

На правах рукописи



МИНАКОВ ДЕНИС КОНСТАНТИНОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ УСТРОЙСТВА СТЕНЫ В ГРУНТЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ОКРУЖАЮЩЕГО МАССИВА ГРУНТА**

Специальность: 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

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

Научный руководитель: доктор технических наук
Шулятьев Олег Александрович

Официальные оппоненты: **Знаменский Владимир Валерианович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ),
профессор кафедры «Механика грунтов и геотехника»
Коннов Артем Владимирович
кандидат технических наук,
федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН),
научный сотрудник лаборатории №62 «Основания, фундаменты и подземные сооружения»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ПГУПС)

Защита состоится 16 марта 2022 г в 11:00 на заседании диссертационного совета 54.1.002.01, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г.Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

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

Автореферат разослан «__» _____ 202 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Дефицит свободных площадей в центре крупных городов способствует увеличению объемов подземного строительства. Данное строительство, как правило, ведется в условиях плотной существующей застройки, сохранность которой должна быть обеспечена. Данная застройка часто характеризуется наличием исторических зданий с предельно допустимыми дополнительными осадкам, исчисляемыми всего лишь несколькими миллиметрами. Одним из способов уменьшения дополнительных осадок существующей застройки при подземном строительстве является использование в качестве ограждающей конструкции котлована стены в грунте траншейного типа, обладающей значительной изгибной жесткостью. Вследствие этого стена в грунте получает все более широкое распространение в практике подземного строительства.

Устройство стены в грунте влияет на изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) окружающего массива грунта. С практической точки зрения данное изменение НДС имеет значение, так как оно приводит к технологическим осадкам существующей застройки и кроме того оказывает влияние на деформации вновь возводимых конструкций и на усилия, действующие в них на стадии откопки котлована и после завершения строительства (под вновь возводимыми конструкциями здесь понимается сама стена в грунте, распорные конструкции котлована и фундаменты, устраиваемые в непосредственной близости от стены в грунте).

В связи с этим тему исследований следует признать актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Исследованию вопросов, связанных с влиянием устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта, посвящены отечественные работы: Бокова И.А., Васенина В.А., Веселова А.А., Дзагова А.М., Ермошкина П.М., Знаменского В.В., Иванова В.Д., Ильичева В.А., Колыбина И.В., Коннова А.В., Конюхова Д.С., Конюшкова В.В., Мамонова В.М., Мангушева Р.А., Мозгачевой О.А., Морозова Е.Б., Никифоровой Н.С., Петрухина В.П., Разводовского Д.Е, Сапина Д.А, Свиридова А.И., Чепурновой А.А., Шашкина А.Г., Шулятьева О.А., и др., а также зарубежные работы Abdel-Rahman A.H., Burland J.B., Burlon S., Carder D.R., Clayton C.R.I., Clough G.W., Comodromos E.M., Conti R., Delattre L., DiBiagio E., Duca V., El-Sayed S.M., Fernie R., Fourie A.B., Gaba A.R., Gourvenec S.M., Gunn M.J., Josseaume H., Karlsrud K., Konstantakos D.C., Kutmen G., Lächler A., L'Amante D., Lei G.H., Lings M.L., Liu W., Loreck C., Nash D.F.T., Ng C.W.W., Ou C.Y., Poh T.Y., Potts D.M., Powrie W., Rodatz W., O'Rourke T.D., de Sanctis L., Schäfer R., Sun J., Symons I.F., Thorley C.B.B., Triantafyllidis T., Uriel S., Vermeer P.A., Viggiani G.M.B., Wit de J.C.W.M и др.

В настоящее время главным методом оценки изменения НДС окружающего массива грунта при устройстве стены в грунте является численное моделирование. При этом существующие методики численного моделирования обладают двумя основными недостатками.

Первый недостаток данных методик состоит в том, что они не учитывают существенное уменьшение давления свежего бетона на стенки траншеи с течением времени, игнорируя результаты многочисленных испытаний, полученных на опытных захватках стены в грунте. Исключение составляет методика С.М. Loreck, не получившая широкого распространения и обладающая рядом значительных недостатков (чрезвычайная трудоемкость; расчетные предпосылки, противоречащие опытным данным и др.). Падение горизонтального давления свежего бетона относительно максимальных значений, достигнутых в процессе бетонирования, способно значительным образом повлиять на изменение НДС окружающего массива грунта и на историю его нагружения.

Второй недостаток существующих методик заключается в том, что они не учитывают влияние скорости бетонирования на величину максимального горизонтального давления свежего бетона, достигнутого в процессе бетонирования захватки стены в грунте. Накопленный значительный опыт по бетонированию монолитных конструкций в опалубке, закрепленный в отечественных и зарубежных нормативных документах, говорит о том, что без учета скорости бетонирования не возможно с приемлемой точностью определить максимальное горизонтальное давление свежего бетона.

В связи с этим важной задачей является разработка методики численного моделирования влияния устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта, учитывающей такие факторы, как скорость бетонирования захватки и уменьшение горизонтального давления свежего бетона с течением времени.

Одним из проявлений изменения НДС грунтового массива при устройстве стены в грунте, имеющим большое практическое значение, являются технологические осадки. Оценка данных осадок только на основе численного моделирования затруднена вследствие того, что их величина зависит, в том числе от технологических факторов, не учитываемых при моделировании (случайные колебания плотности бентонитового раствора и его уровня в траншеи, вибрации при работе тяжелой строительной техники и др.). В связи с этим большое значение имеет развитие эмпирических методов оценки технологических осадок. К настоящему времени данные методы развиты недостаточно, вследствие того, что в существующих научных работах, как правило, рассматриваются только отдельные объекты или небольшое количество объектов в идентичных инженерно-геологических условиях.

Цель и основные задачи исследования

Целью исследования является совершенствование методов оценки изменения НДС окружающего массива грунта при устройстве стены в грунте траншейного типа.

Задачи исследования, которые необходимо решить для выполнения поставленной цели:

- проанализировать имеющиеся результаты мониторинга деформаций окружающего массива грунта от устройства стены в грунте;
- выявить основные закономерности горизонтальных деформаций грунтового массива при устройстве стены в грунте по данным инклинометрического мониторинга;
- получить эмпирические зависимости для оценки технологических осадок в различных инженерно-геологических условиях;
- разработать методику численного моделирования влияния устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта, учитывающую такие факторы, как скорость бетонирования захватки и уменьшение горизонтального давления свежего бетона с течением времени;
- исследовать влияние изменения НДС окружающего массива грунта при устройстве стены в грунте на расчет вновь возводимых конструкций при помощи разработанной методики численного моделирования.

Объект исследования

Объектом исследования являются основания зданий и сооружений в зоне влияния устройства стены в грунте траншейного типа, устраиваемой под защитой глинистого раствора.

Предмет исследования

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние массива грунта в зоне влияния устройства стены в грунте траншейного типа, устраиваемой под защитой глинистого раствора.

Научная новизна работы

- получены эмпирические зависимости, позволяющие оценить максимальные технологические осадки от устройства стены в грунте (без учета аварийных случаев) в различных инженерно-геологических условиях;
- разработана методика численного моделирования влияния устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта, позволяющая, в отличие от применимых на практике существующих методик, учитывать такие факторы, как скорость бетонирования захватки и уменьшение горизонтального давления свежего бетона с течением времени;

Теоретическая значимость работы

- определена эмпирическая зависимость для расчета критической глубины бетонирования (глубины до которой давление свежего бетона на стенки траншеи захватки стены в грунте условно можно принять гидростатическим);
- выдвинута и обоснована гипотеза, объясняющая результаты мониторинга остаточного давления свежего бетона на стенки траншеи захватки стены в грунте;
- предложена зависимость для определения остаточного горизонтального давления бетона на стенки траншеи захватки стены в грунте;
- выявлено влияние изменения НДС окружающего массива грунта в результате устройства стены в грунте на расчет фундаментной плиты по второй группе предельных состояний.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- получен способ расчета вновь возводимых конструкций (стены в грунте, фундаментов, устраиваемых в непосредственной близости от нее, и распорных конструкций котлована), учитывающий изменения НДС окружающего массива грунта в результате устройства стены в грунте;
- получен эмпирический метод оценки максимальных технологических осадок от устройства стены в грунте (без учета аварийных случаев) в различных инженерно-геологических условиях.

Методология и методы исследований

В диссертационной работе использованы следующие методы исследования:

- корреляционно-регрессионный анализ эмпирических данных по давлению свежего бетона и технологическим осадкам с использованием программы Microsoft Excel;
- регрессионный анализ эмпирических данных по технологическим осадкам с использованием математических библиотек языка программирования Python 3: Statsmodels и NumPy;
- сопоставительный анализ имеющихся данных по горизонтальному давлению свежего бетона при бетонировании различных конструкций (захватки стены в грунте, буронабивные сваи, монолитные конструкции, бетонируемые в опалубке);
- методы теории предельного равновесия (в части определения активного давления грунта);
- методы теории консолидации (принцип эффективных напряжений К. Терцаги);

- численное моделирование в сертифицированном геотехническом программном комплексе PLAXIS 3D изменения НДС грунтового массива в результате устройства стены в грунте и откопки глубокого котлована.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в следующем:

- постановке цели и задач исследования;
- анализе имеющихся результатов мониторинга деформаций окружающего массива грунта от устройства стены в грунте;
- выявлении основных закономерностей горизонтальных деформаций грунтового массива при устройстве стены в грунте по данным инклинометрического мониторинга;
- получении эмпирических зависимостей для оценки технологических осадок в различных инженерно-геологических условиях;
- разработке методики численного моделирования влияния устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта, учитывающей такие факторы, как скорость бетонирования захватки и уменьшение горизонтального давления свежего бетона с течением времени;
- исследовании влияния изменения НДС окружающего массива грунта при устройстве стены в грунте на расчет вновь возводимых конструкций при помощи разработанной методики численного моделирования;
- подготовке и написании публикаций по выполненной работе.

Положения, выносимые на защиту:

- эмпирические зависимости для определения технологических осадок от устройства стены в грунте в различных инженерно-геологических условиях;
- эмпирическая зависимость для определения критической глубины бетонирования;
- методика численного моделирования влияния устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта, позволяющая учитывать такие факторы, как скорость бетонирования захватки и уменьшение горизонтального давления свежего бетона с течением времени.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность результатов исследований обеспечена:

- применением апробированных статистических методов при анализе опытных данных по давлению свежего бетона и технологическим осадкам;
- использованием классических методов расчета из механики грунтов;

- хорошей сходимостью результатов расчетно-теоретических исследований с опубликованными данными натурных наблюдений отечественных и зарубежных авторов;
- использованием сертифицированного геотехнического программного комплекса при выполнении численных расчетов.

Апробация работы

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на всероссийской конференции с международным участием “Фундаменты глубокого заложения и геотехнические проблемы территорий (Пермь, 2017 г.) и международной конференции “Подземная урбанистика: архитектура и геотехника” (Санкт-Петербург, 2018 г.).

Внедрение результатов

Результаты работы использованы при проектировании защитных мероприятий в виде геотехнического барьера на объекте “Административное здание с парковочными машино-местами и надземным переходом в здание Совета Федерации Федерального собрания РФ” (г. Москва, ул. Петровка, д.17, строение 19). В результате внедрения были оптимизированы проектные решения по защитным мероприятиям и обеспечена безопасность существующей застройки при устройстве стены в грунте траншейного типа и последующей откопке глубокого котлована под ее защитой.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы представлены в 5 научных статьях, опубликованных в изданиях, входящих в перечень ВАК. Общий объем данных публикаций составляет 6,6 печатных листов, из них лично автором выполнено 5,9 печатных листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 148 наименований, в том числе 91 на иностранном языке (на английском – 78, на немецком – 12, на французском – 1), и 5 приложений. Полный объем диссертации – 217 страниц. Основной текст диссертации (без приложений) изложен на 193 страницах. Диссертация содержит 92 рисунка и 50 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обоснована актуальность темы исследований, приведена общая характеристика работы.

Первый раздел содержит аналитический обзор современного состояния вопроса о влиянии устройства стены в грунте на изменение напряженно-деформированного состояния окружающего массива грунта.

Основным методом оценки изменения НДС грунтового массива от устройства стены в грунте в настоящее время является численное моделирование. Данное моделирование, как правило, осуществляется путем удаления грунта из траншеи и заменой его нагрузкой, приложенной к стенкам и дну траншеи (рисунки 1 и 2).

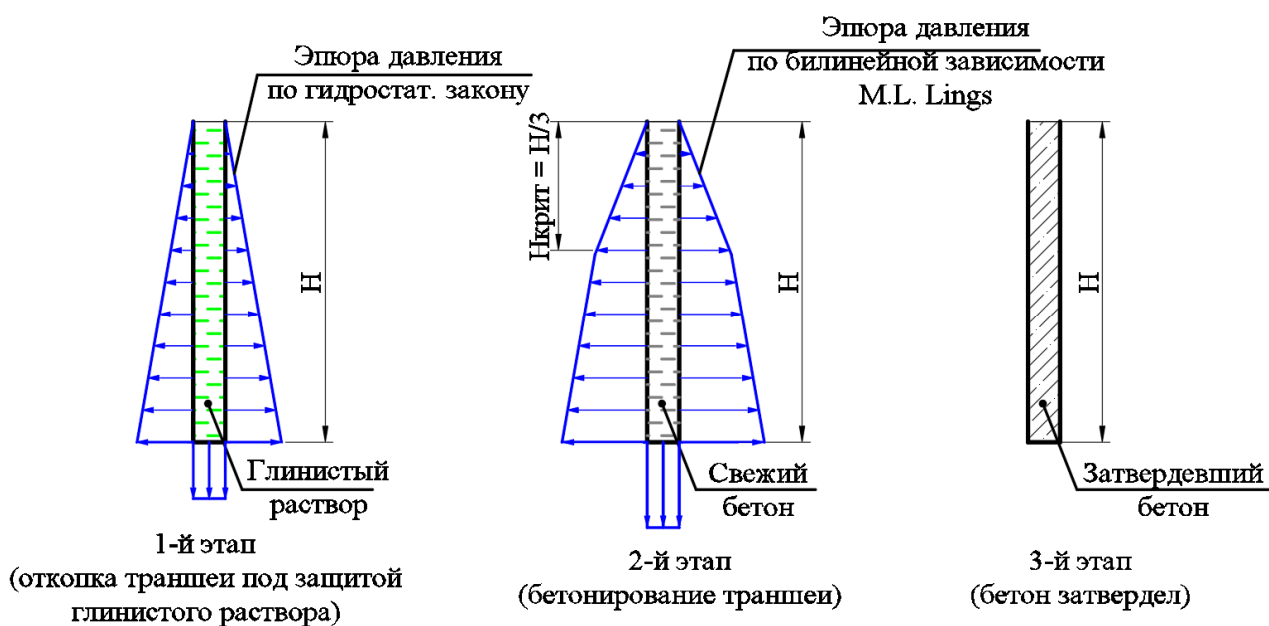


Рисунок 1 – Этапы моделирования устройства захватки стены в грунте (основной метод на настоящий момент)

Нагрузка на стадии откопки траншеи рассчитывается по гидростатическому закону с учетом удельного веса суспензии. Для определения давления свежего бетона на стенки траншеи наиболее часто используется билинейная зависимость, предложенная M.L. Lings с соавторами:

$$\sigma = \begin{cases} \gamma_{\text{бетон}} \times h & \text{при } h \leq h_{\text{крит}} \\ \gamma_{\text{бентонит}} \times h + (\gamma_{\text{бетон}} - \gamma_{\text{бентонит}}) \times h_{\text{крит}} & \text{при } h > h_{\text{крит}} \end{cases} \quad (1)$$

где σ – давление свежего бетона на стенки траншеи, kH/m^2 ; $\gamma_{\text{бетон}}$ – объемный вес бетонной смеси, kH/m^3 ; $\gamma_{\text{бентонит}}$ – объемный вес глинистого раствора, kH/m^3 ; $h_{\text{крит}}$ – критическая глубина бетонирования, м; h – глубина ниже уровня верха стены в грунте, м.

Согласно данной зависимости, давление бетона на стенки траншеи до определенной глубины, называемой критической, является гидростатическим. Ниже критической глубины давление бетонной смеси на стенки траншеи продолжает линейно возрастать, но с меньшей

скоростью, зависящей от плотности глинистого раствора (на каждый метр глубины давление на стенку траншеи возрастает на величину $\gamma_{\text{бентонит}} \times 1 \text{ м}$). Фактически данная билинейная зависимость соответствует максимальному горизонтальному давлению свежего бетона и не учитывает его уменьшение с течением времени.

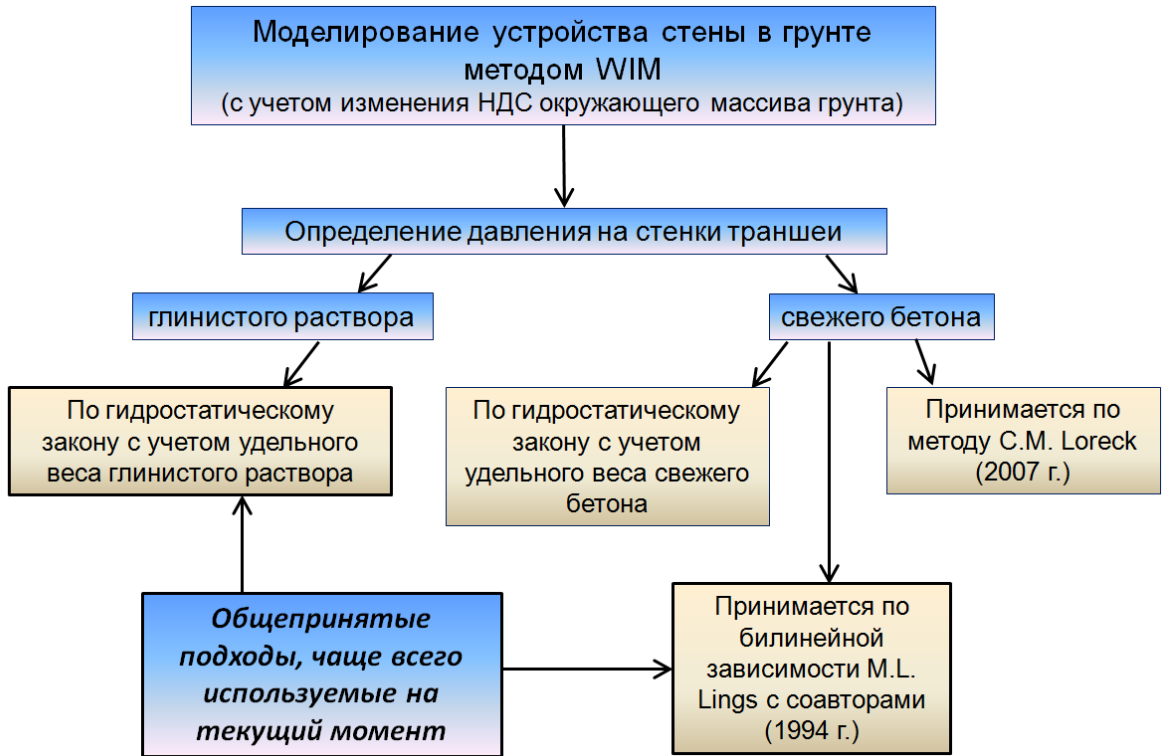


Рисунок 2 – Численное моделирование устройства стены в грунте при помощи нагрузок

Основным недостатком данной методики является отсутствие учета таких факторов, как скорость бетонирования захватки и уменьшение горизонтального давления свежего бетона с течением времени.

Основной сферой практического применения оценки влияния устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта в настоящее время являются технологические осадки. Существенно меньшее внимание уделяется влиянию рассматриваемого изменения НДС на расчет распорных и ограждающих конструкций котлована, расчет которых часто выполняется классическими методами, основанными на теории предельного равновесия или численными методами, но без моделирования процесса устройства стены в грунте. При таком подходе остается неучтенным влияние устройства стены в грунте на горизонтальные напряжения, действующие в грунтовом массиве до начала экскавации грунта из котлована, историю нагружения грунта, предшествующую данной экскавации, и жесткостные характеристики грунтов.

Основные результаты существующих исследований по влиянию изменения НДС грунтового массива при устройстве стены в грунте на расчет вновь возводимых конструкций представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные результаты существующих исследований по влиянию изменения НДС грунтового массива при устройстве стены в грунте на расчет вновь возводимых конструкций

№ п/п	Первый автор, год	Преобладающий тип грунтов	Вновь возводимая конструкция	Влияние изменения НДС при устройстве стены в грунте на расчет вновь возводимой конструкции
1	M. J. Gunn, 1993	Сильнопереуплотненные глины ($K_0=2$)	Стена в грунте (консольная и с распоркой сверху)	Уменьшение изгибающих моментов
2	R. Schäfer, 2006	Нормально и слабопереуплотненные глины ($OCR=1,05\dots 1,8$)	Стена в грунте	Увеличение горизонтальных перемещений и изгибающих моментов
			Распорки (5 ярусов)	Увеличение продольных усилий (особенно в верхних ярусах)
3	R. Conti, 2012	Пески	Стена в грунте	Увеличение горизонтальных перемещений и изгибающих моментов
			Распорки (1 ярус)	Увеличение продольных усилий
4	S. Burlon, 2013	Глины ($K_0=0,5\dots 1$)	Консольная стена в грунте	Увеличение горизонтальных перемещений

Следует отметить, что в существующих работах на рассматриваемую тематику не учитывается уменьшение давления свежего бетона с течением времени. С учетом этого результаты, полученные в данных работах, нуждаются в ревизии.

Второй раздел посвящен обобщению и анализу накопленного эмпирического материала по деформациям грунтового массива в результате устройства стены в грунте.

В результате анализа результатов инклинометрических измерений (8 объектов, 17 инклинометров) выявлены основные закономерности горизонтальных деформаций грунтового массива при устройстве стены в грунте.

Собрана база данных по технологическим осадкам (рисунок 3), имеющая следующие основные количественные характеристики: точки наблюдения – 319 штук, рассмотренные различные объекты – 23 штуки, диапазон измеренных технологических осадок – от 0 до 27 мм.

Для оценки влияния инженерно-геологических условий (далее ИГУ) на технологические осадки выполнена типизация данных условий для объектов, представленных в базе данных:

1) ИГУ-1. Инженерно-геологический разрез до глубины 20 м представлен дисперсными грунтами (от песков до глин в любой комбинации), глинистые грунты с высокой

деформируемостью и сильнопереуплотненные глины отсутствуют или их присутствие в разрезе несущественно.

2) ИГУ-2. Инженерно-геологический разрез до глубины 20 м представлен дисперсными грунтами, среди которых преобладают глинистые грунты с высокой деформируемостью.

3) ИГУ-3. Инженерно-геологический разрез до глубины 20 м представлен дисперсными грунтами, среди которых преобладают сильно переуплотненные твердые глины.

В представленной типизации к глинистым грунтам с высокой деформируемостью относятся глинистые грунты со средними значениями (рассчитываются до глубины 20 м) модуля деформации менее 11 МПа и/или недренированной прочности менее 40 кПа. К сильнопереуплотненным твердым глинам – твердые глины с коэффициентом бокового давления в диапазоне от 1,5 до 2.

Максимальные значения технологических осадок, при исключении ряда выбросов, неплохо аппроксимируются экспоненциальной кривой. Учитывая эти особенности рассматриваемых эмпирических данных, предлагаются следующие формулы для оценки максимальных (при отсутствии аварийных ситуаций) технологических осадок в различных инженерно-геологических условиях:

$$1) \text{ Для ИГУ-1: } s = 14,76e^{-0,248x} \quad (2);$$

$$2) \text{ Для ИГУ-2: } s = 32,64e^{-0,083x} \quad (3);$$

$$3) \text{ Для ИГУ-3: } s = 12,17e^{-0,072x} \quad (4).$$

где s – технологическая осадка от устройства стены в грунте, мм;

x – расстояние от стены в грунте, м.

Аппроксимирующие экспоненциальные кривые для ИГУ-1...ИГУ-3 приведены на рисунке 3. Сопоставление экспоненциальных кривых между собой представлено на рисунке 4. Как видно из данного рисунка, максимальные технологические осадки соответствуют второму типу инженерно-геологических условий.

Результаты корреляционно-регрессионного анализа, выполненного на основе собранной базы данных, свидетельствуют о слабой корреляции между технологическими осадками и глубиной стены в грунте (коэффициент детерминации для всех моделей меньше 0,002).

В собранной базе данных по технологическим осадкам основная часть опытных данных (82%) относится к глинистым грунтам с высокой деформируемостью (ИГУ-2), для которых характерны наибольшие значения технологических осадок. С учетом этого выполнен квантильный регрессионный анализ для второго типа инженерно-геологических условий (выбор квантильной регрессии обусловлен гетероскедастичностью исходных данных). Основные результаты выполненного регрессионного анализа представлены на рисунке 5.

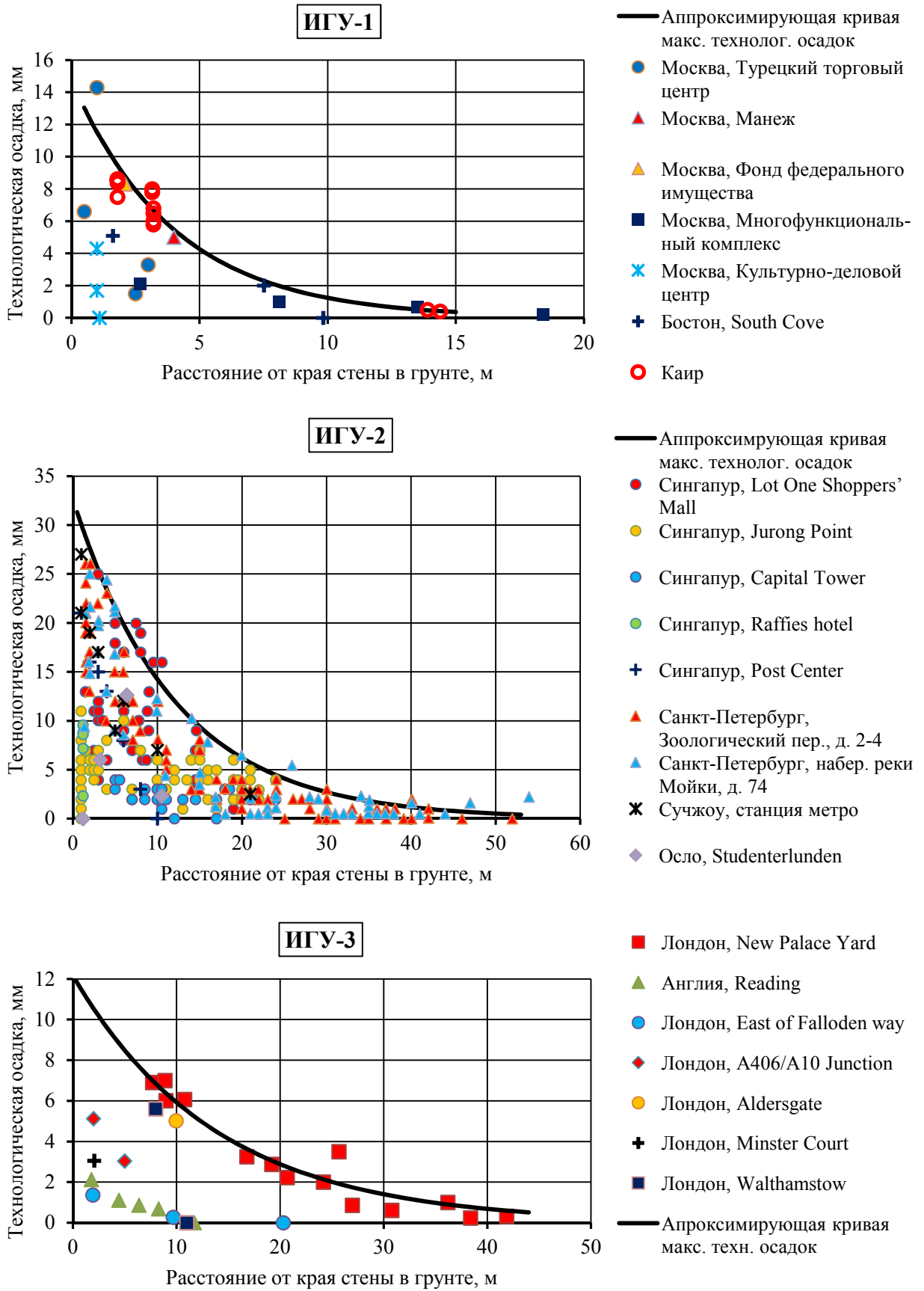


Рисунок 3 – Данные по технологическим осадкам для ИГУ-1...ИГУ-3

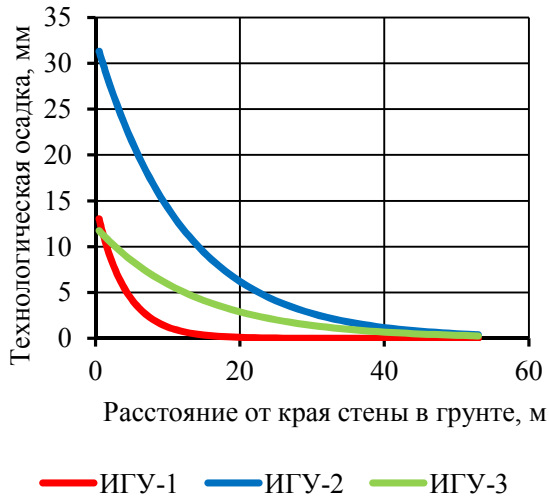


Рисунок 4 – Сопоставление экспоненциальных кривых для оценки максимальных технологических осадок в различных инженерно-геологических условиях

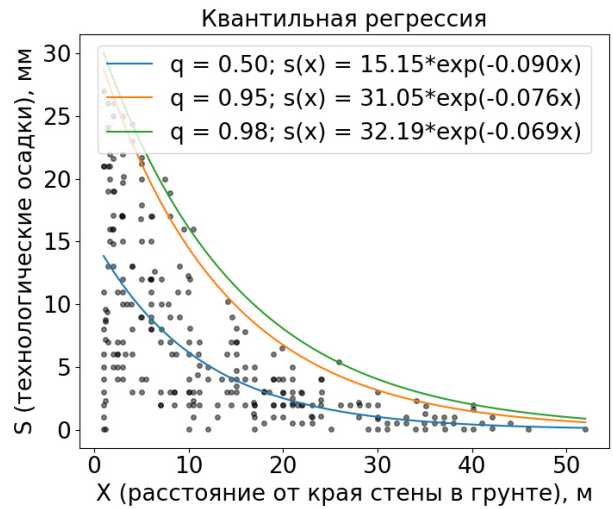


Рисунок 5 – Результаты квантильного регрессионного анализа эмпирических данных по технологическим осадкам для глинистых грунтов с высокой деформируемостью (ИГУ-2)

Для автоматизации квантильного регрессионного анализа написана программа на языке Python 3, использующая математические библиотеки NumPy и Statsmodels.

В результате квантильного регрессионного анализа не выявлено существенного различия между максимальными технологическим осадками фундаментов существующих зданий (дополнительная нагрузка 150-210 кПа) и грунтовой поверхности свободной от застройки.

В разделе 3 выполнен сопоставительный анализ имеющихся опытных данных по горизонтальному давлению свежего бетона при бетонировании различных конструкций: захватки стены в грунте (10 захваток на 8 объектах), буронабивные сваи на опытной площадке Загорской ГАЭС (4 штуки), монолитные конструкции, бетонлируемые в опалубке (24 штуки). Основные результаты данного анализа представлены в таблице 2. Какого либо теоретического объяснения отличия результатов для различных конструкций в настоящее время не представлено.

На основе данного анализа выдвинута гипотеза, объясняющая результаты мониторинга остаточного давления свежего бетона на стенки траншеи захватки стены в грунте. Согласно данной гипотезе, остаточное горизонтальное давление свежего бетона, наблюдаемое на различных объектах при устройстве стены в грунте, равняется сумме активного давления, действующего на бетон со стороны окружающего грунтового массива, и порового давления воды и может быть рассчитано по следующей формуле:

$$\sigma(h)_{min} = \sigma_a + u = K_a \gamma h - 2c\sqrt{K_a} + u, \quad (5)$$

где $\sigma(h)_{min}$ – остаточное горизонтальное давление бетона на стенки траншеи на заданной глубине h ниже уровня поверхности земли, кН/м^2 ; σ_a – активное давление грунта, кН/м^2 ; u –

поровое давление воды, кН/м^2 ; K_a – коэффициент активного давления, рассчитываемый по формуле (6); γ – удельный вес грунта, принимаемый во взвешенном состоянии для водонасыщенных грунтов, кН/м^3 ; h – глубина ниже уровня поверхности земли, м; c – удельное сцепление грунта, кН/м^2 .

Таблица 2 – Сопоставительный анализ опытных данных по давлению свежего бетона

№ п/п	Бетонируемая конструкция	Остаточное горизонтальное давление свежего бетона
1	Стены и колонны, бетонируемые в опалубке	Равно нулю
2	Буронабивные сваи на Загорской ГАЭС*	Небольшое остаточное давление, определяемое из условия реализации “эффекта силоса”
3	Стена в грунте траншейного типа	Существенное остаточное давление (приблизительно равно давлению глинистого раствора на стадии откопки траншеи – эмпирический подход С.М. Loreck)

* Сваи бетонировались насухо.

Формула для определения коэффициента активного давления:

$$K_a = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) \quad (6)$$

Указанная гипотеза обоснована путем сравнения с опытными данными (5 опытных захваток стены в грунте на 4 различных объектах). Пример данного сравнения представлен на рисунке 6.

В результате анализа опытных данных по 8 захваткам стены в грунте (рисунок 7) получена линейная зависимость для определения критической глубины бетонирования (м) в зависимости от скорости бетонирования:

$$H_{\text{крит}}(V) = \alpha V + 1,78, \quad (7)$$

где α – эмпирический коэффициент, равный 0,85 ч;

V – средняя скорость бетонирования стены в грунте, м/час.

Данная зависимость позволяет существенно повысить точность определения критической глубины бетонирования по сравнению с эмпирическим подходом M.L. Lings с соавторами, согласно которому данная глубина принимается равной 1/3 глубины стены в грунте. Реальные значения критической глубины колеблются в широких пределах от 0,14 до 0,57Н (Н – глубина стены в грунте), в большинстве случаев существенно отклоняясь от предложенного M.L. Lings с соавторами значения равного 0,33Н.

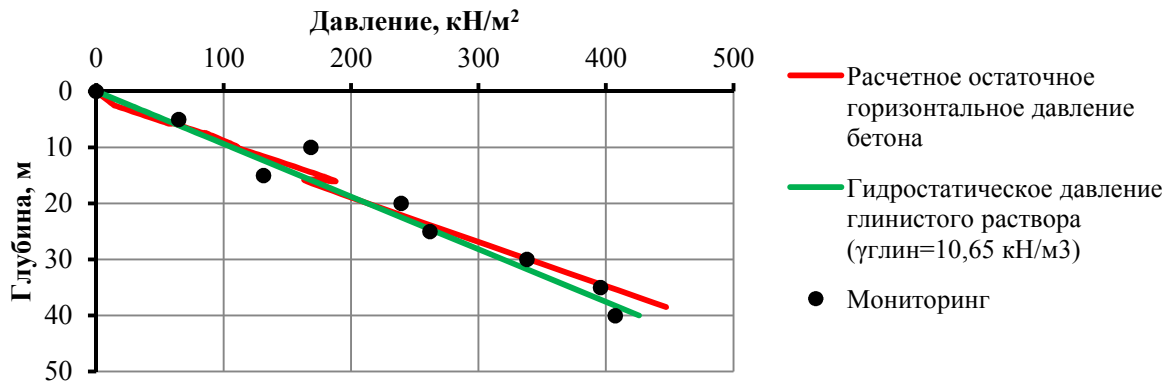


Рисунок 6 – Сравнение расчетного остаточного горизонтального давления бетона с результатами мониторинга для опытной захватки №34 стены в грунте в Роттердаме

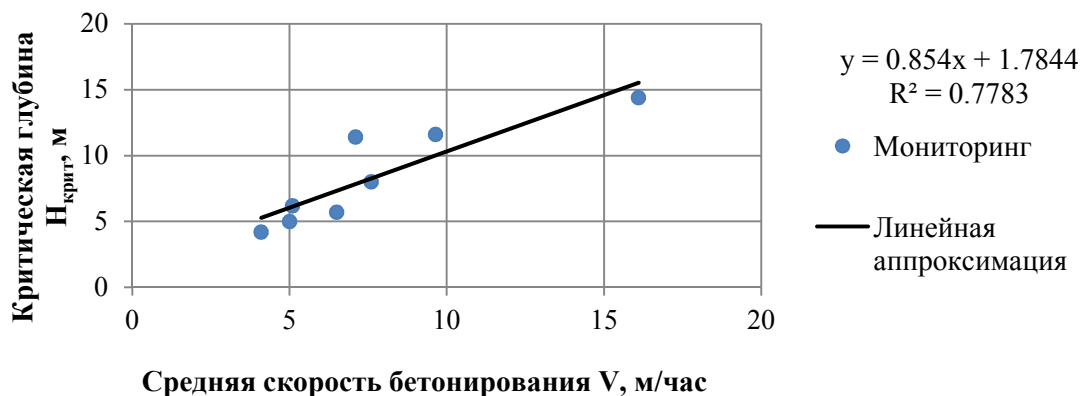


Рисунок 7 – Зависимость критической глубины от средней скорости бетонирования стены в грунте по опытным данным

С учетом полученных результатов исследований разработана методика численного моделирования влияния устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта. Предлагаемая методика заключается в следующем. Моделирование устройства захватки стены в грунте осуществляется численным методом в трехмерной постановке задачи путем удаления грунта из траншеи и заменой его нагрузкой, приложенной к стенкам и дну траншеи и соответствующей давлению глинистого раствора или свежего бетона (в зависимости от рассматриваемого этапа строительства). Процесс устройства захватки при этом моделируется в четыре этапа.

Первый этап соответствует откопке траншеи под защитой глинистого раствора. На данном этапе нагрузки, действующие на стенки траншеи, определяются по гидростатическому закону с учетом удельного веса глинистого раствора.

Второй этап соответствует максимальному горизонтальному давлению свежего бетона, действующему на стенки траншеи. Данное давление рассчитывается по билинейной зависимости (1), предложенной в работе M.L. Lings с соавторами. При этом критическая глубина принимается в соответствии с формулой (7).

Третий этап соответствует остаточному горизонтальному давлению бетона. Данное давление рекомендуется определять в соответствии с формулой (5).

Четвертый этап соответствует затвердевшему бетону. На данном этапе нагрузки, приложенные к стенкам и дну траншеи, отключаются и одновременно траншея заполняется материалом, моделирующим свойства железобетонной стены в грунте после окончания схватывания бетона. Для данного материала следует назначать упруго-линейную модель грунта.

Вертикальное давление бетона на дно траншеи на этапах №1-№3 принимается равным максимальному горизонтальному давлению бетона на стенки траншеи на соответствующем этапе.

Этапы №1, №2 и №4 совпадают с основным методом моделирования в настоящее время (см. рисунки 1 и 2), за исключением определения критической глубины бетонирования по формуле (7), а этап №3 является дополнительным. Введение в моделирование дополнительного этапа позволяет учитывать уменьшение давления свежего бетона с течением времени.

Модель грунта, окружающего захватку стены в грунте, используемая в предлагаемой методике, должна учитывать историю его нагружения. Основные особенности предлагаемой численной методики представлены на рисунке 8.

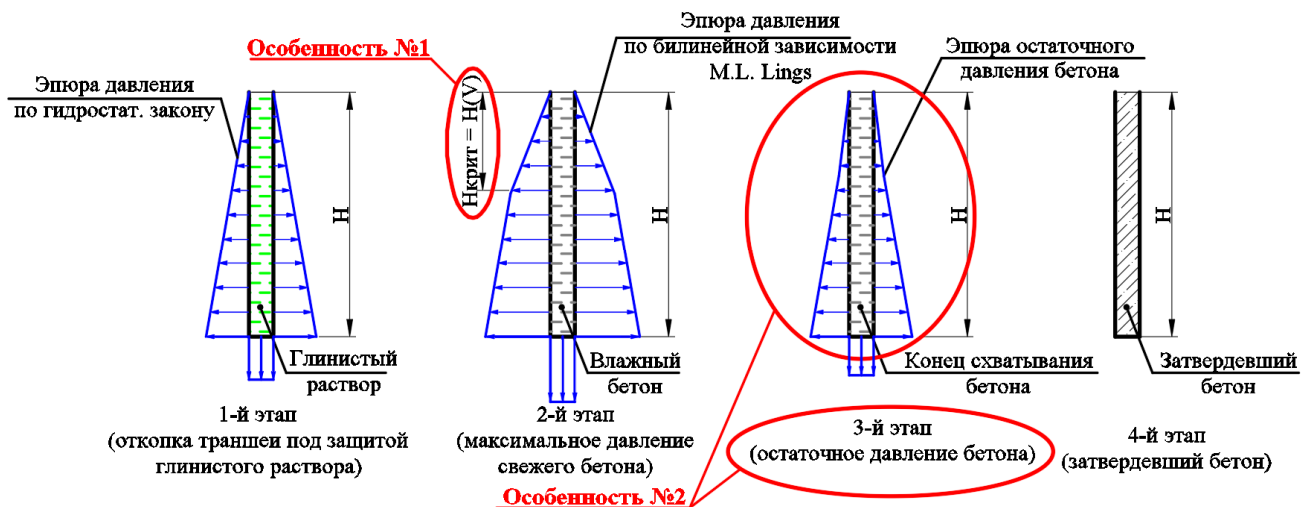


Рисунок 8 – Основные особенности предлагаемой методики численного моделирования влияния устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта

В разделе 4 при помощи разработанной методики численного моделирования выполнено исследование влияния изменения НДС окружающего массива грунта при устройстве стены в грунте на расчет вновь возводимых конструкций.

Численные расчеты по исследованию влияния изменения НДС окружающего массива грунта при устройстве стены в грунте на расчет вновь возводимых конструкций проводились в трехмерной постановке задачи в программе PLAXIS 3D (рисунок 9) с использованием модели

упрочняющегося грунта при малых деформациях (hardening soil model with small-strain stiffness). При выполнении данных расчетов моделировалась откопка котлована глубиной 22 метров в однородных песчаных грунтах (УГВ принят на глубине 14 м) под защитой стены в грунте (глубина 34 м, толщина 1 м) и четырехъярусной распорной системы, состоящей из стальных труб-распорок $\text{Ø}820 \times 8$ мм. Кроме того моделировалось возведение фундаментной плиты толщиной 1,5 м и шириной 22 м, устраиваемой в котловане. Равномерно распределенная нагрузка на фундаментную плиту от надфундаментных конструкций принята равной 500 кПа. Расчеты выполнялись как с учетом изменения НДС грунтового массива от устройства стены в грунте при помощи разработанной методики, так и без учета рассматриваемого изменения НДС.

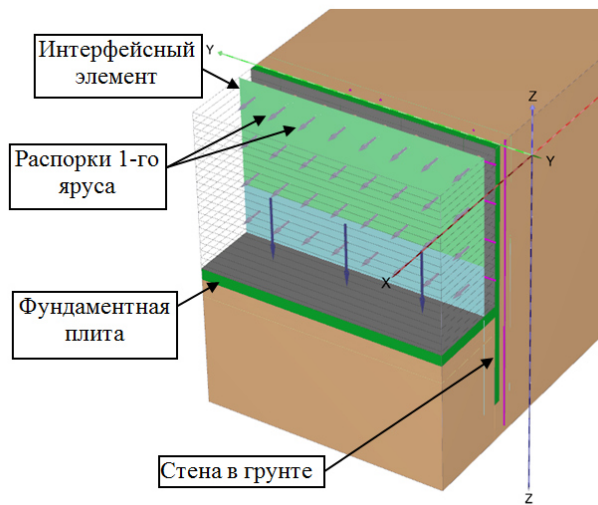
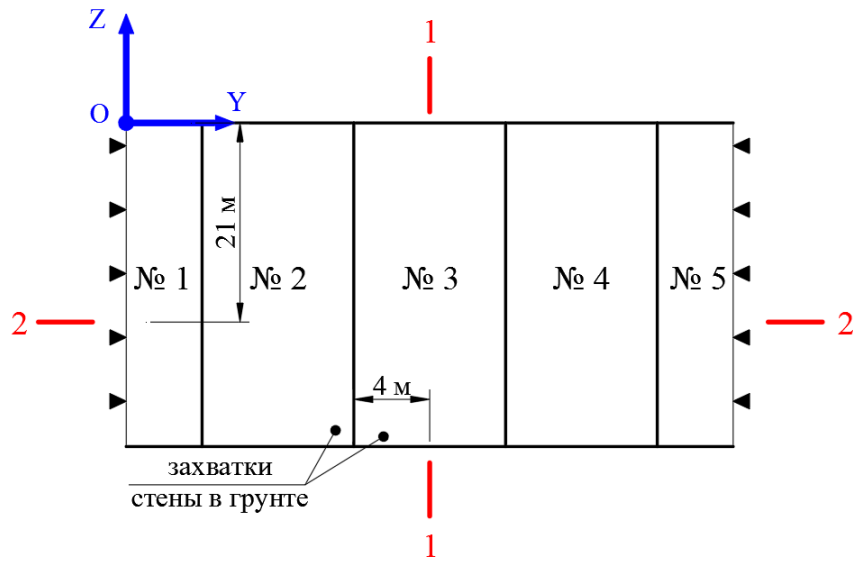


Рисунок 9 – Общий вид фрагмента расчетной модели в PLAXIS 3D

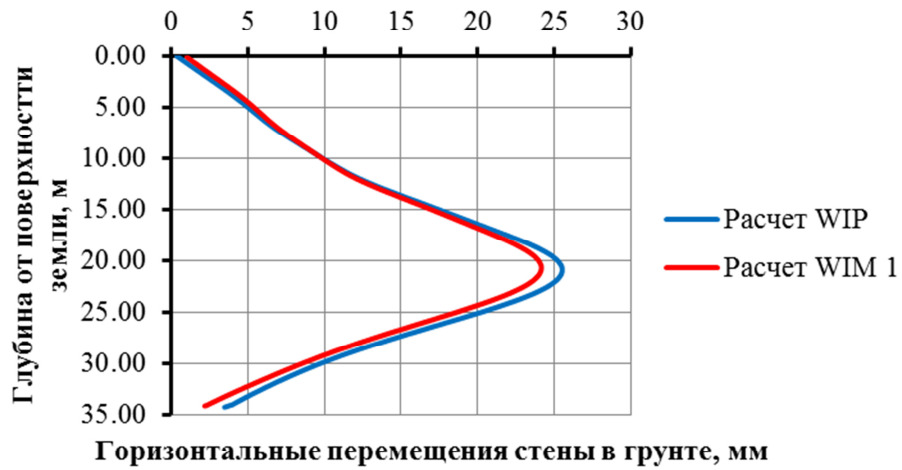
Основные результаты численных расчетов представлены на рисунках 10 и 11. Согласно данным расчетам, даже при учете уменьшения давления свежего бетона с течением времени, изменение НДС грунтового массива от устройства стены в грунте может оказать существенное влияние на расчет вновь возводимых конструкций: распорок и фундаментной плиты, устраиваемой в котловане. Данное влияние относительно расчета, выполненного без учета рассматриваемого изменения НДС, составило

для максимального горизонтального перемещения стены в грунте – минус 4%, максимального продольного усилия в распорке верхнего яруса – плюс 23 %, для максимальной осадки фундаментной плиты – минус 13%, для минимальной осадки – минус 16%.

Схема расчетных сечений для стены в грунте



Расчетное сечение 1-1



Расчетное сечение 2-2

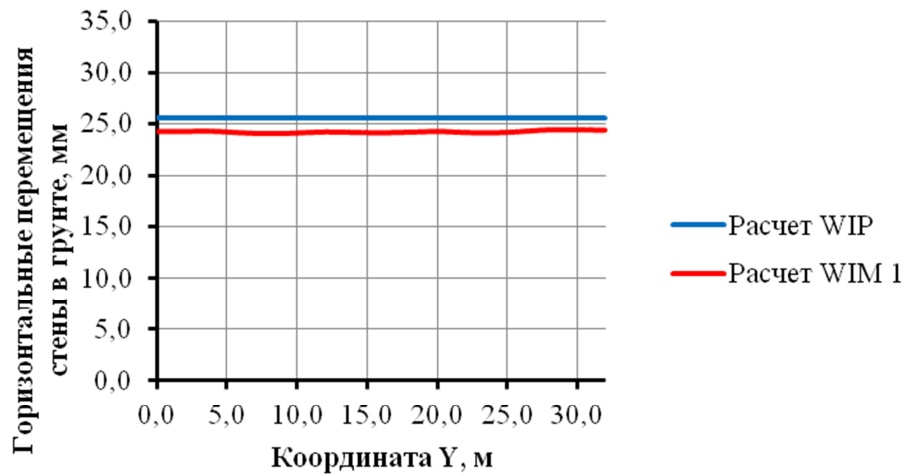
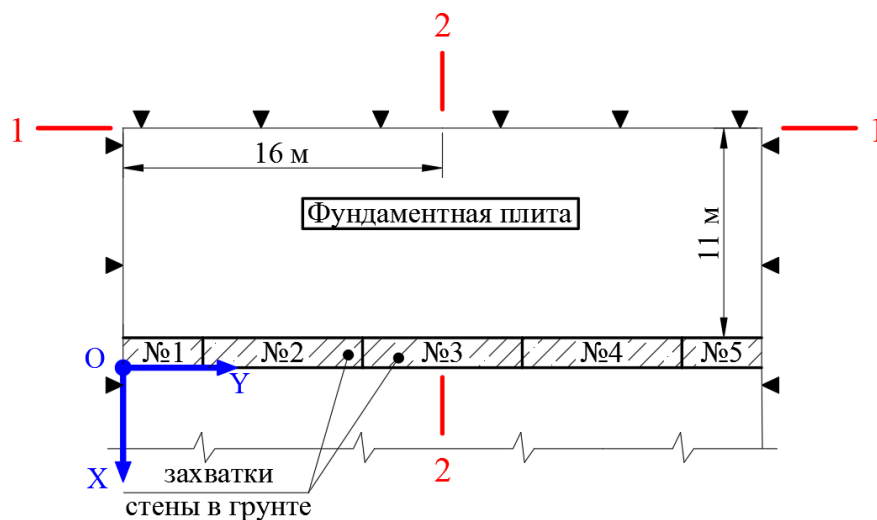
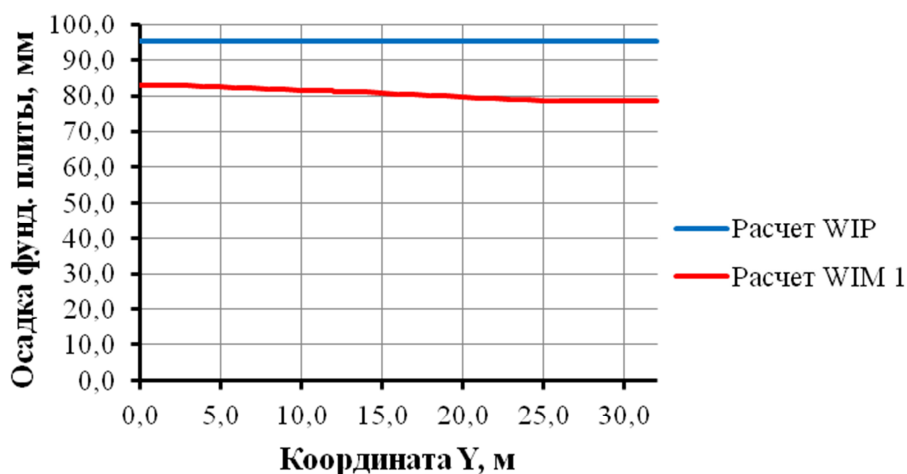


Рисунок 10 – Сравнение горизонтальных перемещений стены в грунте при расчете без учета изменения НДС грунтового массива от устройства стены в грунте (расчет WIP) и с учетом данного изменения (расчет WIM 1)

Схема расчетных сечений для фундаментной плиты



Расчетное сечение 1-1



Расчетное сечение 2-2

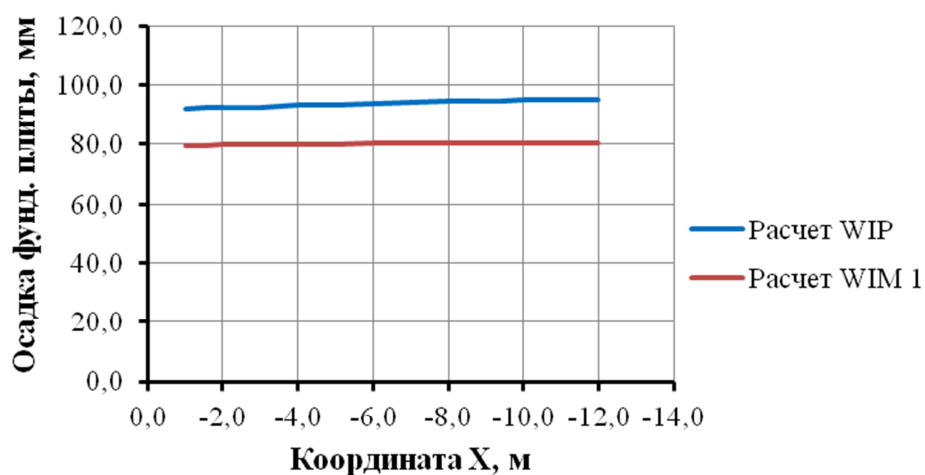


Рисунок 11 – Сравнение осадок фундаментной плиты при расчете без учета изменения НДС грунтового массива от устройства стены в грунте (расчет WIP) и с учетом данного изменения (расчет WIM 1)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе обзора и анализа существующих теоретических и экспериментальных исследований выявлены два основных пробела в изучении вопроса влияния устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта. Первый пробел состоит в отсутствии методик численного моделирования данного влияния, применимых на практике, которые учитывали бы такие факторы, как скорость бетонирования захватки стены в грунте и уменьшение горизонтального давления свежего бетона с течением времени. Второй пробел состоит в том, что, несмотря на значительный накопленный объем, эмпирический материал по деформациям грунтового массива в результате устройства стены в грунте остается на настоящий момент в значительной мере не обобщенным и не проанализированным.

2. В результате обзора источников по теме диссертации выявлено, что основной сферой практического применения оценки влияния устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта в настоящее время являются технологические осадки. Существенно меньшее внимание уделяется влиянию рассматриваемого изменения НДС на расчет распорных и ограждающих конструкций котлована, расчет которых часто выполняется классическими методами, основанными на теории предельного равновесия или численными методами, но без моделирования процесса устройства стены в грунте. При таком подходе остается неучтенным влияние устройства стены в грунте на горизонтальные напряжения, действующие в грунтовом массиве до начала экскавации грунта из котлована, историю нагружения грунта, предшествующую данной экскавации, и жесткостные характеристики грунтов.

3. В результате анализа результатов инклинометрических измерений (8 объектов, 17 инклинометров) выявлены основные закономерности горизонтальных деформаций грунтового массива при устройстве стены в грунте. Первый этап устройства стены в грунте – откопка траншеи вызывает горизонтальные перемещения грунтового массива, преимущественно направленные в сторону захватки стены в грунте. Второй этап устройства стены в грунте – бетонирование захватки вызывает горизонтальные перемещения, преимущественно направленные от стены в грунте. Длительные наблюдения (от 8 часов до 3-х суток) за инклинометрами после бетонирования, выполненные на двух объектах в Сингапуре и Сучжоу (Китай), показали горизонтальные перемещения, направленные преимущественно в сторону стены в грунте. Величина данных перемещений по модулю при этом была существенно меньше, чем при бетонировании.

4. В результате обобщения результатов мониторинга, полученных на 23 объектах в 8 различных городах (Москва, Санкт-Петербург, Бостон, Каир, Сингапур, Сучжоу, Осло и Лондон), собрана база данных по технологическим осадкам от устройства стены в грунте, состоящая из 319 точек наблюдения. На основе собранной базы данных получены

эмпирические зависимости для оценки технологических осадок в различных инженерно-геологических условиях. Дополнительно выполнена оценка влияния на величину технологической осадки различных факторов: глубины и ширины стены в грунте, нагрузки по подошве фундаментов, а также выполнено сравнение максимальных технологических осадок в зависимости от типа инженерно-геологических условий.

5. Выполнен сопоставительный анализ имеющихся опытных данных по горизонтальному давлению свежего бетона при бетонировании различных конструкций (захватки стены в грунте, буронабивные сваи, монолитные конструкции, бетонизируемые в опалубке). На основе данного анализа выдвинута гипотеза, объясняющая результаты мониторинга остаточного давления свежего бетона на стенки траншеи захватки стены в грунте. Согласно данной гипотезе, остаточное горизонтальное давление свежего бетона, наблюдаемое на различных объектах при устройстве стены в грунте, равняется сумме активного давления, действующего на бетон со стороны окружающего грунтового массива, и порового давления воды. Указанная гипотеза обоснована путем сравнения с опытными данными (5 опытных захваток стены в грунте на 4 различных объектах).

6. В результате анализа опытных данных по 8 захваткам стены в грунте получена линейная зависимость для определения критической глубины бетонирования (глубины до которой давление свежего бетона на стенки траншеи захватки стены в грунте условно можно принять гидростатическим) в зависимости от скорости бетонирования (7). Данная зависимость позволяет существенно повысить точность определения критической глубины бетонирования по сравнению с существующим подходом M.L. Lings с соавторами, согласно которому данная глубина принимается равной $1/3$ глубины стены в грунте.

7. На основе анализа опытных данных по горизонтальному давлению свежего бетона разработана методика численного моделирования влияния устройства стены в грунте на изменение НДС окружающего массива грунта, позволяющая учитывать такие факторы, как скорость бетонирования захватки стены в грунте и уменьшение горизонтального давления свежего бетона с течением времени.

8. При помощи разработанной методики численного моделирования выполнено исследование влияния изменения НДС окружающего массива грунта при устройстве стены в грунте на расчет вновь возводимых конструкций. Согласно результатам данного исследования, даже при учете уменьшения давления свежего бетона с течением времени, изменение НДС от устройства стены в грунте может оказать существенное влияние на расчет вновь возводимых конструкций, а именно: на продольные усилия, возникаемые в распорных конструкциях котлована, и осадки фундаментной плиты, устраиваемой в котловане.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. В перспективе, в случае получения дополнительного эмпирического материала по технологическим осадкам, возможны следующие направления дальнейших исследований:

1) уточнение предлагаемых формул для оценки максимальных технологических осадок в различных инженерно-геологических условиях (2) – (4);

2) более подробная типизация инженерно-геологических условий и вывод для каждого выделенного типа инженерно-геологических условий формулы аналогичной формулам (2) – (4);

3) вывод формул для оценки максимальных технологических осадок, учитывающих дополнительные факторы, такие как, например, длина захватки и конструктивные особенности существующего фундамента.

2. Выполнение и анализ результатов дополнительных численных расчетов по разработанной методике с целью детального исследования влияния изменения НДС окружающего массива грунта при устройстве стены в грунте на расчет вновь возводимых конструкций. Данные расчеты следует выполнять для различных инженерно-геологических условий и конструктивных параметров, отличных от рассмотренных в настоящем диссертационном исследовании. Вместо песчаных грунтов, например, можно рассмотреть глинистые грунты, а вместо плитного фундамента – плитно-свайный.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Публикации в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий
ВАК РФ:**

1. Шулятьев, О.А. Определение технологических осадок фундаментов близлежащих зданий при устройстве стены в грунте, грунтовых анкеров и буроинъекционных свай / О.А. Шулятьев, О.А. Мозгачева, Д.К. Минаков, Д.Ю. Соловьев // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – №4. – С. 129-140.
2. Шулятьев, О.А. Технологические осадки при устройстве стены в грунте траншейного типа / О.А. Шулятьев, Д.К. Минаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Том 8. – № 3. – С. 41-50.
3. Шулятьев, О.А. Давление свежего бетона на стенки траншеи при устройстве стены в грунте / О.А. Шулятьев, Д.К. Минаков // Геотехника. – 2017. – № 6. – С. 30-38.
4. Шулятьев, О.А. Влияние изменения напряженно-деформированного состояния в грунтовом массиве при устройстве стены в грунте на расчет ограждающих и распорных конструкций котлована / О.А. Шулятьев, Д.К. Минаков // Геотехника. – 2018. – Том 10. – № 3. – С. 54-68.
5. Минаков, Д.К. Анализ результатов мониторинга технологических осадок от устройства стены в грунте / Д.К. Минаков // Геотехника. – 2020. – № 1, С. 44-56.