

УДК: 624.157
DOI: 10.52409/20731523_2023_4_61
EDN: EREYGS



Анализ опыта проектирования и строительства подземных сооружений с применением «стены в грунте»

Д.М. Нуриева¹, И.В. Агафонов²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²АО "НЕФТЕХИМПРОЕКТ", г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* В современном строительстве использование подземного пространства становится неотъемлемой частью проектов в густонаселенных городах. Цель исследования: определить перспективы развития и направления совершенствования проектирования и строительства подземных сооружений в условиях городской застройки. Задачами исследования являются: анализ работ отечественных и зарубежных авторов, направленных на изучение подземных сооружений с применением «стены в грунте».

Результаты. В ходе обзора исследований было выявлено, что наиболее востребованным способом выполнения ограждения котлована в условиях плотной городской застройки является «стена в грунте». Определены основные направления исследований: анализ поведения ограждающих конструкций котлована, возможность цифровизации и автоматизации выбора проектных решений подземной части зданий, расчет и мониторинг подземных несущих конструкций здания, выбор ограждения и удерживающей системы котлована.

Выводы. Благодаря проделанному исследованию были установлены современные тенденции в развитии проектирования и строительства подземных сооружений с применением «стены в грунте» и выявлена актуальная проблематика, что определяет направления для формирования дальнейших исследований.

Ключевые слова: стена в грунте, геотехническое моделирование, плотная застройка, глубокий котлован, численное моделирование

Для цитирования: Нуриева Д.М., Агафонов И.В. Анализ опыта проектирования и строительства подземных сооружений с применением «стены в грунте» // Известия КГАСУ, 2023, № 4(66), с. 61-72, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_61, EDN: EREYGS

Analysis of experience in design and construction of underground structures using "diaphragm wall"

D.M. Nurieva¹, I.V. Agafonov²

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

²JS «NEFTEKHIMPROEKT», Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* In modern construction, the use of underground space becomes an integral part of projects in densely populated cities. The aim of the study is to determine the prospects of development and trends for improving the design and construction of underground structures in the conditions of urban development. The objectives of the study are to analyze the works of Russian and foreign authors aimed at studying underground structures with the use of "diaphragm wall".

Results. In the course of research review it was revealed that the most popular way of

excavation enclosure execution in conditions of dense urban development is "diaphragm wall". The main trends of research were defined: analysis of the behavior of excavation enclosure structures, possibility of digitalization and automation of selection of design solutions for underground part of buildings, calculation and monitoring of underground load-bearing structures of the building, selection of excavation enclosure and retention system.

Conclusions. Due to the done research, the modern tendencies in development of design and construction of underground structures with application of "diaphragm wall" have been established and topical problems have been revealed, which determines directions for formation of further researches.

Keywords: diaphragm wall, geotechnical modeling, dense development, deep excavation, numerical modeling

For citation: Nurieva D.M., Agafonov I.V. Analysis of experience in design and construction of underground structures using "diaphragm wall"// News KSUAE, 2023, № 4(66), p. 61-72, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_61, EDN: EREYGS

1. Введение

На сегодняшний день подземное строительство является неотъемлемой частью развития современных крупных городов [1-4]. С повышением жизненного уровня население в мегаполисах увеличивается. Это приводит к увеличению плотности городской застройки и дефициту территорий для организации парковочных мест автомобилей. Одним из путей решения этой проблемы является устройство паркингов в подземной части возводимых зданий. Объемно-планировочное и конструктивное решение таких зданий предполагает наличие 2-х, 3-х, а иногда и более подземных этажей, и необходимость устройства в период их строительства глубоких котлованов. Задача часто усложняется еще и тем, что производство работ ведется в стесненных условиях, ограниченных размерами строительной площадки [5]. Для минимизации влияния нового строительства на примыкающие существующие здания и инфраструктуру применяется открытый или полузакрытый способ устройства котлована с выполнением ограждающей конструкции, устойчивость которой обеспечивается различными конструктивными типами удерживающих систем.[6- 8]. Как показал анализ работ [9-11], чаще всего в качестве ограждающей конструкции выступает «стена в грунте», а для обеспечения ее устойчивости применяются грунтовые анкеры или распорные системы из металлических распорок, подкосов и стоек [5,12-14]. «Стена в грунте» это искусственно выполненная конструкция из бетона или железобетона в грунте. Она способна выдерживать значительное по величине боковое давление, быть противодиффузионной завесой и воспринимать гидростатическое давление подземных вод, минимизировать влияние котлована на окружающую застройку, а при необходимости может быть использована в качестве конструктивного элемента несущей системы подземной части здания [15,16].

Несмотря на имеющийся опыт строительства таких сооружений, при их проектировании часто возникают вопросы, не имеющие четких ответов и рекомендаций в действующих строительных нормативных документах.

Так, согласно [17,18] для обеспечения безопасности строящихся и существующих зданий и сооружений, снижения риска возникновения аварийных ситуаций, связанных с обрушением, обвалом и осыпанием грунта крайне важно произвести выбор ограждающих и удерживающих систем котлована с учетом:

- совместной работы системы "основание - фундамент - сооружение" с учетом последовательности разгрузки и нагружения основания;
- последовательности экскавации и обратной засыпки грунта, монтажа и последующего демонтажа конструкций крепления (при их наличии);
- последовательности возведения основного сооружения, если подпорное сооружение выполняется для его строительства или входит в его состав;

- особенности поведения грунта и конструкций вплоть до достижения рассматриваемого предельного состояния;
- влияния подпорного сооружения и объектов внешней среды друг на друга;
- технологии возведения подземной части здания;
- инженерно-геологических условий площадки.

Несмотря на всеобъемлющие условия, которые должен выполнить проектировщик, приступая к расчётам подземной части зданий и выборе конструктивных решений, в действующих строительных нормах отсутствуют конкретные методики и рекомендации по конструированию, учитывающие все вышеуказанные требования, а также имеющие приемлемую сходимость с показаниями мониторинга конструкций.[1,18].

В связи с вышеизложенным весьма актуальным становится изучение имеющихся подходов, перспектив развития и направления совершенствования расчетов, проектирования и строительства подземных сооружений в условиях плотной городской застройки.

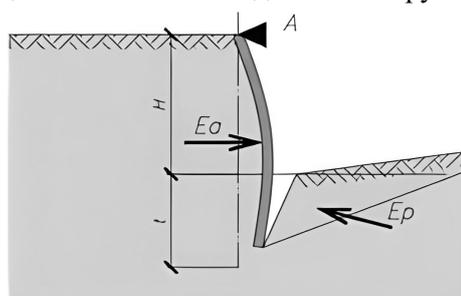
В данной работе задачами исследования являются:

- 1) выполнить обзор и анализ отечественного и зарубежного опыта проектирования и строительства подземных сооружений в условиях плотной городской застройки на основе опубликованных результатов исследований отечественных и зарубежных авторов преимущественно за последние 5 лет;
- 2) выявить наиболее востребованный тип ограждения котлована;
- 3) обозначить основные направления исследований;
- 4) установить актуальные проблемы, на основании которых вывести направления для формирования дальнейших исследований.

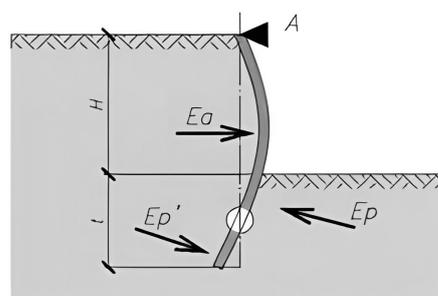
2. Материалы и методы

Для анализа исследований отечественных и зарубежных авторов, были отобраны те работы, в которых изучалось поведение ограждающих конструкций котлована, эффективность возведения подземной части зданий, возможность цифровизации и автоматизации выбора проектных решений, расчет и мониторинг несущих конструкций подземной части здания, выбор удерживающей системы котлована, наиболее применяемых методы расчета ограждающих конструкций котлованов.

На текущий момент применяется два типа расчета подземных сооружений. Первый тип основан на ручных графоаналитических методах, которые хорошо зарекомендовали себя как достаточно простые и не требующие сложных вычислений. Графоаналитический метод упругой (гибкой) линии (методы Якоби и Блюма-Ломейера)[12]. Принцип - определяются эпюры активного и пассивного давлений грунта, строятся веревочные и силовые многоугольники, а также эпюра изгибающего момента в сечении ограждения. По результатам вычислений определяется требуемая глубина заделки ограждения ниже дна котлована из условия устойчивости грунта и подбирается сечение ограждающей конструкции. Однако при своей простоте данные методы не учитывают множество важных факторов: учет этапной разработки котлована, устройства анкеров или распорных систем; их податливость и перераспределение давления в грунтовом массиве, последовательность возведения конструкций.



Расчетная схема по методу Якоби



Расчетная схема по Блюма-Ломейера

Рис 1. Подходы графоаналитический метода расчета ограждения котлована

Fig. 1. Approaches of the graph-analytical method for calculating the fence of the excavation
(<http://geotechfem.com/raschety-ograzhdeniya-kotlovana.html>)

Второй тип основывается на численных расчетах, реализованных в современных программных комплексах, которые отличаются гибкостью построения расчетной модели и учитывают поведение грунта как среды, позволяют получить не только перемещения и напряженное состояние ограждающей конструкции, но и оценить влияние устройства котлована на прилегающую застройку, вычислить дополнительные осадки поверхности и фундаментов существующих зданий и сооружений.

В компьютерной программе ПК «ЛИРА-САПР» реализуется метод конечных элементов (МКЭ) и есть возможность проводить расчет основания по различным моделям, в основе которых лежит трехмерная модель грунта, построенная на основе данных инженерно-геологических исследований. Моделирование работы грунта осуществляется либо путем применения коэффициентов жесткости упругого основания $C1$ и $C2$, либо путем применения объемных конечных элементов КЭ № 34, 36, позволяющих описывать линейное деформирование грунтов, либо специальных КЭ № 271, 272, 273, учитывающих нелинейное поведение грунтов. В ПК SCAD office реализованы следующие виды моделей грунтового основания: модель Винклера; линейно-деформируемого основания; билинейная модель; модель упрочняющегося грунта.

Метод конечных элементов также лежит в основе программного комплекса PLAXIS, позволяющего реализовать численное моделирование ограждений котлованов на двух уровнях. В ПК «Plaxis 2D» заложен расчет по деформированной схеме, в ПК «Plaxis 3D» - модель упрочняющегося грунта («Hardening Soil») [3]. Программные комплексы дают возможность осуществлять моделирование деформационных процессов для зданий и сооружений, попадающих в зону влияния строительства [19], рассчитывать дополнительные осадки здания на момент окончания строительства и, тем самым, обеспечивать геомеханическую безопасность и эффективно использовать подземное пространство.

Принимая во внимание широкий спектр задач, с которыми могут справиться современные программные комплексы, нельзя не отметить тот факт, что они не определяют геометрические, механические и прочие параметры ограждающих конструкций котлованов. Для этого необходимо выполнять дополнительные трудоемкие расчеты для назначения предварительных размеров конструкций. На данный момент не существует промежуточной методики расчета и подхода, который бы позволял быстро подобрать конструктивные элементы подземных сооружений, при этом чтобы эти результаты хорошо согласовались с показаниями мониторинга и экспериментальными данными.

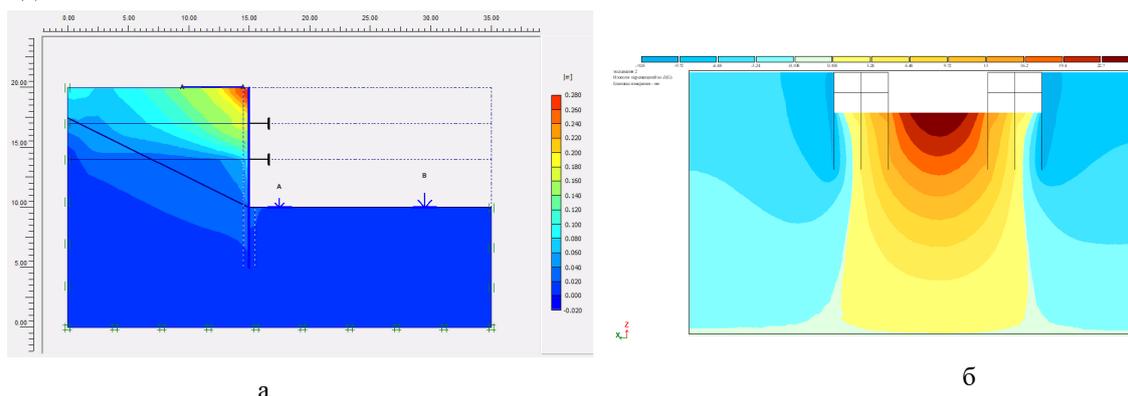


Рис. 2. Иллюстрация работы различных программных комплексов

Fig. 2. Illustration of the operation of various software systems:

а - ПК «Plaxis» б- ПК «Лира-САПР»

a- "Plaxis" PC б - "Lira-SAPR" PC

(<https://www.kadastr.org/conf/2018/pub/monitprir/beregoukreplenie-poberej-ya-azovskogo-morya-na-pri.htm>)

3. Результаты и обсуждение

Рассмотрим подробнее работы отечественных и зарубежных авторов. Основной упор будет сделан на публикации последних пяти лет. Предметность исследований в

этой области достаточно широка, и научные работы направлены на различные аспекты, включая цифровизацию и автоматизацию выбора типа ограждающих конструкций, расчет ограждающей конструкции [20] и выбор типа удерживающей системы котлована, зависимость от температурных воздействий, а также сопоставление расчетной модели с результатами мониторинга.

В работах Разумновой Е.А., [21] И.С. Довольнова [15] проведен анализ современных организационно-технологических решений, используемых при строительстве подземных частей объектов высотного строительства. Авторы пришли к выводу, что наиболее эффективным способом является возведение подземной части полу-закрытым способом, с оговоркой на то, что выводы требуют детальных исследований и проработки.

Относительно возможности цифровизации и автоматизации выбора проектных решений О. В. Ашихмин, А. П. Шестакова, Д.А. Федоров в научных статьях «Цифровизация процессов принятия технологических и проектных решений в современном строительстве», [9] «Результаты численного эксперимента по созданию алгоритма принятия проектных решений в строительной практике» [11] показали работу алгоритма принятия проектных решений для ограждающих конструкций бровки котлована при строительстве объекта «ЖК "Вознесенский"». Принципы и алгоритмы принятия проектных решений, используемые в данном исследовании, могут быть применены на всех этапах строительства и управления проектами. Цифровой эксперимент показал, что для получения быстрого и достоверного варианта решения достаточно иметь исходную базу данных и апробированное программное средство составления дерева решений. В данном исследовании в качестве такого программного средства было использовано Deductor Studio Academic.

В своих работах [22,23] Жеглова Ю.Г. сформулирована задача выбора технических решений для ограждающих конструкций на основе функциональных требований и множества данных; предложена новая математическая модель, методика выбора и функциональное описание системы поддержки принятия решений на основе системного анализа и теории активных систем, обеспечивающие комплексную оценку и экономическую эффективность технических решений.

Использование современных технологий, а именно облака точек и информационной модели здания рассматривает [24] С.Б. Могучев при проведении строительного контроля. Предложенный автором метод строительного контроля повышает точность и скорость регистрации отклонений, позволяет проводить контроль каждого элемента в камеральных условиях и интегрировать журнал работ в информационную модель объекта. Использование информационной модели позволяет оптимизировать процессы, уменьшить непредвиденные расходы и повысить эффективность проектирования, а облачные точки улучшают контроль качества строительных работ и объединяют данные со стройки и проектной модели.

Рассмотрением вопроса влияния изменения напряженно-деформированного состояния грунта при устройстве «стены в грунте» на расчет ограждающих и распорных конструкций котлована занимались Шулятьев О.А., Минаков Д.К. в своей работе [25] и пришли к следующим выводам:

– Учет изменения напряженно-деформированного состояния грунта при устройстве «стен в грунте» оказывает существенное влияние на расчет ограждающих и распорных конструкций котлована.

– Предложенный метод моделирования этапов бетонирования в два этапа учитывает уменьшение давления свежего бетона на стенки траншеи со временем и позволяет более точно оценивать деформации и усилия в конструкциях котлована.

– Недооценка деформаций и усилий при расчете конструкций котлована без учета изменения напряженно-деформированного состояния грунта будет особенно сильной при большой критической глубине и низком уровне грунтовых вод.

О геотехническом мониторинге, как необходимой составляющей строительства в своей работе утверждают И.А. Салмин, [18] О.А. Шулятьев, В. И. Травуш, С.О. Шулятьев [26] и сопоставляют результаты мониторинга с расчетами ограждения котлована на примере технических сооружений в г. Пермь, Лахта Центра в г. Санкт-Петербург. Авторы, приводя расчеты в различных программах, таких как: Plaxis, GeoWall, Alterra,

ANSYS 13, приходят к выводу о том, что мониторинг является полезным инструментом для проектирования ограждений котлованов. Он позволяет получать сигналы о состоянии ограждения на протяжении всего процесса строительства и после его завершения, что помогает инженеру-проектировщику оценить эффективность выбранного решения и принимать более рациональные проектные решения в будущем.

Вопросами учета поэтапного строительства котлована задавались Трушко О.В., Кутявин Д.В. В своем исследовании [5] они провели геотехническую оценку ситуации на участке строительства в Приморском районе г. Санкт-Петербург вблизи станции метро Пионерская с помощью программного комплекса «Plaxis 3D» по модели упрочняющегося грунта («Hardening Soil»), которая позволила произвести расчёт по методике поэтапного строительства. Численный анализ позволил более точно спрогнозировать развитие осадок за счет усовершенствованных моделей грунта с учётом его нелинейной работы при действии нагрузки. Расчёт осадки здания проводился в программно-вычислительном комплексе «Лира-САПР» «Грунт», который позволил установить, что несущие конструкции проектируемого здания удовлетворяют нормативным требованиям прочности и деформативности. В результате проделанной работы был определён наиболее подходящий тип ограждения котлована для условий строительной площадки с сильно деформируемыми грунтами, рассчитаны и численно определены размеры несущих конструкций котлована.

Знаменский В.В., Ганболд А.В в своей статье [10] приводят результаты исследования влияния ограждающей конструкции котлована, выполненной по технологии железобетонной «стены в грунте» траншейного типа, на деформации грунтового массива в основании плитного фундамента высотного здания и его осадку. Исследование выполнено численным методом с использованием программного комплекса PLAXIS 2D.

Сравнение анкерного и распорного методов крепления ограждающих конструкций котлована при строительстве многофункционального комплекса с многоуровневой подземной автостоянкой по адресу: г. Москва, ул. Большая Черемушкинская, д.25. провели С.А. Синенко, А.Р. Халитова. В результате проведенной работы [14] авторы пришли к выводу о том, что наиболее экономичным видом крепления ограждающих конструкций котлована является анкерная система крепления.

Методика выбора технологии устройства крепления ограждающих конструкций котлована с применением грунтовых инъекционных анкеров рассматривают на примере крепления ограждающей конструкции котлована при строительстве многофункционального жилого комплекса в г. Москва. А.Р. Халитова, С.А. Синенко. Авторы разработали методику выбора технологии устройства крепления ограждающих конструкций котлована, [13] используя грунтовые инъекционные анкеры. Она включает определение выбора проходки скважин, расчет необходимых ресурсов для производства работ и показателей калькуляции труда. Также авторы определили факторы, влияющие на выбор технологии грунтовых анкеров при строительстве такие, как наличие близлежащей застройки и инженерных коммуникаций, геологических и гидрогеологических условий, а также конструкции грунтового анкера.

При рассмотрении факторов, влияющих на технологические осадки при возведении «стены в грунте» О.А. Шулятьев, Д.К. Минаков приводят в своей работе [27] следующее: факторы, такие как инженерно-геологические условия, расстояние между траншеей и фундаментом, длина захватки «стены в грунте», нагрузка на подошве фундамента и плотность бентонитового раствора, влияют на технологические осадки. Изменение любого из этих параметров может привести к значительному изменению технологической осадки (от 2,5 до 7 раз). Учет данных факторов необходим для прогнозирования технологической осадки.

Поведение конструкций котлована в зимних условиях в своих работах рассматривали А.В. Бояринцев, М.Б. Заводчикова, И.Н. Зуев, А.В. Журко, И.С. Камаев. В работе [1] авторы выполнили моделирование, расчеты и наблюдение за ограждениями котлована в г. Санкт-Петербурге. Мониторинг за конструкциями ограждения котлована и зданий окружающей застройки в течение зимнего сезона 2020–2021 гг. показал, что при понижении температуры до минус 28 °С ограждения смещаются внутрь котлована до 8

мм, а здания получают дополнительную осадку до 5 мм. Лабораторные испытания показали, что грунтовый массив окружающего котлована не может вызвать подобных деформаций. Исходя из этих наблюдений и моделирования, рекомендуется проводить работы по изготовлению распорных систем в межсезонные периоды года, поддерживать температуру воздуха внутри котлована выше нуля в холодный период года и планировать работы по откопке котлована таким образом, чтобы избежать деформаций конструкций.

Вопросам выбора способа возведения подземной части здания, удерживающей системы ограждающей конструкции котлована уделяется повышенное внимание в настоящее время, поскольку от этого зависит эффективность производства работ, безопасность выполнения работ на строительной площадке и сохранность окружающей застройки. Так, в исследовании [7] на примере котлована городе Ахваз, Иран производится вариантное проектирование и выбор подходящей удерживавшей системы для ограждающей конструкции, выполненной из свай. Авторы также проводят сравнение полученных результатов с опытом строительства на других объектов в этой же местности. Итогом работы является расчет и выбор удерживающей системы в виде металлических распорок. В работе [28] сравнивается влияние трех методов строительства, а именно, открытый способом, top-down и semi-top-down, на боковое смещение стен и зону осадки грунта на примере строительства станции метро в центре Шанхая. Строительство осложнялось сильнодеформируемыми грунтами, а также окружающей застройкой и действующей станцией метро вблизи. В расчетах используется PLAXIS 3D. Авторы утверждают о хорошей сходимости результатов расчета с мониторингом. Рекомендуют метод semi-top-down для котлованов в городских условиях, где нарушение устойчивости несущих систем может иметь катастрофические последствия. В статье [29] исследуется автоматизированное проектирование глубоких котлованов в условиях городской застройки с учетом риска с использованием анализа надежности случайных множеств и методов конечных элементов. Рассматриваются три конкретных случая, в которых сравниваются различные подходы к проектированию, включая стоимость жизненного цикла, приемлемый риск и традиционные методы.

В научной литературе иностранных журналов обнаружено значительное количество работ, посвященных моделированию котлована и последующему сравнению полученных результатов с данными мониторинга. Очевидно, это связано с все более острой необходимостью освоения подземного пространства. Так исследователи [8] проводили оценку своей методики определения осадок в условиях переуплотненной глины с акцентом на зависящие от времени смещения в подпорных стенах. Непосредственное сравнение расчетных данных с фактическими проводят в исследовании, [30, 31] изучая поведение глубокого котлована вблизи существующего моста в карстовой зоне. В работе [32] выполняется сравнение результатов численного моделирования и мониторинга подземной части здания культурного центра Сиваса в Турции. Расчет производится в программах Plaxis 2D и GGU-Retain. На исследуемой территории и в ее окрестностях встречаются коричневые и светло-серые глины. Основание моделируется однослойным, удельный вес 19 кН/м³, модуль упругости 50 Мпа. Исследование показывает, что Plaxis 2D, используя теорию упрочнения грунта, может быть использован с высокой точностью для моделирования работы ФГЗ в твердом глинистом грунте. Рекомендуются дальнейшие исследования для подтверждения полученных результатов с помощью фактических данных грунта и рассмотрения поведения котлована при увеличении его глубины. Аналогичное сравнение [33] проводилось в городе Хайкоу в провинции Хайнань. Котлован предназначен для Башни Хайкоу высотой 428,3 м. Ограждение котлована выполнено из «стен в грунте» толщиной 1 м из свай. Удерживающей система – анкерная. Расчет выполнен в программе Plaxis. Результаты моделирования в целом хорошо согласуются с данными полевого мониторинга.

Для улучшения сходимости результатов расчетной модели с фактической работой несущих конструкций, в статье [34] рассматривается разработка подробных трехмерных конечно-элементных моделей для проектирования глубоких котлованов. Рассматриваются допущения моделирования, связанные с подпорными стенками, свайными фундаментами, эксплуатационной жесткостью конструктивных элементов и

тепловыми эффектами. Параметрические исследования показывают важность использования сплошных элементов для моделирования подпорных стен, балочных элементов для моделирования свай, тщательного выбора эксплуатационной жесткости и учета теплового воздействия на прогибы стен и перемещение грунта. Полученные результаты служат руководством для практического проектирования в проектах глубокого котлована.

В исследовании [6] используется технология распределенного волоконно-оптического мониторинга с использованием оптического частотного анализа Бриллюэна (BOFDA) для мониторинга бокового смещения сверхглубокого котлована. Сравнение данных волоконно-оптического мониторинга с данными ручного мониторинга дает представление о деформациях ограждающей конструкции. Результаты демонстрируют преимущества волоконно-оптического мониторинга в полевом наблюдении за поведением конструкций глубокого котлована.

4. Заключение

На основании проведенного обзора исследований можно сделать следующие выводы:

1. Технология «стена в грунте» является одним из наиболее востребованных методов устройств ограждения котлована на период возведения подземной части здания, а также в качестве несущего конструктивного элемента.

2. С помощью этой технологии решаются сложные задачи строительства при возведении подземных сооружений, подпорных стен, противофильтрационных завес, фундаментов глубокого заложения. Она также может выступать как самостоятельная ограждающая конструкция котлована, так и несущим элементом здания.

3. В настоящее время при расчетах ограждающих конструкций котлованов применяются классические графоаналитические решения, полуаналитические программы и программные комплексы, использующие метод конечных элементов. Наиболее используемым, а также обладающий хорошей сходимостью результатов является ПК Plaxis 3D. Он обладает обширным количеством параметров для моделирования грунтовых условий модель линейно деформируемого полупространства, модель упругопластической среды. Помимо представленных моделей грунта в Plaxis 3D имеется упругопластическая модель с изотропным упрочнением Hardening Soil Model, которая способна ещё более точно отображать реальное поведение грунта. Однако отсутствуют простая и точная методика расчета и подход, результаты которых имели хорошую сходимость с экспериментальными данными и показаниями мониторинга реальных конструкций.

4. Особое внимание отечественных и зарубежных исследователей направлено на комплексный расчет системы здание-основание в программах, проведение мониторинга на этапе строительства и эксплуатации объекта, сравнение фактических значений НДС несущих элементов с проектируемыми, корректировка модели для моделирования реальной работы конструкций.

5. Основные сложности в проектировании наблюдаются при расчете ограждающей конструкции котлована, ее удерживающих систем:

- учет различных технологических особенностей возведения подземной части здания при построении расчетной модели;
- развитие методик расчета совместной работы здания и основания с учетом поэтапного возведения;
- сопоставление данных мониторинга с проектными с последующей доработкой расчетной модели

6. Благодаря проделанному исследованию были установлены современные тенденции в развитии проектирования и строительства подземных сооружений с применением «стены в грунте» и выявлена актуальная проблематика, что определяет направления для формирования дальнейших исследований.

Список литературы/References

1. Бояринцев А.В., Заводчикова М.Б., Зуев И.Н., Журко А.В., Камаев И.С. Поведение конструкций раскрепления котлована в зимних условиях // *Construction and Geotechnics*. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 37–53. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.03 [Boyarintsev, A.V.; Zavodchikova, M.B.; Zuev, I.N.; Zhurko, A.V.; Kamaev, I.S. Behavior of excavation formwork removing structures in winter conditions // *Construction and Geotechnics*. - 2021. - Т. 12, № 4. - P. 37-53. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.03].
2. Вилкова М.В, Латыпов Р. Р., Фабричная К. А. Проблемы строительства при уплотнении застройки исторического центра города на примере объекта культурного наследия: усадьба Киселева, расположенного по ул. Муштари 20, г. Казань // *Строительство и застройка: жизненный цикл - 2022 : Материалы VI Международной (XII Всероссийской) конференции, Чебоксары, 23–24 ноября 2022 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022. – С. 305-315. – EDN UBSBXN.* [Vilkova M.V., Latypov R. R., Fabrichnaya K. A. Problems of construction at densification of the historical city center development on the example of the cultural heritage site: Kiselev's estate, located at 20 Mushtari Street, Kazan // *Construction and development: life cycle - 2022 : Proceedings of the VI International (XII All-Russian) Conference, Cheboksary, November 23-24, 2022. - Cheboksary: Limited Liability Company "Publishing House "Sreda", 2022. - P. 305-315. - EDN UBSBXN.]*
3. Геомеханическое обеспечение строительства многофункционального центра в условиях мегаполиса / Д. Л. Негурица, Г. В. Алексеев, Е. А. Медведев, А. А. Терешин // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 3. – С. 286-296. – DOI 10.46689/2218-5194-2021-3-1-280-290.* [Geomechanical support for the construction of a multifunctional center in metropolis conditions / D. L. Neguritsa, G. V. Alekseev, E. A. Medvedev, A. A. Tereshin // *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. - 2021. - № 3. - P. 286-296. - DOI 10.46689/2218-5194-2021-3-1-280-290.]
4. Чередниченко Т. Ф., Чеснокова О. Г., Сулейманов Д. Р., Журбенко М. Д. Способы устройства подземных систем зданий в условиях существующей городской застройки: проблемы организации строительства // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1(90). С. 154—162.* [T. F. Cherednichenko, O. Chesnokova. G. G., Suleymanov D. R., Zhurbenko M. D. Methods of underground building systems in the existing urban development: problems of construction organization // *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2023. Iss. 1(90). P. 154-162.]*
5. Трушко, О. В. Устройство котлована в условиях сильно деформируемых грунтов при строительстве многоэтажного бизнес-центра с учётом обеспечения устойчивости близстоящих зданий и сооружений / О. В. Трушко, Д. В. Кутявин // *Вестник евразийской науки. – 2018. – Т. 10, № 1. – С. 48.* [Trushko, O. V. Excavation in highly deformable soils during the construction of a multi-storey business center taking into account the stability of the nearby buildings and structures / O. V. Trushko, D. V. Kutuyavin // *Bulletin of Eurasian Science*. - 2018. - Vol. 10, № 1. - P. 48.]
6. Hsiung, B.-C. B., Yang, K.-H., Aila, W., & Ge, L. (2018). Evaluation of the wall deflections of a deep excavation in Central Jakarta using three-dimensional modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, 84–96. DOI:10.1016/j.tust.2017.11.013
7. Mohsen Farzi, Mohammad S. Pakbaz, Hesam A. Aminpour, Selection of support system for urban deep excavations: A case study in Ahvaz geology, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 8, 2018, Pages 131-138, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.01.004>.
8. Raul Fuentes, Anton Pillai, Pedro Ferreira, Lessons learnt from a deep excavation for future application of the observational method, *Journal of Rock Mechanics and*

- Geotechnical Engineering, Volume 10, Issue 3, 2018, P. 468-485, ISSN 1674-7755, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.004>.
9. Ашихмин, О. В. Цифровизация процессов принятия технологических и проектных решений в современном строительстве / О. В. Ашихмин, А. П. Шестакова. – DOI: 10.31660/2782-232X-2022-2-95-103. – Текст: непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 2 (100). – С. 95–103. [Ashikhmin, O. V. Digitalization of technological and design decision-making processes in modern construction / O. V. Ashikhmin, A. P. Shestakova. - DOI: 10.31660/2782-232X-2022-2-95-103. - Text: direct // Architecture, construction, transportation. - 2022. - № 2 (100). - P. 95-103.]
 10. Знаменский, В. В. Результаты исследования влияния ограждения котлована типа стена в грунте на осадки грунта в основании плитного фундамента высотного здания / В. В. Знаменский, А. Ганболд // Инновации и инвестиции. – 2022. – № 4. – С. 146-150. [Znamensky, V. V. Results of the study of the influence of the diaphragm wall type excavation enclosure on the ground settlement at the base of the slab foundation of a high-rise building / V. V. Znamensky, A. Ganbold // Innovations and Investments. - 2022. - № 4. - P. 146-150.]
 11. Федоров, Д. А. Результаты численного эксперимента по созданию алгоритма принятия проектных решений в строительной практике / Д. А. Федоров, О. В. Ашихмин // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 7(79). – С. 454-464. [Fedorov, D. A. Results of the numerical experiment to create an algorithm for making design decisions in construction practice / D. A. Fedorov, O. V. Ashikhmin // Engineering Gazette of Don. - 2021. - № 7(79). - P. 454-464.]
 12. Конюшков, В. В. Сравнительный анализ методов расчетов ограждающих конструкций котлованов / В. В. Конюшков // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 3(86). – С. 92-99. – DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-3-92-99. [Konyushkov, V. V. Comparative analysis of the calculation methods of the excavations enclosure structures / V. V. Konyushkov // Bulletin of Civil Engineers. - 2021. - № 3(86). - P. 92-99. - DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-3-92-99.]
 13. Халитова, А. Р. Методика выбора технологии устройства крепления ограждающих конструкций котлована с применением грунтовых инъекционных анкеров / А. Р. Халитова, С. А. Синенко // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 5(77). – С. 287-301. [Khalitova, A. R. Methodology for selecting the technology of fixing the excavation enclosing structures with the use of soil injection anchors / A. R. Khalitova, S. A. Sinenko // Engineering Bulletin of Don. - 2021. - № 5(77). - P. 287-301.]
 14. Халитова, А. Р. Сравнение анкерного и распорного методов крепления ограждающих конструкций котлована при строительстве зданий и сооружений / А. Р. Халитова, С. А. Синенко // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 4(76). – С. 408-419. [Khalitova, A. R. Comparison of anchor and spacer methods of anchoring of excavation enclosures during construction of buildings and structures / A. R. Khalitova, S. A. Sinenko // Engineering Bulletin of Don. - 2021. - № 4(76). - P. 408-419.]
 15. Довольнов, И. С. Анализ применимости методов подземного строительства гражданских и промышленных зданий / И. С. Довольнов. – DOI: 10.31660/2782-232X-2021-2-50-57. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2021. – № 2. – С. 50–57. [Dovolnov, I. S. Analysis of applicability of methods of underground construction of civil and industrial buildings / I. S. Dovolnov. - DOI: 10.31660/2782-232X-2021-2-50-57. -Text : direct // Architecture, construction, transportation. - 2021. - № 2. - P. 50-57.]
 16. Савиков, Р. А. Сравнительный анализ "стены в грунте" в качестве ограждающей и несущей конструкции / Р. А. Савиков // Молодой ученый. – 2019. – № 22(260). – С. 195-199. – EDN AOVPUF. [Savikov, R. A. Comparative analysis of the "diaphragm wall" as an enclosing and load-bearing structure / R. A. Savikov // Young Scientist. - 2019. - № 22(260). - P. 195-199. - EDN AOVPUF.]
 17. СП 381.1325800. 2018. Сооружения подпорные. Правила проектирования. М.: АО "НИЦ "Строительство" - НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, 2018. Секция геотехники. [SP 381.1325800. 2018. Retaining structures. Design rules. Moscow: JSC

- "SIC "Construction" - N. M. Gersevanov NIOSP, 2018. Section of geotechnics.]
18. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* : Свод правил / В. П. Петрухин, Е. А. Сорочан, И. В. Колыбин [и др.]. – Москва : ФГУП Стандартинформ, 2016. – 228 с. – EDN ZPZGHB.Salmin, I. A. Мониторинг ограждающей конструкции глубокого котлована / И. А. Салмин // Жилищное строительство. – 2017. – № 9. – С. 29-34. [SP 22.13330.2016 Foundations of buildings and structures. Updated edition of SNiP 2.02.01-83* : Code of practice / V. P. Petrukhin, E. A. Sorochan, I. V. Kolybin [and others]. - Moscow : FSUE Standardinform, 2016. - 228 p. - EDN ZPZGHB.Salmin, I. A. Monitoring of the enclosing structure of a deep excavation / I. A. Salmin // Housing construction. - 2017. - № 9. - P. 29-34.]
 19. Мамонтов, А. О. Потенциальные риски в практике геотехнического моделирования строительных объектов в период действия международных санкций / А. О. Мамонтов, В. В. Полити // Отходы и ресурсы. — 2023 —Т. 10 — № 1 — URL: <https://resources.today/PDF/29ECOR123.pdf> DOI: 10.15862/29ECOR123. [Mamontov, A. O. Potential risks in the practice of geotechnical modeling of construction projects during the period of international sanctions / A. O. Mamontov, V. V. Politi // Waste and Resources. - 2023 -Т. 10 - NO. 1 - URL: <https://resources.today/PDF/29ECOR123.pdf> DOI: 10.15862/29ECOR123.]
 20. Шакиров И.Ф, Хисматуллин А.Ф. Исследование напряженно-деформированного состояния гибкой ограждающей конструкции с анкерным креплением // Publishing House "Education and Shience", № 18, - Прага, 2014. - 60-64 с. [Shakirov I.F., Khismatullin A.F. Investigation of stress-strain state of flexible enclosing structure with anchoring // Publishing House "Education and Shience", No. 18, - Prague, 2014.- P. 60-64.]
 21. Разумнова, Е. А. Анализ современных организационно-технологических решений, применяемых при возведении подземной части объектов высотного строительства / Е. А. Разумнова // Инновации и инвестиции. – 2021. – № 4. – С. 298-302. [Razumnova, E. A. Analysis of modern organizational and technological solutions used in the construction of the underground part of high-rise construction objects / E. A. Razumnova // Innovations and Investments.- 2021. - № 4. - P. 298-302.]
 22. Жеглова, Ю. Г. Методика оценки проектных решений ограждений котлованов / Ю. Г. Жеглова, Б. П. Титаренко // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2020. – Т. 47, № 1. – С. 86-92. – DOI 10.21822/2073-6185-2020-47-1-86-92. [Zheglova, Yu. G. Methodology of evaluation of design solutions of excavation fences / Yu. G. Zheglova, B. P. Titarenko // Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical Sciences.- 2020. - T. 47, № 1. - P. 86-92. - DOI 10.21822/2073-6185-2020-47-1-86-92.]
 23. Жеглова, Ю. Г. Анализ проектных решений ограждений котлованов / Ю. Г. Жеглова, Б. П. Титаренко // Автоматизация. Современные технологии. – 2020. – Т. 74, № 9. – С. 390-393. [Zheglova, Yu. G. Analysis of the design solutions of the excavation fences / Yu. G. Zheglova, B. P. Titarenko // Automation. Modern Technologies. - 2020.- T. 74, № 9. - P. 390-393.]
 24. Могучев С.Б. Строительный контроль с использованием облака точек и информационной модели здания Инженерный вестник Дона / С.Б Могучев // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 6(90). – С. 580-589. [Moguchev, S.B. Construction control using point cloud and building information model Engineering Bulletin of Don / S.B. Moguchev // Engineering Bulletin of Don. - 2022. - № 6(90). - P. 580-589.]
 25. Шулятьев, О. А. Экспериментальные и численные исследования изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива при устройстве стены в грунте траншейного типа / О. А. Шулятьев, Д. К. Минаков // Вестник НИЦ Строительство. – 2018. – № 2(17). – С. 118-135. [Shulyatyev, O. A. Experimental and numerical studies of stress-strain state changes of the soil mass at the diaphragm wall construction / O. A. Shulyatyev, D. K. Minakov // Vestnik SIC Stroitel. - 2018. - № 2(17). - P. 118-135.]

26. Анализ результатов геотехнического мониторинга башни "Лахта Центр" / В. И. Травуш, О. А. Шулятьев, С. О. Шулятьев [и др.] // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2019. – № 2. – С. 15-21. [Analysis of the results of geotechnical monitoring of the tower "Lakhta Center" / V. I. Travush, O. A. Shulyatyev, S. O. Shulyatyev [et al.] // Foundations, Foundations and Soil Mechanics. - 2019. - № 2. - P. 15-21.]
27. Шулятьев О.А., Минаков Д.К. Технологические осадки при устройстве стены в грунте траншейного типа // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 41–50. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.05. [Shulyatiev, O.A.; Minakov, D.K. Technological precipitation during the construction of a trench-type diaphragm wall (in Russian) // Vestnik of PNIPU. Construction and Architecture. - 2017. - T. 8, № 3. - P. 41-50. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.05]
28. Cui, Z., Li, Q. and Wang, J. (2019) "Mechanical performance of composite retaining and protection structure for super large and deep foundation excavations", Journal of Civil Engineering and Management, 25(5), P. 431-440. doi: 10.3846/jcem.2019.9873.
29. Saeed Askarian, Ali Fakher, Design of deep urban excavations using life cycle cost in comparison with acceptable risk and conventional method, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 112, 2021, 103868, ISSN 0886-7798, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103868>.
30. Yubing Yang, Caiyuan Chen, Chao Liu, Longtian Huang, Wei Chen, Nengyou Lin, Jie Cui, Wandong Xie, Performance of a deep excavation and the influence on adjacent piles: A case history in karst region covered by clay and sand, Underground Space, Volume 8, 2023, Pages 45-60, ISSN 2467-9674, <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2022.03.004>.
31. Bangke Ren, Yi Shen, Tengeng Zhao, Xiaojun Li, Deformation monitoring and remote analysis of ultra-deep underground space excavation, Underground Space, Volume 8, 2023, Pages 30-44, ISSN 2467-9674, <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2022.04.005>.
32. Acar M. C. , Kekül A. Comparative analysis of an anchored retaining wall system in a deep foundation excavation: A case study of Sivas Cultural Center Building in Türkiye. Turkish Journal of Engineering. 2023; 7(3): 227-235. DOI: 10.31127/tuje.1103007
33. Yong Tan, Hehua Zhu, Fangle Peng, Kjell Karlsrud, Bin Wei, Characterization of semi-top-down excavation for subway station in Shanghai soft ground, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 68, 2017, Pages 244-261, ISSN 0886-7798, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.05.028>.
34. Y.P. Dong, H.J. Burd, G.T. Houlsby, Finite element parametric study of the performance of a deep excavation, Soils and Foundations, Volume 58, Issue 3, 2018, Pages 729-743, ISSN 0038-0806, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.03.006>.

Информация об авторах

Дания Мансуровна Нуриева, доцент, кандидат технических наук, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация.

E-mail: danm_n@mail.ru

Иван Владиславович Агафонов, инженер, АО "НЕФТЕХИМПРОЕКТ", г. Казань, Российская Федерация

E-mail: ivanagafonov.work@gmail.com

Information about the authors

Nurieva M. Daniya, associate professor, candidate of technical sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: danm_n@mail.ru

Ivan V. Agafonov, engineer, JS «NEFTEKHIMPROEKT», Kazan, Russian Federation

E-mail: ivanagafonov.work@gmail.com