

На правах рукописи

Лонжид Энхтур



**ПРОГНОЗ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ МАССИВА
ГОРНЫХ ПОРОД И ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ
ПЕРЕСЕЧЕНИИ ТОННЕЛЯМИ МЕТРО НЕОДНОРОДНЫХ
СЛОИСТЫХ ПОРОД С РАЗЛИЧНОЙ ЛИТОЛОГИЕЙ**

*Специальность 25.00.16 – Горнопромышленная и
нефтегазопромысловая геология,
геофизика, маркшейдерское дело и
геометрия недр*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор

Гусев Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

Макаров Александр Борисович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ), кафедра горного дела им. Н.И. Куличихина, профессор;

Шустов Денис Владимирович

кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем, доцент.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Защита диссертации состоится 19 декабря 2018 г. в 17 ч.00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.08 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. №1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 19 октября 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СКАЧКОВА
Мария Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований.

Метрополитен - это комплекс сложных и дорогостоящих инженерных сооружений и систем пассажирского транспорта, без которых сложно регулировать систему общественного транспорта города. В последнее время пропускная способность дорожной сети города Улан-Батора не справляется с увеличением транспортных потоков, вследствие строительства гражданских, промышленных зданий и сооружений, реконструкции исторической части города и прироста населения, связанного с развитием города. Поэтому для снижения транспортной нагрузки запроектировано строительство метро и в ближайшем времени начнут строиться объекты метрополитена в городе Улан-Батор. Согласно проекту метро будет включать наземную и подземную части. Подземная часть линий метрополитена пройдет под центральными улицами с высокой плотностью городской застройки, инженерными сетями инфраструктур и коммуникаций. В зону влияния строительства тоннелей метро и подземных станций попадают жилые кварталы, инженерные сооружения, железная дорога и автотранспортные магистрали. Это требует определенных мер защиты окружающей среды, зданий и сооружений, которые определяются на основе прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности и сравнением их с допустимыми показателями деформаций для подрабатываемых объектов.

Трасса проектируемых тоннелей метро будет проходить в сложных горно-геологических условиях неоднородной слоистости и переслаивания четвертичных, неогеновых и коренных пород. В этих условиях определение границ зоны влияния строительства тоннелей и прогнозирование сдвижений и деформаций в пределах этой зоны является актуальной задачей.

В области применения теоретических методов к расчётам сдвижений и деформаций горных пород большой вклад внесли ученые С.Г. Авершин, А.Г. Акимов, А.А. Ильюшин, Ж.С. Ержанов, Н.И. Мухелишвили, В.Н. Земисев, Д.А. Казаковский, С.П. Колбенков, А.С. Космодамианский, Ю.А. Лиманов, С.Г. Лехницкий, Р.А. Муллер, Г.Н. Савин и другие. Большой вклад в разработку

геомеханических методов расчета массивов внесли Н.С. Булычев, С.А. Батугин, А.Г. Протосеня, А.К. Черников, К.В. Руппенейт, А.Б. Макаров, Г.А. Крупенников, Г.Л. Фисенко и другие. Также большой вклад в разработку современных методов расчета сдвижений при сооружении тоннелей внесли Е.М. Волохов, Е.А. Демешко, С.Г. Мандриков, В.Ф. Подаков, М.В. Долгих, А.Е. Журавлев, В.А. Ходош, В.П. Самарин, В.П. Хуцкий, С.Ю. Новоженин, В.И. Киреева и другие.

Цель работы.

Обоснование и разработка способа определения параметров зоны влияния сдвижений и деформаций горных пород вследствие строительства тоннелей в неоднородной геологической среде.

Идея работы заключается в определении закономерностей развития зоны влияния строительства тоннелей на основе результатов моделирования условий геологической неоднородности массива горных пород.

Задачи исследований:

- обобщение данных физико-механических свойств четвертичных отложений и коренных пород, полученных по геологоразведочным скважинам, пробуренным на территории г. Улан-Батор;
- изучение существующих методов прогноза сдвижений и деформаций массива горных пород и земной поверхности при строительстве тоннелей;
- математическое моделирование геомеханических процессов для горно-геологических условий города на основе численных методов;
- обоснование возможности использования методов механики сплошных сред к расчетам сдвижений и деформаций в горно-геологических условиях строительства тоннелей горным способом;
- определение зоны влияния строительства тоннеля по граничным углам, получаемым из результатов конечноэлементного моделирования;
- разработка инженерного метода расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций от строительства тоннелей в четвертичных, осадочных и коренных породах г. Улан-Батор.

Защищаемые научные положения:

1. Для выявления наиболее влияющих физико-механических показателей пород на развитие зоны сдвижения, вследствие проходки транспортных тоннелей, следует выполнить корреляционный и двухфакторный анализы результатов моделирования геомеханических процессов для каждого типа пород с учётом натурного опробования их физико-механических свойств по скважинам.

2. Границы зоны влияния сдвижения горных пород от проходки транспортных тоннелей должны устанавливаться с учётом раздельного влияния на граничные углы физико-механических свойств слоёв пород, залегающих над транспортными тоннелями вдоль трассы их проходки.

3. При проходке тоннелей через контакт между четвертичными отложениями и коренными породами, а также через контакт между четвертичными отложениями различной литологии параметры мульды сдвижения на земной поверхности изменяются в сторону их увеличения в пределах от вхождения тоннеля в зону подработки контакта до выхода из неё.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что наиболее влияющим фактором на параметры зоны влияния сдвижения горных пород на земную поверхность является модуль деформаций E (коэф. детерминации составил 58%), вторым влияющим фактором – сцепление C (коэф. детерминации составил 22%), а угол внутреннего трения и объёмный вес практически не оказывают влияние (коэф. детерминации составил 4-5%).

2. С учётом проведённого факторного анализа получена зависимость граничного угла от модуля деформаций полиномиального вида 2-го порядка с погрешностью определения граничного угла $\pm 0,5^\circ$ и зависимость граничного угла от модуля деформаций и сцепления полиномиального вида 1-го порядка с погрешностью определения граничного угла $\pm 0,9^\circ$.

3. Обоснован способ определения границ зоны влияния сдвижений от проходки транспортного тоннеля, согласно которому эту зону определяют в каждом слое пород над тоннелем раздельно, используя полученную зависимость граничного угла от модуля деформаций или от модуля деформаций и сцепления, при этом зона

влияния сдвижения в каждом последующем слое является продолжением зоны влияния предыдущего слоя.

4. Установлена зависимость размеров зоны расширения мульды сдвижения от степени различия физико-механических свойств пород, разделенных контактом, и ширины зоны вскрытия его поверхности проходкой тоннеля.

Методы исследований:

- аналитические методы теоретических решений механики сплошных сред;
- математическое моделирование геомеханических процессов вследствие проходки транспортных тоннелей горным способом на основе метода конечных элементов (МКЭ);
- методы математической статистики для обработки и обобщения результатов численного моделирования.

Практическое значение работы:

1. Полученная аналитическая зависимость граничных углов от физико-механических свойств горных пород позволяет идентифицировать зону влияния сдвижений от проходки тоннелей с учетом горно-геологических условий г. Улан-Батора.

2. Разработан адаптированный к условиям строительства тоннелей метро в г. Улан-Батор инженерный метод прогноза сдвижений и деформаций на основе расчетной методики применяемой для условий строительства Санкт-Петербургского метро.

3. Разработаны рекомендации по организации мониторинговых систем наблюдений за деформациями массива горных пород и земной поверхности для определения условий безопасного строительства подземных сооружений метро и контроля безопасной эксплуатации зданий и сооружений при их подработке вследствие строительства тоннелей метро.

Достоверность и обоснованность:

Научные положения и результаты работы подтверждаются большим объемом данных моделирования геомеханических процессов численными методами (создано более 250 моделей) и обработкой результатов моделирования методами математической статистики.

Апробация работы:

Результаты исследований докладывались на IX-й международной научно-практической конференции «Научные исследования и разработки молодых ученых» (г. Новосибирск, НГТУ, апрель, 2016 г.), представлен доклад на X международной конференции «Наука и технологии» (г. Лондон, Великобритания, апрель, 2018 г.) и на заседаниях кафедры маркшейдерского дела Горного университета.

Личный вклад автора заключается в постановке задач, создании и обработке данных численного моделирования геомеханических процессов при механизированной проходке тоннелей; обработке и анализе данных опробования физико-механических свойств пород по разведочным скважинам; обосновании функциональных зависимостей параметров мульды сдвига от физико-механических свойств пород массива в зоне влияния строительства тоннелей; разработке инженерного метода прогноза сдвижений и деформаций при проходке тоннелей метро.

Публикации:

Основное содержание работы отражено в 7 публикациях, в том числе 4 изданы в журналах, включённых в перечень ведущих рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки России и одна в журнале, индексируемом в международной базе данных WoS.

Объем и структура работы:

Диссертация изложена на 104 страницах машинописного текста, содержит 4 главы, введение, заключение, библиографический список из 91 наименований. В работе 32 рисунка и 12 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю профессору Гусеву В.Н. за поддержку и помощь в подготовке диссертации, доценту Волохову Е.М., ассистенту Киреевой В.И. и доценту Новоженину С.Ю. за поддержку и помощь в проведении исследований на объектах, а также профессорам и преподавателям МГУНТ Дондову Д., Очирбату П., Уранбайгаль Г. и ведущему инженеру-консультанту Монголии по инженерной геологии Должину С. за всестороннюю поддержку и помощь в получении геологических данных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертации, определены цель и задачи исследования, приведены защищаемые научные положения, изложены научная новизна, методика исследований и практическое значение работы.

В первой главе приведены актуальные проблемы, возникающие при строительстве метро и его проектировании, инженерно-геологическая изученность территории г. Улан-Батор, а также историческая и статистическая информация о развитии города.

Во второй главе приведены аналитико-эмпирические методы расчета определения основных параметров мульды сдвижений и метод конечных элементов для моделирования геомеханических процессов. Представлена методика определения зоны влияния строительства тоннелей метро на основе данных геомеханического моделирования, реализованного с помощью трехмерной компьютерной программы «PLAXIS 3D». Изложены результаты определения граничных углов для каждого типа пород, составляющих четвертичные, неогеновые и коренные отложения.

В третьей главе представлены результаты геомеханического моделирования, на основании которых установлена связь между граничными углами и физико-механическими свойствами горных пород. Показано определение границ зоны влияния строительства тоннелей с учетом слоистого строения массива горных пород.

В четвертой главе изложены мониторинговые системы наблюдений за сдвижением и деформациями массива горных пород и поверхности, обеспечивающие оперативное решение вопросов снижения вредного влияния строительства подземных сооружений метро на подрабатываемые здания и сооружения.

Основные результаты исследований отражены в следующих **защищаемых положениях:**

1. Для выявления наиболее влияющих физико-механических показателей пород на развитие зоны сдвижения, вследствие проходки транспортных тоннелей, следует выполнить

корреляционный и двухфакторный анализы результатов моделирования геомеханических процессов для каждого типа пород с учётом натурного опробования их физико-механических свойств по скважинам.

Угловые параметры процесса сдвижения в различных горных породах являются главными факторами для прогнозной оценки зоны влияния от горных выработок и подземных сооружений. Для выявления наиболее влияющих физико-механических показателей пород на развитие зоны влияния сдвижения, вследствие проходки транспортных тоннелей метро в горно-геологических условиях г. Улан-Батор, были проведены исследования геомеханических процессов от проходки тоннелей тоннелепроходческим механизированным комплексом (ТПМК) на основе метода конечных элементов, реализованного с помощью трехмерной программы PLAXIS 3D. Поведение грунтового массива моделировалось на основе упруго-пластической модели с упрочнением грунта.

Методика определения зоны влияния строительства тоннеля метро основана на определении граничных углов по граничным значениям горизонтальных деформаций растяжения ($\epsilon_{тр}$) и наклонов ($i_{тр}$) в мульде сдвижения и выявлении наиболее влияющих физико-механических показателей пород на развитие зоны влияния сдвижения.

Указанные углы были получены путем моделирования геомеханических процессов, протекающих внутри каждого типа пород, по результатам которого с помощью факторного и корреляционного анализов были получены граничные углы как функция наиболее влияющих физико-механических свойств пород.

Обработка результатов геомеханического моделирования производилось следующим образом. Оседание любой точки модели и в том числе земной поверхности (рисунок 1) получены непосредственно по моделям. Наклоны и кривизна земной поверхности вычислялись по значениям оседаний на верхней плоскости моделей.

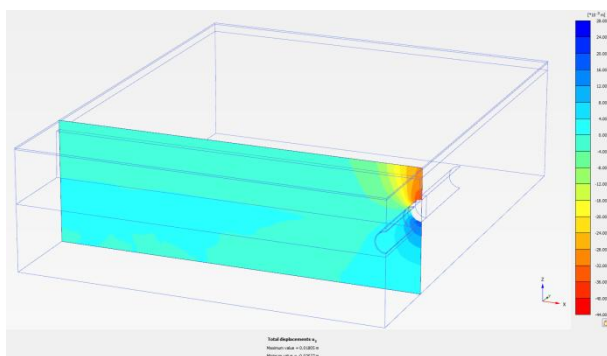


Рисунок 1 – Распределение оседаний, получаемых на модели

Используя значения оседаний из моделирования сдвижений и деформаций, были определены горизонтальные деформации растяжения и наклоны в мульде. Приняв в качестве критерия граничных точек мульды сдвижения $\varepsilon_{гр} = i_{гр} = 0.5 \cdot 10^{-3}$ были получены граничные углы φ_0 для различных типов пород из моделирования геомеханических процессов, протекающих в рассматриваемых типах пород. Анализ большого количества данных о распределении сдвижений и деформаций в различных типах пород, полученных по более 250 геомеханическим моделям, позволил определить граничные углы для каждого типа пород, составляющих четвертичные, осадочные и коренные отложения.

Таким образом, для каждого типа пород создавалась численная модель, при этом физико-механические свойства моделируемого типа породы брались из данных геологических изысканий. По получаемой на модели мульды сдвижения, для отдельно взятого типа породы, определялись граничные углы.

По полученным данным численного моделирования, на основе корреляционного анализа, было рассмотрено влияние каждого физико-механического показателя на величину граничного угла. Влияние оценивалось по типу корреляционной зависимости и коэффициенту корреляции. Для анализа были выведены следующие зависимости граничного угла (φ_0) от физико-механических свойств пород четвертичных, осадочных и коренных отложений:

- $\varphi_0 = f(E)$, где E – модуль деформации;

- $\varphi_0 = f(C)$, где C – сила сцепления;
- $\varphi_0 = f(\varphi)$, где φ – угол внутреннего трения;
- $\varphi_0 = f(\gamma_{об})$, где $\gamma_{об}$ – объемный вес.

Для аппроксимации этих зависимостей использовались различные типы функций. Как видно из таблицы 1 наиболее существенное влияние на величину граничного угла оказывает модуль деформаций (E), теснота связи в случае полиномиальной аппроксимирующей функции составила $R^2 = 0.872$.

Таблица 1 - Теснота связи граничного угла (φ_0) с физико-механическими показателями пород четвертичных отложений

Тип аппроксимирующей функции	Коэффициент детерминации (R^2)			
	Модуль деформации, E , (мПа)	Сцепление C , (кПа)	Угол внутреннего трения, φ (град.)	Объемный вес, $\gamma_{об}$ (г/см ³)
Линейная	0,318	0,019	0,052	0,031
Экспоненциальная	0,312	0,020	0,049	0,0329
Полиномиальная	0,872	0,023	0,055	0,049
Логарифмическая	0,422	0,004	0,054	0,032

Для решения вопроса, в какой степени на величину граничного угла оказывают влияние оставшиеся другие физико-механические показатели (таблица 1), был проведен двухфакторный дисперсионный анализ. Сначала оценивалось совместное влияние модуля деформаций в паре с остальными механическими показателями на величину граничного угла. Оценка воздействия или степень влияния факторов (физико-механических показателей) на исследуемый показатель (граничный угол φ_0) была сделана на основе определения коэффициентов детерминации (k_d) отдельно для рассматриваемых факторов влияния, поскольку эти коэффициенты являются квадратом корреляционного отношения, выраженного в процентах [4]:

- при оценке совместного влияние модуля деформации E (фактор А) и сцепления C (фактор В) на граничный угол φ_0 коэффициенты детерминации по факторам А и В соответственно составили: $k_{дА} = 57 \%$, $k_{дВ} = 22 \%$ при $N = 27$ (27 типов пород);

- при оценке совместного влияния модуля деформации E (фактор А) и угла внутреннего трения φ (фактор В) на граничный угол φ_0 коэффициенты детерминации по факторам А и В соответственно составили: $k_{дА}=58\%$, $k_{дВ}=5\%$ при $N = 27$;

- при оценке совместного влияния модуля деформации E (фактор А) и объёмного веса $\gamma_{об}$ (фактор В) на граничный угол φ_0 коэффициенты детерминации по факторам А и В соответственно составили: $k_{дА} = 57 \%$, $k_{дВ} = 4 \%$ при $N = 27$.

Двухфакторный анализ подтвердил выводы корреляционного анализа о том, что главным влияющим физико-механическим показателем на величину граничного угла φ_0 является модуль деформаций E (см. табл. 1 и $k_{дА} = 57 \%$ для E), вторым по значимости влияния является сцепление C ($k_{дВ} = 22 \%$ для C). Остальные из рассмотренных показателей, угол внутреннего трения и объёмный вес, практически не оказывают влияния на величину граничного угла, о чём свидетельствуют полученные коэффициенты детерминации ($k_{дВ} = 4 \%$ – 5%). Для подтверждения этого факта дополнительно был проведен двухфакторный дисперсионный анализ для определения совместного влияния на граничный угол сцепления в паре с оставшимися показателями – углом внутреннего трения и объёмным весом:

-при оценке совместного влияния на граничный угол φ_0 сцепления C (фактор А) и угла внутреннего трения φ (фактор В) были получены следующие коэффициенты детерминации: $k_{дА} = 23\%$, $k_{дВ} = 7\%$;

-при оценке совместного влияния на граничный угол φ_0 сцепления C (фактор А) и объёмного веса $\gamma_{об}$ (фактор В) были получены следующие коэффициенты детерминации: $k_{дА} = 23\%$, $k_{дВ} = 4\%$.

На основании проведенных анализов на предмет выявления наиболее влияющих факторов на величину граничного угла получены следующие аналитические выражения, отражающие взаимосвязь между этими факторами и граничным углом:

$$\varphi_0 = 0.02 \cdot E^2 - 1.28 \cdot E + 62.96; \quad (1)$$

$$\varphi_0 = 46.02 - 0.13 \cdot E - 0.04 \cdot C, \quad (2)$$

где φ_0 – граничный угол, град.; E – модуль деформаций, МПа; C – сцепление, кПа.

Средняя квадратическая ошибка (СКО) при использовании для прогноза уравнения (1) составила $m_1 = 0.5^\circ$, а при использовании уравнения (2) – $m_2 = 0.9^\circ$. Линейная СКО при известной угловой СКО зависит от величины граничного угла и глубины заложения тоннеля. При среднем граничном угле $\varphi_0 = 40.3^\circ$, полученном из численного моделирования, и глубине тоннеля, согласно проекту, $H_1 = 15$ м, линейная СКО определения положения границы мульды сдвижения при использовании формулой (1) составит $\Delta_1 = 0.30$ м, а при использовании формулой (2) – $\Delta_2 = 0.57$ м. При глубине заложения тоннеля $H_2 = 50$ м (мощность четвертичных отложений в рассматриваемых условиях достигает 40 – 50 м) линейная СКО определения положения границы мульды сдвижения составит при использовании формулой (1) $\Delta_{01} = 0.99$ м, при использовании формулой (2) $\Delta_{02} = 1.91$ м. Отсюда следует, что для прогноза положения границы мульды сдвижения в рассматриваемых условиях следует пользоваться уравнением (1). До глубины 15 - 17 м можно рекомендовать, наряду с уравнением (1), использовать для прогноза границы зоны влияния строительства тоннелей уравнение (2).

2. Границы зоны влияния сдвижения горных пород от проходки транспортных тоннелей должны устанавливаться с учётом раздельного влияния на граничные углы физико-механических свойств слоёв пород, залегающих над транспортными тоннелями вдоль трассы их проходки.

Согласно проекту строительства метро горным способом в г. Улан-Батор, проходка транспортных тоннелей будет осуществлена в слоистом массиве, сложенном неоднородными породами и отложениями, которые различаются по физико-механическим свойствам и геологическому возрасту. В пределах от поверхности до проектируемой глубины вдоль трассы транспортных тоннелей встречаются четвертичные отложения, которые включают в себя более 20 слоев, осадочные (неогеновые) отложения и коренные породы, отличающиеся геологическим возрастом и физико-механическими свойствами. Кроме того на различных

участках трассы тоннелей наблюдается варьирование пород по мощности слоев.

В практике используют угловые параметры процесса сдвижения для определения характерных элементов мульды сдвижения, к числу которых относится граница мульды или граница зоны влияния строительства тоннелей. Граница зоны влияния от проходки тоннеля определяется по граничным углам (рисунок 2).

На основании проведенных исследований было получено аналитическое выражение для определения граничных углов в зависимости от значения модуля деформаций, главного влияющего физико-механического показателя на величину граничного угла φ_0 , и сцепления, второго по значимости влияния (см. формулы (1) и (2)).

Используя генеральный набор граничных углов, определяемых по формулам (1) или (2) устанавливают зону влияния отдельно для каждого типа пород, начиная с самого нижнего, в котором пройдены тоннели. При этом зона влияния сдвижения нижележащего слоя породы является продолжением зоны влияния вышележащего слоя (рисунок 2). Таким образом зона влияния сдвижений на поверхности от проходки тоннелей получается как результат сложения зон влияния в отдельных слоях, залегающих над тоннелями.

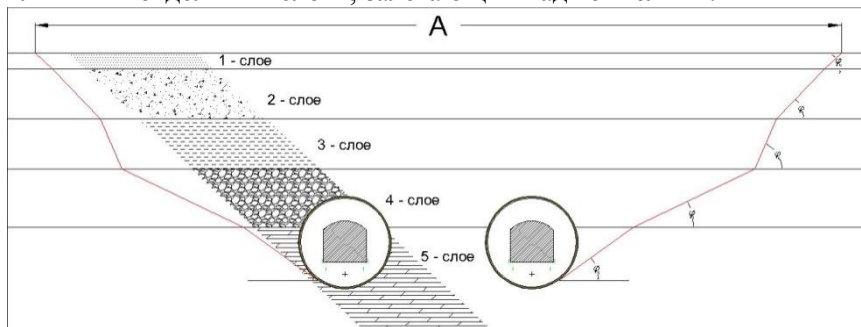


Рисунок 2 – Зона влияния от подземных сооружений на вертикальном разрезе:

А – ширина зоны влияния сдвижения от подземных сооружений; φ_0 – граничные углы для каждого слоя, определяемые по формулам (1) или (2).

Длину полумульды сдвижения (L) в главном сечении при проходке одного тоннеля в массиве, сложенном из одного типа пород, можно определить по следующему выражению:

$$L=2r_0+h_1\cdot\operatorname{tg}(90-\varphi_0) \quad (3)$$

где φ_0 – граничный угол, определяемый по формулам (1) или (2); h_1 – мощность отложений, сложенных из одного типа пород.

При сочетании различных слоев в толще над тоннелем, длина полумульды сдвижения в главном сечении определится из следующего выражения:

$$L=2r_0+m_1\operatorname{tg}(90-\varphi_{01})+m_2\operatorname{tg}(90-\varphi_{02})+\dots+m_n\operatorname{tg}(90-\varphi_{0n}) \quad (4)$$

где $m_1, m_2, \dots, m_n$ – мощности слоев, залегающих над тоннелем; $\varphi_{01}, \varphi_{02}, \dots, \varphi_{0n}$ – граничные углы каждого слоя, залегающих над тоннелем.

Из анализа формулы (4) следует, что на размер мульды сдвижения помимо физико-механических свойств слоев, слагающих толщу над тоннелем, существенное влияние оказывают величины мощности этих слоев.

В качестве основы инженерного метода прогноза сдвижений и деформаций был взят метод типовых кривых. Одним из основных исходных параметров этого метода является длина полумульды L , которая определяется для рассматриваемых условий как функция физико-механических свойств слоев пород и их распределения по мощности над тоннелем (см. формулы (3) и (4)). Другим основным исходным параметром метода является максимальное оседание η_0 , которое предложено определять по формуле проф. Лиманова Ю.А., преобразованной с учетом специфики рассматриваемых условий. Также к основным исходным параметрам относятся типовые кривые распределения сдвижений и деформаций. В силу идентичности процессов сдвижения приняты типовые кривые, используемые для прогноза сдвижений и деформаций при строительстве Санкт-Петербургского метро.

3. При проходке тоннелей через контакт между четвертичными отложениями и коренными породами, а также через контакт между четвертичными отложениями различной литологии параметры мульды сдвижения на земной

поверхности изменяются в сторону их увеличения в пределах от вхождения тоннеля в зону подработки контакта до выхода из неё.

Исследования влияния проходки тоннеля через контакт четвертичных отложений и коренных пород, четвертичных отложений и осадочных пород были проведены по 35 геомеханическим моделям.

В результате было выявлено изменение формы мульды сдвижения земной поверхности, которое проявлялось через увеличение длины полумульды и расширение зоны влияния на земной поверхности в районе контакта в пределах от вхождения тоннеля в зону подработки контакта до выхода из неё.

Изучение этого процесса на геомеханических моделях показало, что размер мульды зависит от следующих факторов: степени различия физико-механических свойств пород в приконтактной зоне, глубины проходки тоннеля, размера выработки (тоннеля), угла падения контакта горных пород, размера зоны вскрытия тоннелем поверхности контакта.

При проходке тоннелей на контакте горных пород, существенно отличающихся по физико-механическим свойствам, форма мульды сдвижения заметно изменяется через увеличение длины полумульды вдоль контакта горных пород. Как только ротор щита пересек контакт, длина полумульды увеличилась, когда щит прошел контакт, то наблюдается уменьшение ее длины. И чем больше разность между модулями деформаций пород в приконтактной зоне, тем больше увеличение размера мульды в районе контакта при его проходке тоннелем (рисунок 3).

На рисунке 3 показана ширина зоны влияния контакта (**B**), формирующаяся вкrest его простирания, длина полумульды первого типа пород (**L₁**), расположенных с одной стороны контакта, длина полумульды второго типа пород (**L₂**), расположенных с другой стороны контакта, средняя длина полумульды $L_{cp}=(L_1+L_2)/2$ и приращение средней длины полумульды (ΔL). Ширина зоны вскрытия тоннелем поверхности контакта (**D**) и простирание контакта (**M**) также показаны на рисунке 3.

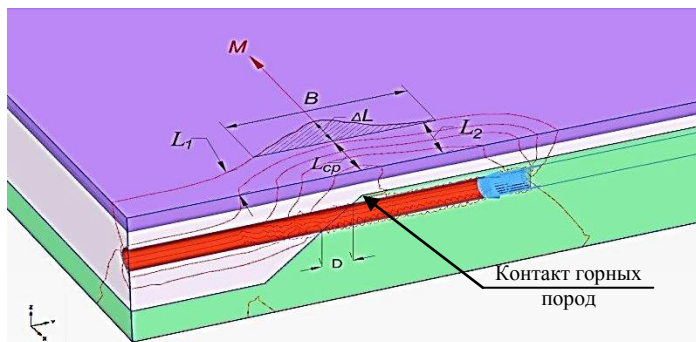


Рисунок 3 – Расширение зоны влияния при проходке тоннеля через контакт на модели

На основе данных численного моделирования был сделан анализ на предмет выявления факторов, от которых зависит ширина зоны влияния контакта **B**. Выделено влияние двух факторов: физико-механических свойств пород и ширины зоны вскрытия тоннелем поверхности контакта. Кроме этого было рассмотрено влияние на величину приращения средней длины полумульды ΔL физико-механических свойств пород. Ранее, при анализе степени участия различных показателей физико-механических свойств пород в процессах сдвижения и формирования мульды сдвижения было установлено, что наибольшее влияние оказывает модуль деформаций **E** (см. 1-е научное положение). Поэтому этот деформационный показатель был включен в корреляционный анализ в качестве фактора, отражающего влияние физико-механических свойств пород на длину полумульды.

В результате проведенного регрессионного анализа были получены зависимости ширины зоны влияния вкrest простирания контакта **B** и приращения средней длины полумульды по простиранию контакта ΔL от модуля деформаций **E**, средней длины полумульды L_{cp} и ширины зоны вскрытия тоннелем поверхности контакта **D**. Аналитическое выражение этих зависимостей имеет следующий вид:

$$B = 34.75 - 0.146 \cdot E_1 - 0.355 \cdot E_2 - 0.062 \cdot \Delta E + 0.184 \cdot D \quad (5)$$

$$\Delta L = 3.871 + 0.003 \cdot L_{cp} + 0.005 \cdot E_1 - 0.027 \cdot E_2 \quad (6)$$

где E_1 – модуль деформаций горных пород первого типа, расположенных на одной стороне контакта; E_2 – модуль деформаций горных пород второго типа, расположенных на другой стороне контакта; ΔE – различие между модулями деформаций горных пород, расположенных по разные стороны относительно плоскости контакта.

Если в пределах забоя тоннеля попадают несколько типов пород, то модуль деформаций:

$$E_{1,2} = (E_{01} + E_{02} + \dots + E_{0n}) / n$$

где $E_{01}, E_{02}, \dots, E_{0n}$ – модули деформаций пород, попадающих в пределы забоя тоннеля.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что в условиях проходки тоннеля через контакт горных пород, размер мульды увеличивается в зависимости от ширины вскрытия тоннелем поверхности контакта, также от величины модуля деформаций горных пород и степени его различия в приконтактной зоне. То есть, главными причинами расширения зоны влияния наблюдаемого эффекта являются степень неоднородности физико-механических свойств пород при переходе через поверхность контакта и ширина его вскрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Выявлены физико-механические показатели пород, наиболее влияющие на развитие мульды сдвижения на основе корреляционного и двухфакторного анализов.

2. По результатам численного моделирования установлена функциональная связь граничных углов с физико-механическими свойствами горных пород, используя которую определяют размеры зоны влияния сдвижений на поверхности от проходки тоннелей как результат сложения зон влияния в отдельных слоях, залегающих над тоннелем.

3. Установлена зависимость размеров зоны расширения мульды сдвижения от степени неоднородности физико-

механических свойств пород, разделенных контактом, и шириной зоны вскрытия его поверхности проходкой тоннеля.

4. Разработан инженерный метод расчета ожидаемых сдвижений и деформаций горных пород от строительства тоннелей для рассматриваемых горно-геологических условий, основанный на результатах проведенных исследований.

5. Предложены рекомендации по организации мониторинговых систем наблюдений за деформациями массива горных пород и земной поверхности для определения условий безопасного строительства подземных сооружений метро и контроля безопасной эксплуатации зданий и сооружений при их подработке вследствие строительства тоннелей метро.

По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них:

В изданиях, индексирующихся в международной базе данных WoS:

1. Энхтур, Л. Forecasting of position of borders of a zone of influence of construction of tunnels in the conditions of urban development / В.Н. Гусев, Л. Энхтур // 10th International Conference “Science and Technology”. –2018. –С. 21-29.

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

2. Энхтур, Л. История развития горного дела в Монголии и сегодняшний уровень горных предприятий [Текст] / Л. Энхтур // Горный информационно-аналитический бюллетень. –2017. – №1 – С. 419-423.

3. Энхтур, Л. Определение граничных углов четвертичного отложения на основе физико-механических свойств горных пород [Текст] / Л. Энхтур // Горный информационно-аналитический бюллетень. –2017. – №4 –С. 337-344.

4. Энхтур, Л. Прогнозирование положения границ зоны влияния строительства тоннелей в условиях городской застройки [Текст] / В.Н. Гусев, Л. Энхтур // Маркшейдерский вестник. –2017. – №4 –С. 58-63.

5. Энхтур, Л. Прогноза зоны влияния от проходки тоннеля, существующих наклонных контактов горных пород [Текст] / В.Н.

Гусев, Л. Энхтур // Естественные и технические науки. –2018. – №5 – С. 90-94.

В прочих изданиях:

6. Энхтур, Л. Моделирование сдвижений и деформаций земной поверхности и горных пород при строительстве метро [Текст] / Л. Энхтур // IX международная молодежная научно-практическая конференция. –2016. –С. 123-127.

7. Энхтур, Л. Исследование вредного влияния на земной поверхности от подземных сооружений при строительстве линий метро г. Улан-Батор [Текст] / Л. Энхтур, В.Н. Гусев, Г. Уранбайгаль // Сборник научно- исследовательских работ сотрудников Монгольского Государственного Университета Науки и Технологии. –2017. – №8 –С. 193-196.