

ГРУЗИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

КУШИТАШВИЛИ ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ ЗАЛОЖЕНИЯ ГОРОДСКИХ
ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

05.15.11. - Физические процессы горного производства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**дисертации, представленной на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

**Тбилиси
2006**

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА В ГРУЗИНСКОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Научный руководитель – докт. техн. наук, проф. Гуджабидзе И. К.

Официальные оппоненты: докт. техн. наук, проф. Махарадзе Л. И.

докт. техн. наук, проф. Чурадзе Т. К.

Защита диссертации состоится 26 декабря 2006 года, в 13-часов на заседании диссертационного совета №ТО5.15С№3 Грузинского технического университета

Адрес: Тбилиси, ул. Костава 77, III корпус, аудитория 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Грузинского технического университета

Автореферат разослан 24 ноября 2006 г.

**Учёный секретарь диссертационного
совета докт. техн. наук.**

Джавахишвили Т. Л.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В настоящее время в связи с высокими темпами развития городского строительства все острее ощущается дефицит земельных участков, вследствие чего становится необходимым интенсивное освоение подземного пространства для размещения сооружений различного назначения.

Освоение подземного пространства явилось новым этапом в градостроительстве. Это дало возможность планировать современные города не только по горизонтали, но и по вертикали, используя ресурсы подземного пространства, размещая многие жизненно важные объекты и сооружения (транспортные, канализационные и коллекторные тоннели, гаражи, автостоянки, склады, магазины и др.) под землей, и тем самым сократить проблему дефицита городской территории.

Особое место в освоении подземного пространства современных городов, как по значимости, так и по масштабам строительства, занимают метрополитены - скоростные, городские неувличные железные дороги.

Важнейшую роль при проектировании сети и выборе способа строительства городских подземных сооружений играет глубина их заложения от поверхности земли. Малоизученность взаимного влияния надземных и подземных сооружений приводит к тому, что при проектировании, в одних случаях берётся необоснованный запас глубины заложения подземных сооружений, вследствие чего ежегодно в среднем перерасходуется около 36% капитальных вложений. В других случаях из-за недооценки степени этого влияния и необоснованного снижения глубины заложения, затраты на поддержание и ремонт сооружений увеличиваются на 25%, а часто последнее приводит к катастрофическим явлениям. Как в отечественной, так и зарубежной практике строительства городских подземных сооружений в последние годы имели место случаи, когда механические процессы в породных массивах завершались катастрофическим разрушением надземных и подземных сооружений. Так, разрушена обделка станции "Глдани" (в настоящее время «ст. Ахметели») и деформированы основания жилых домов на линии Делиси-Важа Пшавела при строительстве метрополитена в г. Тбилиси в 1988г. Существенные деформации претерпело здание государственной библиотеки в г. Москве. Катастрофическое разрушение надземных сооружений произошло в г. Сеуле в 1988 г. при строительстве подземного сооружения метрополитена и скоростной транспортной подземной магистрали, а в г. Токио - в конце 1990 г. В этом, 2006 году, в Барселоне в подземном городском сооружении обвалилась обделка, которая вывела из строя железнодорожные пути. В результате этого произошло крушение поезда, повлекшее за собой человеческие жертвы.

Учитывая вышеизложенное, а также все более возрастающие объемы подземного строительства, тема диссертационной работы, посвященная изучению механических процессов породных массивов, в условиях взаимовлияния подземных и надземных сооружений, и определению оптимальной глубины заложения городских подземных сооружений, является актуальной.

Целью работы является изучение особенностей взаимного влияния городских надземных и подземных сооружений для обоснования оптимальной глубины заложения последних, обеспечивающей их устойчивость при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах.

Основная идея работы заключается в установлении основной закономерности изменения полных затрат на строительство и эксплуатацию городских подземных сооружений в зависимости от глубины их заложения.

Научные положения, разработанные лично диссертантом, **и новизна:**
- В условиях взаимовлияния надземных и подземных сооружений установлена зависимость полных затрат на строительство и эксплуатацию подземных сооружений от глубины их заложения. Она имеет вид мелко-рациональной функции, с резко выраженным минимумом.

- Выбор глубины заложения городских подземных сооружений должен производиться из условий равновесных состояний системы "обделка-породный целик-фундамент", соответствующих минимуму капитальных и эксплуатационных затрат.

- В условиях взаимного влияния надземного и подземного сооружений неблагоприятным вариантом их взаимного расположения является, когда фундаменты надземного сооружения расположены над подземными сооружениями. Для подземного сооружения неблагоприятным является также вариант, когда фундаменты надземного сооружения расположены в боковых частях массива на ширине подземного сооружения.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются натурными исследованиями. Об этом свидетельствует хорошая сходимость результатов теоретических расчётов с замерами, полученными в натуральных условиях:

- абсолютных величин смещений вмещающих пород (измерялись на реперных станциях);
- нагрузок на обделку (на 60 динамометрах);
- размеров областей разрушения пород и формы контуров предельного равновесия (изучались на 20 экспериментальных участках);
- согласования прогнозной оценки устойчивости подземных сооружений с их фактическим состоянием;
- положительных результатов опытно-промышленного внедрения рекомендаций и средств управления устойчивостью подземных сооружений в условиях влияния надземных сооружений;
- расхождений расчётных и замерных величин, которые не превышают 19%.

Значение работы. Научное значение работы заключается:

- в установлении закономерностей взаимного механического влияния надземных и подземных сооружений;

- в обосновании и классификации основных геомеханических ситуаций, характеризующих типы механического взаимодействия надземных и подземных сооружений, в зависимости от взаимного расположения областей их влияния;

- в обосновании и разработке метода определения оптимальной глубины заложения подземных сооружений.

Практическая ценность работы состоит в разработке методов и средств строительства городских подземных сооружений и метода оптимального проектирования глубины заложения, позволяющих снизить затраты на строительство и эксплуатацию.

Реализация выводов и рекомендаций работы. "Метод определения оптимальной глубины заложения городских подземных сооружений и методы и средства строительства подземных городских сооружений" приняты к внедрению институтом "Кавгипротранс" и использованы в проектах на строящемся участке продления метрополитена в г. Тбилиси до жилых массивов Глдани и Варкетили. Реальный экономический эффект на 1 м выработки составил 1108 усл.ед.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на:

- V республиканской научно-технической конференции молодых учёных и специалистов горной промышленности Грузии (Тбилиси, 1986г.),
- XXV республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава (Тбилиси, 1988 г.),
- всесоюзном семинаре "Аналитические методы и применение ЭВМ в механике горных пород" (Новосибирск, 1991г.),
- научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Грузинского технического университета (Тбилиси, 1993г.),

- научном семинаре и расширенном заседании кафедры "Разработки месторождений полезных ископаемых и подземного строительства" Грузинского технического университета (Тбилиси, 2005 г.),
- научном семинаре при диссертационном совете горно-геологического факультета Грузинского технического университета (Тбилиси, 2006 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 4 работы и получены одно авторское и одно патентное свидетельства.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 141 наименований и изложена на 145 страницах, включая 7 таблиц и 61 рисунок.

Содержание работы

Хорошим примером эффективного использования подземного пространства являются сложные сети подземных сооружений разного назначения, сооружаемых во всём мире, без которых трудно представить нормальную жизнь современных городов.

В развитых странах мира подземное пространство используется более эффективно, чем у нас. Большими масштабами сооружаются сложные многоэтажные подземные сооружения комплексного назначения. Среди городских подземных сооружений особое место занимают метрополитены, подземные гаражи, автостоянки и автомагистрали. В настоящее время в этой области в мире создано и реализовано много оригинальных проектов.

Особое место среди городских подземных сооружений занимают метрополитены, являющиеся наиболее удобным и массовым видом транспорта. При проектировании трассы метрополитенов, как правило, предпочтение отдаётся проектам, позволяющим не нарушать ритмическую жизнь города при строительстве, т.е. проектам, использующим горный способ строительства. Важнейшую роль при проектировании сети и выборе способа строительства городских подземных сооружений играет глубина их заложения от поверхности земли. Снижение глубины заложения и приближение выработок к дневной поверхности способствуют сокращению протяженности как трассы, так и вспомогательных и основных выработок. Кроме того, расположение подземных сооружений на небольшой глубине делает их более удобными в эксплуатации.

Надо отметить, что станции, среди всех подземных сооружений метрополитена, выделяются размерами и относятся к подземным сооружениям большого поперечного сечения, глубина заложения которых от поверхности земли определяет степень их взаимного влияния с надземными сооружениями. Поэтому при изучении закономерностей этого взаимовлияния особое внимание надо обращать на станции метрополитенов.

Учитывая тенденции уменьшения глубины заложения подземных сооружений, особое значение приобретает информация о степени их взаимовлияния с надземными сооружениями, поскольку в результате этого влияния могут разрушаться как первые, так и вторые.

Малоизученность механических процессов в этих условиях, а порой и полное отсутствие такой информации, часто вынуждает проектировщиков допускать многократные запасы при выборе конструкции обделки и глубины заложения станции метрополитенов.

Как в Грузии, так и других странах содружества, широкое распространение получила усиленная трёхсводчатая конструкция станций метрополитена с монолитной железобетонной обделкой, которые в большинстве случаев строятся на глубине 50-60 м от поверхности земли. Как показывает зарубежная практика строительства городских подземных сооружений, необходимо существенное упрощение конструкции станций и уменьшение глубины

их заложения. В современных западных технологиях строительства при значительном уменьшении глубины заложения подземных сооружений, с целью предотвращения деформаций поверхности земли или фундаментов и оснований зданий и сооружений, предусмотрены дополнительные защитные мероприятия, которые, как правило, заключаются в проведении работ по упрочнению и армировке предохраняемых областей массива.

Современные методы расчётов подземных сооружений можно найти в монографиях Б.З.Амусина, Л.А.Джапаридзе, И.В. Баклашова, Б.А.Картозия, Н.С. Булычева, А.Г. Оловянного, Н.Н.Фотиевой и других исследователей. Теоретические основы методов расчёта, учитывающие близость земной поверхности, когда поверхность земли свободна от внешних воздействий, даны в работах И.Г.Армановича, А.М.Гольдмана, А.Д.Динника, Г.Н.Савина, Д.И.Шермана и др. С.Г.Гутманом получено решение задачи, когда над выработкой на поверхности земли действует нагрузка, вызванная весом сооружений.

Наиболее обоснованным методом расчётов городских подземных сооружений является метод, разработанный И.К. Гуджабидзе, согласно которому оптимальное место заложения подземного сооружения должно устанавливаться с учётом минимальной безопасной глубины H_{\min} заложения, определяемой из условий совместной работы трёхкомпонентной системы "крепь-массив-фундамент", обеспечивающей устойчивое состояние как надземного, так и подземного сооружения. Но при внедрении современных технологий, связанных с дополнительными мероприятиями по упрочнению предохраняемых областей массива и способствующих искусственному снижению глубины заложения, предложенный им способ оптимизации утрачивает корректность из-за отсутствия минимальности затрат в этих условиях.

Анализ существующих методов расчётов, показывает, что эти методы страдают низким уровнем разработанности, чем и ограничивается их применение на практике.

Существующие экспериментальные методы отечественной практики дают возможность изучения механических процессов в породных массивах вблизи выработок, однако не дают возможности получения полной информации о механизме взаимного влияния надземных и подземных сооружений.

Обзор и анализ существующих методов изучения напряженно-деформированного состояния грузонесущих элементов в условиях взаимного влияния надземных и подземных сооружений показал, что необходимо дальнейшее совершенствование этих методов. Современные методы должны базироваться на закономерностях совместного деформирования трёхкомпонентной системы "обделка-породный массив-основание" и учитывать неоднородность и анизотропность породного массива. Существующий метод оптимизации глубины заложения подземных сооружений разработан для узкого круга задач и не даёт возможности получения эффективных технических решений сохранения требований о минимальности капитальных и эксплуатационных затрат.

Целью натуральных исследований явилось изучение механических процессов, реализуемых в обделке и породном массиве вокруг подземного сооружения до поверхности земли, и установление качественных и количественных характеристик этих процессов.

Достижение этой цели планировалось путём проведения натуральных экспериментов по изучению:

- деформаций в горных породах вокруг односводчатой станции метрополитена;
- напряженно-деформированного состояния монолитной обделки односводчатой станции;
- нагрузок на крепь вспомогательных выработок и обделку станций;
- смещений горных пород от контура выработки до поверхности земли;
- физического состояния горных пород и обделки.

Для проведения натурных исследований был выбран один из наиболее крупных подземных объектов строительства метрополитена в г. Тбилиси - односводчатая станция "Важа-Пшавела".

Использование испытанных и достаточно хорошо разработанных в горном деле методов, изучение напряженного состояния крепей горной выработки и деформаций вмещающего массива для городских подземных сооружений становятся малоэффективными. Дело в том, что существующие методы экспериментальных исследований дают возможность достаточно полно изучить механические процессы в породных массивах, на расстоянии 5-8 м от контура горной выработки (поскольку зона влияния последней дальше этих размеров не распространяется). Для станций метрополитена из-за больших размеров указанный диапазон недостаточен (зона влияния этих сооружений иногда достигает 30-40 м), поэтому становится необходимым изучение деформаций всей толщины горных пород до поверхности земли. Кроме того, из-за больших размеров станций метрополитена, как правило, они сооружаются в несколько этапов, следовательно, методы экспериментальных исследований должны учитывать поэтапность строительства.

На основе вышеизложенного нами были разработаны методика и приборы для изучения механических процессов вокруг станции метрополитена как в обделке станции, так и в окружающем её массиве, до самой поверхности земли. Разработанная методика проведения экспериментов учитывает технологию строительства станции метрополитена.

Согласно разработанной методике исследования, все измеряемые станции, которые находятся над и под землей, должны располагаться в одной плоскости по вертикали, что и обеспечивает получение полной картины изучаемых механических процессов. На рис. 1 показана конструкция комплексной наблюдательной станции с расположением оборудования в поперечном сечении подземного сооружения и на поверхности земли, дающая возможность получения нужной информации с учётом поэтапности строительства.

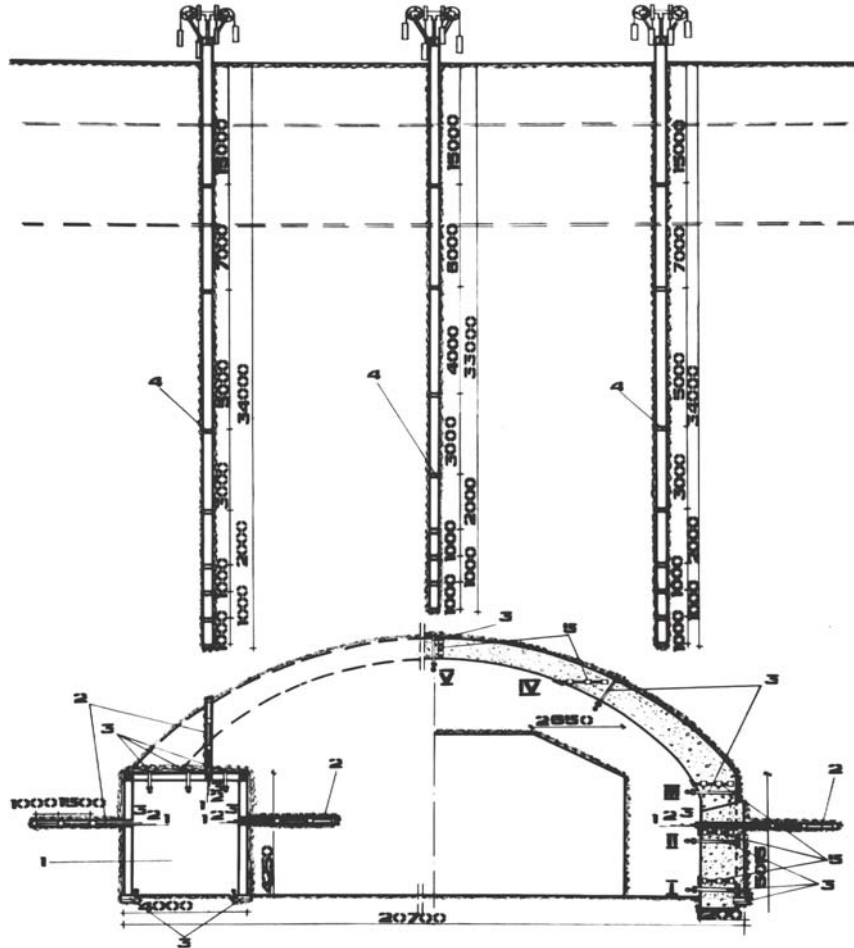
Натурными исследованиями на строительстве станции "Важа-Пшавела" метрополитена г. Тбилиси установлено, что максимальные вертикальные смещения пород кровли свода станций достигают 80 мм; с удалением от контура смещения уменьшаются, и на глубине 20 м не превышают 5 мм. Максимальные сжимающие напряжения в обделке станции не превышают 3,0 МПа, а абсолютные значения макс. растягивающих напряжений незначительны. Эти исследования позволяют заключить, что глубина заложения односводчатых станций проектируется с большим запасом, и при существующей технологии строительства без применения дополнительных мероприятий её можно уменьшить до 25 м.

Очевидно, что результаты полученных экспериментальных исследований имеют локальный характер. Они справедливы лишь для экспериментальных участков. Для дальнейшего уточнения и обобщения закономерностей взаимовлияния надземных и подземных сооружений, а также для выявления новых, позволяющих более обоснованно выбирать глубину заложения, необходимо проведение ряда теоретических исследований.

При теоретических исследованиях механических процессов, реализуемых в породных массивах, широко применяются как аналитические, так и численные методы расчётов. В отдельных случаях весьма полезным становится одновременное применение как аналитических, так и численных методов расчёта в пределах одной расчётной схемы. Выбор того или иного метода расчёта зависит от геомеханической ситуации строительства.

Классификация геомеханических ситуаций впервые была разработана проф. И.К. Гуджабидзе с участием автора, согласно которой в изучаемых условиях могут иметь место три основные геомеханические ситуации (рис. 2.):

1. Если области Γ_1 (область влияния надземного объекта) и Γ_2 (область влияния подземного сооружения) перекрывают друг друга таким образом, что для всех



Станции: 1-боковые выработки; 2-глубинные реперы; 3-механические динамометры типа ДР-1 и 45Д-135; 4-репер СР-1; 5-динамометр ТД-1.

точек границы $l_1 = l_1(\Theta)$ (контур границы области влияния надземного сооружения), выполняется условие $l_1(\Theta) \geq R(\Theta)$, а для точек границы $l_2 = l_2(\Theta)$ (контур границы, области влияния подземного сооружения), в пределах $\Theta_1 \leq \Theta \leq \Theta_2$, существует значение Θ , при котором $l_2(\Theta) \geq h(\Theta)$, то надземный объект находится под механическим влиянием подземного сооружения.

2. Если области Γ_1 и Γ_2 перекрывают друг друга таким образом, что для точек границы $l_2 = l_2(\Theta)$ в пределах $\Theta_1 \leq \Theta \leq \Theta_2$ выполняется условие $l_2(\Theta) \geq h(\Theta)$, а для точек границы $l_1 = l_1(\Theta)$ существует значение Θ , при котором $l_1(\Theta) \leq R(\Theta)$, то подземное сооружение находится под механическим влиянием надземного объекта.

3. Если области Γ_1 и Γ_2 пересекают друг друга таким образом, что для точек границы $l_1 = l_1(\Theta)$ существует значение Θ , при котором выполняется условие $l_1(\Theta) \leq R(\Theta)$, а для точек границы $l_2 = l_2(\Theta)$ в пределах $\Theta_1 \leq \Theta \leq \Theta_2$ существует значение Θ , при котором $l_2(\Theta) \geq h(\Theta)$, то надземный объект и подземное сооружение находятся в ситуации взаимного механического влияния.

Как показывают расчёты, при строительстве комплекса подземных сооружений глубина заложения предопределяется наиболее крупным подземным сооружением, а в условиях строительства подземных сооружений метрополитенов таковыми являются станции. Размеры области влияния таких сооружений в несколько раз превосходят размеры влияния надземных сооружений. Поэтому в таких условиях часто реализуется первая геомеханическая ситуация, а происходящие в породных массивах механические процессы, в основном, предопределяются строительством станций метрополитена, поэтому этим сооружениям необходимо уделять наибольшее внимание. Вторая геомеханическая ситуация характерна для подземных сооружений малых размеров (коллекторные и коммунальные тоннели и др).

Третья геомеханическая ситуация может реализоваться при использовании технологии строительства, позволяющей чрезмерное снижение глубины заложения, что также было учтено в теоретических исследованиях.

Учитывая указанную особенность в изучаемых условиях, расчёты большинства подземных сооружений можно производить как плоских конструкций. Для выделения этих случаев и обоснования расчётной схемы и метода расчёта сначала были исследованы объёмное напряжённое состояния подземного сооружения методом МКЭ по программе "ОПРТ-3", разработанной в Грузинском техническом университете с участием автора.

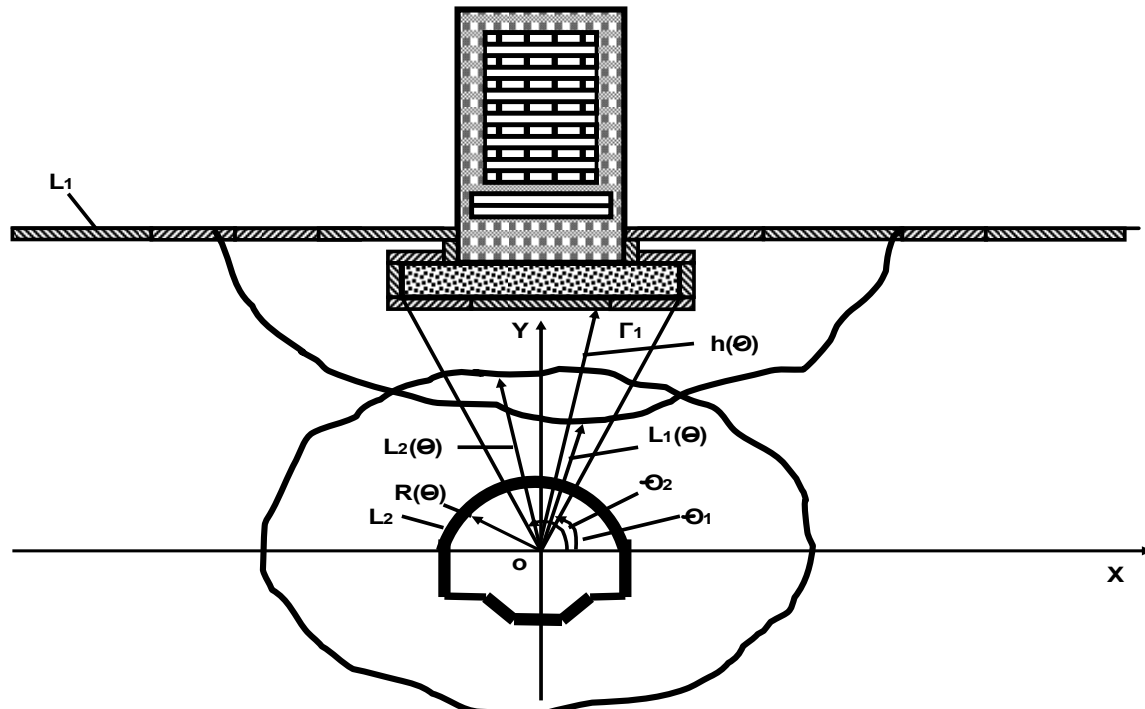


Рис. 2. Расчётная схема к определению основных геомеханических ситуаций.

Результаты этих исследований показали, что погрешность расчётов рассмотрения плоской задачи вместо объёмной, не превышает 10-15%, что вполне соответствует требуемой точности расчёта подземных сооружений. В пределах плоской задачи можно успешно применить как

аналитические, так и численные методы расчётов. На первом этапе для выявления основных особенностей взаимного влияния надземных и подземных сооружений, расчёты были произведены методом граничных элементов (МГЭ) (рис. 3). На втором этапе методом конечных элементов (МКЭ) были произведены детальные расчёты реальных объектов с учётом геологических и технических условий их строительства (рис.4).

В условиях взаимного влияния надземных и подземных сооружений неблагоприятным вариантом их взаимного расположения является вариант, когда фундаменты надземного сооружения расположены над подземными сооружениями. Для подземного сооружения неблагоприятным является вариант, когда фундаменты надземного сооружения расположены в боковых частях массива на расстоянии её ширины от стенок подземного

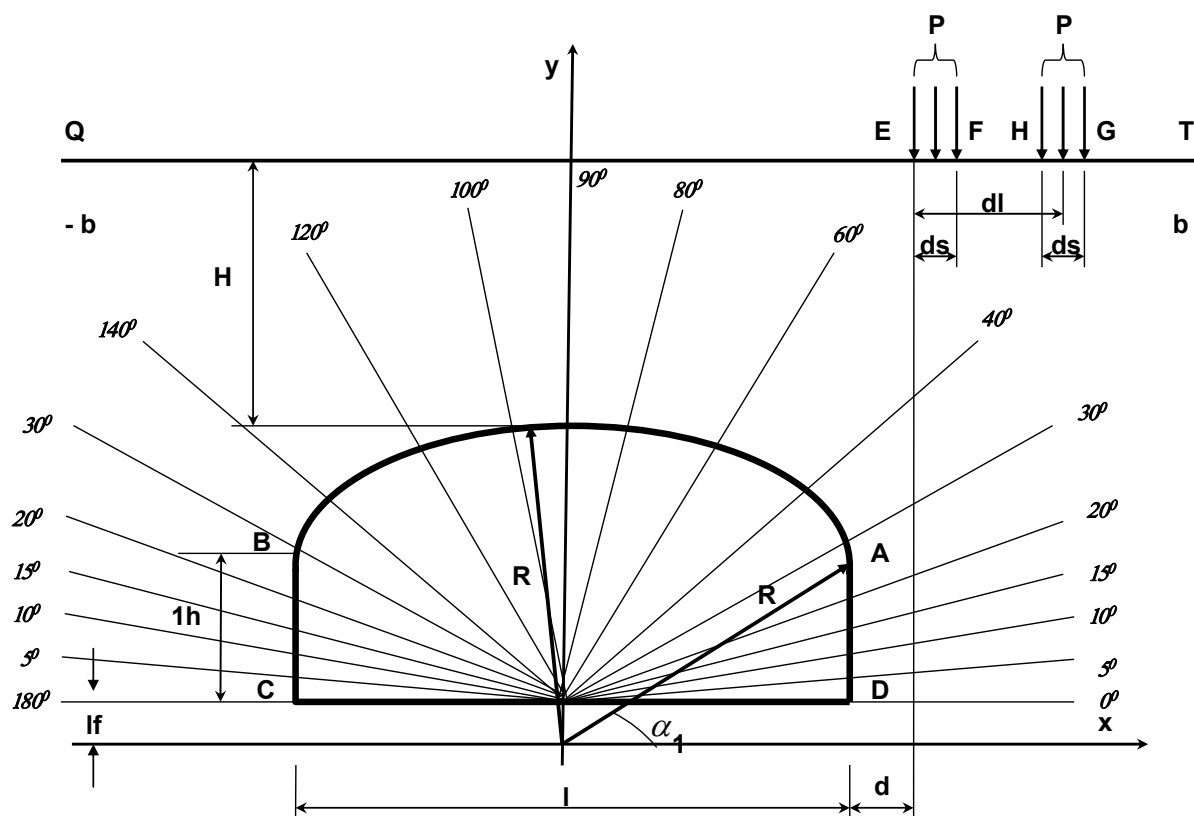


Рис.3. Расчётная схема по МГЭ.

сооружения. В ситуации, когда нагрузка, вызванная надземным сооружением, действует в вертикальных плоскостях стен подземного сооружения, последнее находится в более благоприятных условиях.

В результате теоретических исследований установлено, что неоднородность и слоистость горных пород существенно влияют на механические процессы, реализуемые в исследуемых условиях. При наличии слоя слабых пород наиболее благоприятным расположением с точки зрения устойчивости подземного сооружения, является расположение его ниже этого слоя. В этом случае компоненты напряжений и деформаций вокруг подземного сооружения распределяются более равномерно и уменьшаются размеры области влияния в направлении оснований надземных

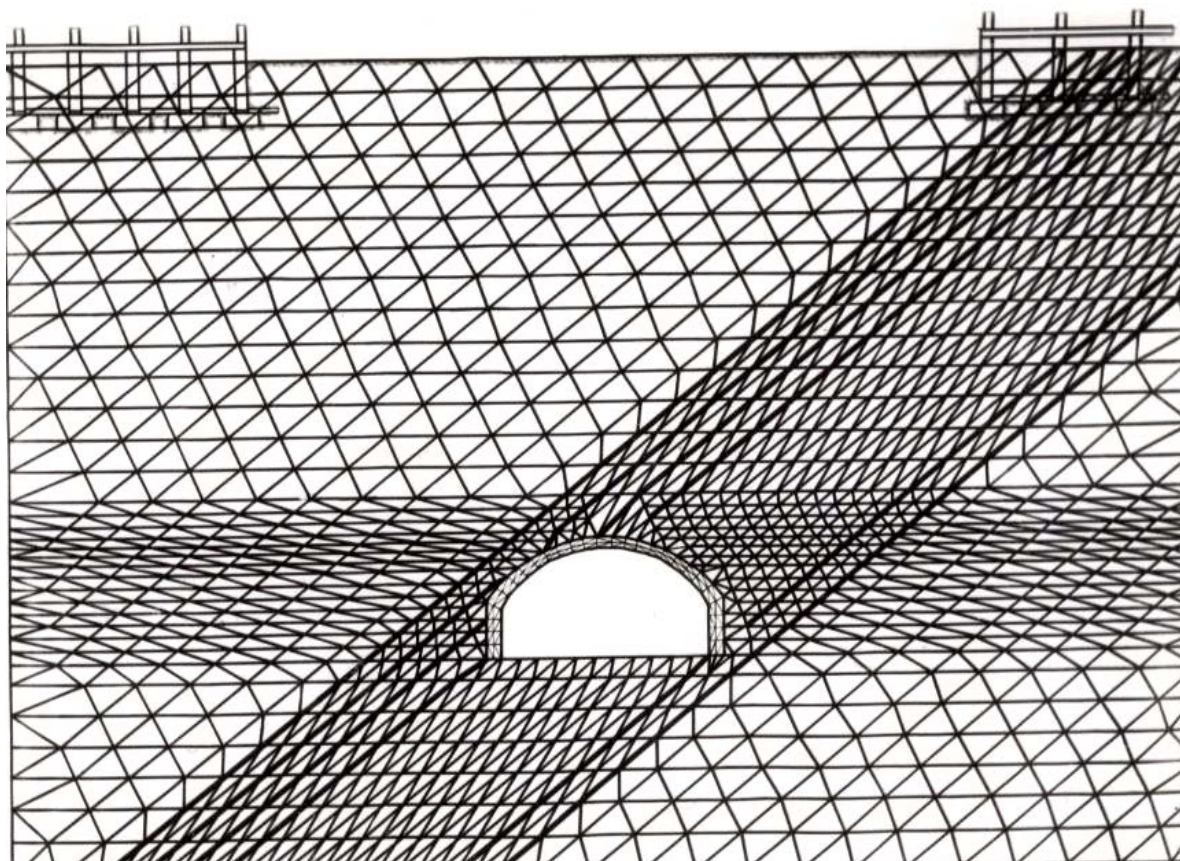


Рис.4. Расчётная схема по МКЭ.

сооружений на 35-40%, и улучшаются условия работы грузонесущих элементов. Аналогичный эффект наблюдается также при уменьшении времени ввода в работу обделки подземных сооружений.

Эти методы расчёта городских подземных сооружений дают возможность выделить из всех значений глубины заложения городских подземных сооружений технически допустимые варианты, т.е. значения H_i , удовлетворяющие предельным условиям

$$u = [u] \quad (1) \quad \tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c \quad (2)$$

и обеспечивающие устойчивое состояние как наземных, так и подземных сооружений. Оптимальное значение $H_{\text{опт}}$ выбирается из технически допустимых вариантов, по критериям минимальности капитальных и эксплуатационных затрат, обеспечивающим максимальную экономию.

В настоящее время критерием экономической эффективности капитальных вложений является минимум приведенных затрат.

Приведенные затраты по каждому варианту определяются суммой капитальных вложений и эксплуатационных затрат, приведенных к одинаковой размерности. В соответствии с нормативом эффективности

$$\{ c_i + E_n K_i \} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $c_i = c_i^0 + c_i^1$;

c_i^0 - себестоимость строительно-монтажных работ;

c_i^1 - эксплуатационные расходы;

E_H - нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности, определяемый по формуле

$$E_H = \frac{c_1 - c_i}{K_i - K_1},$$

где $c_i - K_i$ - капитальные вложения по сравнительным вариантам.

При сравнении разных вариантов расположения подземных сооружений метрополитена в зависимости от глубины H_i заложения, параметры, входящие в формулу (3), будут функциями H_i . Тогда условия минимальности приведенных затрат примут вид:

$$\frac{d(c_i + E_H K_i)}{dH} = 0; \quad \frac{d^2(c_i + E_H K_i)}{dH^2} > 0.$$

Себестоимость строительно-монтажных работ можно выразить следующим образом:

$$c_i = \sum_{i=1}^n V_i c_i^p, \quad (4)$$

где: n -количество видов работ, включаемых в сопоставление;

V_i -объём работ одного вида на данном объекте;

c_i^p -себестоимость единицы работ одного вида.

При изменении глубины заложения H_i виды работ, включаемых в сопоставление, представляют собой работы по строительству лишь тех подземных сооружений, объемы которых меняются с изменением H_i .

Существующие подземные сооружения метрополитена можно разделить на следующие четыре основные группы: 1-станции метрополитена; 2-перегонные тоннели; 3-эскалаторные тоннели и 4-вспомогательные сооружения (стволы, подходные тоннели, эл.депо и другие).

Следовательно, получим:

$$c_i^0 = V_1 c_1^p + V_2 c_2^p = L_1 c_1^p + L_2 c_2^p, \quad (5)$$

где c_1^p -себестоимость строительства 1м подземного сооружения;

L_1 -глубина ствола;

L_2 -длина эскалаторного тоннеля.

В формуле (5) L_1 и L_2 всегда можно выразить через H_i . Так $L_1 = H_i$, а $L_2 = (H_i - h) / \sin 30^\circ = 2(H_i - h)$, где h -глубина заложения надземного вестибюля.

С учётом сказанного формула (4) примет вид:

$$c_i^0 = H_i(c_1^p + 2c_2^p) - 2hc_2^p; \quad (6)$$

после подставления соответствующих формул и преобразования (6) примет вид:

$$\frac{AH_i + B}{cH_i + D} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где $c = -2c_{\text{эск}}$; $D = K_1 - N \cdot c_i^{\text{ДВ}} + 2hc_{\text{эск}}$; $A = k_1(c_1^p + 2c_2^p + 2m) - 2c_1 c_{\text{эск}}$;

$B = -(k_1 - Nc_i^{\text{ДВ}} + 2hc_{\text{эск}})[2h(c_2^p + m) - c_i^*] + (Nc_i^{\text{ДВ}} - 2hc_{\text{эск}})[2h(c_2^p + m) - c_i^* + c_1]$.

Анализируя полученное выражение (7), можно сказать, что использование данной формулы даст возможность определения оптимальной глубины заложения односводчатой станции метрополитена, при которой будет гарантировано безопасное состояние как надземных, так и

подземных сооружений при минимальных затратах на строительство и эксплуатацию данного объекта.

Исходя из вышеотмеченного и принимая во внимание условия строительства в г.Тбилиси, а также влияние надземных и подземных сооружений (рис. 2) и специфику строительства односводчатой станции метрополитена на основе формулы (7), подставляя в нее соответствующие значения входящих параметров, были проведены расчеты для определения полных затрат (Π_i) при разной глубине заложения H_i подземных сооружений.

На рис.5, а приведены графики зависимости полных затрат (Π_i) от глубины заложения H_i , когда массив горных пород представлен однородными породами. Из диаграммы видно, что с уменьшением глубины заложения подземных сооружений почти линейно уменьшаются полные затраты. С приближением к фундаментам надземных сооружений увеличивается отклонение от линейности.

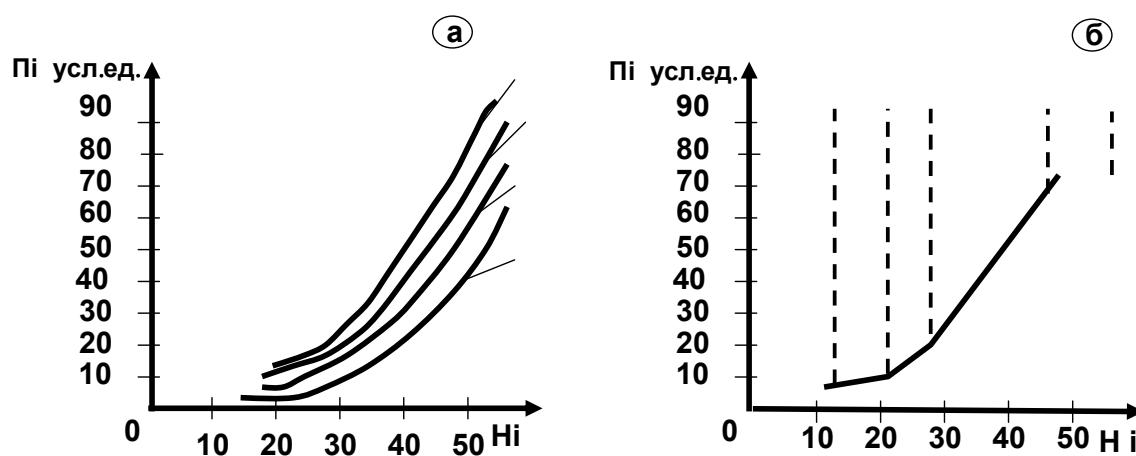


Рис.5. График полных затрат в однородных (а) и неоднородных породах (б) в зависимости от глубины заложения.

В случае неоднородного массива (рис.5, б) эта зависимость имеет более сложную конфигурацию. Как видно из диаграммы, зависимость $\Pi_i = f(H_i)$ на границах слоев пород меняется и с уменьшением глубины затраты уменьшаются.

Зависимости, приведенные на рис.4, а, б, построены для больших значений заложения подземных сооружений H_i . Для этих условий силы взаимовлияния надземных и подземных сооружений малы, поэтому зависимости не имеют характерных точек минимума и оптимальная глубина заложения является их минимальным значением. Для получения зависимости $\Pi_i = f(H_i)$ для более малых значений H_i , необходимо отказаться от обычных способов строительства и широко применить специальные методы и средства, позволяющие повышать несущую способность вмещающих массивов в условиях интенсивного взаимовлияния надземных и подземных сооружений, с целью сохранения их устойчивого состояния. Очевидно, что мероприятия будут связаны с дополнительными затратами.

В этой связи были изучены методы строительства городских подземных сооружений, которые направлены на повышение устойчивости породного массива вокруг подземных сооружений. Эти методы учитывают упрочнение массива путём использования:

- горизонтальных цементационных скважин в виде возведения защитного экрана, способствующего обеспечивать восприятие нагрузки, возникающей от действия веса пород и надземного сооружения;
- защитного зонта, включающего в себя буровые сваи, наклоненные под разными углами и заложенные на различной глубине;
- анкерной крепи. Это пространственная система стержней, закрепленных в породном массиве, вмещающем выработку.

Основываясь на этих методах, нами были получены зависимости $\Pi_i = f(H_i)$ для небольших значений H_i , в условиях интенсивного взаимовлияния надземных и подземных сооружений. Расчёты были произведены с учётом реальных условий строительства односводчатой станции метрополитена ("Важа-Пшавела") в г. Тбилиси.

На рис. 6, а, б, в, г приведены результаты расчётов первого варианта вспомогательных мероприятий (участок А-Б). Из диаграммы хорошо видно, что затраты Π_i в зависимости от уменьшения H_i сокращаются, и до глубины 10-12 м имеют схожие очертания. На рис.6, а, б, приведен график зависимости $\Pi_i=f(H_i)$ в породах с крепостью $f=1,5$ (а);2(б), в соответствии с этим оптимальное расположение станции и минимальные затраты в этих условиях меняются: в частности, $H_{\text{опт}}$ при крепости пород $f=1,5$ составляет 10м, а затраты $\Pi_{\text{min}}=2,2$ млн. усл.ед. При крепости пород $f=2$ соответственно $H_{\text{опт}}=9,3$ м; $\Pi_{\text{min}}=2,0$ млн. усл.ед.

Диаграммы (в) и (г) соответствуют зависимости $\Pi_i=f(H_i)$, когда массив горных пород представлен породами крепостью $f=5$ и $f=10$; в этом случае соответственно оптимальные глубины заложения $H_{\text{опт}}=9,0$ м; 8,2м; а затраты $\Pi_{\text{min}}=1,4$ млн. усл.ед. и 0,9 мил. усл.ед.

На рис. 7, а, б, в, г приведены результаты расчётов при использовании второго варианта вспомогательных мероприятий (защитного зонта, участок А-Б), при разной крепости пород. Из диаграмм видно, что затраты Π_i с уменьшением H_i сокращаются, но в зоне дополнительных работ общие затраты, в сравнении с первым вариантом, растут. Что касается оптимальной глубины заложения, в соответствии с крепостью пород, изменяется приблизительно в тех же пределах, как при первом варианте. В этом случае в соответствии с крепостью пород ($f=1,5;2;5;10$), $H_{\text{опт}}=10,1; 9,6; 9,2; 8,6$ м, а $\Pi_{\text{min}}=2,85; 2,32; 1,67$ и 1,2 млн. усл.ед.

Результаты расчётов при использовании защитного зонта для различных геомеханических вариантов, соответствующих реальным условиям строительства односводчатой станции метрополитена ("Важа-Пшавела"), приведены на рис.8. Из полученных диаграмм хорошо видно, что резкое изменение градиента диаграмм $\Pi_i=f(H_i)$ совпадает на геологическом разрезе с границами слоев. При этом при переходе от слоя крепких пород к слабым градиент увеличивается, и наоборот. На рис.8 в случае зависимости $\Pi_i=f(H_i)$ от H в пределах 60 м - 30 м градиент функции не меняется. Изменения начинаются от $H=30$ м до $H=11,8$ м - после начала дополнительных работ, когда градиент начинает уменьшаться, что объясняется возрастанием затрат строительства в результате проведения вспомогательных мероприятий. В этом случае оптимальное значение $H_{\text{опт}}=8,6$ м, а затраты $\Pi_{\text{min}}=1,0$ млн. усл. ед.

На основе анализа полученных результатов можно заключить, что при строительстве подземных сооружений метрополитенов с применением разных методов упрочнения пород в условиях г. Тбилиси оптимальное значение заложения, при котором общие затраты Π минимальны ($\Pi_{\text{min}}=1,6$ млн. усл. ед.), составляет $H_{\text{опт}}=H_{\text{min}}=9,1$ м, а наиболее эффективным методом строительства является упрочнение пород с использованием защитного зонта.

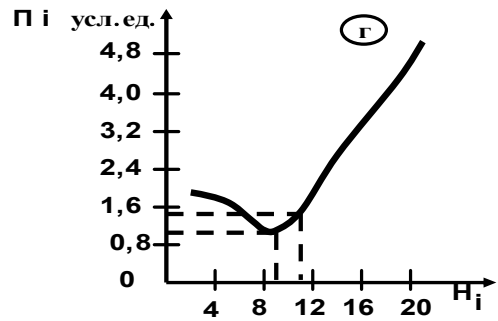
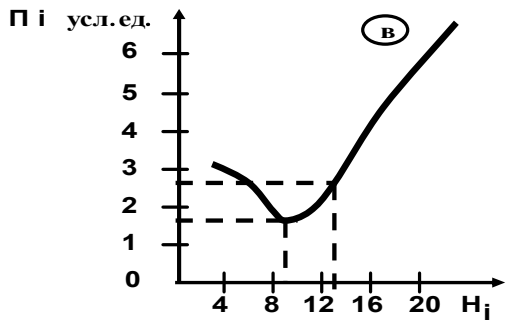
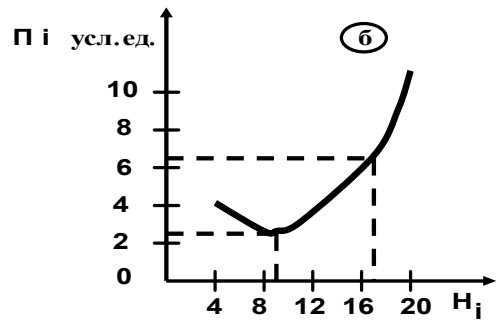
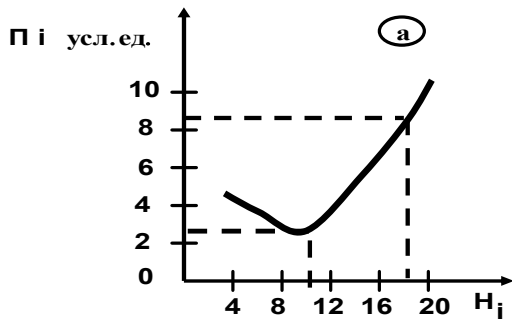
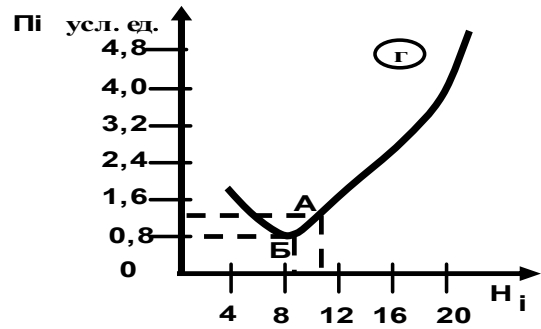
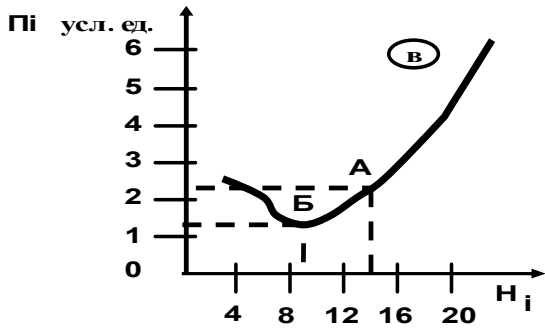
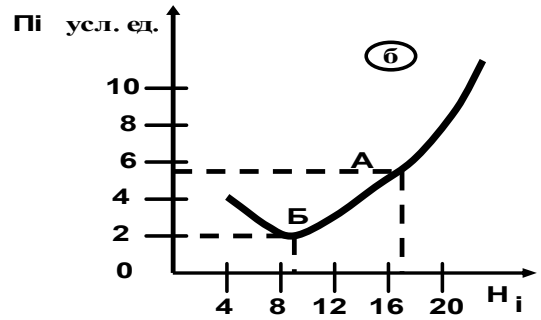
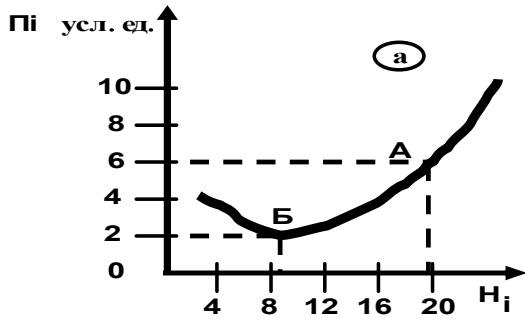


Рис. 7. График H_i при использовании защитного зонта в породах

с крепостью $f=1,5;2;5;10$.

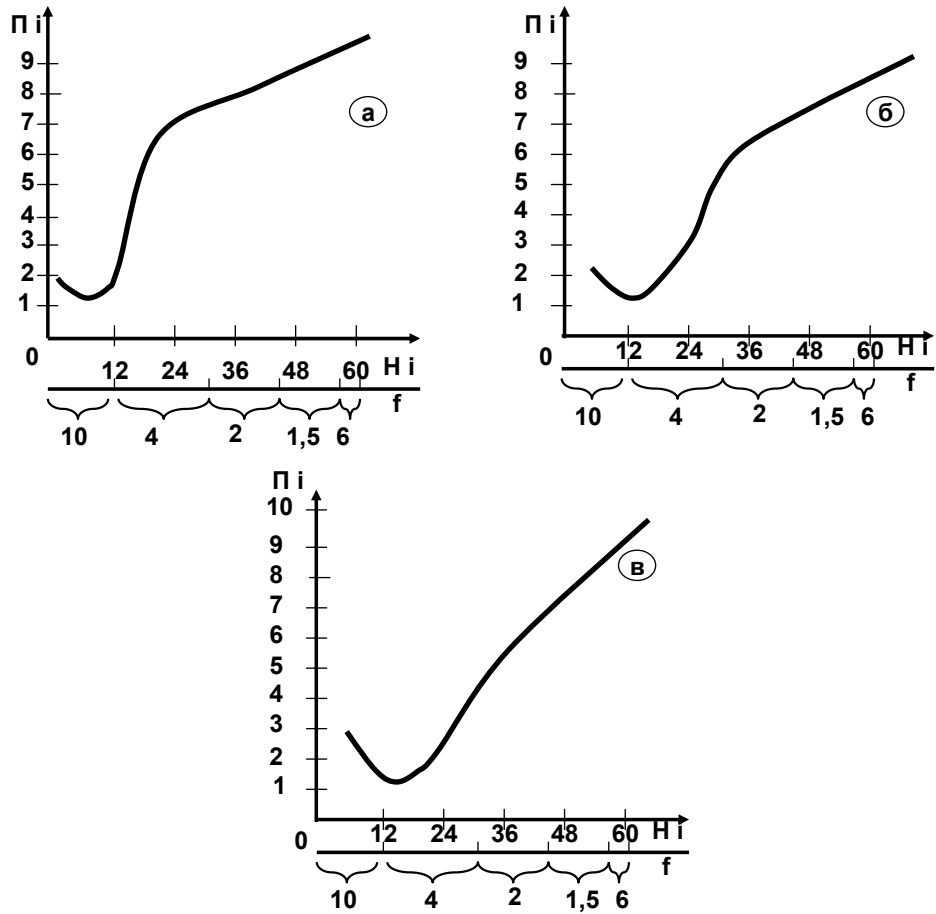


Рис.8. График полных затрат в зависимости от глубины заложения в разных геомеханических вариантах при использовании защитного зонта.

Эффективность функционирования метрополитена с учётом непосредственного эффекта от сокращения затрат времени транспортировки населения и существующего эффекта от снижения его транспортной усталости определяется из выражения:

$$\mathcal{E} = K_{\Pi}(T_1^I - T_2^I) \times m_0, \quad (8)$$

где K_{Π} - количество поездок населения в метрополитене в год;

$T_1^I - T_2^I$ - разность затрат времени при разных вариантах заглубления трассы метрополитена, в часах;

m_0 - оценка затрат времени населением, усл.ед./ч.

В изучаемых условиях можно записать:

$$T_1^I - T_2^I = \frac{\Delta L^*}{V^*},$$

где V^* - скорость движения эскалатора;

$$\Delta L^* = (H_{\max} - H_i) \times 0,5$$

с учётом кап. вложений эл. энергии K_i , также являющейся функцией H_i , получим:

$$\mathcal{E} = \frac{0,5K_{II}M_0}{V^*} (H_{\max} - H_i) \text{ млн усл.ед.} \quad (9)$$

Используя последнее выражение и подставляя в него соответствующие значения параметров, были проведены расчёты, в результате которых установлено, что эффективность эксплуатации метрополитена с уменьшением глубины заложения повышается (рис.9).

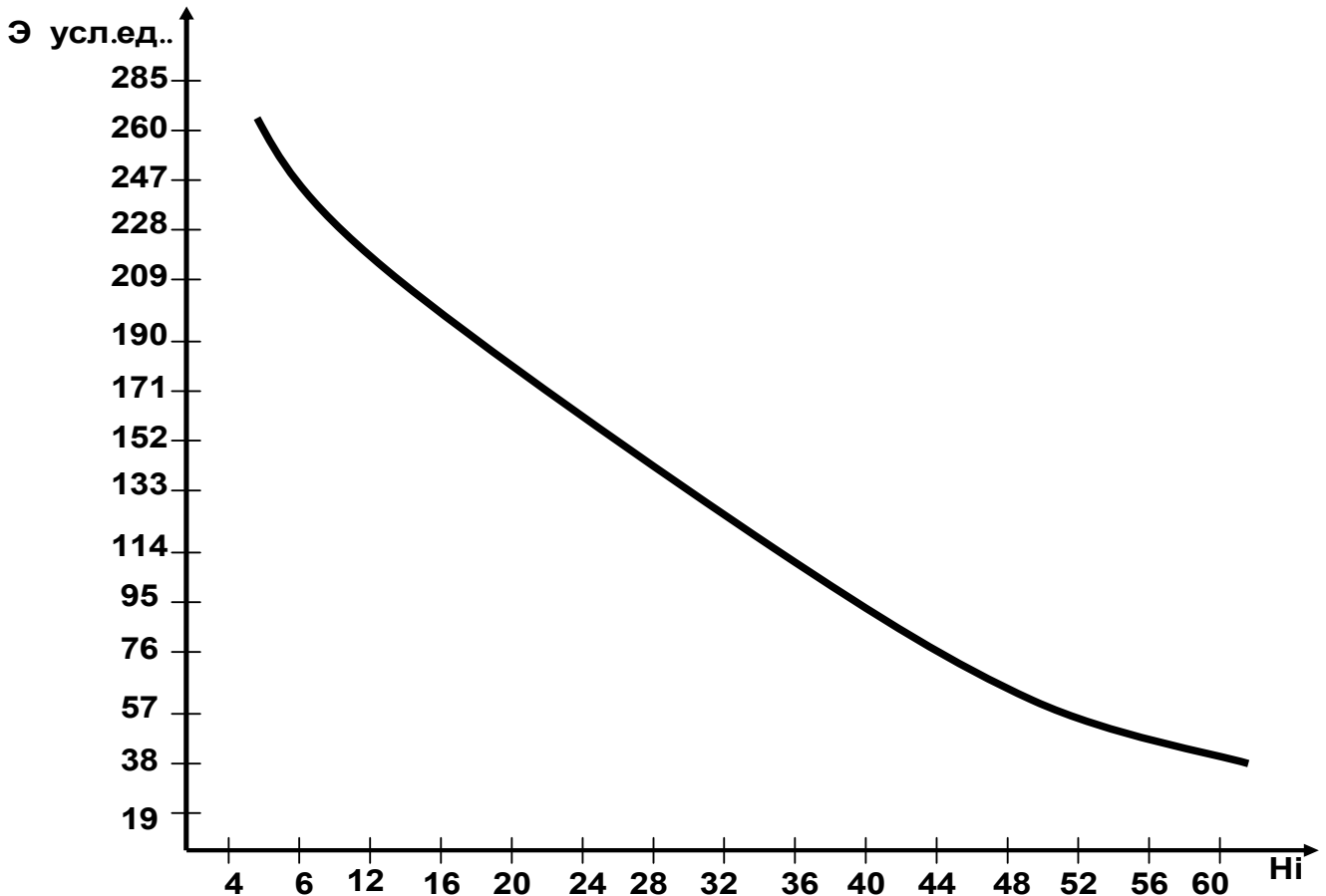


Рис.9. График эффективности эксплуатации метрополитена. в зависимости от глубины заложения.

На кафедре "Разработки месторождений полезных ископаемых и строительства подземных сооружений" Грузинского технического университета с участием автора был разработан способ сооружения выработки, целью которого явилось повышение устойчивости сооружений и получение максимальной прибыли в условиях влияния надземных сооружений для выработок мелкого заложения. Способ разработан для условий строительства подземных сооружений метрополитена в г. Тбилиси и аналогичных условий.

На рис. 10. а, б, в, г приводятся зависимости полных затрат Π_i от глубины заложения подземных сооружений в однородных породах для разработанного способа. На рис.9, а, б приведены результаты расчётов зависимости Π_i - H_i , когда массив горных пород представлен породами крепостью $f=1,5;2$.

В этом случае оптимальные значения $H_{\text{опт}}=8,5; 7,0$ м, а затраты $\Pi_{\text{min}}=558000; 500000$ усл.ед..
 Диаграммы в, г рис.10 соответствуют случаю, когда, крепость пород составляет $f=5; 10$. В этих случаях $H_{\text{опт}}=6,8; 6,1$ м, а затраты $\Pi_{\text{min}}=346000; 245000$ усл. ед.

На основе сравнения полученных результатов с другими распространенными в практике методами подземного строительства можно сказать, что использование разработанного метода даёт возможность более эффективно уменьшить глубину заложения и на 20-25% сократить полные затраты.

На таком подходе основывается принцип опережающей стабилизации кровли выработок. Соблюдение параметров способа позволяет предотвратить возможность обрушения кровли при раскрытии сечения выработки и обеспечить устойчивость сооружений при минимальных материальных и трудовых затратах, при их сооружении на малых глубинах заложения, и существенно снизить расходы, по сравнению с другими известными методами.

Прямые забойные затраты консолидации пород на участке длиной 25 м составили 3542 усл.ед. Прямые забойные затраты на 1 м готовой выработки по предложенному методу составили $3542:25=142$ усл.ед.

Полные затраты на 1 м выработки

$$C_2 = 824 + 142 = 966 \text{ усл.ед.}$$

Реальный экономический эффект на 1 м выработки

$$C_3 = C_1 = C_2 = 2074 - 966 = 1108 \text{ усл.ед.}$$

Предложенным способом было сооружено 40 м соединительной выработки, следовательно, полный экономический эффект составил

$$40 \times 1108 = 44320 \text{ усл.ед.}$$

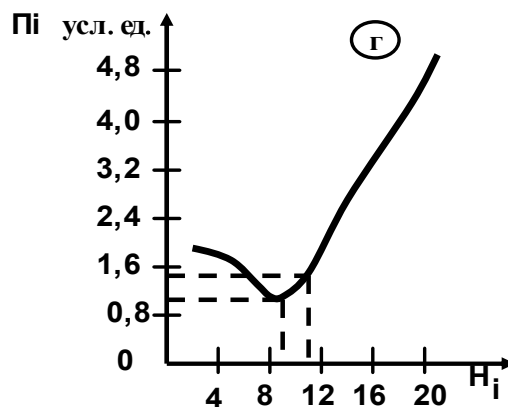
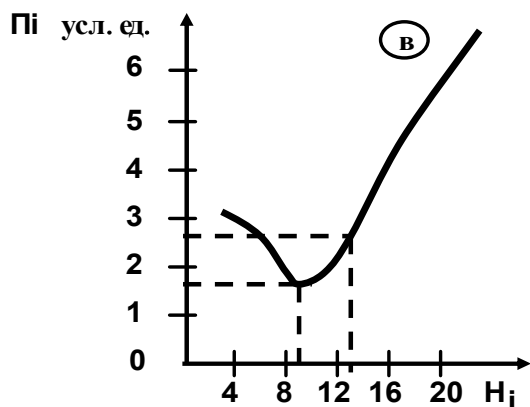
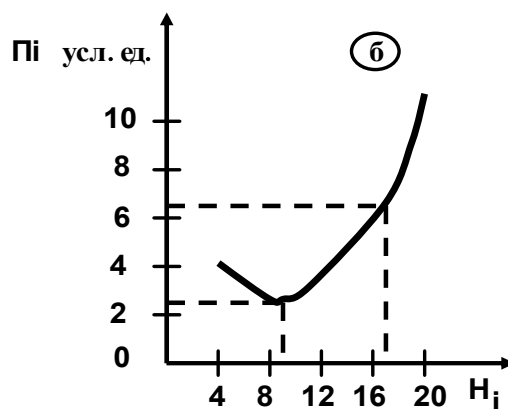
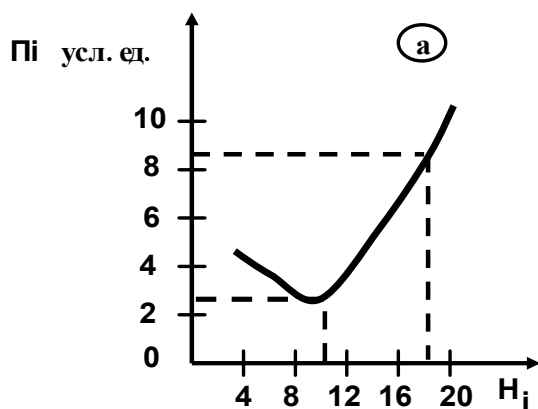


Рис.10. График Π_i зависимости N_i при использовании разработанного метода.

З а к л ю ч е н и е

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи по обоснованию оптимальной глубины заложения городских подземных сооружений, обеспечивающей устойчивость как надземных, так и подземных сооружений при минимальных затратах.

Основные выводы, научные и практические результаты, полученные в работе, заключаются в следующем:

1. Установлено, что малоизученность закономерностей взаимного влияния надземных и подземных сооружений и принимаемых при расчётах необоснованных запасов глубины заложения в одних случаях ежегодно приводит к перерасходу капитальных вложений на 36%. В других случаях недооценка степени взаимовлияния приводит к увеличению затрат на поддержание и ремонт сооружений на 25%. В отдельных случаях имеются катастрофические разрушения как надземных, так и подземных сооружений.
2. Разработаны методика и приборы для проведения натурных экспериментальных исследований механических процессов, реализуемых в породных массивах в условиях взаимовлияния наземных и подземных сооружений, позволяющие комплексно изучать деформации массива горных пород до поверхности земли, напряжения в обделке подземного сооружения и нагрузки на крепь с учётом плотности строительства.
3. Натурными исследованиями на строительстве станции "Важа-Пшавела" метрополитена г. Тбилиси установлено, что максимальные вертикальные смещения пород кровли свода станции достигают 80 мм; с удалением от контура смещения уменьшаются, и на глубине 20 м не превышают 5 мм. Максимальные сжимающие напряжения в обделке станции не превышают 3,0 МПа, а абсолютные значения макс. растягивающих напряжений незначительны. Эти исследования позволяют заключить, что глубина заложения односводчатых станций проектируется с большим запасом и при существующей технологии строительства без применения дополнительных мероприятий её можно уменьшить до 25 м.
4. Разработана методика расчёта напряженно-деформированного состояния грузонесущих элементов в условиях взаимовлияния надземных и подземных сооружений, основанная на методе конечных элементов, который позволяет учитывать неоднородность и анизотропность свойств массивов горных пород. Достоверность результатов теоретических исследований подтверждается хорошей сходимостью с соответствующими данными, полученными в научных экспериментах.
5. В условиях взаимного влияния надземных и подземных сооружений неблагоприятным вариантом их взаимного расположения является вариант, когда фундаменты наземного сооружения расположены над подземными сооружениями;
6. Для подземного сооружения неблагоприятным является вариант, когда фундаменты наземного сооружения расположены в боковых частях массива на расстоянии его ширины от стенок подземного сооружения.
7. В ситуации, когда нагрузка, вызванная надземным сооружением, действует в вертикальных плоскостях стен подземного сооружения, последнее находится в более благоприятных условиях.
8. В результате теоретических исследований установлено, что неоднородность и слоистость горных пород существенно влияют на механические процессы, реализуемые в

исследуемых условиях. При наличии слоя слабых пород наиболее благоприятным расположением с точки зрения устойчивости подземного сооружения, является расположение его ниже этого слоя. В этом случае компоненты напряжений и деформаций вокруг подземного сооружения распределяются более равномерно и уменьшаются размеры области влияния в направлении оснований надземных сооружений на 35-40%, улучшаются условия работы грузонесущих элементов. Аналогичный эффект наблюдается также при уменьшении времени ввода в работу обделки подземных сооружений.

9. Выбор глубины заложения городских подземных сооружений должен производиться из условий равновесных состояний системы "обделка-породный целик-фундамент", соответствующих минимуму капитальных и эксплуатационных затрат. Разработана методика определения оптимальной глубины заложения городских подземных сооружений. Определены значения оптимальных глубин заложения и соответствующих им полных затрат на строительство и эксплуатацию подземных сооружений для наиболее распространенных методов строительства. Так, при применении метода опережающих скважин $H_{\text{опт}}=9,1$ м, $P_{\text{мин}}=1,6$ млн усл.ед.; при применении способа защитного зонта $H_{\text{опт}}=9,5$ м, $P_{\text{мин}}=2,01$ млн усл.ед.
10. Разработан метод строительства подземных сооружений с применением опережающего защитного экрана, позволяющий существенно снизить значения $H_{\text{опт}}$ и $P_{\text{мин}}$ и обеспечить устойчивость состояния сооружения. Определены значения глубины заложений и соответствующих им полных затрат на строительство и эксплуатацию: $H_{\text{опт}}=7,1$ м, $P_{\text{мин}}=412,2$ млн усл.ед. Разработанный метод внедрен при строительстве подземных сооружений метрополитена на участке продления Глдани-Варкетили. Полный экономический эффект от внедрения составил 44320 усл.ед.

**Основные положения диссертационной работы
опубликованы в следующих работах:**

1. Гуджабидзе И.К., Кушиташвили В.А. Методика и приборы для изучения механических процессов вокруг подземных сооружений метрополитена Труды ГПИ им. В.И. Ленина, Тбилиси, 1989, с 41-42 .
2. Гуджабидзе И.К., Кушиташвили В.А. и др. Исследование напряженно-деформированного состояния обделок односводчатых станций метрополитена в г. Тбилиси и окружающего горного массива с определением зон влияния. Отчёт Тбилисского городского центра научно-технического творчества. 1990, с. 133.
3. Кушиташвили В.А. и др. А.с. 1694914 СССР, Способ сооружения горной выработки. 1991.
4. Гуджабидзе И.К., Кушиташвили В.А. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния грузонесущих элементов Материалы научно-технической конф. профес.-препод. состава ГТУ. Тбилиси, 1993, с 50-51.
5. Кушиташвили В.А. Скважинный глубинный репер. Патент №200641 РФ. 1993, с 3.
6. Гуджабидзе И.К., Кушиташвили В.А., Гудавадзе Л.Г. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния грузонесущих элементов городских подземных сооружений. Горный журнал, Москва, 2006, с. 52-53.