380   | 266.000                    | 0.266     | 0.700                | 0.380            | 1.429          | 0.144                    | 2174.550    | 3106.500               | 380.000        |
| 0.400   | 266.000                    | 0.266     | 0.600                | 0.443            | 1.504          | 0.177                    | 1962.000    | 3270.000               | 443.333        |
| 0.420   | 266.000                    | 0.266     | 0.580                | 0.459            | 1.579          | 0.193                    | 1991.430    | 3433.500               | 458.621        |
| 0.440   | 266.000                    | 0.266     | 0.540                | 0.493            | 1.654          | 0.217                    | 1942.380    | 3597.000               | 492.593        |
| <b>50% кремниевой кислоты (0,5% SiO<sub>2</sub>)</b>  |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| t=20C, Грунт 2 кг, раствора 1000 гр. Выдержка 30 мин. |                            |           |                      |                  |                |                          |             |                        |                |
| Нагрузка, P, кг                                       | Длина пройденного пути, мм | Путь l, м | Время движения, t, с | Скорость, V, м/с | Жесткость, P/l | Количество движения, m*V | P*t/S, Па*c | Напряжение, σ= P/S, Па | Скорость, мм/с |
| 0.120   | 51.000                     | 0.051     | 1.570                | 0.032            | 2.353          | 0.004                    | 1540.170    | 981.000                | 32.484         |
| 0.140   | 160.000                    | 0.160     | 1.900                | 0.084            | 0.875          | 0.012                    | 2174.550    | 1144.500               | 84.211         |
| 0.160   | 235.000                    | 0.235     | 1.690                | 0.139            | 0.681          | 0.022                    | 2210.520    | 1308.000               | 139.053        |
| 0.180   | 266.000                    | 0.266     | 1.150                | 0.231            | 0.677          | 0.042                    | 1692.225    | 1471.500               | 231.304        |
| 0.200   | 266.000                    | 0.266     | 0.900                | 0.296            | 0.752          | 0.059                    | 1471.500    | 1635.000               | 295.556        |
| 0.220   | 266.000                    | 0.266     | 0.790                | 0.337            | 0.827          | 0.074                    | 1420.815    | 1798.500               | 336.709        |
| 0.240   | 266.000                    | 0.266     | 0.720                | 0.369            | 0.902          | 0.089                    | 1412.640    | 1962.000               | 369.444        |
| 0.260   | 266.000                    | 0.266     | 0.660                | 0.403            | 0.977          | 0.105                    | 1402.830    | 2125.500               | 403.030        |
| 0.280   | 266.000                    | 0.266     | 0.650                | 0.409            | 1.053          | 0.115                    | 1487.850    | 2289.000               | 409.231        |
| 0.300   | 266.000                    | 0.266     | 0.600                | 0.443            | 1.128          | 0.133                    | 1471.500    | 2452.500               | 443.333        |
| 0.320   | 266.000                    | 0.266     | 0.560                | 0.475            | 1.203          | 0.152                    | 1464.960    | 2616.000               | 475.000        |

**ПРИЛОЖЕНИЕ В. ТАБЛИЦА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ПРИБОРЕ КПР-1**

| <b>Образец без закрепления (по усредненным показателям 3-х испытаний)</b> |   |               |                      |                      |                       |                          |              |              |          |          |               |
|---|---|---------------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------|--------------|----------|----------|---------------|
| <b>№</b>  | <b>m, кг</b>                                    | <b>P, МПа</b> | <b>n<sub>1</sub></b> | <b>n<sub>2</sub></b> | <b>n<sub>ср</sub></b> | <b>h<sub>a</sub>, мм</b> | <b>Δ, мм</b> | <b>h, мм</b> | <b>ε</b> | <b>е</b> |               |
| <b>Без замачивания до достижения расчетной нагрузки</b>                   |   |               |                      |                      |                       |                          |              |              |          |          |               |
| 1   | 1.5   | 0.02842       | 40                   | 38                   | 39.219                | 0.392                    | 0            | 0.392        | 0.0157   | 0.83082  |               |
| 2   | 4.5   | 0.07742       | 106                  | 101                  | 103.623               | 1.036                    | 0            | 1.036        | 0.0414   | 0.78290  |               |
| 3   | 7.5   | 0.12642       | 139                  | 132                  | 135.575               | 1.356                    | 0            | 1.356        | 0.0542   | 0.75913  |               |
| 4   | 10.5  | 0.17542       | 159                  | 152                  | 155.247               | 1.552                    | 0            | 1.552        | 0.0621   | 0.74450  |               |
| 5   | 13.5  | 0.22442       | 173                  | 166                  | 169.656               | 1.697                    | 0            | 1.697        | 0.0679   | 0.73378  |               |
| <b>С замачиванием после достижения расчетной нагрузки</b>                 |   |               |                      |                      |                       |                          |              |              |          |          |               |
| 1   | 13.5  | 0.22442       | 199                  | 202                  | 200.355               | 2.004                    | 0            | 2.004        | 0.0801   | 0.71094  |               |
| 2   | 16.5  | 0.27342       | 200                  | 206                  | 202.735               | 2.027                    | 0            | 2.027        | 0.0811   | 0.70916  |               |
| 3   | 19.5  | 0.32242       | 205                  | 211                  | 207.998               | 2.080                    | 0            | 2.080        | 0.0832   | 0.70525  |               |
| 4   | 22.5  | 0.37142       | 208                  | 215                  | 211.757               | 2.118                    | 0            | 2.118        | 0.0847   | 0.70245  |               |
|   | Начальный коэффициент пористости $e_0$          |               |                      |                      |                       |                          |              |              |          |          | <b>0.86</b>   |
|   | Коэффициент уплотнения $m_0$                    |               |                      |                      |                       |                          |              |              |          |          | <b>0.6117</b> |
|   | Относительный модуль деформации $E_{oed}$ , МПа |               |                      |                      |                       |                          |              |              |          |          | <b>1.8945</b> |
|   | Модуль деформации $E$ , МПа                     |               |                      |                      |                       |                          |              |              |          |          | <b>5.6835</b> |

## Продолжение таблицы

**Обозначения по таблице в приложении 2.2:**

**№** – номер нагружения образца;

**m, кг** – масса груза на штангу прибора КПр-1;

**P, Мпа** – давление на образце от приложенной массы груза m;

**n<sub>1</sub>** – показания левого индикатора деформаций, \*0,01 мм;

**n<sub>2</sub>** – показания правого индикатора деформаций, \*0,01 мм;

**n<sub>ср</sub>** – среднее значение показаний индикаторов деформаций, \*0,01 мм;

**h<sub>a</sub>** – абсолютная деформация, мм;

**Δ** – поправка на деформацию прибора, мм;

**h** – абсолютная деформация с учетом поправки прибора, мм;

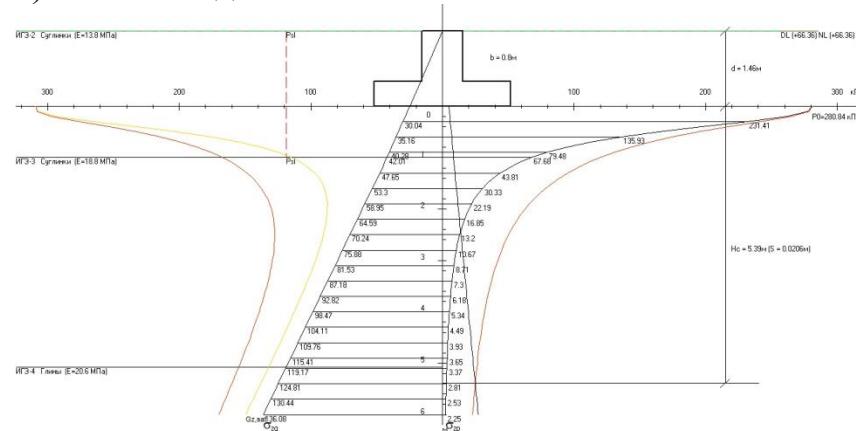
**ε** – относительная деформация;

**e** – коэффициент пористости грунта.

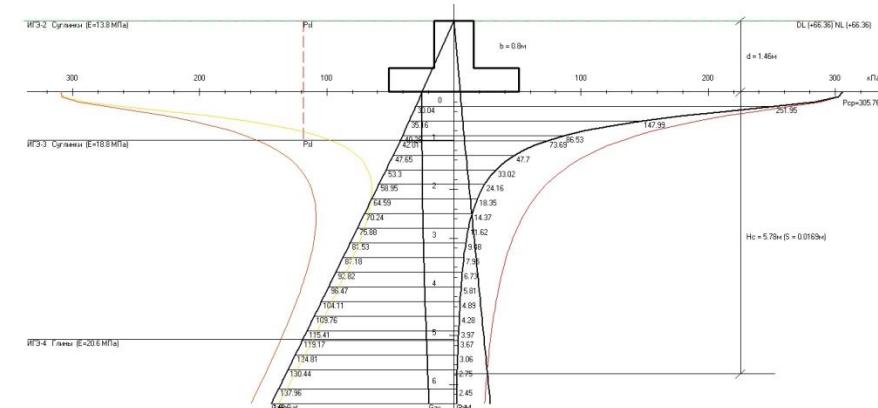
## ПРИЛОЖЕНИЕ Г. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ DesCon

### СНиП 2.02.01-83

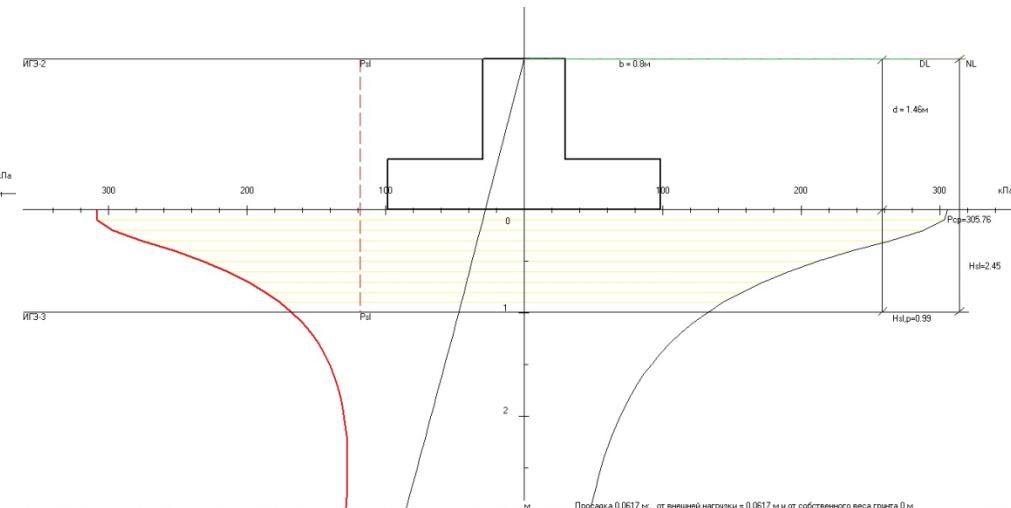
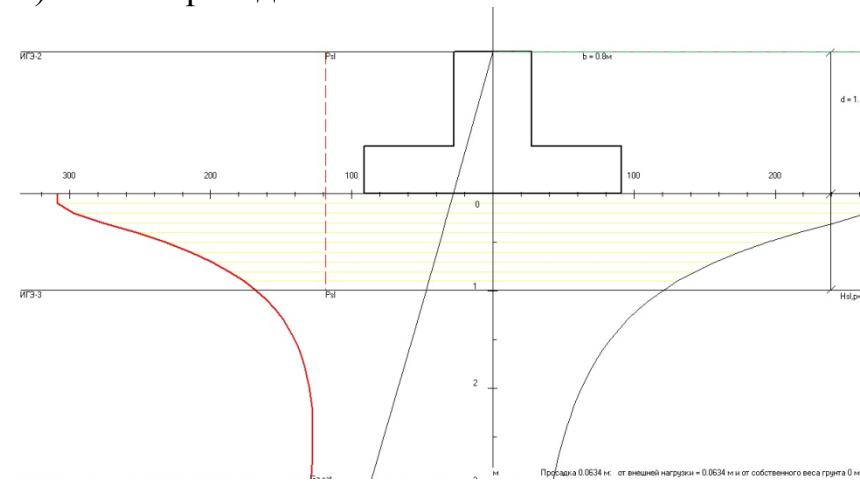
а) схемы осадок



### ДБН В.2.1-10-2009



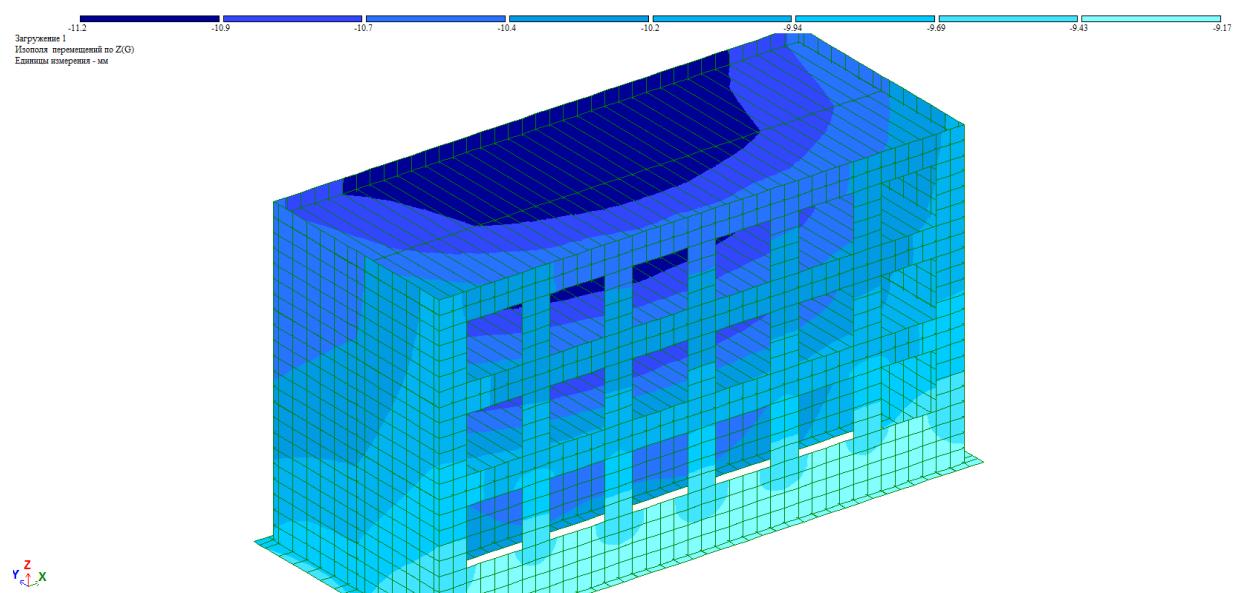
б) схемы просадок



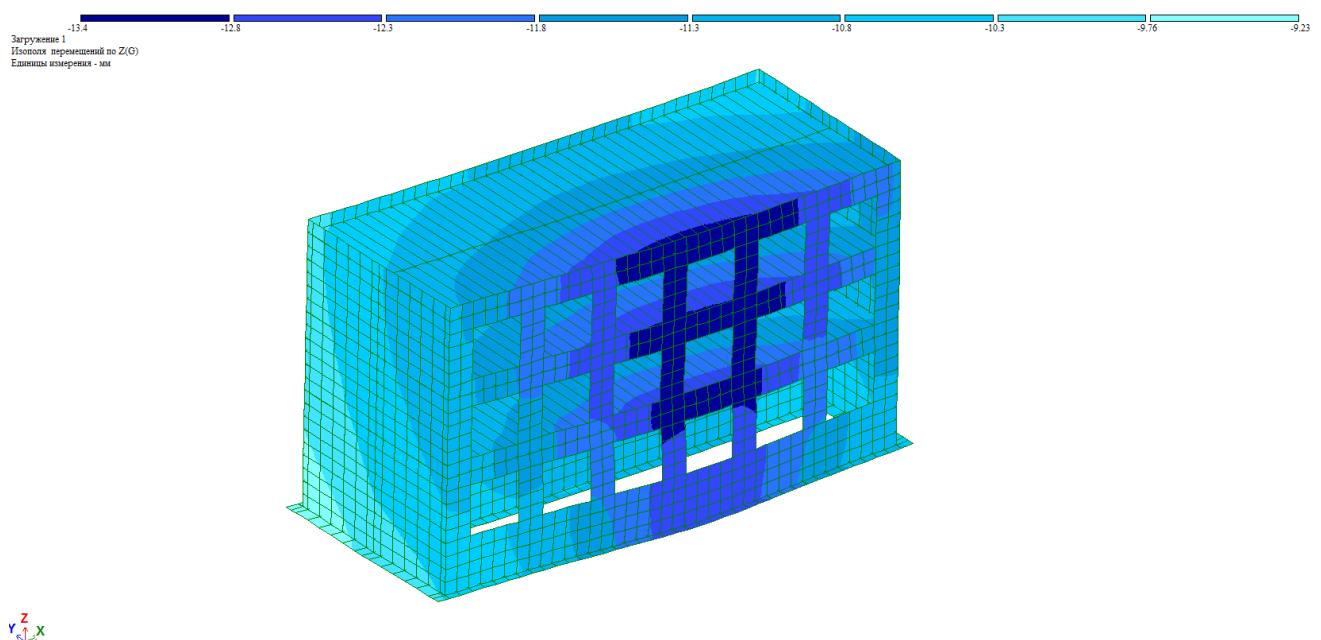
## ПРИЛОЖЕНИЕ Д. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ПК ЛИРА-САПР 2013

### Динамика изменения вертикальных перемещений при просадке посередине стены

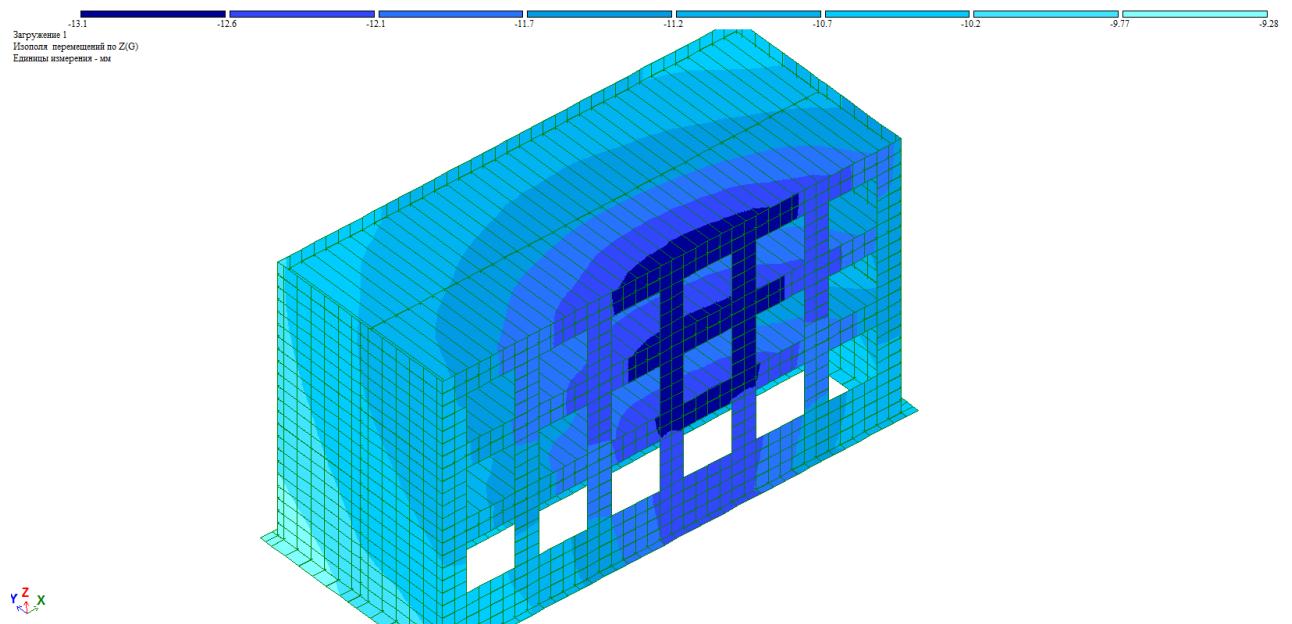
#### 1. Без просадки



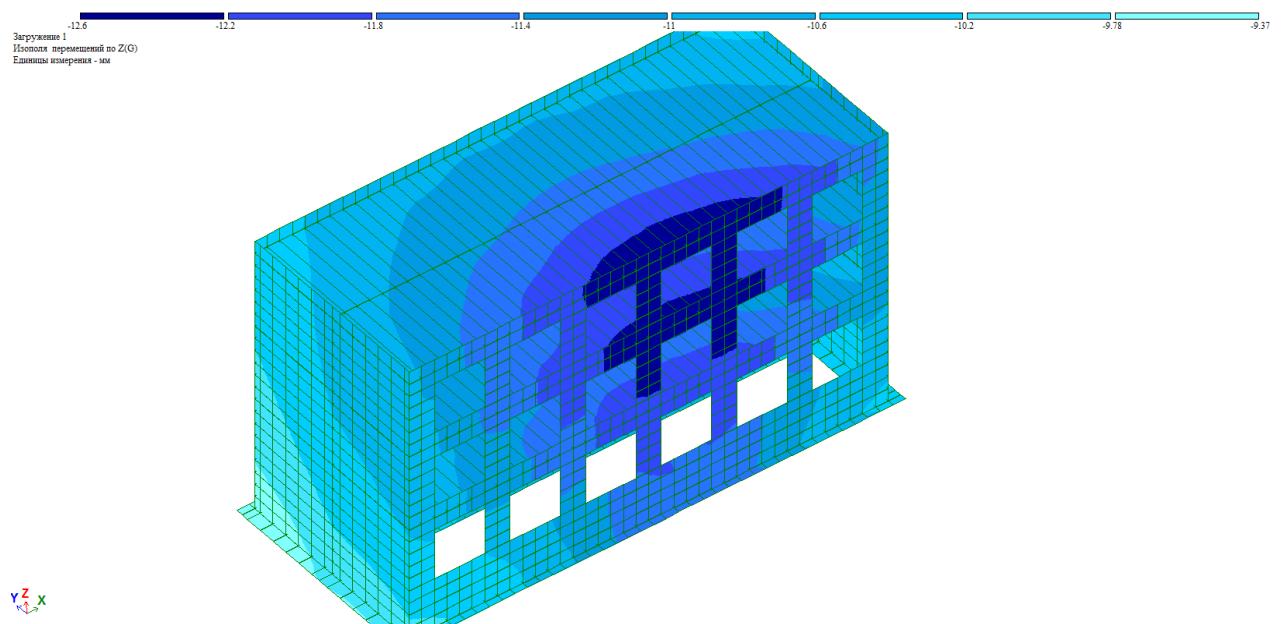
#### 2. С просадкой без усиления



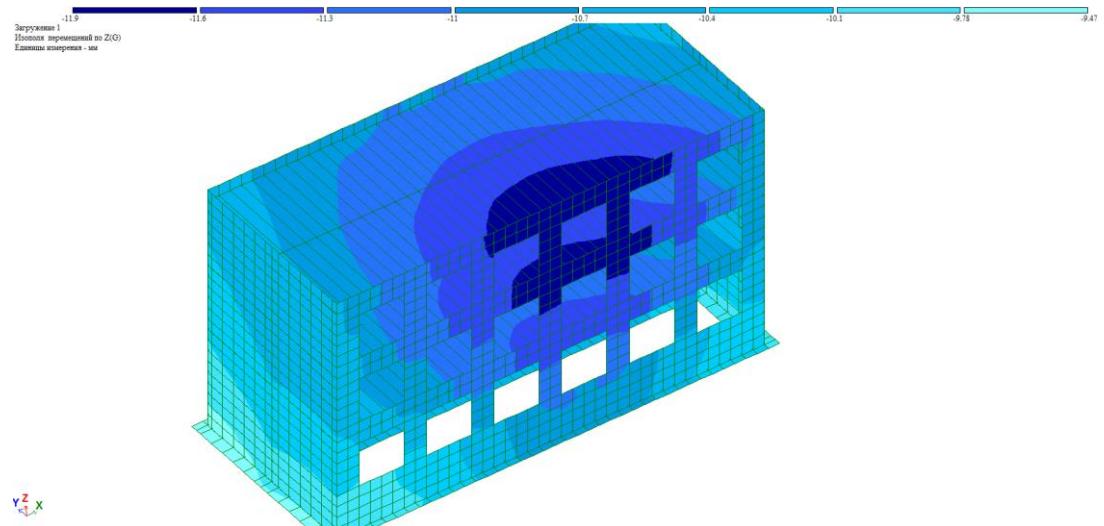
### 3. При усилении 50%



### 4. При усилении 75%

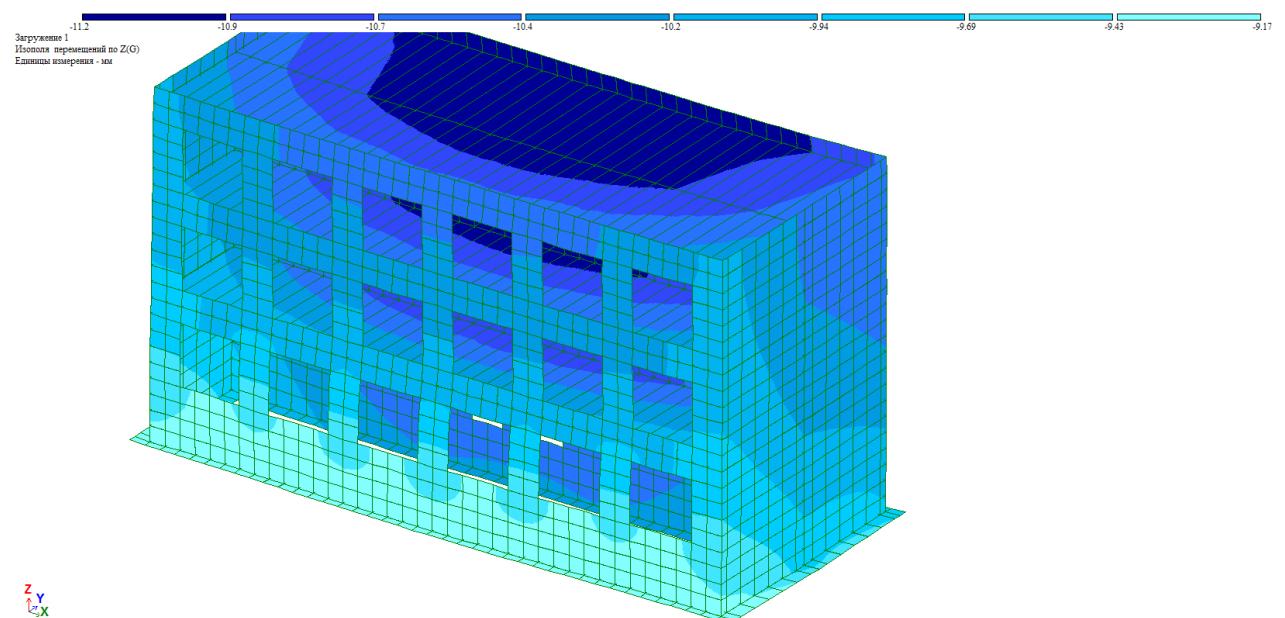


## 5. При усилении 100%

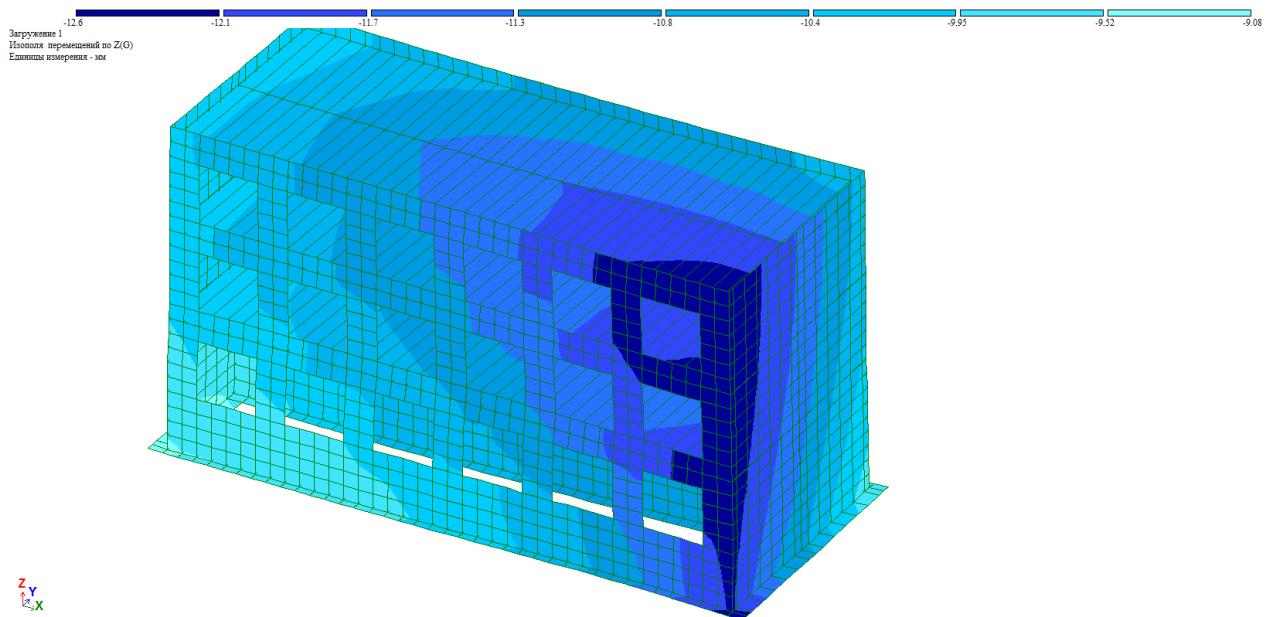


## Динамика изменения вертикальных перемещений при просадке с краю стены

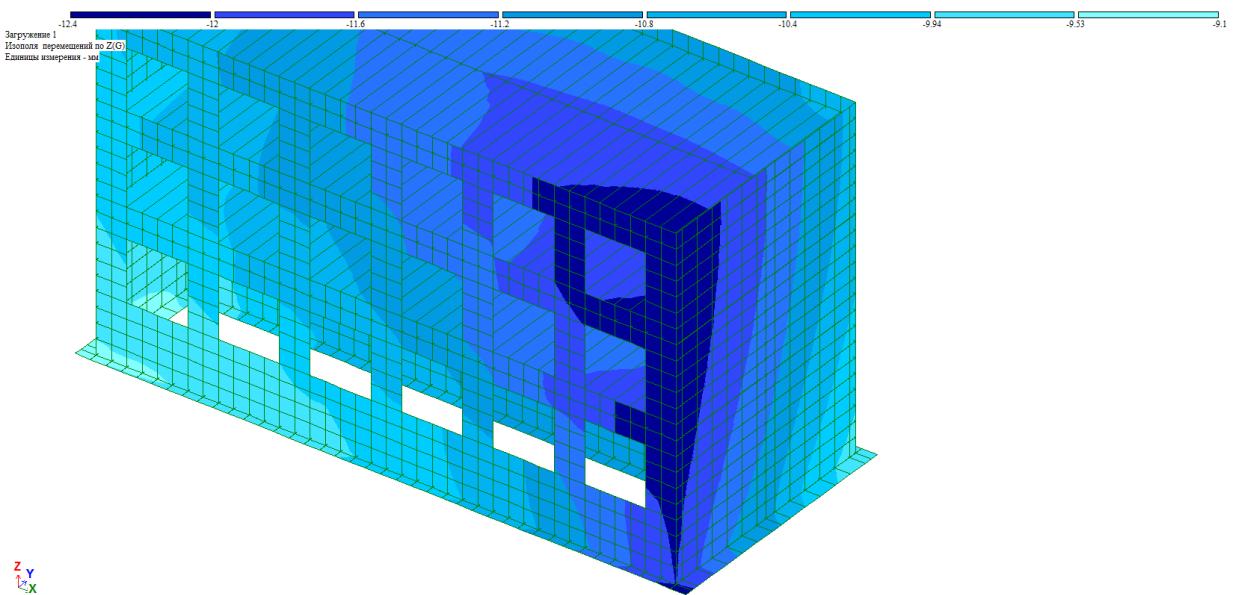
### 1. Без просадки



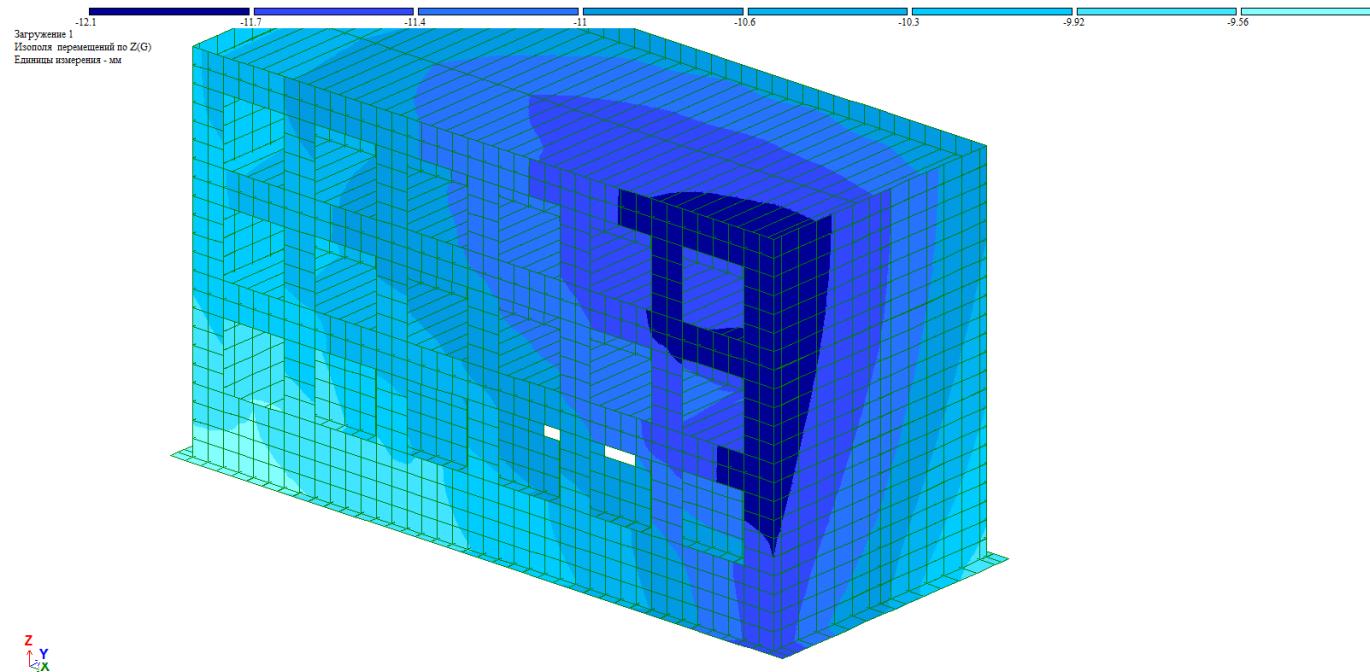
## 2. С просадкой без усиления



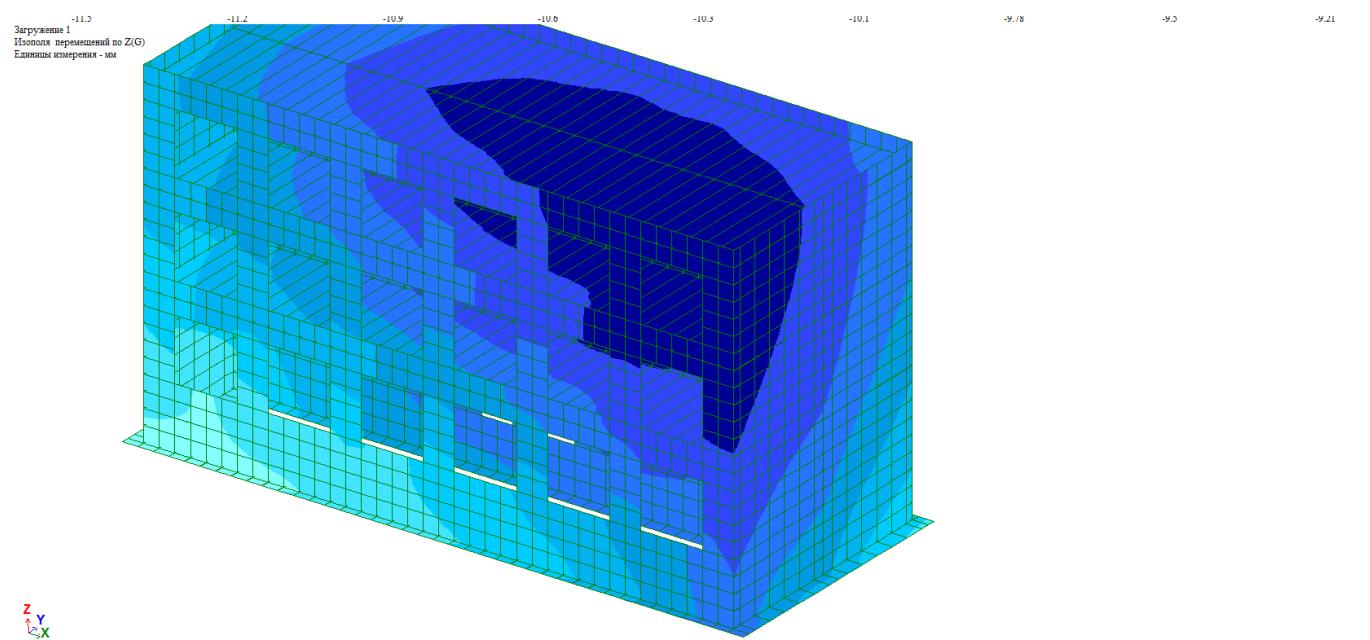
## 3. При усилении 50%



#### 4. При усилении 75%

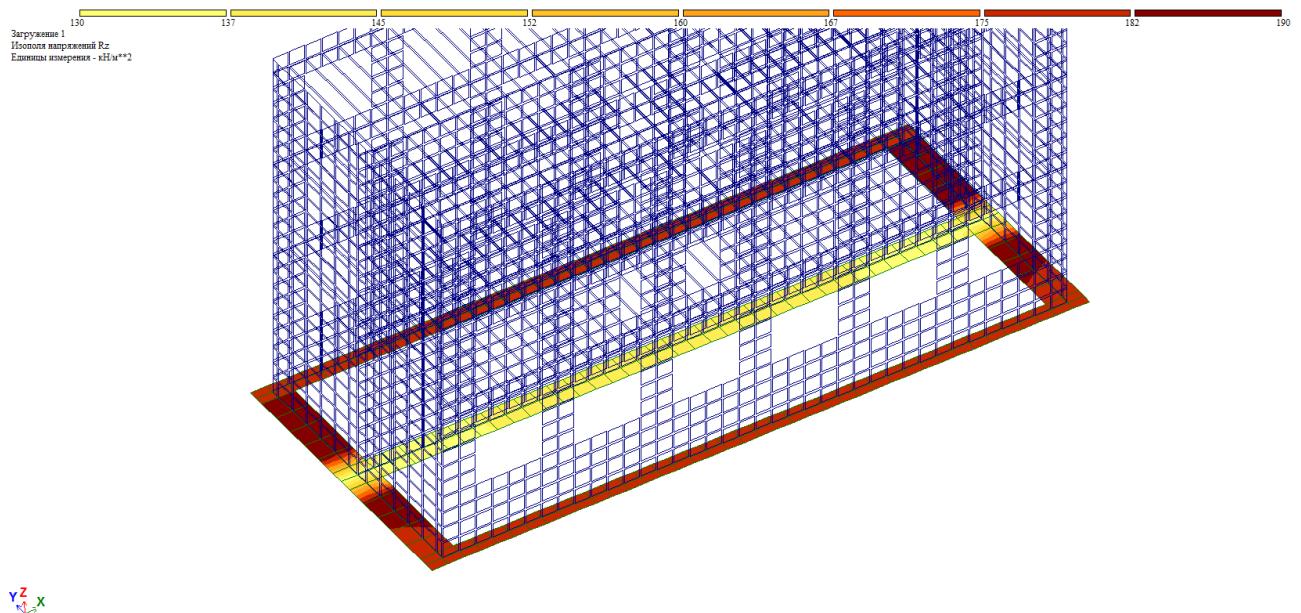


#### 5. При усилении 100%

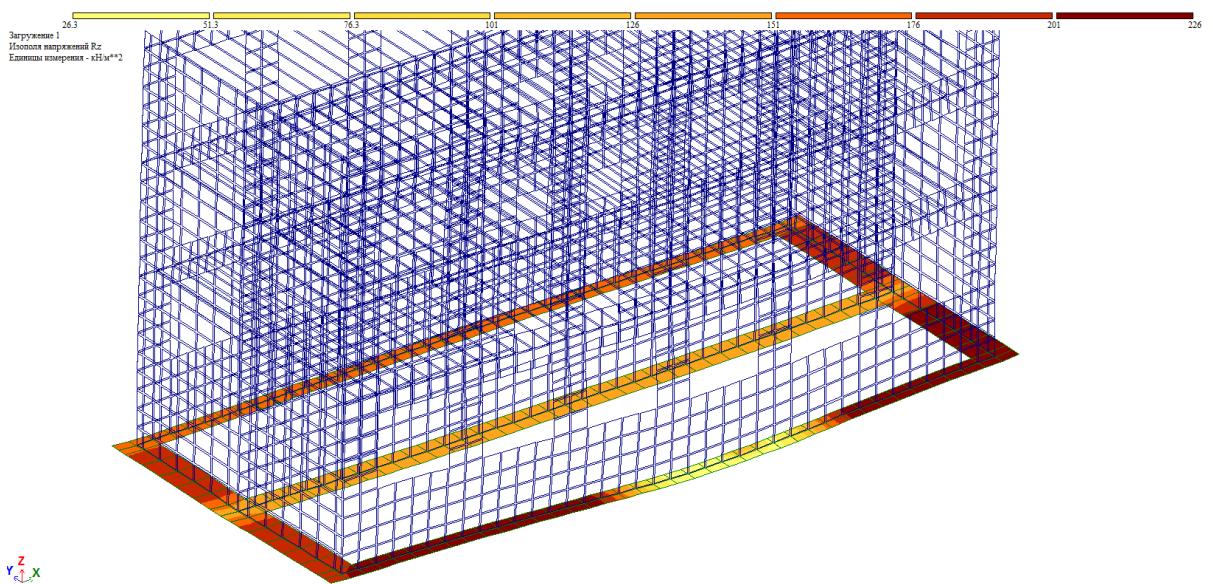


**Схема изменения опорных реакций по фундаментам при просадке посередине стены**

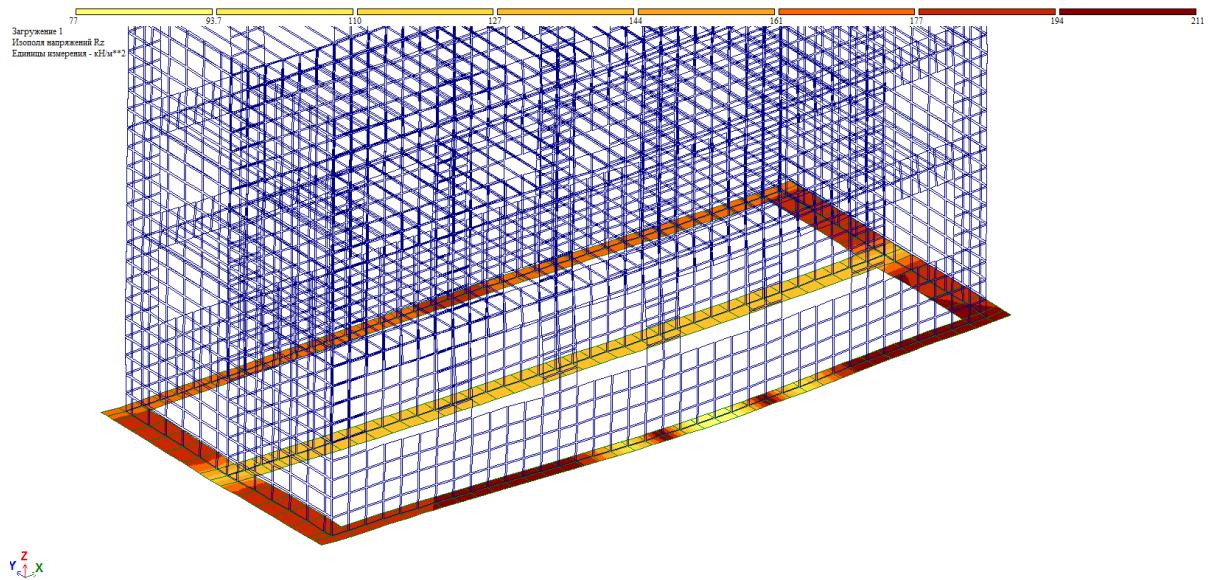
**1. Без просадки**



**2. С просадкой посередине крайней стены без усиления**

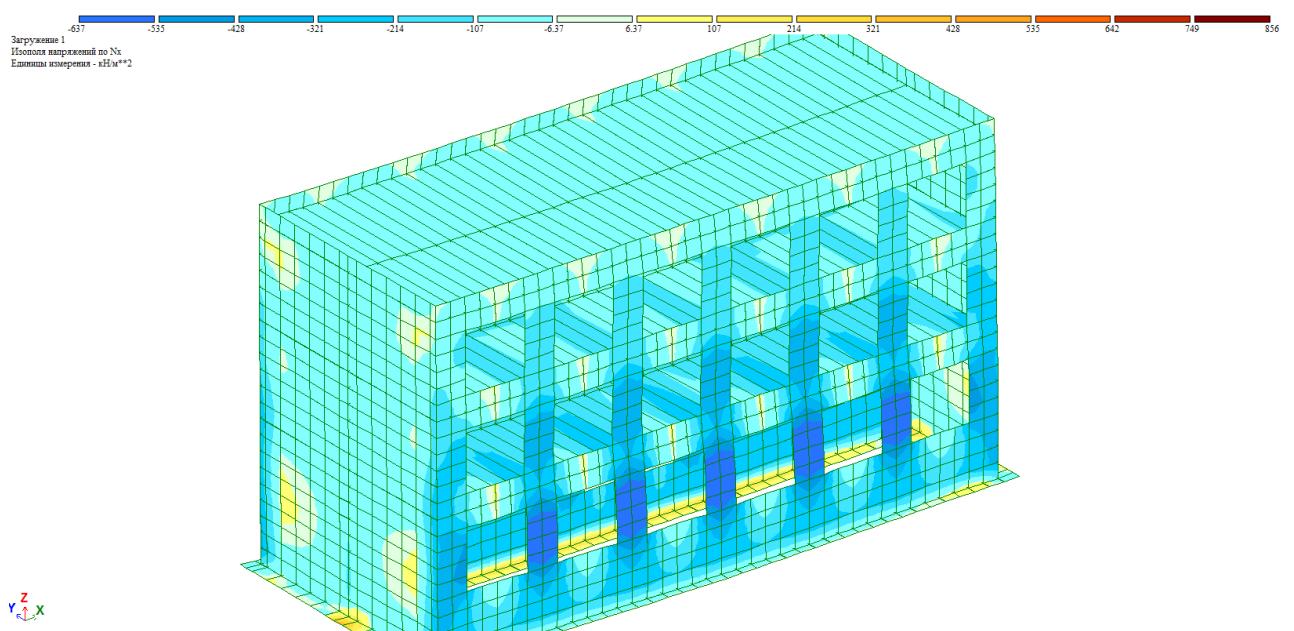


### 3. С усилением 100% по высоте

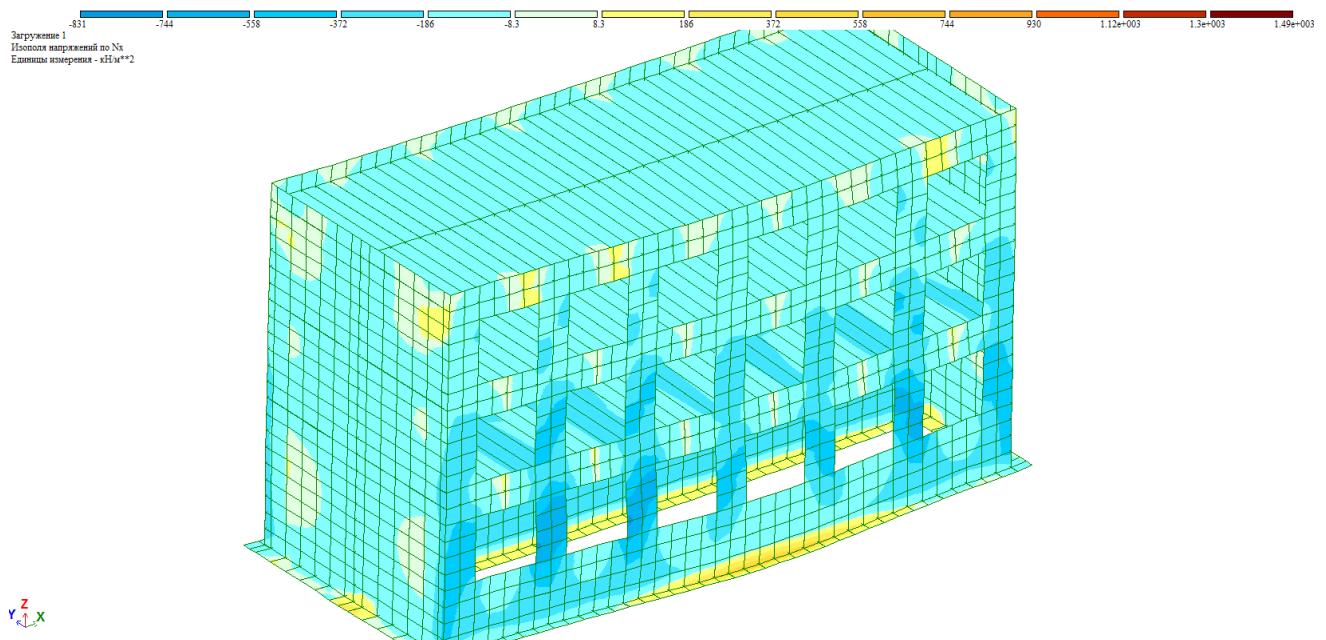


**Схема изменения полей напряжений Nx по конструкциям здания при просадке посередине стены**

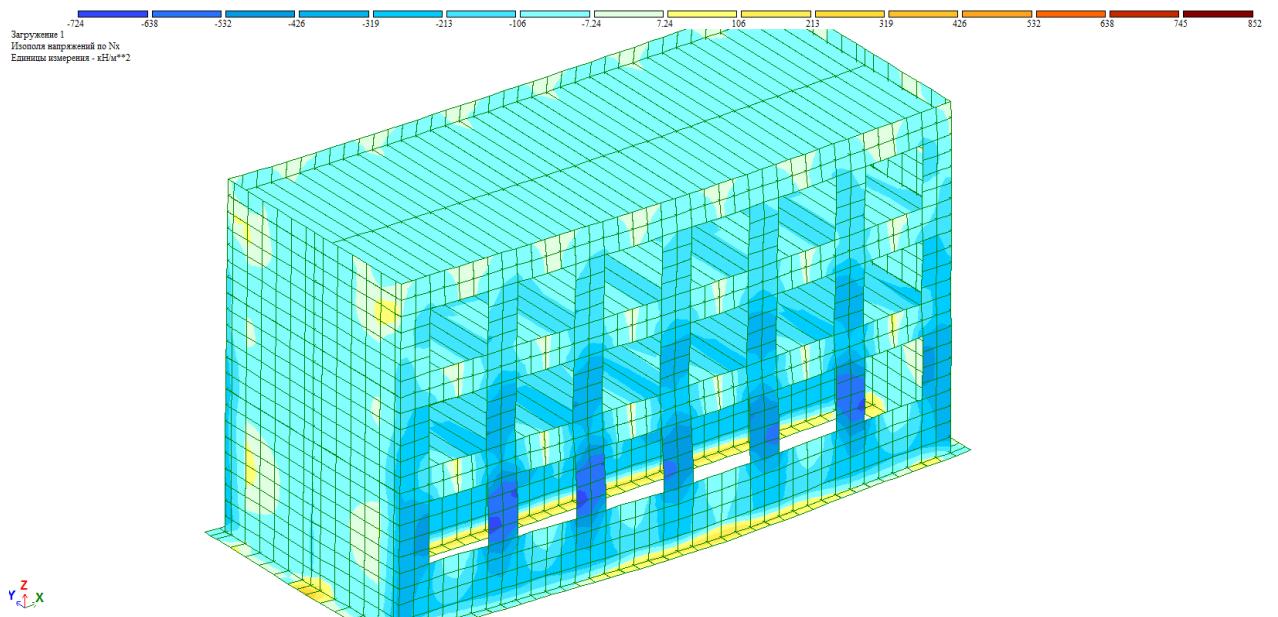
#### 1. Без просадки



## 2. С просадкой посередине крайней стены



## 3. С усилением 100% по высоте



**ПРИЛОЖЕНИЕ Е. ТАБЛИЦА ДАННЫХ ПО РАСЧЕТНЫМ СЕЧЕНИЯМ В ПРОГРАММНОМ  
КОМПЛЕКСЕ ПК ЛИРА-САПР 2013**

**При просадке с краю стены**

| Усилия (напряжения) - без просадки  |                            |                            |                            |                             |                             |            |            |             |              |              |                            |                 |                |  |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------------|--------------|--------------|----------------------------|-----------------|----------------|--|
| №<br>элем                           | Nx<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Ny<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Nz<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Txy<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Txz<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Mx<br>(кН) | My<br>(кН) | Mxy<br>(кН) | Qx<br>(кН/м) | Qy<br>(кН/м) | Rz<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Тип<br>элемента | № загр-<br>ния |  |
| 178                                 | -519.935                   | -32.2274                   | 0                          | -45.0759                    | 0                           | 0.903717   | -0.63117   | 0.673005    | -0.80459     | -1.64556     | 0                          | 41              | 1              |  |
| 769                                 | 174.7688                   | 0.894754                   | 0                          | -7.58424                    | 0                           | -0.4757    | -4.53092   | 0.090418    | 1.250886     | -34.3586     | 180.3005                   | 41              | 1              |  |
| 773                                 | 480.7868                   | 82.72006                   | 0                          | -87.0952                    | 0                           | -0.84111   | -5.53318   | -0.12124    | -2.05431     | -36.4202     | 181.4245                   | 41              | 1              |  |
| Усилия (напряжения) - усиление 100% |                            |                            |                            |                             |                             |            |            |             |              |              |                            |                 |                |  |
| 178                                 | -493.728                   | -48.824                    | 0                          | -58.341                     | 0                           | 1.222988   | -0.62261   | 0.924975    | -0.66489     | -1.38756     | 0                          | 41              | 1              |  |
| 769                                 | 192.5825                   | 1.449525                   | 0                          | -23.9271                    | 0                           | 0.439437   | -4.41931   | -0.20416    | 2.83973      | -34.6048     | 186.3774                   | 41              | 1              |  |
| 773                                 | 595.4781                   | 112.2814                   | 0                          | -91.8944                    | 0                           | 1.269557   | -1.96034   | -2.31693    | -2.4379      | -26.0665     | 206.5142                   | 41              | 1              |  |
| Усилия (напряжения) - усиление 75%  |                            |                            |                            |                             |                             |            |            |             |              |              |                            |                 |                |  |
| 178                                 | -476.855                   | -65.8999                   | 0                          | -74.6902                    | 0                           | 1.684777   | -0.54148   | 1.000515    | -1.1675      | -1.6025      | 0                          | 41              | 1              |  |

Продолжение таблицы

|   |          |          |   |          |   |          |          |          |          |          |          |    |   |
|---|----------|----------|---|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----|---|
| 769                                       | 123.8066 | 1.751573 | 0 | -28.7872 | 0 | 0.77561  | -4.7022  | 0.116928 | 2.776167 | -36.5917 | 196.2988 | 41 | 1 |
| 773                                       | 632.1539 | 119.3093 | 0 | -105.051 | 0 | -1.25524 | -2.19412 | -1.04735 | -1.04266 | -16.3586 | 110.5959 | 41 | 1 |
| <b>Усилия (напряжения) - усиление 50%</b> |          |          |   |          |   |          |          |          |          |          |          |    |   |
| 178                                       | -468.292 | -74.6497 | 0 | -83.0959 | 0 | 1.921322 | -0.50026 | 1.038798 | -1.42508 | -1.71348 | 0        | 41 | 1 |
| 769                                       | 88.35535 | 1.906085 | 0 | -31.2651 | 0 | 0.948051 | -4.84709 | 0.282198 | 2.743832 | -37.609  | 201.3783 | 41 | 1 |
| 773                                       | 650.3223 | 122.903  | 0 | -111.76  | 0 | -2.51573 | -2.31316 | -0.39567 | -0.29392 | -11.4763 | 62.02771 | 41 | 1 |
| <b>Усилия (напряжения) - усиление 0%</b>  |          |          |   |          |   |          |          |          |          |          |          |    |   |
| 178                                       | -465.688 | -77.4711 | 0 | -85.8146 | 0 | 1.994277 | -0.48858 | 1.060034 | -1.48309 | -1.7286  | 0        | 41 | 1 |
| 769                                       | 78.03735 | 1.979798 | 0 | -32.2412 | 0 | 1.013039 | -4.89749 | 0.319885 | 2.749871 | -37.9822 | 203.1622 | 41 | 1 |
| 773                                       | 657.8087 | 124.876  | 0 | -113.552 | 0 | -2.72309 | -2.16829 | -0.34085 | -0.07168 | -9.65631 | 51.63594 | 41 | 1 |

### При просадке посередине стены

| Усилия (напряжения) - без просадки  |                            |                            |                            |                             |                             |            |            |             |              |              |                            |                 |                |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------------|--------------|--------------|----------------------------|-----------------|----------------|
| №<br>элем                           | Nx<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Ny<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Nz<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Txy<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Txz<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Mx<br>(кН) | My<br>(кН) | Mxy<br>(кН) | Qx<br>(кН/м) | Qy<br>(кН/м) | Rz<br>(кН/м <sup>2</sup> ) | Тип<br>элемента | № загр-<br>ния |
| 72                                  | -18.1273                   | 41.65422                   | 0                          | 18.57956                    | 0                           | 0.474196   | 1.258274   | -0.54163    | -0.90741     | -0.27618     | 0                          | 41              | 1              |
| 168                                 | -625.898                   | -8.38812                   | 0                          | -0.10067                    | 0                           | 7.408697   | -0.0409    | -0.1477     | 0.936539     | -0.02754     | 0                          | 41              | 1              |
| 751                                 | 106.0257                   | 0.141562                   | 0                          | 10.49564                    | 0                           | -1.024     | -4.67184   | -0.41902    | 1.080234     | -34.8456     | 181.1119                   | 41              | 1              |
| 758                                 | 75.13823                   | 1.418944                   | 0                          | 3.065692                    | 0                           | -0.3684    | -4.62492   | 0.23271     | 0.591611     | -34.6005     | 181.1615                   | 41              | 1              |
| 788                                 | 841.4868                   | -1.90683                   | 0                          | 9.777332                    | 0                           | -2.42042   | -7.98711   | 0.022908    | 0.699832     | -39.834      | 139.3485                   | 41              | 1              |
| 795                                 | 777.5967                   | 1.975868                   | 0                          | -8.77376                    | 0                           | -1.01596   | -7.78512   | -0.00448    | -0.51124     | -39.1129     | 139.0978                   | 41              | 1              |
| 1030                                | -466.623                   | -19.4358                   | 0                          | -35.8349                    | 0                           | 0.086428   | 0.005917   | 0.002352    | 0.007495     | 0.020395     | 0                          | 41              | 1              |
| Усилия (напряжения) - усиление 100% |                            |                            |                            |                             |                             |            |            |             |              |              |                            |                 |                |
| 72                                  | -10.8935                   | -111.288                   | 0                          | 9.729021                    | 0                           | 0.440728   | 1.183706   | -0.56447    | -0.8489      | -0.26787     | 0                          | 41              | 1              |
| 168                                 | -489.911                   | -7.62578                   | 0                          | -34.3081                    | 0                           | 6.857542   | -0.04244   | -0.17732    | 0.818604     | -0.02203     | 0                          | 41              | 1              |
| 751                                 | 336.7426                   | 1.140643                   | 0                          | -12.4374                    | 0                           | -0.0997    | -4.6851    | -0.62928    | 2.57727      | -35.7907     | 190.3949                   | 41              | 1              |
| 758                                 | 737.505                    | -1.49223                   | 0                          | -4.02311                    | 0                           | -3.75974   | -1.84959   | 0.201343    | 3.236002     | -12.9268     | 77.16565                   | 41              | 1              |
| 788                                 | 830.2211                   | -1.95035                   | 0                          | 9.599612                    | 0                           | -2.45141   | -8.11162   | 0.050868    | 0.697081     | -40.4508     | 141.4608                   | 41              | 1              |

## Продолжение таблицы

|      |          |          |   |          |   |          |          |          |          |          |          |    |   |
|------|----------|----------|---|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----|---|
| 795  | 768.2226 | 1.997718 | 0 | -9.40924 | 0 | -1.02552 | -7.92859 | 0.067243 | -0.53348 | -39.8216 | 141.5365 | 41 | 1 |
| 1030 | -474.912 | -21.2192 | 0 | -36.7935 | 0 | -0.33245 | -0.04264 | -0.05867 | -0.17611 | -0.12516 | 0        | 41 | 1 |

## Усилия (напряжения) - усиление 75%

|      |          |          |   |          |   |          |          |          |          |          |          |    |   |
|------|----------|----------|---|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----|---|
| 72   | -11.1212 | -181.054 | 0 | 10.0218  | 0 | 0.426099 | 1.146565 | -0.57516 | -0.8232  | -0.26313 | 0        | 41 | 1 |
| 168  | -417.42  | -7.20887 | 0 | -53.1792 | 0 | 6.587727 | -0.04347 | -0.19057 | 0.756729 | -0.01859 | 0        | 41 | 1 |
| 751  | 427.1154 | 1.657489 | 0 | -22.0004 | 0 | 0.148174 | -4.95968 | -0.61149 | 2.484589 | -37.8516 | 200.9837 | 41 | 1 |
| 758  | 1028.676 | -0.43743 | 0 | -0.733   | 0 | -3.00345 | -2.01257 | 0.288564 | 1.047726 | -14.7754 | 82.63737 | 41 | 1 |
| 788  | 825.1299 | -1.97167 | 0 | 9.498363 | 0 | -2.46637 | -8.17165 | 0.063424 | 0.695739 | -40.7483 | 142.4796 | 41 | 1 |
| 795  | 764.1479 | 2.006913 | 0 | -9.71094 | 0 | -1.03042 | -7.99798 | 0.101628 | -0.54425 | -40.1639 | 142.7134 | 41 | 1 |
| 1030 | -478.942 | -22.0739 | 0 | -37.2662 | 0 | -0.543   | -0.06732 | -0.08817 | -0.27009 | -0.19808 | 0        | 41 | 1 |

## Усилия (напряжения) - усиление 50%

|     |          |          |   |          |   |          |          |          |          |          |          |    |   |
|-----|----------|----------|---|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----|---|
| 72  | -9.66308 | -245.505 | 0 | 8.22436  | 0 | 0.415747 | 1.1189   | -0.5832  | -0.80503 | -0.25935 | 0        | 41 | 1 |
| 168 | -358.853 | -6.89643 | 0 | -68.8547 | 0 | 6.385384 | -0.04435 | -0.20014 | 0.708917 | -0.01575 | 0        | 41 | 1 |
| 751 | 490.9151 | 2.074872 | 0 | -29.0173 | 0 | 0.355969 | -5.16494 | -0.59613 | 2.447815 | -39.4071 | 208.9214 | 41 | 1 |
| 758 | 1283.417 | -0.46675 | 0 | -0.49083 | 0 | -3.22833 | -1.54693 | 0.326106 | 0.348719 | -11.4723 | 64.90216 | 41 | 1 |
| 788 | 821.3715 | -1.9878  | 0 | 9.41886  | 0 | -2.47762 | -8.21665 | 0.072604 | 0.694701 | -40.9714 | 143.2436 | 41 | 1 |

## Продолжение таблицы

|      |          |          |   |          |   |          |          |          |          |          |          |    |   |
|------|----------|----------|---|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----|---|
| 795  | 761.1677 | 2.013566 | 0 | -9.93609 | 0 | -1.03413 | -8.05006 | 0.127375 | -0.55232 | -40.4207 | 143.5959 | 41 | 1 |
| 1030 | -481.965 | -22.7145 | 0 | -37.6215 | 0 | -0.70277 | -0.08615 | -0.11036 | -0.34172 | -0.25324 | 0        | 41 | 1 |

## Усилия (напряжения) - усиление 0%

|      |          |          |   |          |   |          |          |          |          |          |          |    |   |
|------|----------|----------|---|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----|---|
| 72   | -7.38715 | -293.687 | 0 | 11.92749 | 0 | 0.680074 | 1.359346 | -0.67525 | -1.26113 | 0.040499 | 0        | 41 | 1 |
| 168  | -320.731 | -6.27566 | 0 | -77.3567 | 0 | 7.010058 | -0.07715 | -0.05999 | 0.500422 | 0.088278 | 0        | 41 | 1 |
| 751  | 537.4648 | 2.3297   | 0 | -34.452  | 0 | 0.462612 | -5.28854 | -0.29728 | 2.418484 | -40.2856 | 213.404  | 41 | 1 |
| 758  | 1490.573 | -0.87683 | 0 | 0.59691  | 0 | -5.01078 | -0.87952 | 1.394283 | -2.26587 | -4.28937 | 26.45673 | 41 | 1 |
| 788  | 820.4783 | -1.99688 | 0 | 9.378577 | 0 | -2.48398 | -8.24211 | 0.074748 | 0.694727 | -41.0973 | 143.6738 | 41 | 1 |
| 795  | 760.7161 | 2.016344 | 0 | -10.0512 | 0 | -1.03666 | -8.07853 | 0.13993  | -0.55693 | -40.5605 | 144.0757 | 41 | 1 |
| 1030 | -483.67  | -23.0486 | 0 | -37.8486 | 0 | -0.79598 | -0.09705 | -0.12066 | -0.38364 | -0.28423 | 0        | 41 | 1 |