

*На правах рукописи*

*Шэнь Цяофэн*

**Шэнь Цяофэн**

**ПРОГНОЗ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ  
СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОДНОСВОДЧАТЫХ СТАНЦИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА  
ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОЭТАПНОГО РАСКРЫТИЯ ВЫРАБОТКИ  
В МАЛОПРОЧНЫХ СКАЛЬНЫХ ГРУНТАХ**

Специальность 2.1.8 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,  
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей  
(технические науки)

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

Новосибирск – 2021 г.

Работа выполнена на кафедре «Тоннели и метрополитены» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Научный руководитель: **Фролов Юрий Степанович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Меркин Валерий Евсеевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ООО «Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации», научный руководитель

**Кузнецов Анатолий Олегович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Геотехника, тоннели и метрополитены»  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Ведущая организация: **ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»,**  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «24» ноября 2021 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета 99.2.054.02 на базе федеральных государственных бюджетных образовательных учреждений высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» и «Томский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191, ауд. 224.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» и на сайте [www.stu.ru](http://www.stu.ru).

Отзывы на диссертацию и автореферат диссертации с указанием ФИО, почтового адреса, телефона, адреса электронной почты, наименования организации и должности, подписанные и заверенные печатью организации, в двух экземплярах просим направить в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, доцент



Ланис Алексей Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В общем объеме объектов тоннельного строительства значительную часть занимают подземные сооружения большого пролета: транспортные тоннели пролетом от 16 до 30 метров (трех или четырех полосное движение в автодорожных тоннелях), а также односводчатые станции метрополитенов. Раскрытие выработок большого пролета при строительстве таких тоннелей в среднепрочных и малопрочных скальных массивах ( $75 > RQD \geq 25$ )<sup>1</sup> представляет собой сложный и ответственный комплекс мероприятий, требующий особого подхода как в процессе расчета и проектирования, так и в процессе производства работ. В этих условиях в последние десятилетия в некоторых странах внедряется инновационная технология сооружения тоннелей большого пролета горным способом с поэтапным раскрытием выработки до проектного сечения несколькими опережающими забоями.

При выполнении проходческих работ по новой технологии определяющее влияние на характер формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «крепь – грунтовый массив» оказывают геометрические параметры сечения, последовательность разработки и опережение забоев каждой из выработок. В таких условиях на каждом этапе выполнения проходческих работ необходимо спрогнозировать не только НДС элементов временной крепи/первичной обделки, но и сдвигение и деформации грунтового массива, что особенно важно при строительстве подземных сооружений метрополитена в условиях плотной городской застройки.

Для решения подобных задач в последнее время активно используются достаточно мощные конечно-элементные программные комплексы (ПК), позволяющие решать подобные задачи в трехмерной постановке. Анализ столь сложной схемы выполнения проходческих работ требует не только понимания «физики» силового взаимодействия крепи и грунтового массива, знания грунтовых моделей и общих принципов конечно-элементного моделирования, но и системного подхода для решения этого класса задач, а также наличия надежных результатов верификации применения тех или иных ПК. Такая верификация может быть получена только в рамках специализированной научно-исследовательской работы.

Результаты глубокого научного исследования имеют важное рекомендательное значение и ценность для стран, имеющих подобные проекты в развитии своей транспортной инфраструктуры.

Таким образом, разработка практической методики прогноза НДС грунто-

---

<sup>1</sup> (ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация, п. Г2).

вого массива и временной крепи при поэтапном раскрытии опережающими забоями большепролетных выработок в скальных массивах низкой прочности является актуальной задачей.

### **Степень разработанности темы исследований.**

Вопросам, освещающим опыт проектирования и строительства тоннелей горным способом, посвящены работы российских и иностранных ученых и специалистов: Абрамчука В.Н., Мосткова В.М., Меркина В.Е., Мордвинкова Ю.А., Фролова Ю.С., Чеботаева В.В., Щекудова Е.В., Щелочковой Т.Н., Huang Mingli, Xu Zhen, Ren Zhiliang, Verya Nasri, E. Hoek, N. Barton и M. Kavvadas, др.

Значительный вклад в исследование геомеханических процессов формирования НДС в скальных массивах различной степени сохранности при строительстве подземных сооружений внесли такие ученые, как Амусин Б.З., Баклашов И.В., Безродный К.П., Булычев Н.С., Иванес Т.В., Картозия Б., Либерман Ю. М., Ланис А.Л., Протосеня А.Г., Руппенейт К.В., Саммаль А.С., Фотиева Н.Н., Цибариус Ю.А., N. Бартон, L.V. Rabcewicz, D.U. Deere, A. Bieniawski, Wang Mingnian, Liu Dagang и др.

Однако теоретические аспекты проблемы обеспечения устойчивости выработок пролетом более 20 м в скальных массивах низкой прочности, раскрываемые до проектного сечения по технологии новоавстрийского метода выполнения проходческих работ (НАТМ) еще не достаточно разработаны.

Сложность аналитических решений в плоской постановке задачи о НДС системы «крепь – грунтовый массив» с учетом последовательности раскрытия выработки и поэтапного возведения временной крепи/первичной обделки вынуждает прибегать к различного рода допущениям, идеализирующим действительную физическую картину явления. Те же недостатки присущи и плоским моделям метода конечных элементов. Это существенно снижает точность решения задачи и достоверность результатов. В связи с этим новая технология поэтапного раскрытия выработки во многом опирается на эмпирику, и подбор параметров крепи при поэтапной проходке взаимовлияющих выработок в одном проектном сечении тоннеля приходится корректировать на месте, чтобы минимизировать конструктивные и технологические риски. Такой подход к решению многокритериальной задачи приводит к неоправданно завышенным объемам работ и увеличению материалоемкости тоннельных конструкций. Добиться эффективных решений возможно только при учете в теоретических исследованиях с большей точностью и достоверностью технологических особенностей раскрытия большепролетных выработок, влияющих на характер формирования НДС системы «крепь – грунтовый массив». Поэтому особое значение приобретают научные методы исследования с использованием численного моделирования в

пространственной постановке задачи, а также сочетания 2D- и 3D-моделирования.

**Цель исследований** – повышение эффективности и безопасности проходки тоннельной выработки большого пролета в малопрочных скальных грунтах при ее поэтапном раскрытии опережающими забоями на основе прогноза напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «крепь – грунтовый массив».

**Задачи исследований.**

1. Оценить степень влияния различных способов раскрытия выработок большого пролета несколькими опережающими забоями на устойчивость выработки при поэтапном выполнении проходческих работ.

2. Изучить процесс формирования НДС временной крепи и вмещающего грунтового массива с целью выявления зон концентрации напряжений и повышенных деформаций на каждом из этапов продвижения забоев опережающих выработок вплоть до раскрытия тоннеля до проектного сечения.

3. Выполнить численный анализ НДС системы «крепь – грунтовый массив» в трехмерной постановке задачи с целью прогноза геомеханических процессов при сооружении односводчатой станции метрополитена в г. Чунцин (КНР).

4. Разработать практическую методику прогноза НДС грунтового массива и временной крепи с учетом поэтапного раскрытия выработки большого пролета опережающими забоями в скальных массивах низкой прочности.

5. Выполнить верификацию основных положений разработанной автором методики путем сравнительного анализа результатов прогноза НДС крепи и вмещающего выработку грунтового массива с данными, представленными в независимых источниках по данной тематике.

**Предмет исследования** – характер формирования и изменения НДС системы «крепь – грунтовый массив» при поэтапной разработке большепролетных выработок в малопрочных скальных грунтах.

**Объект исследования** – конструкции временной крепи/первичной обделки и вмещающие их скальные массивы низкой прочности в процессе раскрытия большепролетных выработок несколькими опережающими забоями.

**Научная новизна работы** заключается в следующем.

1. Определена область эффективного применения поэтапного раскрытия большепролетной выработки методом боковых пилот-тоннелей при заложении тоннелей в малопрочных скальных грунтах на глубине соизмеримой с пролетом выработки.

2. Выявлена динамика формирования напряженно-деформированного состояния системы «крепь – грунтовый массив» и установлены причин-

но-следственные связи, определяющие степень влияния технологических параметров проходческих работ в малопрочном скальном массиве на устойчивость выработки большого пролета, раскрытой до проектного сечения методом боковых пилот-тоннелей.

3. Обоснована необходимость анализа НДС армогрунтового массива, заключенного между внутренними диафрагмами (ядро сечения) с целью оценки его устойчивости при различных вариантах разрушения диафрагм.

4. Разработана методика и алгоритм решения задачи, позволяющие повысить достоверность прогноза напряженно-деформированного состояния системы «крепь – грунтовый массив» при раскрытии выработок большого сечения в малопрочном скальном массиве.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в следующем:

– представлены методические рекомендации, позволяющие с наибольшим приближением к натуре отразить в проектных расчетах технологические особенности выполнения проходческих работ, влияющих на распределение и значения расчетных усилий в крепи, на деформации грунтового массива и осадки земной поверхности;

– обоснованы практические предложения по дальнейшему совершенствованию организации проходческих работ с целью снижения конструктивных и технологических рисков в каждом забое взаимовлияющих смежных выработок, а так же обеспечения устойчивости раскрытой до проектного контура большепролетной выработки при разработке центрального ядра сечения;

– показано, что при строительстве станции метрополитена в условиях плотной городской застройки возможно прогнозировать геометрические параметры мульды оседания поверхности земли в процессе продвижения каждого из забоев и, как следствие, управлять этими параметрами, например, корректируя длину заходки при разработке центрального ядра сечения.

**Методология и методы исследований.** Основным методом при решении поставленных в работе задач являлся метод конечных элементов (МКЭ). При этом использовались сертифицированные специализированные геотехнические ПК MIDAS GTS NX и FLAC. Кроме того, в работе использованы отдельные элементы вероятностно-статистического метода системного анализа.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Обоснование целесообразности и эффективности метода боковых пилот-тоннелей для раскрытия большепролетных выработок в малопрочных скальных грунтах путем численного моделирования НДС грунтового массива и временной крепи.

2. Выявленные по результатам численного моделирования причинно-следственные связи, определяющие степень влияния технологических параметров проходческих работ на устойчивость выработки большого пролета, раскрытой до проектного сечения методом боковых пилот-тоннелей в малопрочном скальном массиве.

3. Методика и алгоритм прогноза НДС временной крепи/первичной обделки и грунтового массива, основанная на результатах трехмерного численного моделирования, применительно к условиям строительства односводчатой станции метрополитена в малопрочных скальных грунтах в г. Чунцин (КНР).

#### **Степень достоверности.**

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается корректным применением метода конечных элементов для решения задач геомеханики с использованием для численного моделирования современных сертифицированных и апробированных программных комплексов; удовлетворительным качественным и количественным совпадением результатов исследований автора с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

**Личный вклад автора** состоит в определении цели и в постановке задачи; в непосредственном участии при разработке концепции системного подхода к проведению исследований; в подготовке исходных данных и в построениях численных моделей для различных вариантов технологических схем проходческих работ; в анализе и интерпретации результатов вычислительных экспериментов; в разработке методики и алгоритма прогноза напряженно-деформированного состояния системы «крепь – грунтовый массив» и проведенной верификации результатов исследований; в подготовке основных публикаций по выполненной работе.

**Апробация работы.** Содержание и основные положения работы докладывались на научно-технических семинарах кафедры «Тоннели и метрополитены» ПГУПС, на X международной конференции «Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте» (Санкт-Петербург 2017 г.), на LXXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 2018 г.); на Международной научно-технической конференции «Современные задачи обеспечения проектирования, строительства и эксплуатационной надежности транспортных сооружений» (Москва, 2019 г.); на научном семинаре в ФГБОУ ВО СГУПС (Новосибирск, 2020 г.).

**Внедрение результатов работы.** При строительстве станции «Северный вокзал» кольцевой линии в г. Чунцин (КНР): – были учтены рекомендации по закреплению забоя на торцевом участке станциионного тоннеля. Результаты ис-

следований использованы в учебном процессе, в частности, в рамках дисциплины «Инновационные технологии в тоннелестроении». Рабочая программа Б1.ВОД.5 для специальности 23.05.06 – «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» по специализации «Тоннели и метрополитены».

**Публикации.** Основные результаты работы опубликованы в 7 научных статьях, в том числе 3 из них в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 131 страница, включая 25 таблиц, 62 иллюстрации и 2 приложения. Список литературы содержит 82 наименования.

Автор благодарит своего научного руководителя и коллектив кафедры «Тоннели и метрополитены» ФГБОУ ВО ПГУПС за помощь, оказанную при работе над диссертацией.

### **Основное содержание работы**

**В первой главе** диссертации приведены статистические данные о развитии транспортного тоннелестроения в Китае, проведен анализ мирового опыта строительства транспортных тоннелей и метрополитенов в малопрочных скальных грунтах горным способом по технологии поэтапного раскрытия выработок большого пролета опережающими забоями. Выполнен анализ методов оценки устойчивости выработки и определения качества скального массива, принятых в мировой практике подземного строительства. Изложены актуальные проблемы, возникающие при раскрытии большепролетных выработок в малопрочных скальных грунтах.

Инновационная технология сооружения тоннелей большого пролета, заложённых в малопрочных скальных массивах, с поэтапным раскрытием выработки несколькими опережающими забоями является модификацией метода NATM. Публикации на эту тему появились в начале 90-х годов и до настоящего времени имеются только в зарубежных источниках (N. Barton, E.T. Brown, E. Hoek, P. Lunardi, P. Marinos, P. Průška, M. Šejnoha, J.S. Tang, S.Y. Liu, L.Y. Tong, N. Tomisawa, M. Tamotsu). В каждой из этих работ освещается практический опыт строительства конкретного объекта, достигнутые успехи как с точки зрения снижения финансовых затрат, так и с позиций снижения трудоемкости работ и сокращения времени строительства.

Следует отметить тенденции совершенствования технологии NATM, направленные на развитие теоретической базы метода при раскрытии выработок большого пролета несколькими опережающими забоями в малопрочных скальных массивах. Однако в публикациях отсутствуют сведения о системных научных



исследованиях, проведенных с целью обоснования принятых конструктивно-технологических решений при строительстве столь сложных и ответственных объектов.

С расчетной точки зрения в настоящее время в практике проектирования подземных сооружений общей тенденцией является верификация не только отдельных ПК (MIDAS, PLAXIS, FEM-models, Z-Soil и т.д.), но и самого МКЭ применительно к различным классам задач подземного строительства. Здесь остается большое количество нерешенных вопросов. Одной из наиболее важных и острых проблем является установление границ применимости к таким задачам, как проходка большепролетных выработок, как самого МКЭ, так и отдельных реализующих этот метод программ, поскольку это очень ответственные и очень сложные для производства работ сооружения.

Внедрение современных технологий в разнообразных инженерно- геологических условиях и различная глубина заложения тоннелей большого пролета требуют принятия таких конструктивно-технологических решений, для которых недостаточно – а зачастую и невозможно – использовать метод аналогий и повторных решений без предварительной адаптации проекта к конкретным условиям строительства. В связи с этим возникает необходимость в проведении комплекса научных исследований и разработке на их основе методики прогноза НДС системы «крепь – грунтовый массив». Это позволит обоснованно принимать конструктивно-технологические решения, обеспечивающие высокие технологии проходческих работ и минимизацию конструктивных и технологических рисков при строительстве тоннелей большого пролета в малопрочных скальных грунтах.

Результаты такого научного исследования не только имеют важное рекомендательное значение и ценность для подобных проектов в Китае, но также могут быть использованы в качестве альтернативных решений при рассмотрении вариантов сооружения односводчатых станций на линиях метрополитена в городах Красноярск, Челябинск, Екатеринбург, где станционные тоннели заложены в скальных массивах средней и низкой прочности.

**Во второй главе** изложены результаты 2D-численного моделирования НДС системы «крепь – грунтовый массив» при разных вариантах технологических схем раскрытия выработки. В результате сопоставления полученных данных установлено, что при выполнении проходческих работ с раскрытием выработки пролетом более 20 метров в малопрочных скальных грунтах на глубине соизмеримой с пролетом выработки оптимальным решением является метод боковых пилот-тоннелей.

Прогноз устойчивости выработки, пройденной в скальных грунтах, непосредственно связан с обобщенной характеристикой скального массива, включа-

ющей большое число показателей, определяющих не только прочностные и деформационные характеристики грунта, но и особенности структурного строения скального массива, его начальное напряженное состояние, степень обводненности и т.д. Такую обобщенную характеристику в международной практике тоннельного строительства принято называть показателем качества скального массива.

В мировой практике подземного строительства для оценки устойчивости скального массива, нарушенного выработкой, известны классификации: по коэффициенту крепости  $f$  (СП 120.13330, Протодюконов М.М., РФ), по прочности на одноосное сжатие  $R_c$  (ГОСТ 25100-2020, РФ), по показателю BQ («Стандарт классификации грунтовых массивов», GB 50218-94, КНР), по показателю RQD (Rock Quality Designation, Deere, США), по показателю RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski, Польша), по показателю Q (Barton, Норвегия). Некоторые из них приводятся в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели качества скального массива

Прочность грунтов	$f$	$R_c$ , МПа	BQ	RQD, %	RMR
Средней прочности	4	30–15	451–351	75–50	60–41
Малопрочные	2	15–5	350–251	50–25	40–21

Проектирование и строительство транспортных тоннелей большого пролета и односводчатых станций метрополитена, сооружаемых горным способом в малопрочных скальных грунтах, – технически и технологически сложная задача. Выработки пролетом более 20 м в малопрочных скальных грунтах раскрывают по схеме центральной диафрагмы или по схеме боковых пилот-тоннелей (рисунок 1). С целью минимизации риска обрушения площадь сечения выработок, раскрываемых каждым забоем, должна контролироваться в соответствующем диапазоне, что обусловлено ограниченной прочностью грунтов.

Выбор способа поэтапного раскрытия выработки односводчатой станции метрополитена, сооружаемой в малопрочных скальных грунтах опережающими забоями, выполнен по совокупности результатов 2D-численного моделирования. Сравнительный анализ способов проведен с учетом деформационно-прочностных свойств малопрочного скального массива, конструктивных параметров крепи/первичной обделки и последовательности выполнения проходческих работ. Физико-механические характеристики малопрочного скального массива в численной модели определены в соответствии с ГОСТ 25100-2020 и GB 50218-94.

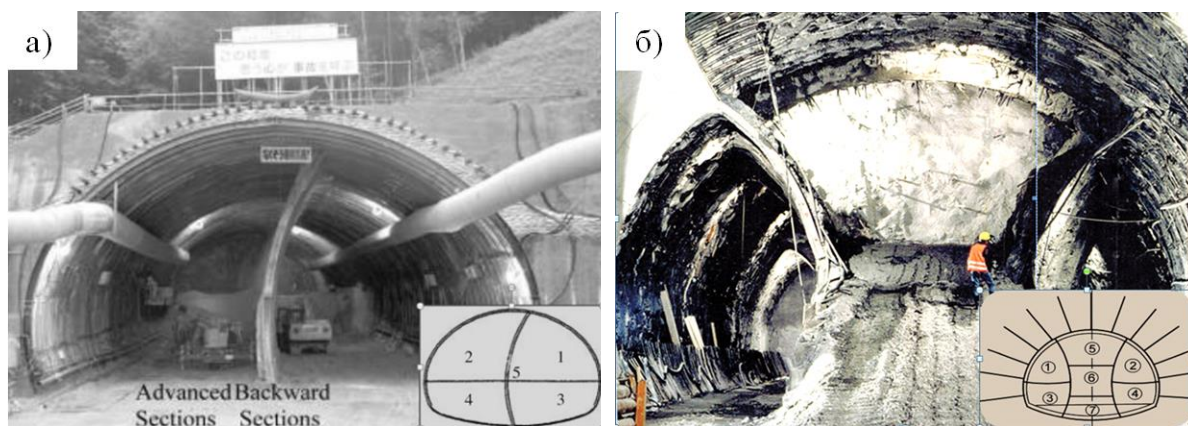


Рисунок 1 – Схема и общий вид поэтапного раскрытия большепролетных выработок: а – методом центральной диафрагмы; б – боковых пилот-тоннелей

Установлено, что при глубине заложения тоннеля, соизмеримой с пролетом выработки, при производстве проходческих работ по схеме центральной диафрагмы существует риск значительных осадок земной поверхности. Так, осадки земной поверхности при раскрытии выработки методом центральной диафрагмы на 60 % больше, чем при методе боковых пилот-тоннелей, на 15 % больше и границы мульды оседания (рисунок 2).

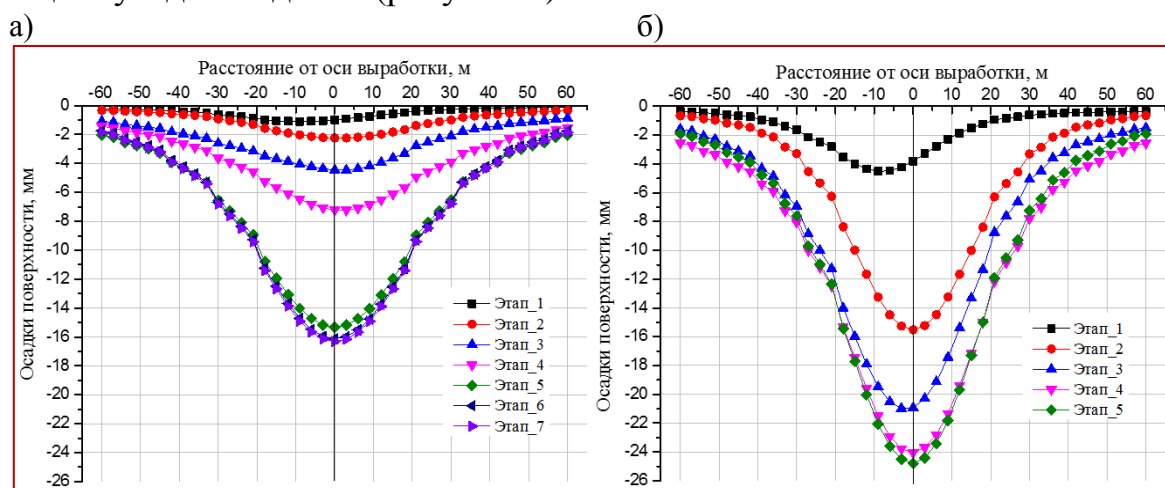


Рисунок 2 – Мульды оседания земной поверхности при раскрытии выработки: а – методом боковых пилот-тоннелей; б – методом центральной диафрагмы

Уровень сжимающих напряжений в скальном массиве вокруг выработки, раскрытой по методу боковых пилот-тоннелей несколько ниже, чем при методе центральной диафрагмы. Следует отметить незначительные растягивающие напряжения после разработки лотковой части выработки при методе центральной диафрагмы.

Активный рост зоны предельного равновесия в случае выполнения работ по методу боковых пилот-тоннелей прекращается на расстоянии 5 м после проходки боковых пилот-тоннелей. При выполнении работ по методу центральной диафрагмы границы области предельного равновесия еще на этапе раскрытия калотты центрального ядра распространяются до 14 м, а после раскрытия выра-

ботки на полное сечение достигают земной поверхности (рисунок 3). Это свидетельствует о возможной потере устойчивости выработки.

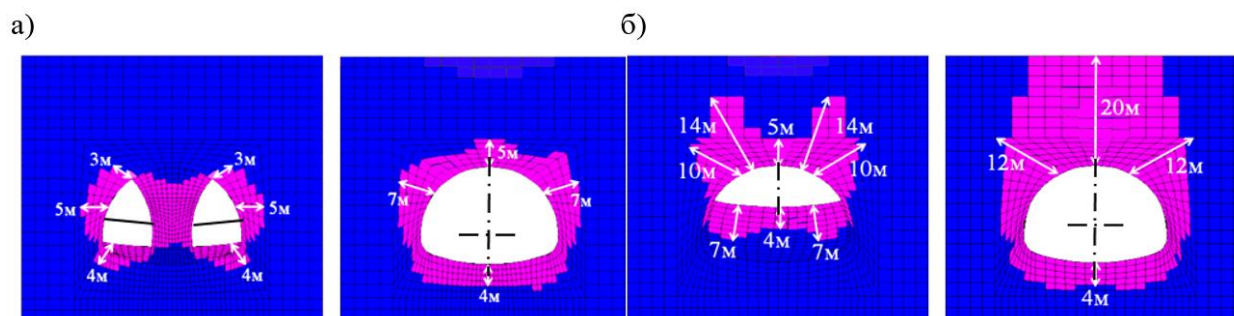


Рисунок 3 – Формирование области пластических деформаций в грунтовом массиве вокруг выработки при раскрытии: а – методом боковых пилот-тоннелей; б – методом центральной диафрагмы

Величины деформаций и динамика их изменения на контуре арочно-набрызг-бетонной крепи существенно отличаются при разных схемах поэтапного раскрытия выработки. Так при методе боковых пилот-тоннелей смещения в своде выработки на последних этапах проходческих работ зафиксированы на 30 % меньше, чем при методе центральной диафрагмы. Напряжения в набрызг-бетонной крепи при методе боковых пилот-тоннелей на 40 % меньше, чем при методе центральной диафрагмы. Меньше на 42 % и максимальное усилие в анкерах.

По совокупности результатов численного анализа, полученных при разных схемах раскрытия выработки до проектного сечения, можно заключить, что при сооружении односводчатых станций метрополитена, расположенных в малопрочных грунтах приоритетным технологическим решением является способ выполнения проходческих работ по схеме боковых пилот-тоннелей.

**В третьей главе** представлены результаты исследований геомеханических процессов при выполнении проходческих работ по схеме боковых пилот-тоннелей в плоской постановке задачи; с учетом специфики метода основное внимание уделено анализу устойчивости грунтового массива, заключенного между внутренними диафрагмами (ядро сечения); выявлена степень влияния физико-механических характеристик грунтового массива и конструктивных параметров крепи/первичной обделки на напряженно-деформированное состояние исследуемой системы.

Особенность выполнения проходческих работ с предварительной проходкой боковых опережающих забоев помимо выявления закономерности деформирования крепи и смещения грунтового массива на каждом из этапов выполнения проходческих работ требует решения целого комплекса технических задач, обеспечивающих минимизацию технологических рисков. К таким задачам в первую очередь следует отнести необходимость обеспечения устойчивости

скального массива при разработке центральной части выработки (ядра сечения).

При построении численной модели геомеханические параметры скального массива и конструкция временной крепи/первичной обделки максимально приближены к условиям строительства односводчатой станции метрополитена в г. Чунцин (КНР). Станционный тоннель расположен на глубине 17 м, соизмеримой с пролетом выработки. Арочно-набрызг-бетонная комбинированная крепь включает стальные арки, омоноличенные набрызг-бетоном, и анкеры (рисунок 4а). Конечно-элементная модель построена в программе FLAC (рисунок 4б).

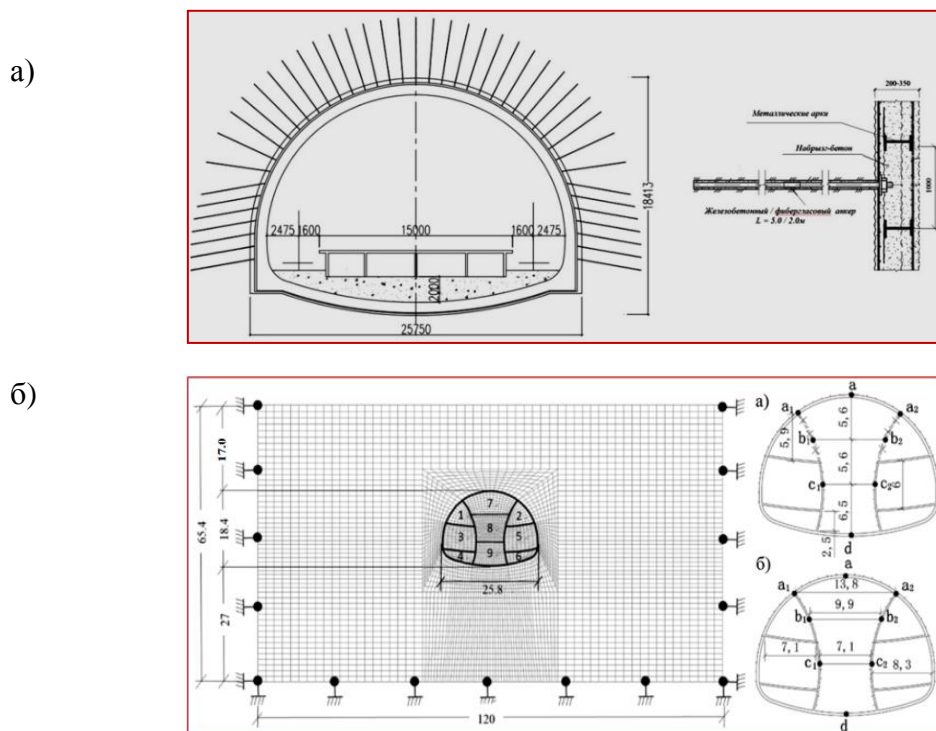


Рисунок 4 – Конструкция временной крепи/первичной обделки (а) и расчетная схема конечно-элементной модели (б)

Грунтовый массив моделировался объемными элементами с толщиной 1 м. Физико-механические свойства грунтового массива: удельный вес грунта  $\gamma = 22,5 \text{ кН/м}^3$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 27^\circ$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ , модуль деформации  $E = 600 \text{ МПа}$ , удельное сцепление  $c = 0,2 \text{ МПа}$ , прочность на сжатие  $R_c = 15 \text{ МПа}$ .

Набрызг-бетонная крепь со стальными арками моделировалась элементами оболочки. Приведенные модули упругости крепи по периметру проектного очертания выработки и по внутреннему контуру опережающих выработок равны, соответственно:  $E'_{пр} = 23000 \text{ МПа}$  и  $E''_{пр} = 2300 \text{ МПа}$ . Железобетонные и фиброгласовые анкеры моделировались анкерными элементами.

В разработанных конечно-элементных моделях выделялись основные расчетные этапы, соответствующие технологическим этапам проходческих работ.

С учетом специфики метода основное внимание уделено анализу устойчи-

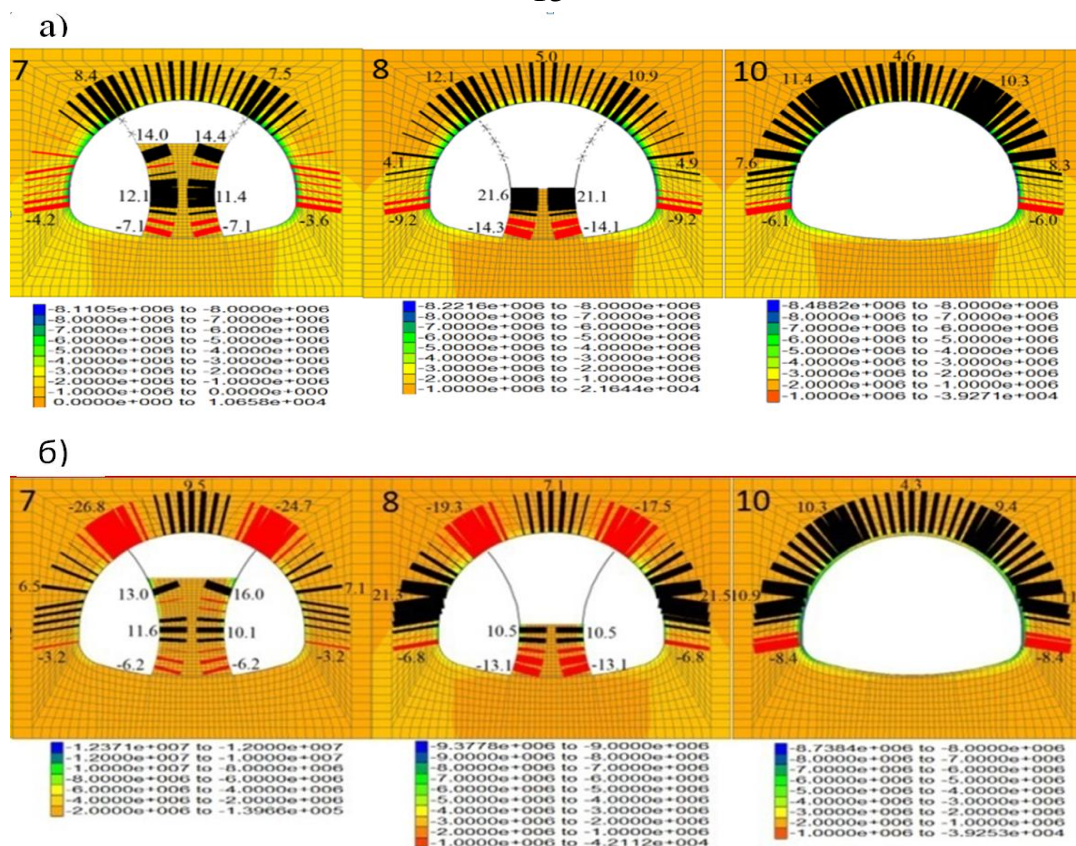
ности грунтового массива, заключенного между внутренними диафрагмами (ядро сечения) при двух возможных вариантах производства работ: с частичным разрушением внутренних диафрагм и с разработкой грунта в ядре сечения с разрушением диафрагм только после раскрытия выработки до проектного сечения.

Анализ вертикальных смещений шельги свода и кровли выработки позволяет заключить, что принятая система крепления и порядок разработки пилот-тоннелей практически исключают смещение грунтового массива до окончания проходки боковых тоннелей (этапы 1–6). При разработке грунта в ядре сечения с одновременным разрушением внутренних диафрагм осадки земной поверхности нарастают постепенно и к завершению проходческих работ достигают 22 мм. В случае, если разработка грунта в ядре сечения ведется с сохранением железобетонных диафрагм, то после их разрушения осадки резко возрастают, но остаются в тех же пределах, которые были зафиксированы при выполнении проходческих работ по первому варианту.

После выполнения проходческих работ по двум вариантам разрушения железобетонных диафрагм существенного различия в характере распределения и в величинах напряжений в окружающем грунтовом массиве не наблюдается (рисунок 5). В каждом случае преобладают сжимающие напряжения, значения которых находятся на низком уровне (8,2 МПа).

На различных этапах расчета, отражающих специфику проходческих операций, зафиксированы знакопеременные усилия в системе анкерной крепи не только на каждом из этапов раскрытия выработки, но и при разных вариантах выполнения проходческих операций. После разработки калотты с одновременным разрушением крепи пилот-тоннелей анкеры в своде работают на растяжение с усилием 7,5 до 8,5 кН. В процессе разработки ядра сечения растягивающие усилия в анкерах по контуру выработки нарастают. Сжимающие усилия сохраняются только в узлах примыкания сохраненных элементов крепи обратного свода боковых тоннелей. После раскрытия выработки на полное сечение растягивающие усилия фиксируются во всех анкерах, достигая максимума 11 кН.

Вариант разработки грунта в ядре сечения с разрушением диафрагм после раскрытия выработки до проектного сечения и замыкания обратного свода вносит существенные коррективы в работу анкеров. Характер распределения и величина усилий в анкерах на участке примыкания внутренних диафрагм после разработки калотты (этап 7) резко изменяются. Сжимающие усилия в узлах примыкания жестких элементов крепи боковых тоннелей резко возрастают, достигая значений 28 кН. Сохраненные до окончания проходческих работ диафрагмы сдерживают смещения грунта в ядре сечения и снижают вдвое максимальные усилия в анкерах с 21 кН до 10,5 кН.



Риснок 5 – Распределение максимальных главных напряжений (Па) в грунте и усилий в анкерах (кН) при выполнении проходческих работ: а – с разрушением внутренних диафрагм в процессе разработки ядра сечения; б – с разрушением внутренних диафрагм после раскрытия выработки до проектного сечения

Из данных о горизонтальных смещениях внутренних диафрагм следует, что после раскрытия калотты с разрушением части диафрагм (этап 7) смещение точки  $b_1$  в сторону пилот-тоннелей возросло в 4 раза по сравнению с периодом окончания в этих тоннелях проходческих работ (см. рисунок 4б). Это привело к образованию зоны пластических деформаций в верхней части заключенного между диафрагмами грунтового массива.

В то же время при варианте раскрытия стационарной выработки с сохранением диафрагм они под действием усилий, возникающих при деформации крепи/первичной обделки, смещаются в сторону оси выработки сразу после разработки калотты на величину до 10 мм (этап 7–9). Незначительные по величине горизонтальные смещения точек  $c$  происходят в сторону пилот-тоннелей до 8 этапа работ. Затем, несмотря на разные решения о последовательности разрушения внутренних диафрагм, смещения этих точек происходят в сторону оси стационарной выработки, причем при схеме работ по первому варианту эти смещения увеличиваются в 3 раза, а по второму – в 6 раз. В случае раскрытия выработки с последовательным разрушением части диафрагм в сохраненных элементах диафрагм возникают незначительные растягивающие напряжения. При сохранении железобетонных диафрагм до раскрытия выработки на полное сечение

сжимающие напряжения в этих элементах превышают 16 МПа непосредственно после раскрытия калотты (этап 7).

После раскрытия калотты ядра сечения область пластических деформаций смыкается в кровле выработки, распространяясь на глубину 4 м и эта граница остается постоянной до полного раскрытия выработки как при разрушении диафрагм в процессе разработки грунта, так и с разрушением диафрагм после завершения работ по разработке грунта в ядре сечения и устройства обратного свода. Следует отметить, что после последовательного разрушения диафрагм в верхней части ядра сечения возникают обширные области предельного равновесия вследствие смещения диафрагм в сторону боковых тоннелей (рисунок б).

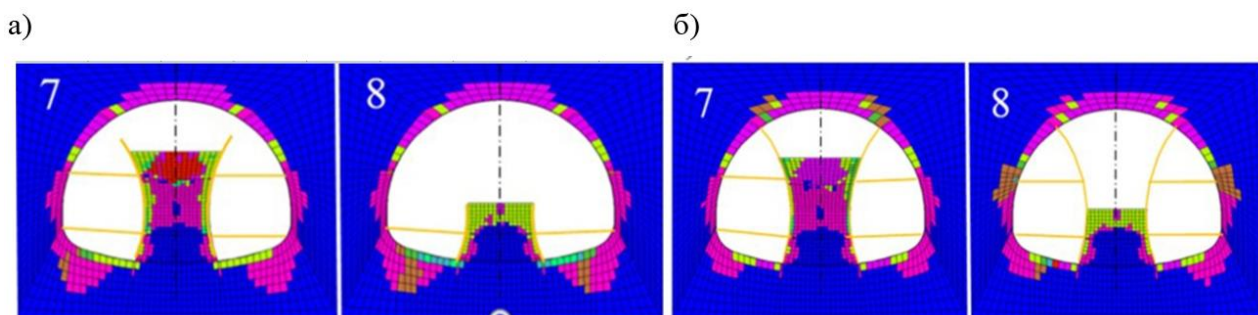


Рисунок 6 – Зоны пластических деформаций в центральном ядре на этапах разработки а – при разрушении диафрагм в процессе разработки грунта; б – при сохранении после раскрытия выработки до проектного сечения

Характер напряженно-деформированного состояния арочно-набрызг-бетонной крепи существенно не изменяется при стадийной технологии раскрытия выработки по любой из рассмотренных технологических схем. Уровень максимальных сжимающих напряжений после раскрытия выработки на полное сечение (13 МПа) обеспечивает со значительным запасом несущую способность конструкции в рассмотренных условиях строительства.

Таким образом, порядок выполнения работ при разработке скального массива в ядре сечения оказывает существенное влияние на НДС как грунтового массива, заключенного между внутренними диафрагмами, так и на НДС внутренних диафрагм. Сохраненные до окончания проходческих работ диафрагмы сдерживают смещения грунта в ядре сечения и снижают вдвое максимальные усилия в анкерах. Снижение несущей способности последовательно разрушаемых стен по первому варианту сопряжено с определенным риском обрушения грунта в центральном ядре.

Степень влияния физико-механических характеристик грунтового массива на напряженно-деформированное состояние исследуемой системы выявлена по результатам численного моделирования с обработкой статистических данных вероятностно-статистическим методом системного анализа.

**В четвертой главе** изложены результаты численного моделирования с це-



лью прогноза геомеханических процессов при строительстве горным способом односводчатой станции метрополитена в г. Чунцин (КНР). Задача решалась с максимальным приближением численных моделей к реальным условиям строительства и принятых в проекте конструктивно-технологических решений путем 3D-численного моделирования с использованием программного комплекса MIDAS GTS NX.

Расчетная схема конечно-элементной модели в объемной постановке задачи показана на рисунке 7. Длина заходки опережающих забоев составляла 2 м. Протяженность участка проходческих работ принята 80 м. Впереди выработки, раскрытой до проектного очертания, оставлен массив грунта на длине 30 м для того, чтобы оценить степень устойчивости лба забоя большепролетной выработки, а также установить характер и величину осадок земной поверхности впереди забоя.

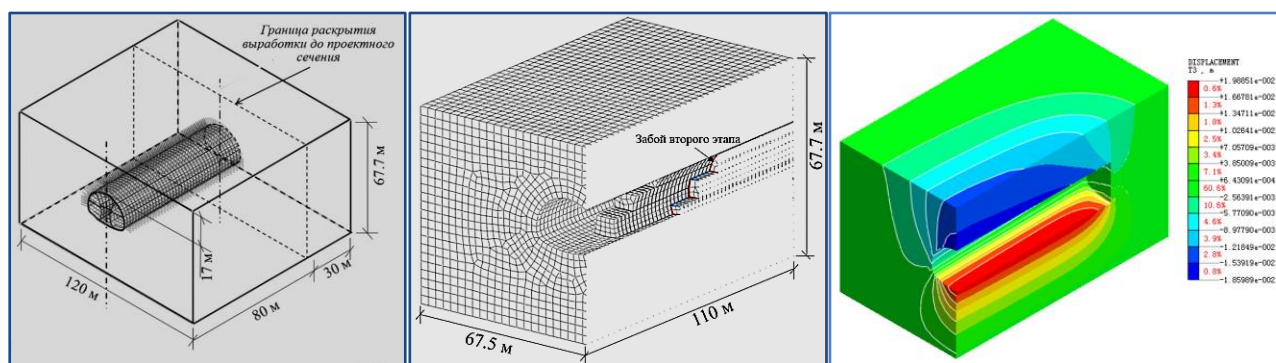


Рисунок 7 – Исходная конечно-элементная модель стационарного тоннеля, фрагмент модели при проходке правого пилот-тоннеля и пример картины вертикальных смещений в грунтовом массиве после раскрытия выработки до проектного сечения

Технологическая схема выполнения проходческих работ предполагает проходку опережающих выработок и центрального ядра уступным способом (рисунок 8). При этом в модели длина уступа  $\ell_u$  варьировалась от  $1/4L_B$  до  $1/2L_B$  ( $L_B$  – пролет выработки). К разработке калотты центрального ядра приступали на расстоянии  $5\ell_u$  от забоя №1 левого пилот-тоннеля.

Графики смещения шельги свода раскрытой до проектного сечения выработки по мере продвижения опережающих забоев боковых пилот-тоннелей и разработки центрального ядра при различной длине уступа показаны на рисунке 9. Положение забоев, при котором фиксировались осадки шельги свода, отмечено на графике сечениями 1-1 – 10-10. Из анализа графиков следует, что длина уступа при проходке пилот-тоннелей не оказывает существенного влияния на смещения шельги свода. Большее влияние на эти показатели оказывает длина уступа, принятая при разработке центрального ядра.

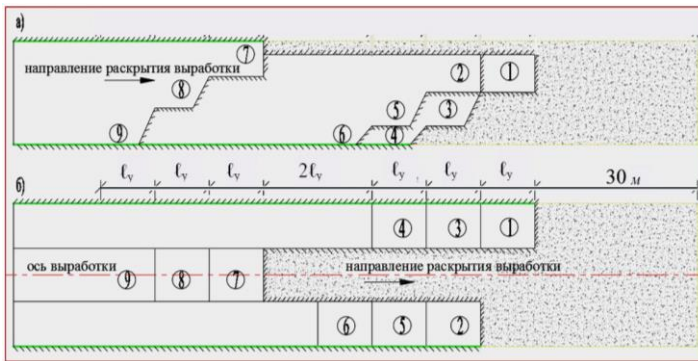


Рисунок 8 – Технологическая схема проходческих работ: а – продольный разрез; б – план

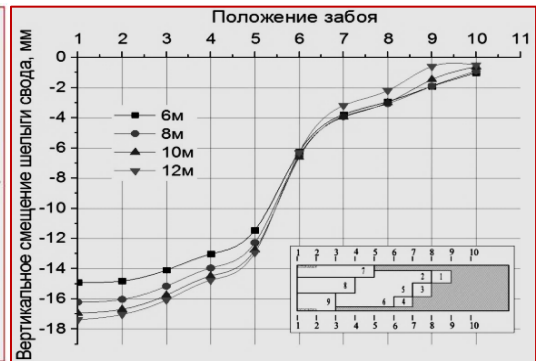


Рисунок 9 – Смещения шельги свода в процессе продвижения опережающих забоев

В этом случае величина деформации увеличивается до 80 % от их максимального значения. Отсюда следует, что при разработке центрального ядра выработки длину уступа следует назначать, руководствуясь не только требованиями развития фронта работ, но и соображениями, касающимися разработки мероприятий по обеспечению устойчивости выработки.

Максимальная осадка поверхности земли после окончания всех проходческих работ, определенная с помощью объемной модели, меньше на 40 %, чем зафиксированная на плоской модели, а вертикальная деформация шельги свода меньше на 55 % (рисунок 10).

Характер изменения величины смещений в малопрочном скальном массиве, зафиксированных от поверхности земли до шельги свода выработки, закрепленной железобетонными анкерами, согласуется с гипотезой об образовании вокруг выработки армогрунтовой самонесущей арки (рисунок 11).

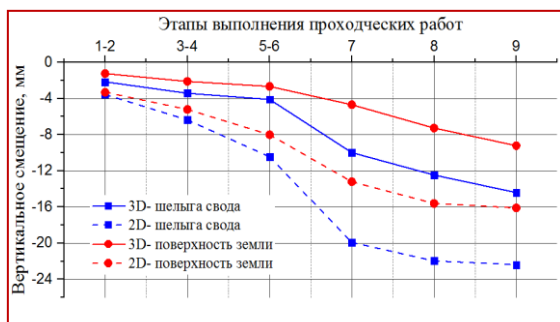


Рисунок 10 – Вертикальные смещения шельги свода и осадки поверхности земли по результатам 2D- и 3D-численного анализа

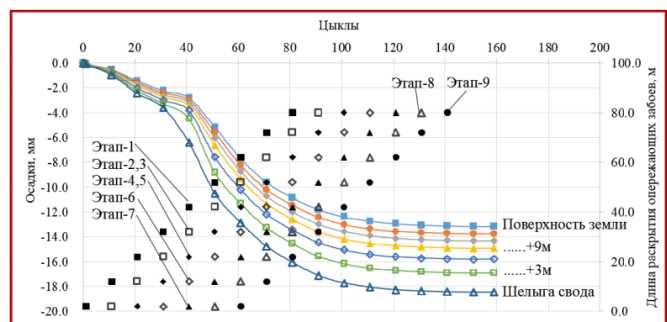


Рисунок 11 – Вертикальные смещения в малопрочном скальном массиве в процессе поэтапного раскрытия выработки стационарного тоннеля

Картина продольных смещений и развития пластических деформаций в скальном массиве в торце стационарного тоннеля свидетельствует о том, что граница области предельного состояния скального массива впереди лба забоя распространяется до 1/4 пролета выработки (рисунок 12). Отсюда следует важ-

ный практический вывод: анализ НДС массива в торце стационарного тоннеля позволит обосновать эффективные мероприятия по закреплению лба забоя при завершении проходческих работ в каждой опережающей выработке. Это исключит риск обрушения лба забоя раскрытой до проектного очертания большепролетной выработки в торце стационарного тоннеля.

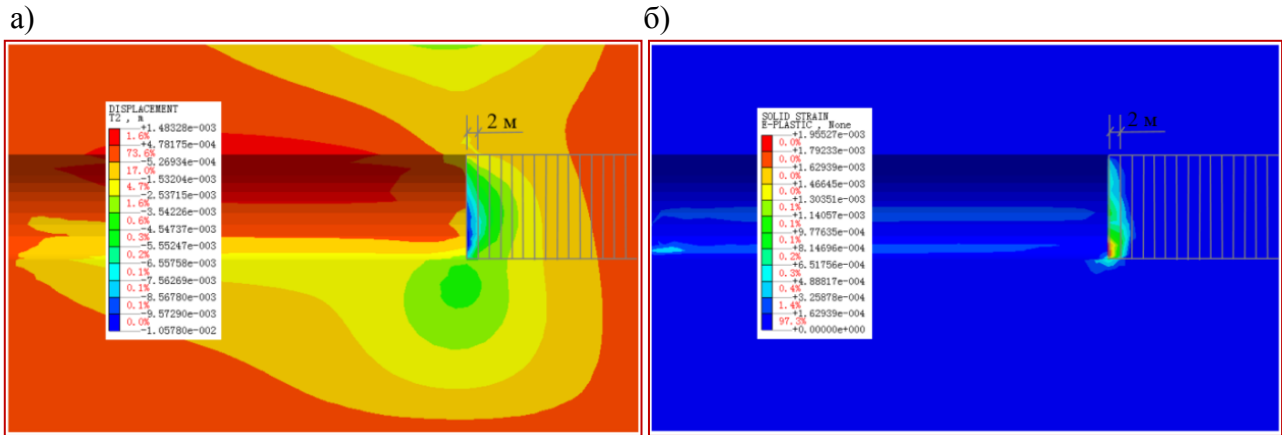


Рисунок 12 – Картина продольных смещений в торце стационарного тоннеля (а) и область развития пластических деформаций в скальном массиве (б)

Полученные данные о напряженно-деформированном состоянии армированного анкерами скального массива (ядра сечения), заключенного между двумя железобетонными диафрагмами, свидетельствуют о том, что при разработке грунта с одновременным разрушением железобетонных диафрагм риск потери устойчивости ядра сечения может быть сведен к минимуму (рисунок 13).

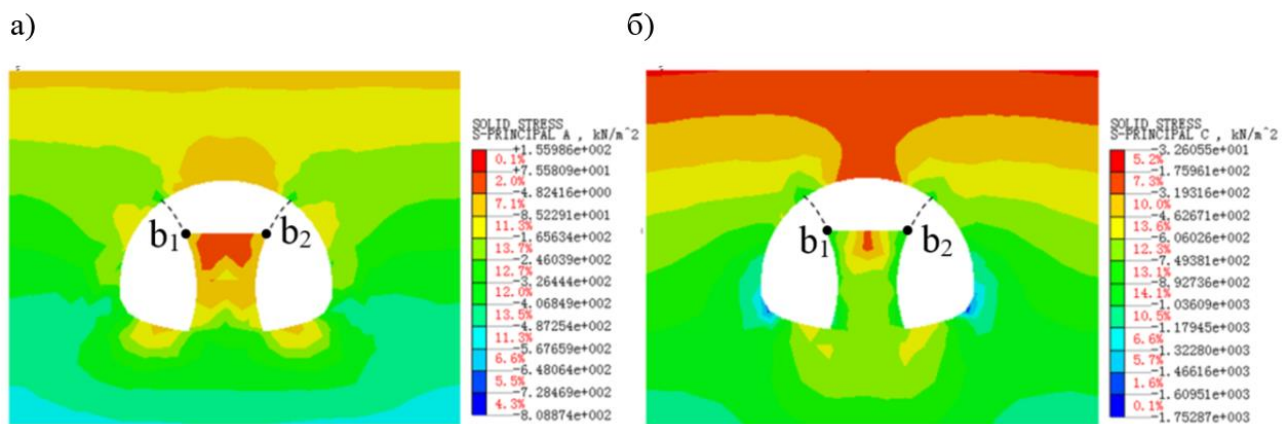


Рисунок 13 – Главные напряжения  $\sigma_1$  (а) и  $\sigma_3$  (б) в окружающем грунтовом массиве и в центральном ядре после разработки калотты

Достоверность и обоснованность научных результатов подтверждены сопоставлением результатов численного моделирования (деформации крепи/первичной обделки и осадки земной поверхности) с данными, полученными по итогам мониторинга, проводимого в рамках научного сопровождения при сооружении большепролетных выработок в малопрочных скальных грунтах. Информация получена по материалам, опубликованным в научных трудах, освещающих опыт строительства односводчатой станции метрополитена и автодо-

рожного тоннеля Longtoushan в КНР.

Основные положения методики сводятся к последовательному выполнению следующих операций (рисунок 14).

1. Выполнение инженерно-геологических исследований в соответствии с нормативными требованиями.

2. Определение проектного очертания выработки, назначение схемы и очередности раскрытия в соответствии с основными положениями новоавстрийского метода (НАТМ). При этом с целью минимизации риска обрушения площадь сечения выработок, раскрываемых каждым забоем, должна контролироваться в соответствующем диапазоне, что обусловлено ограниченной прочностью грунтовых массивов.

3. Оценка качества скального массива по классификации RQD. (Классификация RQD принята во многих странах мира. Включена в ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация»).

4. Назначение предварительных конструктивных параметров крепи опережающих забоев. Конструктивные параметры крепи рекомендуется принимать в соответствии с показателем качества грунтового массива, пользуясь эмпирической системой Q, основанной на классификации Rock Quality Designation (RQD). Рекомендации системы Q разработаны (на уровне официального документа) Норвежским геотехническим институтом.

5. Построение пространственной конечно-элементной модели грунтового массива, который пересекает тоннельная выработка. Прочностные и деформативные параметры крепи тоннеля в расчетной модели должны соответствовать их фактическим значениям. Геомеханические модели грунтового массива должны отражать характерные деформационные свойства реального грунтового массива, в котором проходит тоннельная выработка.

6. Задание этапов расчета пространственной модели, отражающих технологическую последовательность раскрытия выработки. В общем случае каждый этап расчета должен включать удаление области грунта, заключенной внутри контура опережающей выработки с последующей активацией крепи.

7. Оценка устойчивости выработки по осадкам земной поверхности, смещениям крепи, напряжениям в грунтовом массиве вблизи выработки и в элементах крепи в соответствии с требованиями, изложенными в стандарте КНР GB10003-2005 или в российском стандарте СТО НОСТРОЙ 2.27.128-2013.

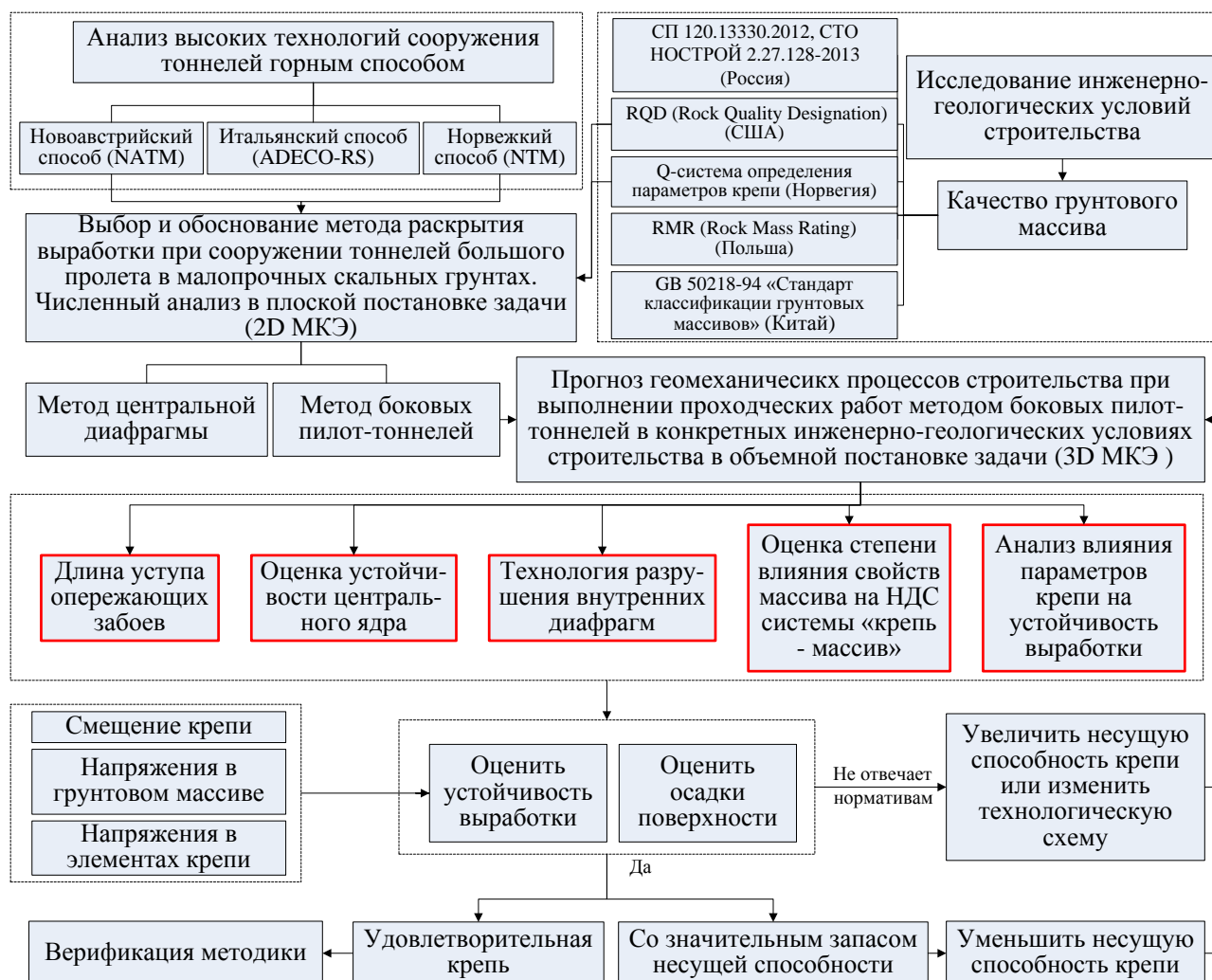


Рисунок 14 – Алгоритм прогноза геомеханических процессов при сооружении транспортных тоннелей большого сечения и односводчатых станций метрополитена в малопрочных скальных грунтах

Разработанная автором методика прогнозирования напряженно- деформированного состояния системы «крепь – грунтовый массив» позволяет при обосновании проектных решений строительства тоннелей способом поэтапного раскрытия выработки опережающими забоями с наибольшим приближением к натуре отразить в расчетах технологические особенности выполнения проходческих работ, влияющих на распределение и значения расчетных усилий в крепи, на сдвигание грунтового массива и осадки земной поверхности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что для выработок пролетом более 20 метров в малопрочных скальных грунтах ( $75 > RQD \geq 25$ ,  $0,5 > Q \geq 2,0$ ), на глубине соизмеримой с пролетом выработки, приоритетным является новоавстрийский способ (NATM) с поэтапным раскрытием несколькими опережающими забоями по схеме боковых пилот-тоннелей.

2. По результатам численного 2D- и 3D-моделирования изучен процесс

формирования НДС системы «крепь – грунтовый массив» по мере продвижения каждого из забоев опережающих выработок. В частности, установлены причинно-следственные связи, определяющие степень влияния технологических параметров проходческих работ на устойчивость выработок при проходке несколькими опережающими забоями:

- при раскрытии выработки по схеме боковых пилот-тоннелей смещения в шельге свода на завершающих этапах проходческих работ на 30 %, а осадки земной поверхности на 60 % меньше, чем по схеме центральной диафрагмы, при этом максимальные напряжения в набрызг-бетонной крепи снижаются на 40 %;

- длина уступа при проходке пилот-тоннелей не оказывает существенного влияния на смещения шельги свода; в значительной степени влияние на деформации крепи и осадки земной поверхности оказывает длина уступа, принятая при разработке ядра сечения: с увеличением длины от 1/4 до 1/2 пролета выработки величина деформации составляет, соответственно, 78 % и 70 % от их максимального значения, зафиксированного после раскрытия выработки до проектного сечения;

- разработка калотты ядра сечения с разрушением железобетонных диафрагм связана с риском обрушения грунта, так как приводит к образованию обширной области предельного равновесия в верхней части ядра сечения (1/3 высоты) вследствие смещения диафрагм в сторону боковых пилот-тоннелей, при этом в элементах диафрагм возникают растягивающие напряжения (1,6 МПа); сохраненные же до полного раскрытия выработки диафрагмы сдерживают смещения грунта в ядре сечения и снижают вдвое максимальные усилия в анкерах, армирующих грунт;

- при поэтапном раскрытии выработки несколькими опережающими забоями в торце станционного тоннеля впереди лба забоя полностью раскрытой выработки образуется область пластических деформаций, граница которой распространяется до 1/4 пролета выработки, поэтому в каждой из опережающих выработок после завершения проходческих работ необходимо предусмотреть специальные мероприятия по закреплению лба забоя.

3. Разработанная автором практическая методика и алгоритм прогноза геомеханических процессов при строительстве односводчатых станций метрополитена в малопрочных скальных грунтах позволяет с наибольшим приближением к натуре отразить технологические особенности проходческих работ, влияющих на распределение усилий в крепи, деформации грунтового массива и осадки земной поверхности. Основные количественные параметры получили подтверждение в процессе геомониторинга на строительстве станций метрополитена в г. Чунцин (КНР).

4. Результаты исследований могут быть использованы в качестве альтернативных решений при рассмотрении вариантов сооружения односводчатых станций на метрополитенах Красноярска, Челябинска, Екатеринбурга, где линии метро заложены в скальных массивах средней и низкой прочности.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

По теме диссертации автором опубликовано 7 печатных работах, в том числе 3 статьи – в изданиях, рекомендованных ВАК.

### ***Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России***

1. *Фролов Ю.С.* Прогноз геомеханических процессов при сооружении станции метрополитена в скальных грунтах / Ю.С. Фролов, **Шэнь Цяофэн** // Путевой навигатор. – 2020. – № 44 (70). – С. 50–59.

2. **Шэнь Цяофэн**. Решение геомеханических задач при стадийной технологии раскрытия выработок большого пролета в малопрочных скальных грунтах / **Шэнь Цяофэн**, Ю.С. Фролов // Интернет-Журнал «Транспортные сооружения». – 2019. – № 3 (6). – С. 1–14.

3. *Фролов Ю.С.* Влияние методов поэтапного раскрытия выработки большого пролета на напряженно-деформированное состояние системы «крепь – грунтовый массив» / Ю.С. Фролов, **Шэнь Цяофэн** // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1 (48). – С. 73–83.

### **Публикации в журналах, научных сборниках и других научных изданиях**

4. **Шэнь Цяофэн**. Обеспечение устойчивости выработок большого пролета при строительстве станций метрополитена в малопрочных скальных грунтах / **Шэнь Цяофэн**, Ю.С. Фролов // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте / Сборник трудов X Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. – СПб: ПГУПС. – 2018. – С. 273–279.

5. *Фролов Ю.С.* Проблемы сооружения большепролетных станций метрополитена в малопрочных скальных грунтах / Ю.С. Фролов, **Шэнь Цяофэн** // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте / Сборник трудов X Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. – СПб: ПГУПС – 2017. – С. 107–109.

6. *Фролов Ю.С.* Обоснование конструктивно-технологических решений при строительстве односводчатых станций в малопрочных скальных грунтах /

Ю.С. Фролов, **Шэнь Цяофэн** // Подземные Горизонты. – 2019. – № 22. – С. 28–32.

7. *Фролов Ю.С.* Обоснование конструктивно-технологических решений при строительстве односводчатых станций в малопрочных скальных грунтах /

Ю.С. Фролов, **Шэнь Цяофэн** // Подземные Горизонты. – 2020. – № 23. – С. 16–21.

**Шэнь Цяофэн**

**ПРОГНОЗ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ  
СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОДНОСВОДЧАТЫХ СТАНЦИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА  
ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОЭТАПНОГО РАСКРЫТИЯ ВЫРАБОТКИ  
В МАЛОПРОЧНЫХ СКАЛЬНЫХ ГРУНТАХ**

Специальность 2.1.8 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,  
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать «23» сентября 2021 г.

Печ. л 1,0. Тираж 120 экз. Заказ №

Издательство ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»  
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191. Тел. (383) 328-03-81. e-mail: bv@mail.ru

---