

Уве Ресслер



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НАГРУЗОК НА ОБДЕЛКУ
ТОННЕЛЕЙ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОТОННЕЛИРОВАНИЯ**

Специальности: 25 00 20 - "Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная
теплофизика"

25.00.22 - "Геотехнология (подземная, открытая,
строительная)"

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва 2005

Работа выполнена в Московском государственном горном университете.

Научный руководитель

профессор, доктор технических наук Баклашов Игорь Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Одинцев Владимир Николаевич

кандидат технических наук Борисов Владимир Николаевич

Ведущая организация - ОАО «Горнопроходческих работ №3».

Защита состоится «*21*» *августа* 2005 г. в *14⁰⁰* час на заседании диссертационного совета Д-212.128.05 при Московском государственном горном университете по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан *18 марта* 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

профессор, доктор
технических наук
Крюков Г.М.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Как свидетельствует мировая практика, технология микротоннелирования, которая несомненно относится к наукоемким "высоким" технологиям подземного строительства, за тридцатилетний период существования значительно расширила область своего применения: от безлюдной технологии сооружения тоннелей малого диаметра до сооружения тоннелей большого диаметра с присутствием людей. Технология микротоннелирования - это сооружение тоннелей с помощью специальных дистанционно управляемых механизированных проходческих комплексов и специальной обделки, задавливаемой с помощью домкратных установок вслед за продвижением комплексов.

На сегодняшний день технология микротоннелирования при постоянном совершенствовании конструкций проходческих комплексов и обделки тоннелей превратилась в наиболее универсальную технологию подземного строительства: возможность сооружения тоннелей любого диаметра и по любым породам, в том числе неустойчивым и водонасыщенным, в условиях плотной городской застройки с минимальными деформациями земной поверхности и размерами строительной площадки при полной механизации и автоматизации всех горно-строительных работ - все это обеспечивает высокие темпы строительства с минимальной численностью обслуживающего персонала при минимальном воздействии на окружающую среду, наземные сооружения и объекты. С позиций геомеханического состояния окружающего породного массива технология микротоннелирования ограничивает до безопасного (устойчивого) уровня развитие геомеханических процессов в массиве как на период сооружения, так и на период эксплуатации тоннеля.

Перечисленные достоинства технологии микротоннелирования проявляются только при определенном сочетании и взаимодействии двух основных проходческих операций - разработки забоя и крепления тоннеля. Отличительная особенность микротоннелирования заключается в том, что обделка, передавая продольные монтажные усилия от домкратных установок на проходческую машину, активно участвует в разработке забоя, обеспечи-

вая при этом свою основную функцию - крепление тоннеля от воздействия эксплуатационных нагрузок, в основном горного давления. Отсюда становятся очевидными повышенные требования к точности и корректности в количественной оценке монтажных и эксплуатационных нагрузок при микротоннелировании, определяющих конструктивное исполнение обделок.

Таким образом, следует констатировать, что наблюдаемый в мировой практике прогресс в разработке микротоннельных проходческих комплексов существенно опережает разработку нормативно-методической базы, регламентирующей определение нагрузок на элементы обделки. В основе таких разработок должно лежать решение актуальной научной задачи - исследование геомеханических процессов в окружающем породном массиве, определяющих условия взаимодействия массива и обделки, т.е. в конечном итоге эксплуатационные и монтажные нагрузки на обделку. В этом смысле тема диссертационных исследований является **актуальной**.

Цель работы состоит в геомеханическом обосновании и разработке методики определения нагрузок на обделку тоннелей при микротоннелировании как основы для последующего создания нормативной базы по конструированию обделки.

Идея работы заключается в том, что обделка в технологии микротоннелирования, предполагающей минимизацию строительного зазора и заполнение его бентонитовым раствором, деформируется в стесненных условиях совместно с окружающим породным массивом, что предопределяет использование расчетной схемы, построенной на конечно-элементной модели обделки и породного массива, адекватно отражающей технологические особенности микротоннелирования и геомеханические процессы формирования нагрузок на обделку.

Основные научные положения, разработанные **лично соискателем**, и их новизна:

1. Поскольку технологический регламент микротоннелирования изначально предусматривает практически бесосадочную для земной поверхности проходку тоннелей, расчетная схема для определения нагрузки от горного давления должна быть построена из

условия недопустимости геомеханических процессов образования в окружающем породном массиве области предельного равновесия.

2. Кривизна трассы микротоннелирования, возникающая по непредусмотренным проектом горно-геологическим условиям, может привести к такой же реализации реактивных геомеханических процессов и соответственно увеличению монтажных нагрузок на обделку, что и на криволинейной трассе, первоначально заложенной в проектных решениях.
3. Нагружение обделки в условиях взаимовлияющих деформаций с породным массивом и возникающих при этом на внешней поверхности обделки контактах нормальных и касательных напряжений приводит к увеличению сжимающих усилий в лотке и своде обделки, учет которых позволяет существенно снизить металлоемкость поперечных арматурных каркасов железобетонной обделки при сохранении ее прочности и трещиностойкости.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в работе, подтверждаются:

- использованием апробированных методов геомеханики и механики подземных сооружений для определения нагрузок на обделку тоннелей;
- сходимостью полученных результатов с результатами других авторов и данными производственных наблюдений;
- положительными результатами внедрения расчетных рекомендаций в практику проектирования железобетонных обделок для микротоннелирования.

Методы исследований: анализ и обобщение существующего опыта проектирования и производства работ при микротоннелировании; теоретические исследования нагрузок на обделку методами геомеханики и механики подземных сооружений; расчеты и обоснование конструктивных решений арматурных каркасов железобетонных обделок.

Научное значение работы состоит в дальнейшем развитии существующих представлений о геомеханических процессах формирования нагрузок на обделку тоннелей, сооружаемых по технологии микротоннелирования

Практическое значение работы заключается в разработке методики определения нагрузок на обделку тоннелей, сооружаемых с использованием технологии микротоннелирования.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты работы реализованы в виде расчетного обоснования конструктивных решений железобетонных труб диаметром 600, 800, 1000, 1200 и 1500 мм, выпускаемых ООО "Завод специальных железобетонных труб".

Апробация работы. Результаты работы обсуждались в сентябре 2003 и 2004 гг. на семинарах Российского общества по внедрению бестраншейных технологий и на заседаниях кафедры ФГПИП МГГУ в 2003 и 2004 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликованы три работы.

Объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, **содержит список литературы из 70 наименований, 14 рисунков и 37 таблиц.**

Основное содержание работы

В первой главе приведен краткий обзор развития технологии микротоннелирования и анализ ее использования в России. Технология продавливания сборной трубчатой обделки тоннелей, лежащая в основе современных зарубежных технологий микротоннелирования, успешно развивалась в России, начиная с 50-60-х годов, и широко использовалась в эти годы при строительстве коллекторных тоннелей в Москве, Ленинграде, Саратове, только не было механизированных управляемых забойных щитов. Но это перспективное направление развития бестраншейной технологии сооружения тоннелей было прекращено в России в конце 70-х годов, а в конце 80-х в России уже не было объективных условий для государственных инвестиций в развитие этой технологии. Именно в этот период фирмы Японии, а затем Германии, Великобритании, Франции, США, Канады, используя

мировой опыт, в том числе и российский в области щитовой проходки и продавливания, и современные достижения в лазерной и телевизионной технике, а также государственную финансовую поддержку, создали технику и технологию управляемого микротоннелирования. В настоящее время основными производителями микротоннелепроходческой техники, которая используется в России, являются фирмы Германии и Канады. Подробный анализ современной техники и технологии микротоннелирования опубликован известным российским специалистом В.П. Самойловым.

В последние годы наиболее значительные разработки в технике и технологии микротоннелирования выполнены в Германии фирмой "Херренкнехт", которая успешно сотрудничает со строительными фирмами России. Первый опыт микротоннелирования в России с использованием комплекса AVN-400 фирмы "Херренкнехт" имел место в Москве в 1994 г. В настоящее время в России уже работают более 40 микротоннелепроходческих комплексов (МТПК) различных зарубежных фирм, из них в Москве - 24. Тем не менее, российский опыт в технологии микротоннелирования представляет весьма ограниченным по сравнению с зарубежным по причине отсутствия российских производителей МТПК. В сложившейся экономической ситуации российский опыт микротоннелирования мог бы оказаться еще более ограниченным, если бы не существующее в России информационное обеспечение по технике и технологии микротоннелирования, формируемое издательством ТИМР (главный редактор Н.Н. Смирнов), а также информационная и организаторская деятельность таких известных российских специалистов, как П.П. Бессолов, С.Н. Власов, А.Ю. Синицын.

Одной из причин отставания России в области применения технологии микротоннелирования является то обстоятельство, что даже купленные за рубежом современные МТПК не могут работать без соответствующей высокопрочной и герметичной обделки тоннелей в виде трубчатых секций, производство которой только начинается в России. Поэтому в первой главе диссертации подробно проанализированы существующие конструктивные решения такой обделки в зависимости от материала труб и конструкции стыков между ними. Одна из последних работ, в которой приведен такой

анализ, была опубликована А Ю. Сеницыным По материалу трубы для микротоннелирования можно классифицировать следующим образом из металла (сталь, чугун), из неметаллических материалов (неорганических, органических и комбинированных). За рубежом применяются трубы керамические, асбоцементные, железобетонные, полимербетонные, стеклопластиковые

Железобетонные трубы, нефутерованные и футерованные изнутри пластмассой, широко распространенные за рубежом, в последние годы успешно внедряются и в России, где налажено их производство на оборудовании датской фирмы "Педершааб" в Москве, Н Новгороде, Омске, Казани Так, в Москве на предприятии ООО "Завод специальных железобетонных труб" выпускается широкий ассортимент труб для микротоннелирования D=400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 мм. Необходимо отметить, что особенностью этого производства является использование только технологического зарубежного оборудования, в то время как конструктивные решения труб разрабатываются в России на основании нормативных документов, рекомендуемых для традиционной **щитовой проходки, в которые заложены** совершенно иные представления о действующих нагрузках на обделку, чем на трубы при микротоннелировании

На основании проведенного анализа конструктивных решений труб можно сделать следующий вывод¹ на сегодняшний день и в ближайшие годы в России реальным представляется производство и использование железобетонных труб, производимых на зарубежном оборудовании с разработкой отечественных методов расчета конструктивных решений на уровне передовых зарубежных аналогов

В связи с этим были проанализированы существующие методы расчета труб для микротоннелирования, и в первую очередь нагрузки, действующие на трубы, которые можно подразделить на продольные монтажные нагрузки от воздействия домкратных установок и поперечные эксплуатационные нагрузки

Продольные монтажные нагрузки определяются усилиями продавливания проходческого комплекса и труб в породном массиве, которые склады-

ваются в свою очередь из двух составляющих усилия врезания ножевой части щита в породный массив и усилия на преодоление трения по боковой поверхности продавливаемой конструкции

Наибольшие сложности возникают при определении второй составляющей усилий продавливания, поскольку она представляет произведение контактного давления, т.е. давления на контакте продавливаемой конструкции и окружающего породного массива, на коэффициент трения на контакте. В существующих исследованиях этой составляющей предлагаются различные гипотезы по определению контактного давления, поскольку оно главным образом зависит от давления, создаваемого весом перекрывающих пород, иными словами, от горного давления, определение которого до настоящего времени остается самой сложной и до конца нерешенной задачей геомеханики. Обычно усилие на преодоление трения выражают через произведение удельного сопротивления трения породы по поверхности продавливаемой конструкции (кН/м^2) на площадь этой поверхности. По данным фирмы "Херренкнехт", в проходческих комплексах без нагнетания бентонитового раствора удельное сопротивление трения может достигать 20-30 кН/м^2 , при нагнетании - 1-0,2 кН/м^2 .

Большинство существующих исследований и нормативных рекомендаций по определению усилий продавливания проходческих комплексов предполагают прямолинейность трассы микротоннелирования, хотя в действительности она может быть криволинейной по проекту или в результате непредусмотренных проектом горно-геологических условий (такую кривизну трассы в дальнейшем будем называть технологической), что является причиной увеличения усилий продавливания за счет появления дополнительного контактного давления при развороте элементов обделки на криволинейных участках трассы.

Поперечные эксплуатационные нагрузки на обделку микротоннелирования определяются в основном от воздействия "горного давления", собственного веса обделки, колесных нагрузок на земной поверхности и веса наполнителя тоннеля. Основная составляющая этих нагрузок по оценкам зарубежных и российских ученых и практиков - это нагрузка от "горного дав-

ления", поскольку она определяет не только поперечное воздействие на обделку, но и формирует контактное давление, определяющее, как указывалось выше усилия продавливания, т е продольные монтажные нагрузки на обделку

По результатам анализа, выполненного в первой главе, сформулированы следующие основные задачи диссертационного исследования

- разработка расчетных схем, конечно-элементной модели и методов определения нагрузок на обделку без привлечения специальных гипотез, упрощающих реальную картину нагружения обделок в породном массиве,
- геомеханическое обоснование эксплуатационных нагрузок от горного давления и оценка предельного перехода от расчетной схемы "свода давления" к расчетной схеме "веса полного столба породы до поверхности" при определении нагрузок от горного давления
- геомеханическое обоснование монтажных нагрузок в виде усилий продавливания на прямолинейных и криволинейных участках трассы микротоннелирования;
- разработка конструктивных решений обделки в виде производимых в России железобетонных труб для микротоннелирования с использованием предлагаемых рекомендаций по определению нагрузок на обделку

Во второй главе выполнено геомеханическое обоснование эксплуатационных нагрузок на обделку при микротоннелировании

Построена классификация эксплуатационных и монтажных нагрузок на обделку

- по направлению действия относительно трассы микротоннелирования поперечные (эксплуатационные) и продольные (монтажные),
- по происхождению природные (от горного давления), монтажные или строительные (от домкратных установок), полезные (от собственного веса конструкций, транспорта, веса наполнителя), при-

родные и полезные нагрузки объединяются общим названием эксплуатационные,

- по длительности действия постоянные (от горного давления и собственного веса конструкций), временные (кратковременные - от домкратных установок, длительные - от транспорта и веса наполнителя),
- по условиям статической работы обделки активные и реактивные со стороны окружающего породного массива,
- режим нагружения обделок - взаимовлияющих деформаций, когда величины нагрузки определяются как активной, так и реактивной составляющей при деформировании сооружения.

Если оценивать нагрузки по их значимости при разработке конструктивных решений обделки, необходимо иметь в виду, что технология микротоннелирования требует особого подхода к статическим расчетам трубчатых обделок, принципиально отличного от традиционных методов расчета подземных конструкций, например блочных при щитовой проходке. Это принципиальное отличие касается соотношения между эксплуатационными и монтажными нагрузками. Как показывает зарубежная практика проектирования и производства работ при микротоннелировании, монтажные нагрузки являются определяющими. Такое сопоставление эксплуатационных и монтажных нагрузок не совпадает с действующими в России нормативными рекомендациями, где традиционно заложены рекомендации по сбору нагрузок, характерные для щитовой технологии проходки, из которых следует определяющая роль нагрузок от горного давления, т.е. эксплуатационных, при проектировании подземных конструкций.

Определив таким образом первостепенную значимость продольных монтажных нагрузок в статических расчетах микротоннельных конструкций, вернемся к вопросу геомеханического обоснования поперечных эксплуатационных нагрузок. Для технологии микротоннелирования характерно нагружение обделки в режиме взаимовлияющих деформаций, что обеспечивается задавливанием в породный массив трубчатой обделки с минимальными строительными зазорами и заполнением последних бентонитовым раство-

ром При этом, по классификации И В Баклашова и Б А Картозия, наблюдается вторая схема нагружения, которая характеризуется активными и реактивными нагрузками по всему периметру обделки, как нормальными, так и касательными

Методы строительной механики, обычно применяемые при расчете обделки в технологии щитовой проходки и до сих пор рекомендуемые российскими нормативными документами для технологии микротоннелирования построены на рабочих гипотезах определения реактивных нагрузок, в основном нормальных к поверхности обделки При этом касательные реактивные нагрузки которые в технологии микротоннелирования могут быть значительными и могут увеличивать нормальные усилия и тем самым несущую способность обделки, как правило, не рассматриваются

Учитывая изложенное, следует рекомендовать для статического расчета в технологии микротоннелирования расчетную схему, построенную на конечно-элементной модели обделки и породного массива, которая отражает указанную выше вторую схему нагружения, те адекватно отражает **технологические особенности микротоннелирования и геомеханические процессы формирования нагрузок на обделку** Соответственно в качестве метода расчета следует рекомендовать метод конечных элементов, как наиболее современный численный метод механики деформируемого твердого тела, детально разработанный и доведенный до программных комплексов, совместно работающих с системами автоматизированного проектирования

Наиболее значимой поперечной эксплуатационной нагрузкой является нагрузка от горного давления Как следует из опубликованных работ (М М Протодьяконов, Н С Булычев, В Н Одинцев и др), существуют два принципиально различных подхода к определению нагрузки от горного давления первый - нагрузка от горного давления определяется весом полного столба породы до земной поверхности, второй - нагрузка определяется весом породы только в пределах так называемого "свода обрушения" или "свода давления", который по высоте составляет только часть полного столба породы до земной поверхности

Совершенно очевидно, что выбор того или иного подхода к определению нагрузки от горного давления связан, помимо структурно-механических особенностей перекрывающего породного массива, с технологией подземного строительства. В этой связи следует обратить внимание на одну из главных особенностей технологии микротоннелирования, выделяющую ее среди других технологий подземного строительства: она практически исключает сдвигание перекрывающего породного массива и формирование нагрузки от горного давления как веса полного столба породы до земной поверхности. Заполнение под давлением строительного зазора бентонитовым раствором исключает возможность таких сдвижений.

В нормативных документах Германии для микротоннелирования (ATVA 161) расчетная схема по определению нагрузки от горного давления построена на анализе статического равновесия полного столба породы до земной поверхности с учетом сил трения по его боковой поверхности, что в конечном итоге приводит к меньшей нагрузке, чем от веса полного столба. Однако такой подход допускает образование в перекрывающем породном массиве области предельного равновесия, по существу в пределах всего столба перекрывающих пород, которая может привести при определенных граничных условиях к сдвиганию перекрывающего породного массива вплоть до земной поверхности, что исключается при использовании технологии микротоннелирования. Поэтому в расчетную схему определения нагрузки от горного давления в технологии микротоннелирования должно быть положено условие недопустимости образования в перекрывающем породном массиве области предельного равновесия.

Указанное условие использовано в диссертации для решения задачи по определению нагрузки от горного давления как предельной нагрузки на микротоннельную обделку горизонтального тоннеля, которая в первом приближении рассматривается как абсолютно жесткая по сравнению с окружающим породным массивом. В постановке задачи учтено еще одно существенное обстоятельство, сформулированное в работах В.Г. Хлопцова и И.В. Баклашова: причиной образования области предельного равновесия являются так называемые "снимаемые напряжения" с контура выработки

при ее проходке и возникающие при этом деформации, а прочностные характеристики породного массива при этом должны приниматься с учетом начальных напряжений в массиве

Сформулированная таким образом задача предельного равновесия решена в постановке плоской деформации в двух вариантах, как осесимметричная с использованием часто применяемого в геомеханике условия предельного равновесия Кулона-Мора, где учитываются только максимальные и минимальные главные напряжения; как неосесимметричная с учетом влияния земной поверхности и условия предельного равновесия более общего вида, учитывающего все три главных напряжения.

Из решения обеих задач получено следующее расчетное выражение для нагрузки от горного давления:

$$P = k\gamma H, \quad (D)$$

где γ, H - соответственно удельный вес перекрывающих пород и глубина заложения микротоннеля от поверхности земли до кровли выработки,

k - понижающий коэффициент ($k \leq 1$), учитывающий формирование нагрузки от горного давления по расчетной **схеме "свода давления"**, который в случае первой постановки задачи

$$k = 1 - \sin \varphi \cdot \frac{K}{\gamma H} \cos \varphi, \quad (2)$$

а в случае второй постановки задачи

$$k = 1 - \frac{\left(\frac{K}{\gamma H} \frac{6 \cos \varphi}{3 - \sin \varphi} + \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \right) \left(2 + \frac{3}{h^2} - \frac{5}{h^2} \right)}{\left(2 + \frac{3}{h^2} - \frac{4}{h^2} \right) \left\{ 3 - \frac{1}{3} \left(\frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \right)^2 \right\} - \frac{6 \sin \varphi}{(3 - \sin \varphi) h^2}}, \quad (3)$$

где K, φ - соответственно коэффициент сцепления и угол внутреннего трения, определяемые в результате лабораторных испытаний на образцах;

$h = 2 \frac{H}{D}$; D - диаметр выработки в породном массиве.

Совместный анализ расчетных выражений (2) и (3) показывает, во-первых, с увеличением глубины заложения тоннеля H понижающий коэффициент k стремится к асимптотическому значению, которое зависит только от угла внутреннего трения породы; во-вторых, учет всех компонент

главных напряжений в породном массиве, как и следовало ожидать, дает меньшие предельные нагрузки, что реально отражает геомеханические процессы в перекрывающем породном массиве.

Поэтому в дальнейшем проанализируем переход к асимптотическому значению выражения (3), которое при $H \rightarrow \infty$ принимает вид

$$k = 1 - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3 - \sin \varphi}{6 \sin \varphi}\right)^2 - \frac{1}{3}}} \quad (4)$$

Коэффициент k , определяемый выражением (3), быстро снижается в интервале глубин $0 \leq H \leq 2D$ и далее выходит на асимптотическое значение (4). Глубину $h \sim W$ в первом приближении можно считать той критической глубиной, меньше которой расчет нагрузки от горного давления на обделку следует производить по расчетной схеме "веса полного столба породы до земной поверхности", т.е. в расчетном выражении (1) следует положить $k=1$. При глубине заложения $H \geq 2D$ понижающий коэффициент k в расчетном выражении (1) следует определять по формуле (3) или ее асимптотическому значению (4), что соответствует расчетной схеме "свода давления".

Произведены сопоставления рекомендуемой критической глубины $H = 2D$ с рекомендациями, приведенными в "Пособии по проектированию метрополитенов" (1992) и более позднем нормативном документе СП 32-105-2004, откуда следует для песков $H = 1,54D$, для глин $H = 2,13D$, что свидетельствует о достоверности выполненных исследований по определению нагрузки от горного давления.

Далее во второй главе выполнено геомеханическое обоснование поперечной эксплуатационной нагрузки от собственного веса обделки и давления наполнителя. Нагрузка от собственного веса обделки, как следует из существующих исследований, формирует максимальный изгибающий момент в лотке обделки. Исследована зависимость этого изгибающего момента от диаметра железобетонных труб, применяемых в технологии микро-тоннелирования, которая обнаруживает тенденцию к увеличению изгибающего момента с увеличением диаметра труб в виде функциональной зави-

симости $M \approx 2R^2d[T \cdot м]$, где R - радиус осевой линии обделки (м), d - толщина обделки (м). Установлено, что при напорном режиме эксплуатации тоннеля давление наполнителя следует учитывать при напоре более $50 \frac{Tc}{м^2}$ при безнапорном режиме давление наполнителя идет в запас прочности обделки и его можно не учитывать.

В результате сопоставления нагрузки от горного давления и колесной нормативной нагрузки на земной поверхности НК-80 установлено, что колесная нагрузка обязательно должна учитываться при сборе нагрузки на обделку тоннелей малого диаметра в песках и может не учитываться с небольшой погрешностью при сборе нагрузки на обделку тоннелей большого диаметра в глинах.

В третьей главе выполнено геомеханическое обоснование монтажных нагрузок на обделку при микротоннелировании.

Монтажные нагрузки на элементы обделки возникают от воздействия домкратных установок на продавливаемую конструкцию обделки и проходческого комплекса и складываются из двух составляющих: усилия внедрения в породный забой и усилия сопротивления трения по боковой поверхности обделки.

Усилия внедрения в породный забой, по экспериментальным данным японских исследователей, рекомендуется определять в виде удельного сопротивления внедрения в кН на $м^2$ площади забоя в зависимости от типа грунта и вида пригруза забоя (фунтового или гидропригруза). В российских нормативных документах по микротоннелированию, опубликованных в последнее время, рекомендуется аналогичная методика определения усилий внедрения в породный забой.

Заслуживает внимания для проектирования микротоннелирования методика определения усилия внедрения в породный забой, построенная на экспериментальных исследованиях и изложенная в указанных выше нормативных документах для сооружений метрополитена, где удельное сопротивление внедрения считается в Tc на $м^2$ ножевой части щита и принимает-

ся равным $\delta R_{сж}$, т.е. в зависимости от нормированной характеристики грунта - предела прочности на сжатие

Усилия сопротивления трения по боковой поверхности обделки определяются произведением нормальных к боковой поверхности обделки контактных напряжений на коэффициент трения μ , что выражается в самом общем виде интегралом по площади боковой поверхности обделки и дополнительными усилиями на преодоление сцепления C по контакту обделки и породного массива. Таким образом, в качестве механических характеристик окружающего обделку породного массива следует рассматривать коэффициент трения μ и сцепление C по контакту с обделкой. Для обделки в виде железобетонных труб, применяемых в российской практике микротоннелирования, можно рекомендовать данные, приведенные в указанных выше нормативных документах для сооружений метрополитена и составленные в результате экспериментальных наблюдений. На основании этих рекомендаций коэффициент трения μ уменьшается с уменьшением песчаной фракции и его среднее значение изменяется от 0,55 для бетона по песку до 0,4 для бетона по глине, а сцепление C наоборот возрастает - от 0 для бетона по песку до 0,2 кН/м² для бетона по глине. Для бетона по раствору бентонитовой глины рекомендуется принимать коэффициент трения $\mu=0,1$, сцепление $C=0,05+0,10$ кН/м²

Если рассматривать усилие сопротивление трения на прямолинейных участках трассы с постоянной глубиной заложения тоннеля и неизменными механическими характеристиками окружающего обделку породного массива, его можно определить выражением

$$F = S(\sigma_{ср}\mu + C) = Sq, \quad (5)$$

где S - площадь боковой поверхности продавливаемой обделки и проходческого комплекса, м²,

$\sigma_{ср}$ - среднеинтегральное по полярному углу нормальное контактное напряжение, кН/м²,

q - удельное сопротивление трения, кН/м²

При заданных механических характеристиках породного массива μ и C (например, по приведенным выше рекомендациям) для определения уси-

ля сопротивления трения F достаточно проанализировать зависимость $\sigma_{\text{сп}}$ от механических свойств породного массива и глубины заложения тоннеля H .

Величина $\sigma_{\text{сп}}$ определяется в основном воздействием нагрузок от горного давления, собственного веса обделки и пригрузок на земной поверхности. В результате численного анализа показано, что с некоторым завышением величины $\sigma_{\text{сп}}$, что идет в запас прочности обделки при расчете ее на монтажные нагрузки, можно принять $\sigma_{\text{сп}} = k\gamma H$, т.е. равной нагрузке от горного давления по формуле (1), построенной на гипотезе "свода давления". Тогда расчетное выражение для удельного сопротивления трения можно записать следующим образом:

$$q = (k\gamma H)\mu + C, \quad (6)$$

где k - понижающий коэффициент, определяемый по формуле (4) при $H \geq 2D$ и равный единице при $H < 2D$.

Численные расчеты по формуле (6) для различных горных пород при механических характеристиках μ и C , принятых по указанным выше рекомендациям, для глубин заложения $H = 6, 10, 15$ м, которые удовлетворяют условию $H \geq 2D$, и среднем удельном весе перекрывающих пород $\gamma = 20$ кН/м³ обнаружили следующие особенности в оценке удельного сопротивления трения: влияние сцепления мало по сравнению с влиянием трения, если не учитывать увеличение адгезионного сцепления при длительных остановках проходческого комплекса, поэтому вторым членом в формуле (6) для оценочных расчетов можно пренебречь; удельное сопротивление трения для одних и тех же пород линейно возрастает с глубиной заложения тоннеля H ; наличие бентонитового раствора за обделкой в 4-5 раз снижает удельное сопротивление трения.

Как показывает практика микротоннелирования на криволинейных трассах, которые заложены в проектных решениях, или трассах с технологической кривизной, возникающей по причине непредусмотренных проектом горно-геологических условий, усилия продавливания возрастают. Если предположить, что сопротивление внедрению в породный забой практиче-

ски не изменяется на криволинейной трассе, основной причиной увеличения усилий продавливания следует считать увеличение сил трения на тех участках внешней поверхности трубчатой обделки, которые испытывают дополнительный реактивный отпор со стороны окружающего породного массива при развороте обделки. Расчетное выражение для определения усилий продавливания P_m отдельного элемента m трубчатой обделки на криволинейной трассе микротоннелирования построено из условий равновесия этого элемента при его развороте.

Это выражение использовано для определения максимального усилия продавливания на криволинейной трассе произвольного очертания, которое развивают домкратные установки перед выходом проходческого комплекса в приемную шахту.

$$P_0 = \sum_1^K P_{2n-1} \alpha^{2n-2} - \sum_1^K P_{2n} \alpha^{2n} + P_{2K+1} \alpha^{2K} + P \alpha^{2K}, \quad (7)$$

Выражение (7) построено следующим образом. Произвольная криволинейная трасса микротоннелирования включает K целых витков кривизны (каждый целый виток имеет начальный и следующий за ним криволинейный участок) и заключительный прямолинейный участок. Участки имеют порядковый номер n , начинающийся от стартовой шахты. При этом все прямолинейные участки имеют нечетный номер $(2n-1)$, а криволинейные - четный $2n$. Количество витков кривизны K и номер участка связаны соотношением $n=1,2,3, \dots, 2K, (2K+1)$. Для оценки протяженности трассы введены обозначения L - общая длина трассы, м, $L_{(2n-1)}$ - длина прямолинейного участка до первого раскрытого стыка между элементами обделки, м, L_{2n} - длина криволинейного участка с учетом последнего элемента обделки с задним раскрытым стыком, м. Для оценки усилий продавливания введены обозначения P - начальное усилие внедрения проходческого комплекса в породный забой, МН, $P_{(2n-1)} = \pi D_a L_{(2n-1)} q$ - усилие сопротивления трения на прямолинейных участках, МН, $P_{2n} = \pi D_a L_{2n} q$ - усилие сопротивления трения на криволинейных участках, МН, D_a - внешний диаметр обделки, м, q - удельное сопротивление трения, МПа, α - параметр, определяющий увеличение усилий продавливания на криволинейных трассах и зависящий от кривизны

трассы и геометрических параметров обделки, который для железобетонных труб, производимых в России, табулирован и в среднем может быть принят равным 1,2. При $a=0$ расчетное выражение (7) преобразуется в выражение для определения максимального усилия продавливания P_0 на прямолинейной трассе соответствующей длины. На трассах микротоннелирования с технологической кривизной для определения максимального усилия продавливания рекомендуется расчетное выражение

$$P_0 = P_1 + \pi D_a l q \left(1 + \alpha^{4K} + 2 \sum_{j=1}^{2K-1} \alpha^{2jK} \right) + P_3 \alpha^{4K} + P \alpha^{4K}, \quad (8)$$

где $P_1 = \pi D_a L_1 q$ - усилие сопротивления трения на начальном от стартовой шахты прямолинейном участке (МН), имеющем длину $L_1(M)$; $P_3 = \pi D_a L_3 q$ - усилие сопротивления трения на заключительном у приемной шахты прямолинейном участке (МН), имеющем длину $L_3(M)$; K - количество технологических витков кривизны трассы, l - длина элемента обделки, м

Сравнительные числовые расчеты, выполненные по выражениям (7) и (8), позволяют сделать следующие выводы:

1. На криволинейных трассах микротоннелирования максимальное усилие продавливания P_0 может увеличиться в 1,5-2,0 раза по сравнению с прямолинейными трассами
2. Кривизна трассы, возникающая по технологическим причинам, может привести к такому же увеличению усилий продавливания, что и на криволинейной трассе, заложенной в проектных решениях
3. Усилия продавливания увеличиваются, если технологическая кривизна трассы наблюдается ближе к стартовой шахте

Далее были построены общие расчетные выражения для определения монтажных нагрузок на передний торец любого из элементов обделки по трассе микротоннелирования, т.е. стыковых монтажных нагрузок, где под монтажными нагрузками понимаются величина усилий продавливания, действующая на передний торец элемента и величина эксцентриситета ее приложения. Построена также методика оценки распределения по трассе максимальных стыковых напряжений между элементами обделки.

Сравнительный количественный анализ построенных таким образом расчетных выражений позволил обнаружить следующие закономерности.

1. Усилия продавливания, развиваемые домкратными установками, резко возрастает при входе и выходе из криволинейных участков.
2. На прямолинейных участках, следующих за криволинейными, тенденция к увеличению усилий продавливания с увеличением расстояния до стартовой шахты возрастает.
3. Стыковые монтажные нагрузки на элементы обделки распределяются по трассе, как зеркальное отображение распределения усилий продавливания, рассмотренных в пп. 1 и 2, т.е. имея общую тенденцию к уменьшению с увеличением расстояния до стартовой шахты, стыковые монтажные нагрузки более резко падают при входе и выходе из криволинейных участков.
4. Эксцентриситеты приложения стыковых монтажных нагрузок на криволинейных участках, ближе расположенных к стартовой шахте, меньше, поскольку на этих участках большая величина самих монтажных нагрузок; по этой же причине на этих участках максимальные стыковые напряжения больше.
5. Наибольшие по величине максимальные стыковые напряжения имеют место при входе в первый от стартовой шахты криволинейный участок трассы и, очевидно, являются определяющими при расчете конструктивных элементов обделки.

В четвертой главе приведены результаты практической реализации в России рекомендаций по определению нагрузок и проектированию обделок для тоннелей, сооружаемых по технологии микротоннелирования. Разработанные рекомендации были реализованы при расчетном обосновании поперечных арматурных каркасов железобетонных труб для микротоннелирования, выпускаемых ООО "Завод специальных железобетонных труб" в Москве. Для определения напряжений и внутренних усилий в характерных сечениях обделки (свод, лоток, бок) использованы рекомендации по конечно-элементной расчетной схеме и рекомендации по определению нагрузки от горного давления в соответствии с немецкими нормативами ATVA 161. За-

тем по действующим в России нормам проектирования железобетонных конструкций (по первому и второму предельным состояниям) с учетом работ И В Баклашова и В.Н. Борисова по расчету железобетонных конструкций определено необходимое количество и шаг спиральной поперечной арматуры для обделок с внутренним диаметром $D=1200$ мм и $D=1500$ мм для двух вариантов их нагружения для глубины заложения $H=6$ и 10 м при нагрузке от горного давления по расчетной схеме "веса полного столба породы до земной поверхности" и для глубины $H=25$ м при нагрузке от горного давления по расчетной схеме "свода давления".

На основании первого варианта расчета сделан вывод о возможности внесения конструктивных изменений в арматурные каркасы производимых в России железобетонных труб $D=1200$ мм и $D=1500$ мм для глубины заложения $H=6$ и 10 м, которые заключаются в увеличении шага рабочей спиральной арматуры, что обеспечивает снижение металлоемкости и стоимости соответствующих обделок для микротоннелирования. По результатам второго варианта расчета доказана возможность эксплуатации на глубине заложения $H=25$ м железобетонных труб $D=1200$ мм и $D=1500$ мм, производимых для глубины заложения $H=10$ м.

Заключение

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения по геометрическому обоснованию нагрузок на обделку тоннелей в технологии микротоннелирования, имеющие существенное значение для повышения экономической эффективности городского подземного строительства.

Основные научные выводы и практические результаты заключаются в следующем

1. Предложены расчетная схема и конечно-элементная модель совместного деформирования обделки и породного массива при микротоннелировании, адекватно отражающие особенности формирования нагрузок на обделку тоннелей.

2. Разработана методика определения эксплуатационных поперечных нагрузок от горного давления на обделку, учитывающая все компоненты главных напряжений при анализе развития в окружающем породном массиве области предельного равновесия
3. Получены расчетные выражения и построены графические зависимости для определения коэффициента уменьшения нагрузки от горного давления на обделку при увеличении отношения глубины заложения кровли H к диаметру выработки D для различных типов фунтов, из которых следует, что глубину заложения $H=2D$ в первом приближении можно считать критической, меньше которой расчеты нагрузки следует производить исходя из веса полного столба породного массива до земной поверхности.
4. Разработана методика определения монтажных продольных нагрузок на элементы обделки, учитывающая кривизну трассы микротоннелирования, заложённую в проектные решения или возникающую по технологическим причинам.
5. На криволинейных участках трассы продольные монтажные нагрузки имеют внецентренное приложение, т.е. характеризуются величиной нагрузки и эксцентриситетом ее приложения; причем эксцентриситет увеличивается с уменьшением радиуса кривизны трассы, величины нагрузки и с увеличением длины элемента трубчатой обделки, ее диаметра и жесткости конструктивных материалов обделки.
6. Усилия продавливания, развиваемые домкратной установкой и формирующие монтажные нагрузки на элементы обделки, резко увеличиваются при входе в криволинейный участок трассы и выходе из него; при этом увеличение усилий продавливания тем больше, чем ближе криволинейный участок трассы к домкратной установке.
7. Реализация расчетных рекомендаций по определению нагрузок на обделку при микротоннелировании, как показывают результаты их внедрения в практику проектирования железобетонных обделок,

производимых в России, позволяет разработать более рациональную конструкцию обделки как в отношении ее последующей безаварийной эксплуатации, так и в отношении материалоемкости, те стоимости

Основные положения диссертации отражены в следующих опубликованных работах

1 Баклашов И В , Хлопцов В Г, Ресслер У Статические расчеты в технологии микротоннелирования -ТИМР, РОБТ 2003, №10

2 Ресслер У Оценка дополнительных усилий продавливания на криволинейных трассах микротоннелирования -ТИМР Подземное пространство мира, 2004, №2-3

3 Баклашов И В , Хлопцов В Г, Ресслер У Нагрузки на обделку тоннелей в технологии микротоннелирования -ТИМР РОБТ, 2004, №8

Подписано в печать

Объем 1 печ. л.

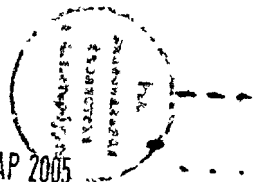
Формат

Тираж 100 экз.

Заказ№ 933

Типография Московского государственного горного университета,
Москва, Ленинский проспект, 6

25.00



22 MAR 2005

303