

*На правах рукописи*

**Иовлев Григорий Алексеевич**



**ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ  
В ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ГРУНТОВЫХ МАССИВАХ**

Специальность 25.00.20 - *Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика*

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

Санкт-Петербург – 2020

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

**Научный руководитель**  
доктор технических наук,  
профессор

**Протосеня Анатолий  
Григорьевич**

**Официальные оппоненты:**

**Саммаль Андрей Сергеевич,**  
доктор технических наук, профессор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тулский государственный университет», кафедра «Механика материалов», профессор

**Коньков Александр Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Тоннели и метрополитены», доцент

**Ведущая организация** – открытое акционерное общество «Научно-исследовательский проектно-изыскательский институт «Ленметро-гипротранс», г. Санкт-Петербург.

**Защита диссертации состоится 24 сентября 2020 г. в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Горного университета ГУ 212.224.06 по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1163.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru)

**Автореферат разослан 23 июля 2020 г.**

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ**  
диссертационного совета



**СИДОРОВ**  
Дмитрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Практика прогноза устойчивости подземных сооружений устанавливает допустимым в обычных условиях исходить из предположения линейной работы грунтового массива. Большинство широко используемых аналитических методик, также основаны на упругом представлении деформирования исследуемой среды. Однако, экспериментальные данные инженерно-геологических изысканий грунтовых массивов Санкт-Петербурга показывают нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями.

Учёт особенностей нелинейной деформируемости вмещающего грунтового массива становится возможным при использовании численных методов расчёта, которые позволяют моделировать геомеханическое состояние подземного сооружения при различных условиях.

При этом, геомеханическое обоснование проектных решений, учитывающих особенности пластического деформирования грунтового массива численными методами имеет существенные методические проблемы. Это связано со сложностью комплексного перехода от установленных в ходе лабораторных испытаний механических характеристик к совокупности функциональных зависимостей, заложенных в геомеханическую модель.

Грамотный учёт нелинейного деформирования грунтовых массивов является одним из ключевых факторов, обеспечивающих обоснованность численных расчётов подземного сооружения и позволяющих получить достоверное представление о напряженно-деформированном состоянии (НДС) грунтовых обнажений и их устойчивости.

Поставленная задача становится приоритетной для дальнейшего развития нормативной базы в условиях интенсивно развивающихся требований, предъявляемых к эффективному и безопасному освоению подземного пространства при сложившейся городской инфраструктуре.

В связи с вышеизложенным можно заключить, что комплексное обоснование принятой модели поведения грунтового массива, прогноз основных параметров НДС и устойчивости подземного сооружения с учетом нелинейного деформирования вмещающей среды, является актуальной задачей.

**Степень разработанности исследуемого направления:** Основными разработчиками теории и практики исследования НДС массива горных пород являются такие ученые, как И.В. Баклашов, Н.С. Булычев, Б.А. Картозия, М.М. Протодяконов, К.В. Руппенейт, А.Г. Протосеня, П.М. Цимбаревич, И.В. Родин, D.W. Muir и др.

Исследованиям, связанным с разработкой моделей нелинейного тела и развитием теории пластичности посвящены работы Г.К. Генки, А.А. Ильюшина, А.Н. Ставрогина, W. Prager, J.M. Duncan, T. Schanz, P.A. Vermeer, а в последние годы: М.А. Карасева, А.Г. Шашкина, T. Benz, T.A. Bower., R. Lagioia и др.

Изучению геомеханических процессов численными методами в окрестности подземных сооружений посвящены работы А.П. Господарикова, О. Зенкевича, А.Б. Фадеева, Р.И. Ларионова и др.; численными методами с учётом нелинейного деформирования грунтовых массивов посвящены работы Н.А. Белякова, S. C. Moller и др.

Расчётами, связанными с устойчивостью обделок подземных сооружений при различных условиях, занимались: А.С. Саммаль, А.Н. Панкратенко, О.В. Афанасова, П.А. Деменков и др.

Значимые результаты физического моделирования, основанного на методе эквивалентных материалов, представлены в работах А.Н. Конькова, Ф.С. Фролова, A. Kirsch, и др. Описание опыта применения различных технологий, способов обеспечения устойчивого состояния грунтов проходческого забоя и натурные исследования его деформирования приведены в работах Н.И. Кулагина, К.П. Безродного, А.П. Ледяева, В.А. Маслака, P. Lunardi и др.

Оценка устойчивости грунтового обнажения призабойного пространства представлена в работах М.О. Лебедева, Ю.А. Филонова, P. Oreste, D. Piela, Kirsch A., E. Leca и др.

Анализ их трудов показал, что при расчете НДС грунтовых массивов использовались различные допущения, в том числе, о линейном характере деформирования грунтового массива, вносящие существенные неточности в оценку НДС при строительстве подземных сооружений.

Вместе с тем, остается нерешенным ряд задач, связанных с созданием достоверной и эффективной методики расчета основных параметров НДС грунтового массива, вмещающего выработку кругового сечения, решение которых позволило бы учитывать нелинейный характер процесса деформирования пород.

Задача построения геомеханической модели в нелинейно деформируемой среде, а также создания эффективного численного алгоритма исследования НДС грунтового массива в окрестности выработки круговой формы является актуальной и имеет практическую и научную значимость.

**Цель работы:** разработка методики прогноза устойчивости грунтовых обнажений при строительстве одиночной горизонтальной выработки кругового сечения в физически нелинейных грунтовых массивах.

**Идея работы.** Прогноз геомеханических процессов вокруг подземных сооружений в нелинейно деформируемых грунтовых массивах должен основываться на моделях сред, учитывающих нелинейное деформирование в допредельной зоне, изотропное и сдвиговое упрочнение и сравнительном анализе результатов расчётов.

**Основные задачи исследования:**

1. Выполнение анализа существующих методов исследования нелинейно деформируемых грунтовых массивов и способов учёта этого явления при прогнозе геомеханических процессов вокруг подземных сооружений.

2. Разработка рекомендаций для подбора параметров модели, отражающей нелинейное деформирование протерозойских глин на основании проведенных лабораторных испытаний и верификация параметров через виртуальный эксперимент.

3. Разработка концепции проведения геомеханического анализа для прогноза устойчивости подземных сооружений при использовании методов математического моделирования.

4. Получение представления о влиянии нелинейных свойств грунтовых массивов на величину и характер распределения НДС в окрестности подземного сооружения при их сравнении с классическими геомеханическими моделями поведения среды.

5. Разработка рекомендаций по прогнозу устойчивости подземных сооружений в физически нелинейном грунтовом массиве с использованием численных методов.

**Объектом** исследования в диссертационной работе является нелинейно деформируемый грунтовый массив. **Предметом** исследования является достоверная оценка НДС нелинейно деформируемого грунтового массива в окрестности подземного сооружения.

**Научная новизна** проведенного диссертационного исследования заключается в следующем:

- выявлены закономерности изменения основных параметров НДС в окрестности выработки круговой формы, расположенной на различных глубинах в физически нелинейном грунтовом массиве;

- установлены зависимости влияния параметров физической нелинейности грунтового массива на размер и форму зоны предельного состояния и упрочнения, формирующегося в окрестности выработки круговой формы, расположенной на различных глубинах;

- получены зависимости изменений величин изгибающих моментов, вертикальных осевых сил и эквивалентных смещений кольцевой обделки тоннеля при учтённой физической нелинейности и начальной переуплотнённости грунта, а также, изменяемой мощности глинистой потолочины;

- выявлены закономерности изменений продольных смещений лба проходческого забоя в зависимости от технологии раскрытия сечения тоннеля по уступам и изменения параметров временного крепления.

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (пп. 1, 2, 4, 5, 13).

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработана методика получения входных параметров для нелинейных упруго-пластических моделей поведения грунта с упрочнением.

2. Разработана методика прогноза устойчивости кольцевой обделки и определения форм и размеров зон предельного состояния и упрочнения в окрестности одиночной круговой выработки.

3. Разработаны рекомендации по определению параметров жесткости временного крепления, с учётом технологии раскрытия сечения по уступам, обеспечивающие исключение развития зоны предельного состояния впереди лба забоя и уменьшающие величины его продольных смещений.

**Методология и методы исследования.** Работа выполнена с применением комплекса методов исследований, заключающийся в анализе разработок отечественных и зарубежных авторов в вопросах учёта нелинейного деформирования для прогноза устойчивости; анализ теоретических и математических исследований, формирующих

геомеханические модели; анализ литературных источников, в области исследований протерозойской глины, результатов лабораторных экспериментов и материалов инженерно-геологической изысканий; численное моделирование геомеханических процессов, позволяющее учесть физическую нелинейность массива с использованием метода конечных элементов.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Достоверность представления о влиянии пластического деформирования грунтовых массивов на величину и характер распределения напряженно-деформированного состояния связана с составом, структурой и ключевыми элементами геомеханической модели, входные параметры которой должны верифицироваться и иметь сходимость с данными лабораторных испытаний.

2. Факторами, существенно влияющими на характер и размер зоны предельных состояний, величины коэффициентов концентрации напряжений в окрестности выработки, устойчивость обделки, являются: физическая нелинейность вмещающего грунтового массива в допредельной области деформирования, степень естественной уплотненности грунтов, упрочнение при девиаторном нагружении, мощность глинистой потолочины.

3. Выбор параметров крепления лба забоя необходимо осуществлять с помощью моделей упрочняющегося грунта, поскольку использование классической упруго-пластической модели с критерием прочности Кулона-Мора, прогнозирует завышенные коэффициенты концентрации напряжений и смещения лба забоя, а также не учитывает формирующиеся в окрестности подземного сооружения пластические деформации упрочнения.

**Степень достоверности и апробация результатов** подтверждается обоснованием принятых входных параметров нелинейной геомеханической модели, полученных из сопоставления результатов, проведенных реальных лабораторных испытаний с виртуальными экспериментами; использованием современных методов механики сплошных сред, упругости и пластичности, а также, методов математического и численного анализа.

**Личный вклад автора** заключается в: постановке целей и задач исследования; обосновании методики определения входных параметров для нелинейных моделей; построении конечно-элементных моделей и численных экспериментов методом конечных элементов в

условиях плоской и пространственной постановок; выполнении работки и анализе результатов моделирования; получении закономерностей влияния физической нелинейности на прогнозируемое в окрестности выработки НДС, коэффициенты концентрации напряжений, размеры зон предельных состояний и зон упрочнения, возникающих в кольце обделки усилий и её смещений, а также, величин продольных смещений лба забоя; исследовании влияния изменения жесткости временного крепления на геомеханические процессы в окрестности выработки; разработке методики, позволяющей осуществлять переход от пространственной постановки геомеханической задачи к плоской, с учтённым влиянием величины шага заходки.

### **Апробация выполненного исследования.**

Основные положения и результаты исследований были представлены на научных конференциях в 2016-2020 гг.: XXI международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех-2020» (Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, 2020 г.), III Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2020 г.), XVIII Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2020 г.) и на заседаниях кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений Горного университета.

**Результаты диссертационной работы** в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), из них в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

### **Объем и структура диссертации.**

Диссертационная работа изложена на 161 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения,



списка литературы из 192 источников, содержит 54 рисунка, 11 таблиц, 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована актуальность, основная цель и идея, научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** проведён анализ современных теоретических и математических методов описания и учёта нелинейного деформирования геоматериалов; сформулированы необходимые свойства, которыми должна обладать современная геомеханическая упруго-пластическая модель среды; обоснован выбор моделей упрочняющегося грунта, выполнен их комплексный анализ, с рассмотрением заложенных в них функциональных зависимостей и принципов работы.

Во **второй главе** разработана методика получения входных параметров для упруго-пластических моделей упрочняющегося грунта, на примере описания поведения протерозойских аргиллитоподобных глин, в том числе, их нелинейного деформирования; проведено сопоставление результатов виртуальных экспериментов и лабораторных испытаний, принятая модель упрочняющегося грунта верифицирована; сформулированы входные параметры моделей упрочняющегося грунта для описания нелинейного поведения протерозойских глин, исходя из предложенной методики.

**Третья глава** посвящена исследованию НДС в окрестности выработки круговой формы в условиях плоской постановки задачи; разработке метода оценки устойчивости в зависимости от следующих изменяемых параметров: выбранной геомеханической модели поведения среды, глубины заложения выработки (в том числе при малой мощности потолочины), учтённого переуплотнения, толщины крепи. При этом анализируются: природа и характер формирования и распределения зон предельных состояний и зон упрочнения, преимущества моделей упрочняющегося грунта сравнительно с классическими моделями, а также, устойчивость кольцевой обделки и формируемые в ней структурные силы.

**Четвертая глава** посвящена исследованию НДС в окрестности выработки круговой формы и его устойчивости при пространственной постановке задачи; рассмотрению влияния учтённой технологии проходки по уступам; выявлению влияния величины отпора и выбранной геомеханической модели на устойчивость лба проходческого забоя и возникающие в крепи внутренние усилия; разработке

метода подбора способа обеспечения устойчивости лба проходческого забоя, с учетом нелинейного деформирования грунтового массива.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

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

**1. Достоверность представления о влиянии пластического деформирования грунтовых массивов на величину и характер распределения напряженно-деформированного состояния связана с составом, структурой и ключевыми элементами геомеханической модели, входные параметры которой должны верифицироваться и иметь сходимость с данными лабораторных испытаний.**

При углубленном изучении сложной геомеханической проблемы понимание алгоритма работы всех принятых допущений является необходимым для корректной интерпретации результатов конечно-элементного расчёта. Исследование влияния какого-либо фактора на геомеханические процессы возможно при его включении в закрытую, от влияния прочих факторов, изолированную систему.

Большая часть наблюдаемых фактов, связанных с нелинейным деформированием может быть сведена в систему функциональных зависимостей, определяющую геомеханическую модель поведения среды.

Результат анализа современных теоретических и математических представлений пластического деформирования твердого деформируемого тела позволяет выделить следующие необходимые элементы, которыми должна обладать модель среды достоверно описывающая пластическое деформирование:

- 1) поверхность текучести модели грунтовых массивов должна быть замкнутой;
- 2) изменение формы и изменение объема должно быть описано различными функциями, должна использоваться комбинированная поверхность текучести;
- 3) для учёта пластических деформаций при сложных траекториях нагружения необходимо использовать функции пластического потенциала в рамках теории пластического течения;

- 4) использовать неассоциированный закон пластического течения, как для учёта упрочнения формоизменения, так и для учёта упрочнения при сдвиге;
- 5) иметь нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями, аутентичной испытаниям в стабилometре, даже при небольших величинах напряжений;
- 6) включать в себя функции, учитывающие накопления сдвиговых и изотропных пластических деформаций в результате процесса упрочнения;
- 7) входные параметры модели должны определяться лабораторными испытаниями, программа которых не может радикально отличаться от уже сформированной рынком и традицией;
- 8) полученные входные параметры модели должны иметь возможность проведения их верификации;
- 9) обобщать накопленные экспериментальные данные по конкретному типу грунта и иметь с ними двухстороннюю связь, то есть, модель должна быть способна воспроизводить эксперименты при различных траекториях нагружения и условиях их проведения.

В диссертационном исследовании нелинейное деформирование рассматривалось на примере протерозойских глинистых грунтов Санкт-Петербурга. Известно, что эти грунты склонны к ярко выраженному пластическому деформированию под нагрузкой, а описание всех особенностей их поведения вызывает трудности.

Для сравнения кривых деформирования, паспортов прочности и связи объёмного деформирования со сдвиговым, использовались результаты консолидировано-недренированных трёхосных испытаний перпендикулярно и параллельно слоистости при разных величинах наименьшего главного напряжения (обжатия). Кроме этого, использовались результаты испытаний при: одноосном сжатии, раскалывании по образующим сферическими инденторами, при изотропной компрессии.

Часть параметров модели была получена напрямую из испытаний, оставшаяся часть – “управляемые параметры” изменялись до момента достижения наилучшей сходимости ряда кривых виртуального эксперимента и реальных испытаний. К изменяемым, управляемым параметрам модели упрочняющегося грунта, относится параметр нелинейности -  $m$ , коэффициент разрушения -  $R_f$ .

Подбор параметров осуществлялся по результатам серии виртуальных экспериментов. Схема испытаний задавалась аналогичной

проведённой в реальных лабораторных условиях. На рисунках: 1, 2 представлены результаты подбора управляемых параметров и калибровки параметров, принятых на основе лабораторных испытаний.

Полученные входные параметры модели упрочняющегося грунта сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры модели Hardening Soil Small для протерозойской глины

Параметр	Обозначение	Величина	Ед. изм.
Удельный вес грунта выше УГВ	$\gamma_{sat}$	19,5	кН/м <sup>3</sup>
Удельный вес грунта ниже УГВ	$\gamma_{unsat}$	22,5	кН/м <sup>3</sup>
Величина эффективного сцепления	$c^*$	125	кПа
Угол внутреннего трения	$\varphi$	23	град.
Коэффициент поперечной деформации	$\nu_{ur}$	0,2	-
Угол дилатансии	$\psi$	0	град.
Величина модуля деформаций на 50% прочности	$E_{50}^{ref}$	305	МПа
Величина одометрического модуля деформаций	$E_{oed}^{ref}$	191	МПа
Величина модуля деформаций при разгрузке	$E_{ur}^{ref}$	610	МПа
Коэффициент разрушения	$R_f$	0,9	-
Параметр нелинейности	$m$	0,65	-
Напряжения, ограничивающие область напряжений	$\sigma_t$	300	кПа
Пороговая деформация сдвига	$\gamma_{0.7}$	0,0001	-
Модуль сдвига при сверхмалых деформациях	$G_0^{ref}$	450	МПа

\* - величина эффективного сцепления принята с учётом допущений, приведённых в главе 2.2 диссертационной работы.

**2. Факторами, существенно влияющими на характер и размер зоны предельных состояний, величины коэффициентов концентрации напряжений в окрестности выработки, устойчивость обделки, являются: физическая нелинейность вмещающего грунтового массива в допредельной области деформирования,**

### **степень естественной уплотненности грунтов, упрочнение при девиаторном нагружении, мощность глинистой потолочины.**

Оценка влияния нелинейного деформирования грунтов была проведена на примере исследования результатов численного моделирования проходки одиночной выработки кругового сечения глубокого заложения. Численная модель строилась, как в условиях плоской, так и в условиях объёмной постановки задачи (рисунки 3, 4).

Геометрическая и кинематическая схемы расчётных моделей, задавались типичными для случая строительства тоннелей метрополитена в г. Санкт-Петербург. В условиях объёмной постановки задачи учитывалась технология раскрытия сечения по уступам (рисунки 4, б).

Проводилось многовариантное моделирование. Оценка влияния учтённой нелинейности проводилась сравнительным анализом полученных результатов НДС для случаев, когда массив задавался линейной (модель E), упругой идеально-пластической (модель MC) и нелинейными моделями (модель упрочняющегося грунта - HS и с малыми деформациями - HSs). Исследуемыми, изменяемыми факторами являлись: для плоской постановки - глубина заложения выработки (в том и при малой мощности глинистой потолочины), степень начального переуплотнения грунта, толщина постоянной крепи; для пространственной постановки - величина равномерно-распределённой силы, приложенной перпендикулярно лбу проходческого забоя.

Установлено, что для заданных условий в окрестности выработки формируется зона предельных состояний, её характер и размер определялся по пластическим точкам состояния (рисунок 5, а).

На рисунке 5, а семейству красных точек соответствуют напряжения, которые достигли критерия прочности Кулона-Мора. Зелёным, коричневым и синим показаны точки пластических деформаций, полученные при упрочнении от сдвига, изотропного сжатия и сдвига (комбинированная), изотропного сжатия соответственно. Зоны упрочнения формируются при использовании моделей HS и HSs и связаны с заложенными в них функциями, аккумулирующими пластические деформации с начала нагружения. Учёт уплотнения задавался изменением коэффициента переуплотнения (*OCR*). Его увеличение уменьшает зоны изотропного и комбинированного упрочнения, вплоть до исключения.

Учёт уплотнения приводит к уменьшению величины формируемых смещений по контуру свода и сужению ширины зоны над сводом, в которых смещения формируются. В результате, уменьшается ширина мулды и абсолютные смещения поверхности (рисунок 5, б).

Для плоской постановки задачи значения напряжений и деформаций определялись вдоль сечений, проведенных от центра выработки под различными углами к горизонту. На рисунке 6, а приведены характерные зависимости, демонстрирующие отличия в распределении коэффициентов концентрации напряжений  $\sigma_1$ , при использовании рассмотренных моделей на различных глубинах.

В таблицу 2 сведены максимальные значения коэффициентов концентрации наибольших главных напряжений. Здесь коэффициент увеличения напряжений по линейной теории, по сравнению с нелинейной, обозначен как  $K_k$ , в числителе для модели МС, в знаменателе для модели НS.

Таблица 2 – Максимальные коэффициенты концентрации наибольших главных напряжений в окрестности выработки

Наибольшие главные напряжения $\sigma_1$				
Угол, °\Коэф-т	$K_E\sigma_1$	$K_{MC}\sigma_1$	$K_{HS}\sigma_1$	$K_k$
Глубина 75 м				
0°	2,53	1,57	1,26	1,61\2,01
30°	1,99	1,32	1,16	1,51\1,71
Глубина 60 м				
0°	2,51	1,55	1,24	1,62\2,02
30°	1,97	1,30	1,13	1,52\1,74
Глубина 45 м				
0°	2,65	1,79	1,34	1,48\1,98
30°	2,15	1,44	1,31	1,49\1,64
Наименьшие главные напряжения $\sigma_3$ в точке смены литологических разностей				
Глубина 45 м				
60°	1,02	1,01	1,19	1\0,86
90°	1,11	1,16	1,81	0,96\0,61

При расположении выработки на горизонте – 45 м для сечений, направленных под углами 60° и 90°, наблюдается скачок в распределении величин, как напряжений, так и деформаций на расстоянии ~10 м от центра выработки, это расстояние соответствует переходу

между заданными геологическими слоями, то есть, влияние оказывает малая мощность потолочины (рисунок 6, б).

Малая мощность глинистой потолочины увеличивает напряжения в замке свода и в боках выработки, и в равной степени, увеличиваются деформации, что выражается в большей амплитуде прогиба толщи потолочины и приводит к значительному росту общих смещений бетонной обделки.

Размер потолочины, дальнейшее уменьшение которой будет оказывать значительное влияние на устойчивость выработки, равна ~9,5 метра. Её последующее уменьшение показывает значительный прирост относительных смещений крепи, рисунок 6, в.

Исследование НДС в окрестности выработки в пространственной постановке позволяет учитывать его изменение в результате продвижения проходки и в целом соответствует закономерностям, установленным при плоской постановке задачи.

На рисунке 7: а, б приведено распределение осевой вертикальной силы  $N_2$  в боку (точка II) и в своде (точка I) выработки. Наибольшие, по величине, значения показывают использованная модель Е, меньшие величины - модель МС, наименьшие - модель HSs с учтенным уплотнением. По контуру выработки осевые силы распределены неравномерно и в боку выработки имеют наименьшие значения, а в своде - наибольшие, характер их распределения соответствует плоской постановке.

Установлено, что равномерно распределенная нагрузка  $q$ , приложенная перпендикулярно лбу забоя, незначительно увеличивает вертикальную нагрузку на крепь (пунктирная линия рисунка 7: а, б).

**3. Выбор параметров крепления лба забоя необходимо осуществлять с помощью моделей упрочняющегося грунта, поскольку использование классической упруго-пластической модели с критерием прочности Кулона-Мора, прогнозирует завышенные коэффициенты концентрации напряжений и смещения лба забоя, а также не учитывает формирующиеся в окрестности подземного сооружения пластические деформации упрочнения.**

Рассмотрение задачи в пространственной постановке позволило дополнить полученные в плоской постановке результаты и исследовать устойчивость лба забоя. На рисунке 7, в представлена одна из характерных полученных зависимостей распределения коэффициен-

тов концентрации наибольшего главного напряжения  $\sigma_1$  и максимального касательного напряжения  $\tau_{mob}$ , в зависимости от расстояния от центра выработки. Наибольшие главные напряжения направлены вдоль оси  $z$  в декартовой системе координат. Для наглядности  $K_\tau$  умножен на -1.

Для представления о преимуществах, реализуемых моделью HS, по отношению к классическим моделям E и MC, на рисунке 8 показаны зависимости изменений напряжения сдвига от среднего напряжения для различных глубин, вдоль сечения, направленного под углом  $0^\circ$  от центра выработки.

Анализ расчётных данных показывает завышение величин напряжений сдвига при их достижении поверхности текучести для модели MC по сравнению с моделью HS. Это объясняется, учитываемым моделью HS, изменением жёсткости при увеличении глубины, нелинейным характером связи между напряжениями и деформациями, а также, пластическими деформациями при сдвиговом и изотропном упрочнении. Без учёта этих факторов достижение огибающей критерия прочности Кулона-Мора происходит по более короткому пути. Использование модели MC приводит к увеличению размера зоны предельных состояний и завышенным смещениям по контуру и лбу забоя.

Учтённое переуплотнение коэффициентом  $OCR$  приводит к уменьшению, вплоть до исчезновения, пластических деформаций от изотропного сжатия и уменьшению комбинированных пластических деформаций изотропного сжатия и сдвига. В результате, достижение линии разрушения происходит по-иному, более прямолинейному пути, это позволяет описывать известное свойство малой сжимаемости протерозойских глин при их всестороннем обжатии.

Полноценное представление о геомеханических процессах, протекающих в окрестности лба забоя показано на рисунке 9, где отображены сформировавшиеся точки состояний в призабойной зоне. Верхний ряд рисунков соответствует модели HSs, нижний — модели MC. На рисунке 9: *a, д* показаны форма и размер потери устойчивости для случая моделирования при уменьшении сцепления до  $70 \text{ кН/м}^2$ ; на рисунке 9: *б, е* величина  $q = 0 \text{ кН/м}^2$ ; на рисунке 9: *в, ж*  $q = 75 \text{ кН/м}^2$ ; на рисунке 9, *з*  $q = 150 \text{ кН/м}^2$ ; на рисунке 9, *и*  $q = 250 \text{ кН/м}^2$ .



Цветовая легенда соответствует легенде рисунка 9, а. Серыми точками показана область, в которой образовавшиеся растягивающие напряжения превысили предел прочности на растяжение.

Анализ результатов расчёта рисунка 9: в, г показывает, что повышение величины отпора  $q$  для модели МС приводит к уменьшению зоны предельных состояний, а при использовании модели HSs к уменьшению зон пластических деформаций от упрочнения. Дополнительное моделирование показало, что увеличение коэффициента OCR уменьшает, вплоть до исчезновения, зоны упрочнения от изотропного сжатия и комбинированную зону упрочнения.

Наглядным является построение зависимости изменения относительных продольных смещений  $u_y$  вдоль относительного вертикального диаметра тоннеля, рисунок 10. Относительный вертикальный диаметр – отношение величины рассматриваемой координаты к величине диаметра. Ось рассмотрения соответствует оси тоннеля от свода к пяте. Наибольшие смещения соответствуют незакрепленной выработке при  $q = 0$ , они уменьшаются по мере увеличения  $q$ . В данном случае для модели МС использовались две величины модуля деформации:  $E = 610$  МПа и  $E = 305$  МПа.

Модель МС при  $E = 305$  МПа, по сравнению с моделью HSs, прогнозирует значительные превышения (~2,7 раза) относительных продольных смещений. При достижении  $q$  значения 500 кН/м<sup>2</sup> смещения вдоль лба забоя приобретают значения соответствующие модели HSs с незакрепленным сечением.

Увеличение в два раза жёсткости грунта в модели МС ожидаемо привело к снижению значений прогнозируемых смещений в той же пропорции, но при этом, всё равно, их величина превосходит прогнозируемые моделью HSs смещения на ~30%. Это объясняется тем, что модуль деформации в модели МС имеет постоянное значение, а в модели HSs возрастает с увеличением глубины.

Анализ полученных результатов показал, что для решения поставленной задачи модель МС не рекомендуется, как при  $E_{MC} = E_{50}^{ref}$ , так и при  $E_{MC} = E_{ur}^{ref}$ . Её использование для целей определения параметров временного или постоянного крепления подземного сооружения приведет к значительному завышению параметров крепи.

Рациональным решением для обеспечения устойчивости лба забоя с небольшими величинами смещений может быть подбор такой временной крепи, жесткость которой обеспечивала бы определённый

ную величину давления на лоб забоя. Величина эквивалентного давления на лоб забоя  $q$  должна быть достаточна, чтобы исключить образование зоны предельных состояний и минимизировать зону отслоения грунтов в окрестности лба забоя. В противном случае, при недостаточной жесткости, функция временной крепи ограничивается поддержанием отслоившихся пород.

Полученные данные показывают, что величина отпора  $q = 75 \text{ кН/м}^2$  для модели HSs достаточна для того, чтобы при заданных условиях исключить формирование не только зоны предельных состояний, но и отслоившихся пород.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты исследований представляют собой законченную научно-квалификационную работу, в которой дано решение актуальной задачи - разработки методики прогноза устойчивости подземных сооружений в нелинейно-деформируемых грунтовых массивах, в окрестности выработки круговой формы.

### **Основные научные и практические результаты:**

Выполненные в диссертационной работе исследования посвящены разработке метода прогноза геомеханических процессов в окрестности выработки, учитывающей нелинейную деформируемость вмещающей среды.

### **Основные результаты выполненных исследований:**

1. Проанализированы упруго-пластические геомеханические модели нелинейно-деформируемого тела и предложена методика по подбору и калибровке параметров модели упрочняющегося грунта с малыми деформациями, которая с некоторыми допущениями, позволяет описывать механическое поведение протерозойских глин.

2. Предложен способ получения коэффициента  $dec$ , относящийся к методике аппроксимации объёмного состояния вблизи забоя ( $\beta$  – метод) к условиям плоской постановки. Установлено, что предложенная методика способна достоверно описывать напряженное состояние в окрестности выработки и смещения контура, однако, занижает возникающие в обделке внутренние силы.

3. Выполнен сравнительный численный анализ с использованием различных моделей вмещающего грунта, который показал, что использование модели MC приводит к завышению прогнозируемых величин коэффициентов концентрации касательных напряжений, главных напряжений, а также, к завышенной величине главных деформаций. Достижение огибающей критерия прочности Кулона-

Мора происходит по более короткому пути, что приводит к увеличению размера зоны предельных состояний и завышенным смещениям на контуре.

4. Установлено, что для рассмотренных глубин, при заданных прочностных и деформационных характеристиках грунта, в окрестности выработки формируется зона предельного состояния. При численном анализе с использованием модели упрочняющегося грунта, помимо зоны предельного состояния формируются зоны упрочнения от изотропного сжатия, зоны упрочнения от сдвига и зоны упрочнений от изотропного сжатия и сдвига. Были определены величины и характер распределения пластических деформаций от упрочнения при сдвиге, определен размер этой зоны при различных глубинах.

5. Подтвержден известный фактор существенного влияния малой мощности глинистой потолочины на формируемое в окрестности выработки НДС и показано, что этот эффект проявляет себя значительней при использовании моделей упрочняющегося грунта. Установлена величина мощности глинистой потолочины, уменьшение которой приводит к значительному росту смещений контура кольцевой обделки.

6. Получено представление о природе формируемых пластических деформаций изотропного сжатия. Установлено, что увеличение коэффициента переуплотнения  $OCR$  при неизменной величине коэффициента бокового распора, приводит к уменьшению величин эквивалентных смещений контура выработки, уменьшению ширины свода, в котором смещения в значительной степени формируются. Учётное переуплотнение коэффициентом  $OCR$  уменьшает ширину мулды и абсолютные смещения поверхности.

7. Анализ эпюр внутренних усилий и смещений постоянной обделки позволили установить степень влияния таких факторов, как глубина заложения выработки, толщина кольца обделки и применяемая модель грунта. При этом, нелинейной моделью HSs с учённым уплотнением прогнозируются наименьшие смещения и наименьшие нагрузки в крепи.

8. Установлено, что при численном конечно-элементном моделировании проходки одиночной круговой выработки использование в классической модели грунта МС секущего модуля деформации не рекомендуется, так как это приводит к значительному завышению величин смещений лба забоя.

9. Установлено, что определяющими факторами деформируемости и устойчивости грунтов проходческого забоя являются: учитываемая моделью нелинейность деформирования, учтённое сдвиговое и изотропное упрочнение, учтённая зависимость изменения жесткости при изменении девиаторной нагрузки, величина эквивалентного давления на грунты проходческого забоя и технология проходки (в случае вскрытия сечения по уступам).

10. Разработана методика определения параметров временного крепления через установление такой величины эквивалентного давления на лоб забоя, при котором исключаются негативные процессы, связанные с формированием в её окрестностях зоны предельных состояний и зоны отслоившихся пород.

Полученные результаты позволяют прогнозировать устойчивость подземных сооружений, на примере выработки круговой формы, в физически нелинейных грунтовых массивах и расширяют сложившиеся представления о протекающих при этом геомеханических процессах.

С точки зрения перспективы дальнейшей разработки темы, по мере совершенствования математических и теоретических представлений, предложенная методика может быть дополнена и уточнена.

Предложенная в работе методика может быть дополнена исследованием влияния фильтрационных процессов, данный фактор способен оказать влияние на основные параметры НДС в окрестности выработки и на форму зоны предельных состояний.

Так как потеря устойчивости лба забоя происходит в результате сдвиговых напряжений, интерес представляет вопрос влияния изменения величины сцепления на устойчивость лба забоя. В работе изучение данного вопроса производится лишь косвенно и требует более тщательного исследования.

Для оценки влияния выделенных факторов и решения поставленных в работе модельных задач осуществлялся комплекс исследований на численных моделях, при обширной вариации заданных условий и входных параметров. Для чего было рассчитано более 60 КЭ моделей в условиях плоской постановки; 70 КЭ моделей в пространственной постановки, расчёт каждой объёмной модели занимал порядка 5 часов.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК*

1. **Протосеня, А.Г.** Прогноз напряженно-деформируемого состояния в окрестности подземного сооружения в нелинейно-деформируемых грунтовых массивах / А.Г. Протосеня, Г.А. Иовлев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – Вып. 2. – С. 215-228.

2. **Протосеня, А.Г.** Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в призабойной зоне тоннеля / А.Г. Протосеня, Г.А. Иовлев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 5. – С. 128–139.

3. **Иовлев, Г.А.** Адаптация модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / Г.А. Иовлев, А.В. Алексеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 75–87.

*Публикации в прочих изданиях:*

4. **Иовлев, Г.А.** Обоснование упруго-пластической модели поведения физически нелинейных грунтовых массивов / Г.А. Иовлев // XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов. Тезисы докладов. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет. – 2020. – С. 188 – 189.

5. **Иовлев, Г.А.** Определение параметров модели физически нелинейного тела для моделирования геомеханических процессов в слабых аргиллитоподобных протерозойских глинах / Иовлев Г.А. // Ростовский научный журнал. – 2017. – № 6. – С. 286 – 294.

6. **Иовлев, Г.А.** Получение коэффициентов для модели физически нелинейного тела по экспериментальным данным протерозойских глин / Иовлев Г.А. // Современные концепции техники и технологии: проблемы, состояние и перспективы. – Чебоксары. Сборник статей по материалам международной онлайн-конференции. – 2017. – № 6. – Режим доступа: [https://interactive-plus.ru/ru/article/462173/discussion\\_platform](https://interactive-plus.ru/ru/article/462173/discussion_platform).

7. **Алексеев, А.В.** Влияние неоднородности массива на устойчивость проходческого забоя при строительстве метрополитена / А.В. Алексеев, Г.А. Иовлев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 8 (62). – С. 6–14

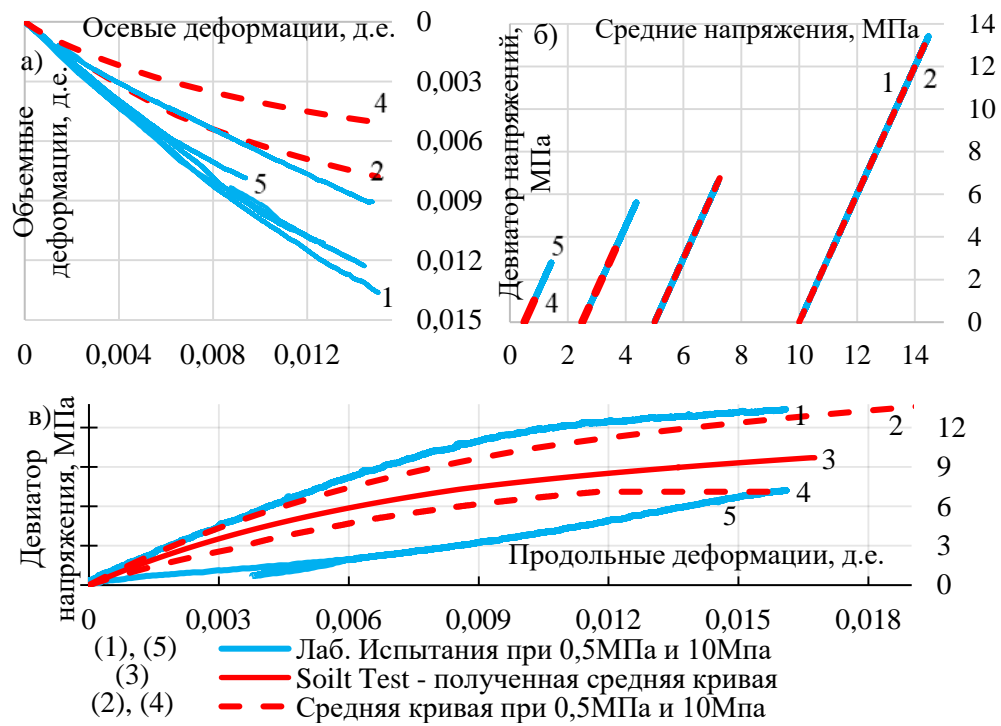


Рисунок 1 а) – Сопоставление диаграмм деформирования в осях “Осьевые деформации – объёмные деформации”; б) – сопоставления диаграмм деформирования в осях “средние напряжения – сдвиговые напряжения”; в) – сравнение полученной “средней” кривой, при различных значениях бокового давления, полученной по результатам подбора входных параметров в модуле Soil Test с диаграммами деформирования из лабораторных испытаний

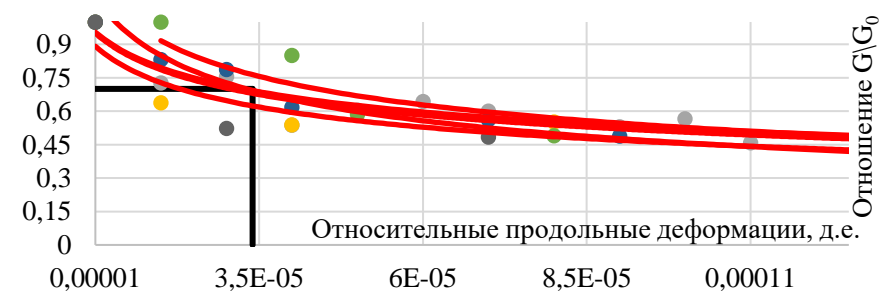


Рисунок 2 – Изменение относительной величины касательного модуля деформации от величины достигнутых относительных продольных деформаций

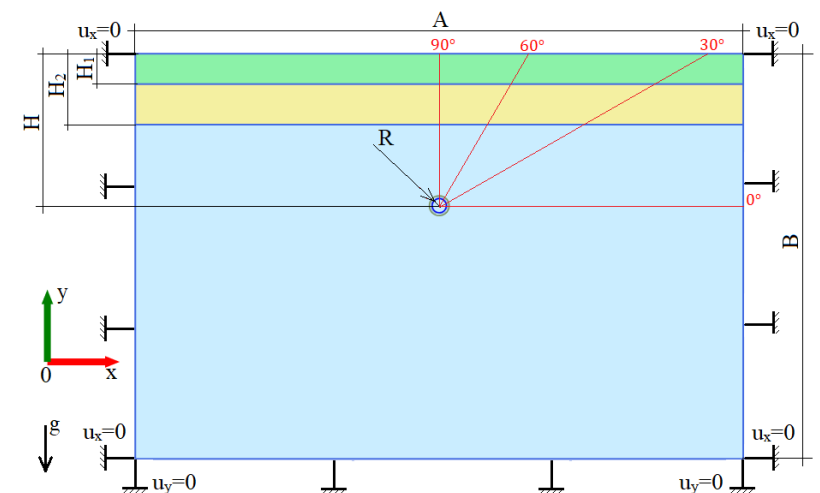


Рисунок 3 – Геометрическая и кинематическая схемы расчётной модели в плоской постановке; R = 7 м; H<sub>1</sub> = 15 м; H<sub>2</sub> = 25 м; моделирование выработки производилось на трёх глубинах H: -45 м; -60 м и -75 м; A = 150 м; B = 100 м

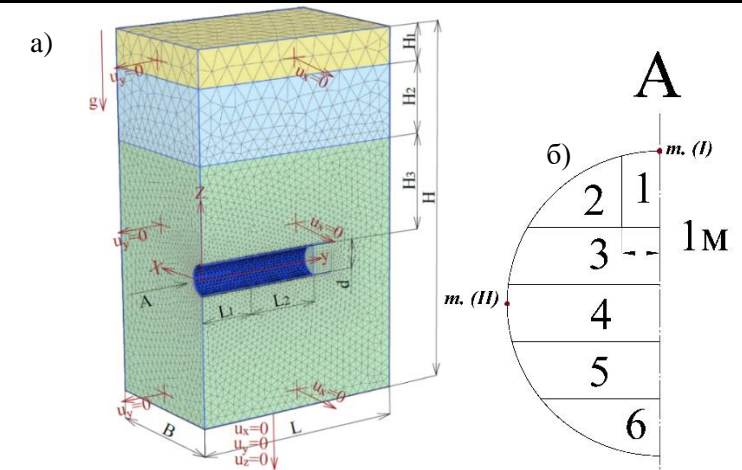


Рисунок 4 а) – Геометрическая и кинематическая схемы расчётной модели в плоской постановке; б) – схема разработки тоннеля диаметром 8 м уступами; шаг заходки равен ширине одного кольца обделки -1 м; H<sub>1</sub> = 10 м; H<sub>2</sub> = 20 м; H<sub>3</sub> = 26 м; d = 8 м; H = 26 м; B = 26 м; L = 26 м

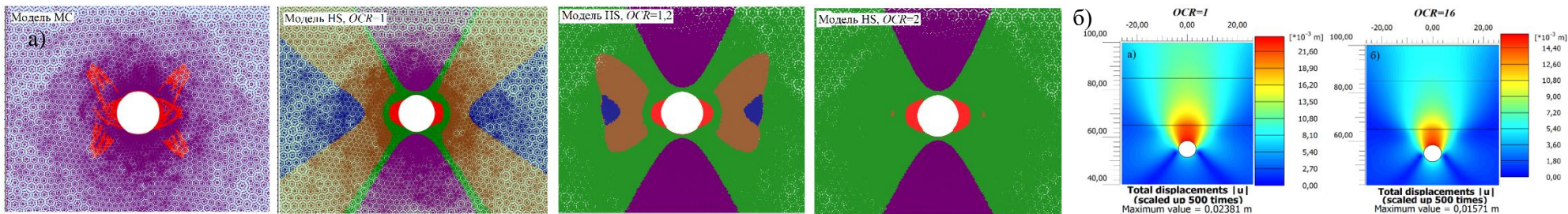


Рисунок 5 а) – Состояние точек интегрирования для модели MC и модели HS при разной величине OCR; б) – изменение общих смещений в окрестности выработки в зависимости от учтённой уплотнённости грунтов при глубине заложения тоннеля 45 метров

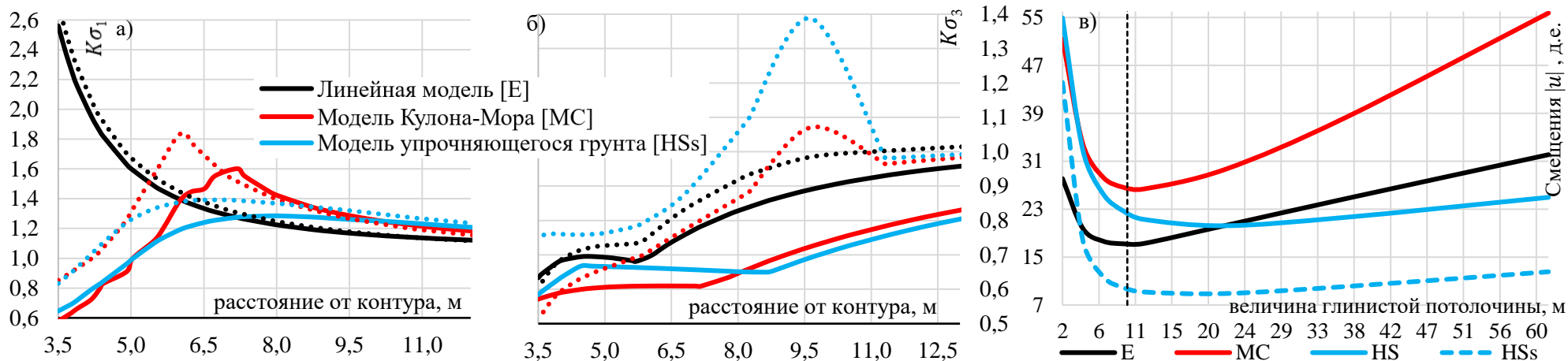


Рисунок 6 – Распределение коэффициентов концентрации напряжений; а) – для  $K\sigma_1$ , вдоль сечения под углом  $0^\circ$ ; б) – для  $K\sigma_3$ , вдоль сечения под углом  $90^\circ$ ; в) – зависимость изменения эквивалентных смещений обделки в зависимости от глубины заложения выработки

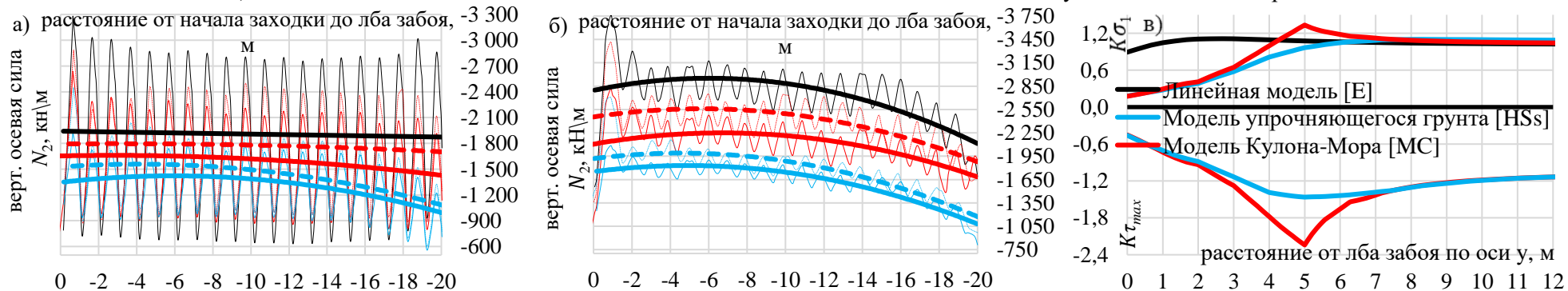


Рисунок 7 Кривые распределение вертикальной осевой силы в бетонной крепи при продвижении проходки а) – в т. (I); б) – в т. (II); в) – распределение коэффициентов концентрации наибольшего главного напряжения и максимальных касательных напряжений в окрестности выработки



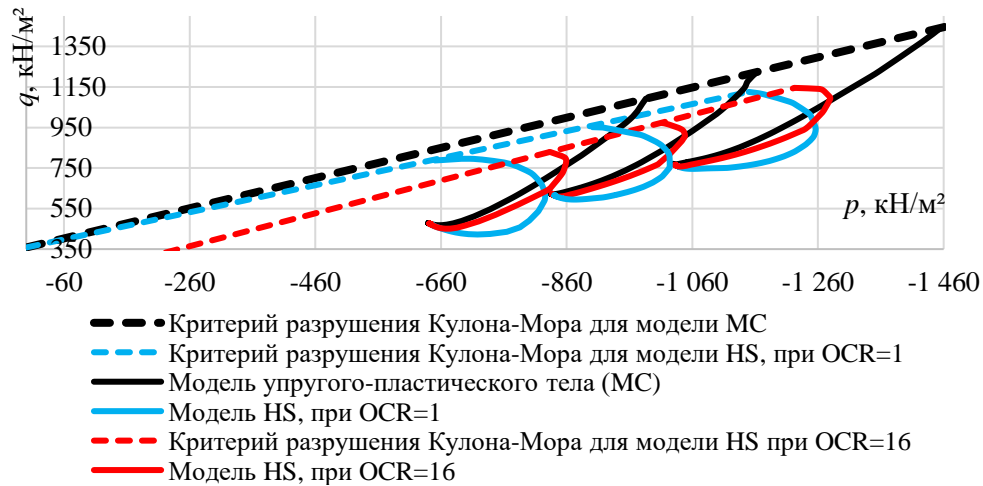


Рисунок 8 - Кривые зависимостей среднего эффективного напряжения от напряжений сдвига в окрестностях выработки круговой формы, пройденной на различных глубинах

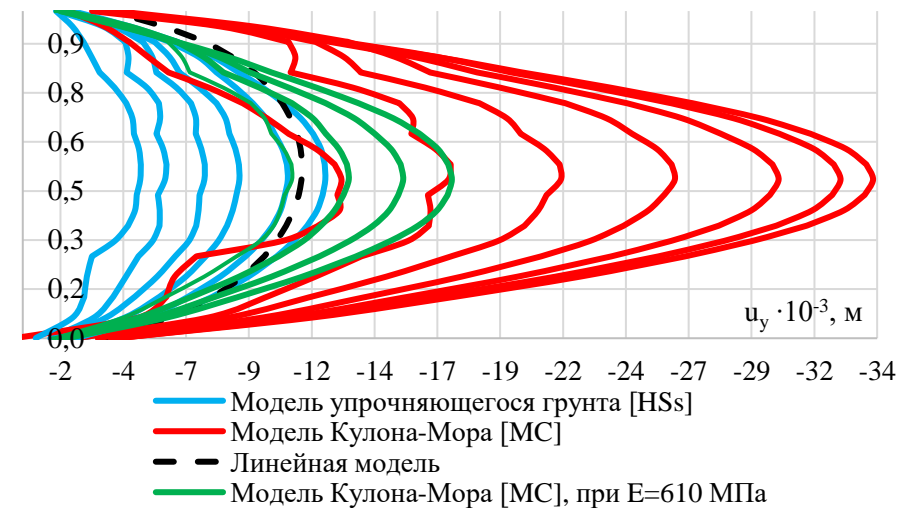


Рисунок 10 - Распределение относительных продольных смещений забоя по относительному вертикальному диаметру тоннеля

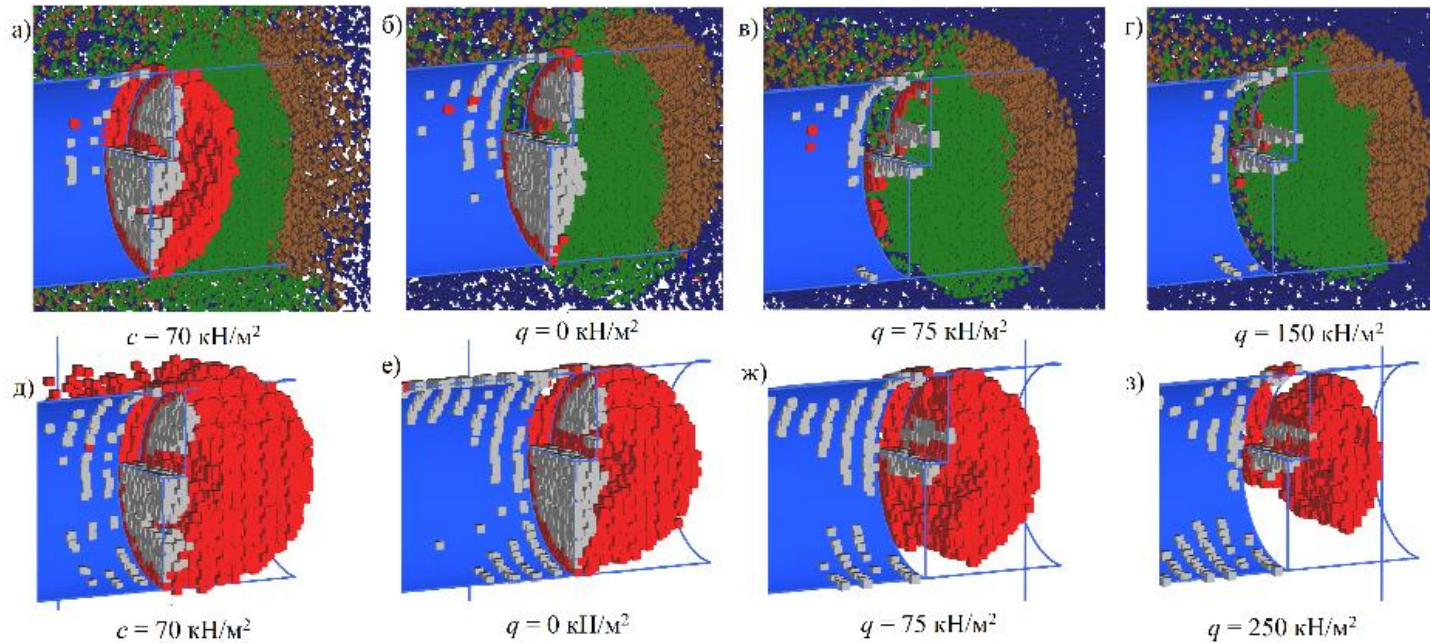


Рисунок 9 - Взаимосвязь между формируемой зоной предельных состояний и зоны упрочнения в зависимости от изменяемой величины сцепления и эквивалентного давления на лоб забоя