

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе КАРАСЕВА Максима Анатольевича
«Прогноз геомеханических процессов в слоистых породных массивах при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации в условиях плотной городской застройки», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

1. Актуальность работы

Развитие инфраструктуры крупных мегаполисов связано с комплексным освоением подземного пространства, предусматривающим сооружение комплексов взаимовлияющих большепролетных выработок, к которым относятся станции и пересадочные узлы метрополитенов, подземные парковки и торговые центры. Проектирование этих сооружений, имеющих, как правило, сложную пространственную конфигурацию, предполагает принятие уникальных объемно – планировочных, конструктивных и технических решений, основанных на применении многоэтапных технологий строительства. При этом создаваемые в современных условиях проекты должны иметь соответствующее геомеханическое обоснование, предполагающее учет не только взаимного влияния сооружений в комплексах, возможных негативных проявлений происходящих в горном массиве процессов, связанных с его деформированием, но также воздействие подземных сооружений на фундаменты зданий и оснований сооружений на поверхности.

Следует отметить, что существующие аналитические методы расчета подземных сооружений, базирующиеся, как правило, на решениях плоских контактных задач теории упругости, в которых массив пород моделируется однородной изотропной линейно-деформируемой бесконечной или полубесконечной средой, могут быть использованы только на начальном этапе проектирования с целью получения весьма приближенных, оценочных представлений о напряженно-деформированном состоянии подземных конструкций. В целом, приходится констатировать, что, несмотря на значительный прогресс в разви-

тии аналитических методов расчета, в настоящее время альтернативы компьютерному численному геомеханическому моделированию подземных сооружений сложной пространственной конфигурации в слоистых породных массивах при строительстве в условиях плотной городской застройки не существует.

Современные компьютерные программные комплексы реализующие, в основном, метод конечных элементов, открывают новые возможности для использования наиболее адекватных реальному поведению массива физических моделей и пространственных расчетных схем, что является особенно актуальным при рассмотрении таких уникальных сооружений, как подземные станции и пересадочные узлы метрополитенов, имеющих сложную пространственную конфигурацию. Однако успешное применение численных методов требует соответствующей настройки компьютерной модели, основанной на глубоком геомеханическом анализе моделируемой ситуации.

Сложность предпринятого исследования состоит в том, что автор ставит и решает ряд научных и технических проблем, связанных не только с оценкой влияния, которое оказывает слоистое строение горного массива на его поведение в окрестности подземного сооружения, но также предлагает новую методологию проведения компьютерного моделирования, основанную на разделении общей, глобальной численной модели на ряд локальных и рассмотрении их взаимного влияния, как единой динамической системы. При этом следует особо отметить, что выполненные в работе теоретические исследования базируются на результатах большого объема лабораторных и натурных экспериментов, анализ которых послужил отправной точкой для последующего компьютерного моделирования.

Сказанное выше позволяет заключить, что диссертационная работа М. А. Карасева, посвященная разработке и внедрения в практику проектирования новой методологии компьютерного моделирования геомеханических процессов в слоистых породных массивах при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации с целью повышения качества принимаемых проектных решений, является чрезвычайно актуальной.

2. Полученные автором результаты, научная новизна и практическая значимость выносимых на защиту положений

Представленная на отзыв диссертация изложена на 307 страницах машинописного текста и включает семь глав (разделов), введение и заключение. Список использованной литературы состоит из 254 наименований.

Следует особо отметить большое внимание, которое уделено в работе анализу современного мирового опыта компьютерного моделирования геомеханических систем «горный массив – подземное сооружение». Так, в общем количестве использованных источников более 180 – это публикации иностранных авторов.

Собранные в диссертации (в первой главе) данные о закономерностях и причинах проявлений деформаций породных массивов в окрестности подземных сооружений, особенно под застроенными территориями, их систематизация и научный анализ представляют большую практическую ценность, поскольку могут быть обобщены и применены специалистами в конкретных случаях проектирования подземных объектов в сходных горно - технических условиях. Эти данные послужили автору отправной точкой для разработки концептуальных положений корректировки объемных численных моделей подземных сооружений сложной пространственной конфигурации, с целью учета слоистости горных массивов, а также изменения деформационных и прочностных свойств пород в зависимости от интенсивности сформировавшихся в процессе строительства полей напряжений.

Для реализации поставленной цели диссертации, заключающейся в разработке нового подхода к прогнозу геомеханических процессов, происходящих в слоистом горном массиве в окрестности подземного сооружения, в том числе – при поэтапном его строительстве, автору потребовалось провести большой объем весьма сложных и интересных лабораторных и натурных исследований. В связи с этим особый интерес представляют подробное описание (в главе 3)

выполненных автором лабораторных исследований, полученные в процессе их проведения данные, а также результаты их обработки и анализа. Изложенный эмпирический материал положен в основу новых, более адекватных численных моделей, которые реализуются в соответствии с общей идеей работы, состоящей в учете нелинейного деформирования и анизотропии свойств реального горного массива при прогнозе проявлений деформаций пород в окрестности подземного сооружения.

Очевидно, что в лабораторных условиях можно выполнить лишь ограниченное количество испытаний, в то время как в процессе компьютерного моделирования напряженно – деформированного состояния массива в окрестности подземного сооружения необходимо применять деформационные и прочностные характеристики пород в зависимости от достигнутого уровня и отношений компонент напряжений и деформаций в объемном состоянии. Задача восполнения недостающей информации о «равнопрочности» и «равнодеформируемости» пород, находящихся в различных напряженных состояниях, в диссертации решается на современном научном уровне. На первом этапе, принимая за основу результаты испытаний породных образцов в направлениях перпендикулярном и параллельном слоистости на осевое и объемное сжатие, сжатие образцов по образующим, а также раскалывания образцов сферическими инденторами (с целью определения прочностных характеристик при растяжении) настраивается дискретно - сплошная численная модель материала породного образца. Далее на основе этих данных строится компьютерная модель массива, позволяющая автоматически определять требуемые характеристики пород на каждом этапе нагружения в процессе расчета напряжений и перемещений в массиве вокруг подземного сооружения.

Особый интерес представляют также приведенные в диссертации рекомендации по применению конечно-элементной сетки, включающей два типа конечных элементов. Элементы первого типа являются сплошными и отвечают за деформирование материала среды, моделирующей горный массив, на допредельной стадии. Второй тип конечных элементов представляет собой класс

контактных (когезионных) элементов. Эти элементы позволяют моделировать зарождение и развитие микротрещин в материале и рассматривать запредельное состояние деформирования. Таким образом достигается повышение адекватности моделирования соответствующих условий контакта между слоями в грунтовом массиве при применении той или иной геомеханической модели.

В качестве основного научного достижения следует особо отметить разработанную и реализованную автором концепцию разделения общей глобальной компьютерной модели породного массива, окружающего подземное сооружение сложной пространственной ориентации, на ряд локальных модели различного уровня в зависимости от конструктивной сложности объекта и этапности его строительства. Предложенный подход предусматривает разработку для каждого составляющего элемента сооружения соответствующей локальной численной модели с высоким уровнем детализации и позволяющим учитывать технологию его проходки. Граничные условия, накладываемые на рассматриваемую локальную модель, задаются автоматически в зависимости от уровня напряжений и деформаций, достигнутых в сопряженных локальных моделях. Таким образом обеспечивается учет взаимного влияния локальных моделей между собой и их общего состояния в составе глобальной модели. Очевидно, это позволяет существенным образом сократить общее время расчета и повысить детализацию компьютерного моделирования подземного объекта в целом. В то же время, автор убедительно показывает, что при существенном сокращении трудоемкости расчета, предложенная концепция компьютерного моделирования не приводит к заметному снижению точности расчета, конечно, при соответствующей корректной ее реализации.

Широкие возможности, которые открывает предложенный метод компьютерного моделирования, позволили автору на заключительном этапе исследований рассмотреть особенности формирования деформированного состояния земной поверхности над пересадочным узлом станции метрополитена на различных этапах его строительства. Очень важно, что для подтверждения достоверности полученных результатов компьютерного моделирования автор сопо-

ставлял их с данными натурных исследований. При этом проведенное сравнение расчетных и измеренных в натурных условиях величин оседания земной поверхности, выявившее их удовлетворительное согласование (отличие не превышало 10%) показало, что применяемая численная компьютерная модель настроена идеально.

В целом, анализ сформулированных автором на основе выполненных исследований трех научных положений, выносимых на защиту, позволяет заключить, что все они являются обоснованными и обладают несомненной новизной и практической значимостью.

Так, изложенное выше позволяет утверждать, что **первое защищаемое положение**, в котором автор предлагает проводить исследование процессов деформирования и разрушения слоистых пород в рамках пространственной геомеханической модели «горный массив – подземное сооружение» на основании представления их в виде конечно-дискретных элементов с ориентированным распределением механических их показателей, представляется обоснованным и убедительно доказанным.

На основе этого положения в диссертации сформулирована концепция практического компьютерного моделирования процессов зарождения и распространения трещин в горном массиве, а также построена и проиллюстрирована методика определения зон дополнительной нарушенности пород в окрестности подземного сооружения в процессе его строительства.

Второе защищаемое положение, согласно которому прогноз деформаций слоистого породного массива, вследствие создания породных обнажений при строительстве подземного сооружения, должен производиться с учетом степени анизотропии и влияния интенсивностей сформировавшихся полей напряжений и деформаций на механические свойства пород, также убедительно подтверждается результатами выполненных исследований, включающими их сопоставление с данными детального геотехнического мониторинга за оседанием земной поверхности при строительстве объектов Санкт-Петербургского метрополитена.

Не вызывает сомнений **третье научное положение**, связанное с совершенствованием методики компьютерного моделирования поведения горного массива в окрестности подземного сооружения сложной пространственной конфигурации, в том числе при поэтапном строительстве.

Научная новизна полученных в диссертационном исследовании Карасева М.А. результатов заключается в следующем:

- предложена концепция учета взаимной связи между деформационными характеристиками твердых аргиллитоподобных глинистых пород и достигнутыми напряжениями и деформациями в рамках компьютерного моделирования на основе применения конечно-дискретных элементов;

- разработаны уточненные численные модели слоистой среды, которые в явном виде позволяют прогнозировать зарождение и рост микро- и макротрещин, формируемым в процессе деформирования плоскостям ослабления;

- в рамках концепции многослойной среды разработана геомеханическая модель твердых аргиллитоподобных глинистых пород, позволившая установить основные закономерности, описывающие влияние интенсивностей полей напряжений и деформаций в массиве, формирующихся при подземной строительстве, на анизотропию прочностных и деформационных свойств пород.

Практическая значимость результатов диссертации состоит:

- в реализации нового подхода к расчету деформаций породного массива при строительстве подземных сооружений на основе применения уточненной геомеханической модели твердых аргиллитоподобных глинистых пород и предложенного автором алгоритма ее численной реализации в существующих программных комплексах;

- в разработке рекомендаций по применению новых типов конечных элементов с целью повышения точности определения зоны влияния строительства сложных пространственных подземных сооружений на процесс развития деформаций земной поверхности;

- в уточнении концепции научно-технического обоснования геомеханически безопасного освоения подземного пространства городов при строительстве

подземных сооружений сложной пространственно конфигурации.

3. Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов

Достоверность и обоснованность результатов научных исследований автора не вызывает сомнений и подтверждается проведенной апробацией предложенных моделей при проектировании реальных объектов подземного строительства и сопоставлением полученных в ходе компьютерного моделирования прогнозных значений деформаций земной поверхности с результатами наблюдений за осадками земной поверхности, полученными в ходе геодезической съемки при строительстве станций и подземных пересадочных комплексов Санкт-Петербургского метрополитена. Удовлетворительные результаты сравнения прогнозных и фактических замеров оседания земной поверхности над станциями "Обводный канал", "Бухаресткая", "Волковская", "Адмиралтейская" и "Международная", при строительстве которых был организован детальный геотехнический мониторинг, позволяют говорить об адекватности применяемых расчетных моделей и обоснованности сформулированных в диссертации научных положений, выносимых на защиту.

3. Апробация и внедрение работы

Основные научные положения и результаты исследований широко освещались автором и получили поддержку в процессе выступлений с докладами на Международных и всероссийских научных конференциях и семинарах высокого уровня.

Полученные в диссертации результаты использованы при проектировании новых станций Санкт-Петербургского метрополитена и включены в состав проектной документации. Проекты сооружений станций метрополитена "Театральная", "Горный институт", "Путиловская" получили положительное заключение Главгосэкспертизы и находятся на стадии практической реализации.

3. Замечания и рекомендации по диссертационной работе

Отмечая высокий уровень выполненных автором исследований, тем не менее, по тексту диссертации и, частично, автореферата можно сделать следующие замечания.

1. В качестве основного замечания следует отметить, что изложение материала в диссертации имеет явно выраженную практическую направленность. В связи с этим многие аспекты, принципиальные в теоретическом плане, освещены недостаточно полно. Так, можно отметить, что в работе такого высокого уровня было бы уместным привести более полные и конкретные рекомендации по заданию элементной сетки, содержащей когезионные элементы, позволяющие моделировать процесс образования трещин, а также по выбору варианта модели деформирования слоистых грунтов. Кроме этого не совсем понятно, как нагружается каждая из локальных моделей в процессе расчета. Очевидно, что принятая за основу модель нелинейного деформирования массива предусматривает организацию итерационного процесса нагружения. Представляется, что вопросу исследования сходимости этого процесса, особенно, когда все локальные модели взаимосвязаны в рамках глобальной модели, следовало уделить больше внимания.

2. При моделировании геомеханических процессов, происходящих в горном массиве в окрестности подземного сооружения, автору следовало более подробно описать процесс моделирования подземных конструкций, которые, к тому же, могут возводиться поэтапно.

3. Прогноз геомеханических процессов во вмещающем горном массиве в окрестности подземных сооружений предполагает анализ напряженно-деформированного состояния пород. Очевидно, что компьютерное моделирование в рассматриваемой постановке позволяет учитывать, что изменение напряженно-деформированного состояния массива в процессе строительства подземного сооружения оказывает существенное влияние на указанные процессы. В связи с этим в процессе исследований автору следовало, наряду с осадками земной поверхности, более детально проанализировать также и напряженно-

деформированное состояние окружающего сооружение массива, изменяющееся на каждом этапе строительства

4. Иллюстрируя широкие возможности, которые открывает разработанная численная модель для практики проектирования, автор приводит результаты прогноза осадок земной поверхности над станционным комплексом метрополитена в г. С.-Петербурге. При этом, сопоставляя полученные расчетные значения вертикальных смещений с данными натурных измерений, в работе убедительно показано, что практических целях относительно простая геомеханическая модель слоистого грунтового массива, как трансверсально-изотропной среды, обладающей анизотропией прочностных и деформационных свойств (сформулированная в рамках механики сплошной среды), дает удовлетворительные результаты. В связи с этим диссертанту следовало убедительно показать, в каких случаях в практике проектирования необходимо обращаться к гораздо более сложной и трудоемкой модели, основанной на дискретно-сплошном представлении массива пород, разработке которой уделено большое внимание. Впрочем, эта рекомендация дополняет первое замечание.

5. Автор воспользовался реологической моделью для описания поведения аргиллитоподобных глин и использовал при моделировании соответствующие параметры линейной наследственной ползучести. В дальнейшем при проведении расчетов на основании этих параметров определяются необходимые значения деформационных характеристик пород. Однако полученные в результате лабораторных экспериментов константы, характеризующие ползучесть глинистых пород, не могут быть универсальными для всех видов напряженных состояний, а потому, по всей видимости, автору следовало в этой связи сделать необходимые пояснения о принятых допущениях.

Рекомендации:

В целом, сделанные замечания не относятся к научным положениям выполненного исследования и носят, скорее, характер рекомендаций. Кроме этого, следует отметить, что автор, говоря о слоистых породах, ограничился рассмотрением только аргиллитоподобных глин, характерных для условий строитель-

ства метрополитена в г. С.-Петербурге. Вряд ли обоснованно такое сужение понятия «слоистые породные массивы», использованное в названии работы. Конечно, разработанный в диссертации программный инструмент для компьютерного моделирования позволяет рассматривать и другие условия, в том числе – когда слои разнородны и обводнены. Представляется, что в этом направлении работа может (и должна) быть продолжена.

4. Оценка языка и стиля диссертации и автореферата.

Диссертация оформлена должным образом и отвечает всем требованиям, предъявляемым к научным публикациям. Однако следует отметить, что обилие материала, который автор принял решение привести в работе, вынудили его уменьшить шрифт и применить сокращенный интервал, с тем, чтобы общий объем диссертации не превышал норматива. В результате это не лучшим образом отразилось на восприятии текста.

Основные результаты диссертации опубликованы в одной монографии и 27 научных статьях автора, 16 из которых – в изданиях, соответствующих перечню ВАК.

Содержание автореферата полностью раскрывает основные положения диссертационного исследования. Язык и стиль диссертации и автореферата соответствуют принятым нормам.

5. Заключение

В заключение, наряду с научной новизной и практической значимостью выполненного М.А. Карасевым диссертационного исследования, следует отметить, что оно содержит решение актуальной научной проблемы, связанной с разработкой и совершенствованием методологии проектирования подземных объектов различного назначения, представляющих собой комплексы сооружений сложной пространственной конфигурации, которая в настоящее время имеет важное значение для успешного освоения подземного пространства городов и народного хозяйства в целом.

Изложенное позволяет констатировать, что диссертация М.А. Карасева является законченной научно-квалификационной работой, полностью соответ-

вует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» п.9, предъявляемым к докторским диссертациям, в которой на основании выполненных автором исследований разработана новая концепция компьютерного моделирования геомеханических процессов в слоистых породных массивах при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации в условиях городской застройки и получены новые научные и практические результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение для подземного строительства.

Таким образом, М.А. Карасев заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры механики материалов
Института горного дела и строительства
ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет»



Андрей Сергеевич
Саммалъ

Подпись д.т.н., проф. А.С.Саммалъ заверяю
Начальник административно-кадрового управления



Метелищенкова М.В.



10 ноября 2017 г.

300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92

телефон (4872) 33-24-10, e-mail: sammal@min.fsu.tula.ru, assammal@mail.ru

Институт горного дела и строительства

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»