

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ГУ.7
ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА (ДОКТОРА) НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 15.07.2025 № 22

О присуждении Петрушину Владиславу Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Прогноз геомеханических процессов в окрестности породных обнажений в соляных массивах на макромасштабном уровне» по специальности 2.8.6 Геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика принята к защите 12.05.2025, протокол заседания № 10, диссертационным советом ГУ.7 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России, 199106, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, приказ ректора Санкт-Петербургского горного университета о создании диссертационного совета от 06.02.2023 № 155 адм, с изменениями от 13.07.2023 № 1090 адм, от 29.12.2023 № 1965 адм, от 11.11.2024 № 1690 адм.

Соискатель, Петрушин Владислав Владимирович, 07 августа 1997 года рождения, в 2021 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» по специальности 21.05.04 Горное дело.

С 01.10.2021 года по настоящее время является аспирантом очной формы обучения кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России.

Диссертация выполнена на кафедре строительства горных предприятий и подземных сооружений в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент **Карасев Максим Анатольевич**, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», кафедра строительства горных предприятий и подземных сооружений, профессор кафедры.

Официальные оппоненты:

Ашихмин Сергей Геннадьевич – доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем, профессор кафедры;

Румянцев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», лаборатория геотехники, заведующий лабораторией; дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – **федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»**, г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Винниковым Владимиром Александровичем, доктором физико-математических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Физических процессов и геоконтроля», Пугачом Александром Сергеевичем, кандидатом технических наук, доцентом той же кафедры, секретарем заседания и утвержденном Филоновым Михаилом Рудольфовичем, доктором технических наук, профессором, проректором по науке и инновациям, указала, что автором разработана и реализован подход к моделированию геомеханических процессов в соляных массивах, основанный 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, также автором выявлены количественные зависимости между формой, размером и угловатостью зёрен, и прочностным откликом модели, а также обоснован масштабный эффект.

Соискатель имеет 11 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 4 работы, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 4 работы, в том числе в 1 статья - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в

изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Общий объем – 3,63 печатных листов, в том числе 2,06 печатных листа - соискателя.

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Протосеня А.Г. Анализ подходов к прогнозу напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев, А.М. Катеров, **В.В. Петрушин** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство – 2023. – № 19. – С. 129–137 (№ 2507 Перечня ВАК ред. 29.03.2023).

Соискателем выполнен детальный обзор существующих отечественных и зарубежных методик моделирования напряжённно-деформированного состояния (НДС) в массивах соляных пород, с особым акцентом на использование разнообразных реологических моделей, которые учитывают характеристики длительной прочности, процессы ползучести и релаксации напряжений в соли. В представленной работе автор систематизировал основные тенденции развития численных методов прогнозирования НДС в крепи вертикальных стволов, обозначил ключевые достоинства и ограничения моделей, основанных на различных предположениях о механизмах деформирования.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

2. Karasev M.A. Analysis of the stress-strain state of the shaft support in the transition zone of anhydrite-rock salt / M.A. Karasev, A.G. Protosenya, A.M. Katerov, **V.V. Petrushin** // Rudarsko-geološko-naftni zbornik – 2022. – Vol. 37, No. 1. – P. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13 [Карсев М.А. Анализ напряженно-деформированного состояния крепи ствола в переходной зоне ангидрит–каменная соль/ М.А. Карсев, А.Г. Протосеня, А.М. Катеров, **В.В. Петрушин** // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. – 2022. – Т. 37, № 1. – С. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13]

Соискатель внёс весомый вклад в обоснование выбора численного подхода для оценки напряжённно-деформированного состояния крепи вертикального ствола, проходящего через переходную зону ангидрит–каменная соль. В ходе исследования автором были детально изучены геомеханические особенности поведения соляных пород, включая их высокую восприимчивость к длительным нагрузкам, склонность к ползучести, реологическую нестабильность, а также влияние температурных и

пластовых факторов на изменение прочностных характеристик. Исходя из анализа физико-механических свойств каменной соли и ангидрита, а также особенностей их взаимодействия в зоне контакта, соискатель обосновал применение численного метода, который позволяет учесть резкий контраст свойств пород, геометрию переходной области и длительное перераспределение напряжений.

3. Карасев М.А. Применение метода конечно-дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макроструктурном уровне / М.А. Карасев, **В.В. Петрушин**, А.И. Рысин // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2023. – № 4. – С. 48–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48

Соискатель внёс существенный вклад в обоснование целесообразности использования метода конечно-дискретных элементов (МКДЭ) для моделирования поведения соляных пород на уровне их макроструктуры. В рамках работы автором были всесторонне исследованы механические особенности соляных массивов, включая наличие микродефектов, трещиноватости, зон неоднородности и включений, которые оказывают значительное влияние на прочностные и деформационные свойства массива. Особое внимание было уделено выявлению ограничений классических континуальных моделей при описании процессов разрушения, формирования локализованных зон деформации и перераспределения напряжений в соляных породах. Соискатель обосновал необходимость применения подходов, учитывающих разрывность среды и макроструктурные особенности деформирования, свойственные природным соляным телам.

4. Карасев М.А. Методические вопросы определения исходных параметров модели деформирования каменной соли как поликристаллической дискретной среды / М.А. Карасев, **В.В. Петрушин** // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2024. – № 9. – С. 47–64. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_47

Соискатель внёс значительный вклад в разработку и обоснование методических подходов к определению исходных параметров модели деформирования каменной соли, рассматриваемой как поликристаллическая дискретная среда. В рамках исследования автором был подробно проанализированы микроструктурные особенности соляных пород, включая форму, размеры, пространственное распределение и ориентацию кристаллов, а также особенности межкристаллитного взаимодействия.

Соискатель исследовал влияние этих характеристик на макроскопическое поведение образцов, включая процессы трещинообразования и разрушения, и принимал участие в разработке

методики перехода от макромеханических свойств к параметрам численного моделирования, предназначенного для описания поведения соли на инженерном уровне.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619605 Российская Федерация. Программа для внедрения когезионных элементов в сетку сплошных элементов первого порядка в Abaqus CAE. Заявка № 2023619605: заявл. 27.04.2023: опубл. 12.05.2023 /**Петрушин В.В.**, Карасев М.А.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Соискатель внёс значимый вклад в разработку алгоритмической и программной части решения, направленного на интеграцию когезионных (сцепляющих) элементов в сетку сплошных конечных элементов первого порядка в среде моделирования Abaqus CAE. Соискателем была разработана оригинальная методика автоматизированной модификации конечной элементной сетки с учётом геометрии контактов и особенностей межслоевых связей, реализованная в виде программного инструмента для платформы IBM PC. Созданная программа значительно упростила процесс построения моделей разрушения и трещинообразования в Abaqus CAE, особенно для случаев взаимодействующих сред и анизотропной прочности материала.

Апробация диссертационного исследования проведена на научно-практических мероприятиях с докладами:

1. XVIII Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (15-21 мая 2022 г., г. Санкт-Петербург);

2. XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (29 мая - 01 июня 2024 г., г. Санкт-Петербург);

3. XXXIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2025» (06 февраля 2025 г., г. Москва.

В диссертации Петрушина Владислава Владимировича отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от: директора Санкт-Петербургского филиала ООО «Научно-проектный центр «Акрон инжиниринг» **И.П. Веретельника**; менеджера по инжинирингу службы

управления проектом Подольского месторождения ООО «Башкирская медь», к.т.н. **А.Б. Чебакова**; директора департамента Кировского филиала акционерного общества «Апатит» по горному производству, к.т.н. **В.Б. Мельника**; заместителя директора по научной работе ИГД СО РАН, главный научный сотрудник лаборатории механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред, д.ф.-м.н., с.н.с. **С.В. Лаврикова**; руководителя лаборатории геомеханики ООО «ПроТех Инжиниринг», к.т.н. **В.Н. Дешковского**; профессоров кафедры механики материалов и геотехнологий ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», д.т.н. **А.С. Саммалы** и д.т.н. **П.В. Деева**

В отзывах дана положительная оценка диссертационного исследования, отмечена актуальность выбранной темы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования, логическое построение работы с использованием актуальной научной и статистической информации, однако отмечены ряд замечаний:

1. Пожеланием может быть расширение рассмотрения масштабного эффекта в контексте долгосрочного поведения породы, а также потенциальной интеграции с методами машинного обучения. Однако эти вопросы не снижают ценности полученных результатов (**И.П. Веретельник**);

2. Было бы полезно дополнительно сравнить результаты моделирования с данными натурных наблюдений, что позволило бы повысить степень верификации численных моделей. (к.т.н. **В.Б. Мельник**);

3. В автореферате желательно уточнить объем использования разработанной программы: ограничено ли ее применение Abaqus CAE, либо возможна адаптация к другим платформам. (к.т.н. **В.Б. Мельник**);

4. Для повышения универсальности модели можно было бы рассмотреть влияние температурных и гидрогеологических факторов. Эти аспекты могут быть предметом дальнейших исследований и не снижают достоинств представленной работы. (к.т.н. **А.Б. Чебаков**);

5. Из автореферата неясно какая именно модель пластичности применялась в расчетах (критерий пластичности, идеальная пластичность, упрочнение и т.д.), учитывалась ли в расчетах возможная разгрузка. Не вполне ясна модель взаимодействия зерен по границам их соприкосновения, в частности, учитывалось ли внешнее сухое трение, как это имеет место в методе дискретных элементов? (д.ф.-м.н. **С.В. Лавриков**);

6. В работе используется «параметр округлости зерен», который не является общепринятым. Необходимо дать его точное определение. (д.ф.-м.н. **С.В. Лавриков**);

7. В автореферате встречаются неточные стилистические выражения «дилатансия возникла на 20-30% раньше ...», «разнородных видов напряженного состояния ...», «... посредством внедрения процедуры по внедрению ...» и др. (д.ф.-м.н. **С.В. Лавриков**);

8. В автореферате не указано какие модели материала и контактных взаимодействий использованы автором, однако в диссертации это раскрыто в должной степени. В то же время не указаны исследованные скорости приложения нагрузки к образцам поликристаллической структуры и их взаимосвязь с использованным экспоненциальным законом разупрочнения. (к.т.н. **В.Н. Дешковский**);

9. Автором использован метод тесселяции Вороного для описания междукристаллических связей, указано о его надежности. В то же время не представлено сравнение использованного метода с иными методами описания междукристаллических связей. Не представлены сведения о принципах определения количества междукристаллических связей, соотношении поликристаллических структур и междукристаллических связей между ними, характерных для соляных массивов. (к.т.н., **В.Н. Дешковский**);

10. Автору следовало более подробно описать особенности рассматриваемых в работе геомеханических процессов и их проявление на макромасштабном уровне. При этом, вводя новое понятие «хрупкопластичного поведения» соляных пород (стр. 4), не лишним было бы дать соответствующее пояснение для этого весьма специфического термина. (д.т.н. **А.С. Саммаль** и д.т.н **П.В. Деев**);

11. Не совсем понятно, какие лабораторные исследования проводились в работе с целью решения задач (сформулированных на стр. 6, 7 автореферата), связанных с исследованием макроструктур соляных пород и изучением деформирования и разрушения соляных пород на макроструктурном уровне. (д.т.н. **А.С. Саммаль** и д.т.н **П.В. Деев**);

12. Как известно, основные проблемы обеспечения устойчивого поддержания выработок в соляных массивах обусловлены проявлениями процессов незатухающей ползучести в солях. Представляется, что автору также следовало уделить внимание этим геомеханическим процессам. (д.т.н. **А.С. Саммаль** и д.т.н **П.В. Деев**).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием исследований и публикаций по теме диссертационной работы и их компетентностью в области диссертационного исследования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана новая научная концепция прогноза напряженно-деформированного состояния соляных пород на основе их рассмотрения в виде набора поликристаллических структур с учетом особенностей их макроструктуры и механического взаимодействия между зернами;

предложен нетрадиционный подход построения поликристаллической структуры соляных пород на основе тесселяции Вороного с учетом статистического характера распределения размеров и формы частиц по Вейбуллу;

доказана перспективность использования макроструктурного представления соляного массива для повышения точности прогноза геомеханических процессов в окрестности породных обнажений;

введены понятия масштабного эффекта репрезентативного объёма, определяющего характерный размер зерен для выбранного масштаба расчетной модели и новые параметры описания формы и размеров зёрен соли для построения численных моделей прогноза НДС рассматриваемой системы.

Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:

доказано существенное влияние формы и размеров зёрен и межзеренного сцепления на механическое поведение соляных пород, а также возможность воспроизведения данного эффекта за счет применения метода конечно-дискретного моделирования, базирующегося на макроструктурном представлении породы;

применительно к проблематике диссертации результативно **использован** комплекс базовых численных методов механики сплошной и дискретной сред, методы генерации случайных структур с заданным законом статического распределения, а также комплекс теоретически-экспериментальных методов изучения макроструктуры соляных пород;

изложены основные положения построения численных моделей прогноза НДС соляных пород в том числе параметры репрезентативного объёма, формы и размеров частиц рассматриваемой макроструктуры пород, а также параметры модели деформирования и контактного взаимодействия между элементами поликристаллической структуры;

раскрыты существенные противоречия между расчётами напряженно-деформированного состояния в окрестности породных обнажений в рамках континуальных и предложенного в работе подходов, выявлены несоответствия прогнозных зон разрушения и повреждения породного массива в приконтурной зоне и как следствие выявлена необходимость использования предложенного подхода

изучены причинно-следственные связи между макроструктурой пород и локальными зонами трещинообразования и дилатансии, выявлены

закономерности распределения напряжений, формы и размеры зон повреждений и разрушений;

проведена модернизация существующего алгоритма построения численных моделей в рамках метода конечно-дискретных элементов, учитывающего особенности макроструктуры соляных пород.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены прикладные рекомендации по построению численных моделей прогноза устойчивости породных обнажений с учётом их макроструктурных особенностей;

определены перспективы практического использования метода конечно-дискретных элементов с учетом макроструктурного представления соляных пород для решения прикладных задач геомеханики разработки месторождений полезных ископаемых;

создана система практических рекомендаций по определению исходных параметров для реализации метода конечно-дискретных элементов с учетом макроструктурного представления соляных пород;

представлены предложения по дальнейшему совершенствованию представленного подхода к прогнозу напряженно-деформированного состояния соляных пород при оценке развития водопроводящих трещин в водозащитной толще месторождений соляных пород.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты численных экспериментов согласуются с опубликованными физическими испытаниями, параметры моделей откалиброваны и согласованы с литературными данными;

теория построена на проверяемых исходных предпосылках и соответствует современным представлениям о механике деформирования и разрушения соляных пород;

идея базируется на обобщении мирового опыта в части совершенствования подходов к созданию макроструктурных моделей геоматериалов и особенностей деформирования и разрушения соляных пород;

использованы сравнения полученных автором численных расчетов НДС в окрестности породных обнажений с результатами, выполненными ранее исследований;

установлено качественное совпадение характера деформирования и разрушения соляных пород с результатами натурных наблюдений и данными лабораторных исследований;

использованы современные алгоритмы построения поликристаллических структур и разработаны инструменты для

параметрического анализа статистических параметров распределения размеров и форм частиц в макроструктуре соляных пород.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии на всех этапах работы – от обоснования задачи и разработки численной методики до реализации расчётов, интерпретации результатов и подготовки научных публикаций; соискатель лично разработал алгоритм построения макроструктурных моделей и их адаптацию для соляных пород, выполнил серию расчетов НДС образцов породы для типовых схем проведения лабораторных испытаний и обобщил полученные результаты в ряд зависимостей.

В диссертации отсутствуют заимствованные материалы без ссылки на автора и (или) источник заимствования, результаты научных работ, выполненных Петрушиным В.В. в соавторстве, без ссылок на соавторов.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

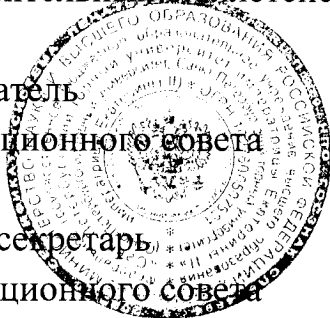
Соискатель Петрушин В.В. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию.

На заседании 15.07.2025 диссертационный совет принял решение присудить **Петрушину В.В.** ученую степень кандидата технических наук за решение научной задачи разработки и обоснованию алгоритмов и инженерных рекомендаций для реализации конечно-дискретного подхода при моделировании деформирования и разрушения соляных пород, имеющих существенное значение для повышения геомеханической безопасности при разработке соляных месторождений.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 4 доктора наук (по научной специальности рассматриваемой диссертации), участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 13, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета



Протосеня
Анатолий Григорьевич

Афанасьев
Павел Игоревич

15.07.2025 г.