

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по науке и инновациям

ИРИУ МИСИС

проф.

М.Р. Филонов

» 06 2025 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Петрушина Владислава Владимировича на тему «Прогноз геомеханических процессов в окрестности породных обнажений в соляных массивах на макромасштабном уровне», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

### 1. Актуальность темы диссертации

В современных условиях освоения и эксплуатации подземных пространств всё большую значимость приобретают вопросы достоверного прогноза поведения горных пород вблизи техногенных возмущений. Особенно остро эта проблема стоит при разработке месторождений, расположенных в пределах соляных массивов, которые характеризуются сложным механическим поведением, склонностью к пластичности, локальному разрушению и дилатансии. Одним из наиболее уязвимых элементов горных выработок являются зоны породных обнажений: стенки скважин, контуры выработанных пространств, камеры и стволы. При их проектировании и эксплуатации важно учитывать не только средние прочностные характеристики массива, но и его внутреннюю макроструктурную неоднородность. В то же время традиционные подходы, основанные на моделях сплошной среды, зачастую оказываются недостаточными для описания процессов разрушения, инициируемых вдоль границ кристаллов и в слабых зонах.

Актуальность диссертационной работы Петрушина Владислава Владимировича определяется необходимостью повышения точности геомеханических расчётов и разработки более реалистичных моделей, отражающих структурное строение соляных пород. В работе предложен метод прогнозирования напряжённо-деформированного состояния породы на макромасштабном уровне с учётом поликристаллической структуры, позволяющий выявить и количественно оценить зоны потенциального разрушения и потери устойчивости.

Разработка и применение подобного подхода представляет значительный интерес как с научной точки зрения — в аспекте развития моделей структурной геомеханики, так и с инженерной — при проектировании и обеспечении безопасности подземных сооружений в соляных массивах.

### 2. Научная новизна диссертации

Научная новизна диссертационной работы Петрушина Владислава Владимировича заключается в разработке и численной реализации подхода к моделированию

геомеханических процессов в соляных массивах, основанного на учёте поликристаллической структуры породы на макромасштабном уровне. Соль рассматривается не как сплошная среда, а как дискретная система взаимодействующих кристаллов, что позволяет воспроизводить процессы разрушения, трещинообразования и дилатансии с учётом внутренней структуры материала. Методика включает генерацию поликристаллической структуры с помощью тесселяции Вороного, задание прочностных характеристик отдельных зёрен и межзеренных контактов, а также разрушение когезионных связей при достижении предельных условий.

Автором выявлены количественные зависимости между формой, размером и угловатостью зёрен, и прочностным откликом модели, а также обоснован масштабный эффект. В работе получены новые результаты по сравнению классического и дискретного подходов: ширина зоны разрушения, определённая по дискретной модели, в среднем на 28 % превышает расчётную по модели Мора–Кулона. Разработан критерий глубины потери устойчивости вокруг скважины и показано, что характер разрушения асимметричен и связан с положением и размером зёрен.

Таким образом, в диссертации представлены научно обоснованные, оригинальные и практически значимые результаты, расширяющие современные представления о механике разрушения поликристаллических горных пород.

### **3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Научные положения, сформулированные в диссертации Петрушина Владислава Владимировича, имеют высокую степень обоснованности и достоверности, что подтверждается логикой изложения, полнотой численного обоснования и репрезентативностью полученных результатов. Все этапы исследования – от построения геометрической модели поликристаллической структуры до решения прикладных инженерных задач – опираются на современные методы численного моделирования и механики дискретных сред. Выводы подкреплены результатами обширных параметрических расчётов, в которых варьируются физико-механические свойства зёрен, параметры межзеренных контактов и геометрические характеристики структуры. Применение метода системного анализа и сопоставление дискретного подхода с классическими континуальными моделями (на основе критерия Мора–Кулона) обеспечивают объективность и достоверность обоснований.

Достоверность результатов дополнительно подтверждается устойчивостью выявленных закономерностей при изменении масштаба модели и повторяемостью поведения в различных постановках. Автором выполнен последовательный анализ масштабного эффекта, влияния формы зёрен, а также сравнение поведения целиков и стенок скважин при различных нагрузочных условиях.

Рекомендации, сформулированные в работе, логично вытекают из анализа полученных результатов и ориентированы на инженерное применение — в расчётах устойчивости обнажений, обосновании параметров крепи и идентификации зон потенциальной потери несущей способности. Все рекомендации являются практико-ориентированными и могут

быть использованы как при проектировании, так и при мониторинге состояния подземных сооружений.

#### **4. Научные результаты, их ценность**

В диссертационной работе получены новые научные результаты, представляющие ценность как для развития теории геомеханики, так и для прикладных инженерных расчётов. Автором предложен и реализован подход к моделированию поведения соляных пород, основанный на явном учёте их поликристаллической структуры, что позволило воспроизвести ключевые механизмы разрушения: межзерновое трещинообразование, дилатантное расширение, локальное отслоение и потерю устойчивости.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 1 статье - 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), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Ценность научных результатов заключается в возможности их использования при создании цифровых геомеханических моделей, разработке нормативных подходов к расчёту крепи и при оценке безопасности эксплуатации подземных объектов в соляных массивах.

#### **5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации**

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии научных представлений о геомеханике поликристаллических сред и формировании численного подхода, учитывающего реальную зеренную структуру соляных пород. В работе обосновано влияние геометрических и механических параметров макроструктуры на напряжённо-деформированное состояние массива, показана необходимость перехода от континуальных моделей к конечно-дискретному описанию разрушения.

Практическая значимость состоит в возможности применения разработанной методики при проектировании и эксплуатации подземных сооружений в соляных массивах. Полученные результаты позволяют с высокой точностью прогнозировать зоны потери устойчивости вблизи стволов, скважин и камер, обосновывать параметры крепи и выявлять участки, требующие усиленного контроля или мониторинга. Методика может использоваться при разработке инженерных решений, оценке техногенного риска и создании цифровых геомеханических моделей, применяемых в производственной и экспертной деятельности.

#### **6. Рекомендации по использованию результатов работы**

Материалы и результаты, представленные в диссертационной работе, могут быть использованы при решении широкого круга практических и научных задач в области горной геомеханики. В частности, разработанный подход может быть применён при расчётах напряжённо-деформированного состояния и прогнозировании зон разрушения вблизи выработок, проходящих через соляные и другие пластичные породы с выраженной зеренной структурой.

Методика формирования поликристаллических моделей и реализации конечно-дискретного численного анализа может использоваться в проектных организациях при обосновании параметров крепи вертикальных стволов, скважин и камер. Результаты расчётов позволяют более точно учитывать влияние микроструктуры массива на его поведение, что особенно актуально в условиях сложной геологии и тектонической нарушенности.

Кроме того, полученные данные и выявленные зависимости могут быть интегрированы в действующие геомеханические программные продукты, использованы при подготовке экспертных заключений, а также при обучении и переподготовке специалистов в области инженерной геомеханики.

Основные результаты диссертации рекомендуются к внедрению в таких отечественных организациях, как ООО «ПРОТЕХ ИНЖИНИРИНГ», АО «ВНИИ Галургия», ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II «Научный центр геомеханики и проблем горного производства» и других.

## **7. Замечания и вопросы по работе**

1. В ряде разделов (например, при обсуждении зон разрушения вокруг скважины) используется термин «дилатансия», однако его количественная трактовка не представлена. Уточнение этого аспекта могло бы усилить обоснованность интерпретации результатов.

2. Несмотря на заявленную структуру модели, ориентированную на трёхмерную природу поликристаллической среды, все расчёты выполнены в двумерной постановке. Указание на ограничения плоской схемы и возможные искажения при переходе к пространственным условиям следовало бы раскрыть более подробно.

3. При описании влияния формы зерен на прочность массива не раскрывается, каким образом в модели задаётся степень угловатости – через коэффициенты, углы или другие геометрические параметры. Ясное определение этого критерия повысило бы воспроизводимость результатов.

4. Формулировки ряда промежуточных выводов носят описательный характер. Введение более строгих количественных обобщений, например, в форме уравнений, графиков корреляции или безразмерных параметров, усилило бы научную строгость изложения.

5. Недостаточно представлены рекомендации по практическому внедрению полученных результатов в расчётную деятельность – например, в контексте адаптации к существующим нормативам или программному обеспечению.

## **8. Заключение по диссертации**

Диссертация «Прогноз геомеханических процессов в окрестности породных обнажений в соляных массивах на макромасштабном уровне», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика, соответствует требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета от 20.05.2021 №953 адм, а ее автор –

Петрушин Владислав Владимирович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Отзыв на диссертацию и автореферат диссертации Петрушина Владислава Владимировича обсужден и утвержден на заседании кафедры «Физических процессов горного производства и геоконтроля» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», протокол № 9 от «20» мая 2025 года.

#### **Председатель заседания**

Заведующий кафедрой «Физических процессов и геоконтроля» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
д.ф.-м.н., доцент



В. А. Винников

#### **Секретарь заседания**

Доцент кафедры «Физических процессов и геоконтроля» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
к. т. н.,



А. С. Пугач

#### **Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»  
Почтовый адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1  
Официальный сайт в сети Интернет: <https://misis.ru/>  
эл. почта: [kancela@misis.ru](mailto:kancela@misis.ru), телефон: +7 495 955-00-32

Подпись Винникова В.А.; Пугач А.С.  
заверяю  
Заместительница Кузнецова А.Е.  
отдела кадров

« 09 » 06 2025 г.