

Министерство науки и высшего
образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки

ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА
ИМ. Н.А. ЧИНАКАЛА

Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИГД СО РАН)

Красный просп., д. 54, Новосибирск, 630091
Телефон/факс (383) 205-30-30
E-mail: mailigd@nisd.ru, <http://www.nisd.ru>
ОГРН 1035402457683, ИНН 5406015365

03 09 2025 № 447/69-2025

На № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ
Директор Федерального
государственного
бюджетного учреждения науки
Институт горного дела
имени Н.А. Чинакала Сибирского
отделения
Российской академии наук

к.т.н.

Хмелинин А.П.

«03» сентября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Цаюкова Андрея Андреевича

«Разработка методов математического моделирования процессов деформирования соляных междокамерных целиков», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Актуальность темы работы

Обоснование технологий вскрытия и разработки месторождений твердых полезных ископаемых, прогноз состояния породного массива при ведении горных работ, интерпретация данных сейсмического мониторинга шахт и рудников – вот далеко не полный перечень проблем, решение которых невозможно без геомеханического моделирования исследуемого геотехнического объекта. Ключевой элемент этого процесса – построение определяющих соотношений, описывающих реакцию горных пород на силовое воздействие. Для соляных пород, являющихся одним из предметов данного исследования, до настоящего времени нет общепринятого вида уравнений состояния, поэтому возникает необходимость разработки новых уравнений, позволяющих более точно моделировать реологическое поведение элементов массива. Применение этих уравнений состояния к анализу горнотехнических ситуаций дает возможность адекватного прогнозирования развития процессов деформации и разрушения целевых объектов, вызванных горными работами, а также выработке мероприятий для предотвращения опасных ситуаций. Эти обстоятельства обуславливают актуальность темы диссертации.

Научная новизна

1. Создана и с использованием данных реологических лабораторных испытаний кубических образцов откалибрована новая 3D модель упруго-вязкопластического деформирования и разрушения соляных пород. При этом для учета ползучести среды выполнена модификация вязкопластической составляющей модели посредством введения дополнительного внутреннего параметра – предела ползучести.

2. На базе метода конечных элементов (МКЭ) разработан и протестирован реализующий новую модель численный алгоритм, оригинальными элементами которого являются: модифицированный метод проекции напряжений (на основе неявной схемы Эйлера локального интегрирования методом обратного отображения); блок расчета предела ползучести и эквивалентного напряжения ползучести.

3. На основе новой модели деформирования соляных пород разработана и по данным *in situ* наблюдений верифицирована геомеханическая модель типичного участка отработки Верхнекамского месторождения солей – ВКМС (камерный блок, пласт КрII). Проведен многопараметрический анализ модели, позволивший предложить новую методику оценки состояния водозащитной толщи (величины оседания земной поверхности) по скоростям горизонтальной конвергенции очистных камер, полученными форвардными расчетами.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Для проведения исследований использованы классические модели механики сплошной среды в контексте геомеханики. Все коды разработаны на базе МКЭ с изопараметрическими элементами и прошли тестирование. Валидация оригинальной модели упруго-вязкопластического деформирования соляных пород (построение уравнений состояния) осуществлялась с использованием данных нестандартных лабораторных экспериментов по длительному нагружению соляных образцов кубической формы с регистрацией деформаций по всей поверхности (это позволило получить большой объем информации для настройки модели). Верификация модели деформирования участка месторождения проводилась по результатам маркшейдерских измерений на реальном объекте. Совокупность вышеперечисленных обстоятельств обеспечивает достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Научные результаты и их ценность

Разработанные автором новая математическая модель реологического деформирования соляных пород и геомеханическая модель, описывающая изменение полей напряжений и деформаций при эксплуатации соляных месторождений, представляют высокую научную ценность, поскольку дают возможность прогнозировать критическое состояние ответственных элементов

таких объектов (несущих целиков, водозащитной толщи), разрушение которых может привести к катастрофическим последствиям.

Автором разработаны методика анализа напряженно-деформированного состояния целевых объектов и соответствующий инструмент – алгоритмы и коды, позволяющие повысить эффективность горных работ и снизить вероятность возникновения техногенных аварий.

Перечисленные выше научные результаты являются развитием геомеханики в части теории деформирования горных пород, проявляющих реологические свойства, являются практически ориентированными и могут быть использованы профильными проектными организациями как методологическая база при обосновании технологий отработки соляных месторождений, а также для выбора конфигурации систем мониторинга состояния массива при ведении горных работ.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемых источников из 166 наименований и двух приложений (данные натурных наблюдений). Работа изложена на 199 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков и 26 таблиц.

Текст диссертации и автореферата написаны грамотным языком, научные термины используются корректно. Материал проиллюстрирован достаточным количеством рисунков, графиков таблиц.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертантом опубликовано 16 статей, 8 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ (из них 6 в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus). Публикации автора в полной мере отражают научные положения, выводы и рекомендации.

Теоретическая и практическая значимость

Построенные и верифицированные геомеханические модели, описывающие упруго-вязкопластическое деформирование пород и массивов (в том числе соляных), проявляющих реологические свойства, а также разработанные численные алгоритмы, могут найти применение при обосновании технологий отработки соляных месторождений, прогноза оседания поверхности и состояния водозащитной толщи при развитии горных работ, интерпретации данных деформографических измерений для контроля устойчивости несущих элементов геотехнологий.

Полученные в диссертации результаты вошли в отчеты по грантам РФФИ (№17-45-590681), РНФ (№19-77-30008), а также по проекту Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-15-2024-535).

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты работы (модели, алгоритмы, закономерности) следует использовать при анализе напряженно-деформированного состояния породных массивов в зоне ведения очистных работ и подработанных территорий соляных месторождений России и Белоруссии (Верхнекамское, Старобинское, Петриковское) с целью прогноза опасных геодинамических событий и обоснования мер по их предотвращению.

Замечания по работе

1. В параграфе 4.2. (стр. 96) указано «При использовании камерной системы отработки с целиками ленточной формы напряжённое состояние подработанного массива является близким к плоскому деформированному (ПДС)». Между тем, это далеко не достаточное условие для использования ПДС, в частности, необходимо учитывать тип внешнего (по отношению к исследуемому объекту) поля напряжений, например, вне геомеханического пространства ВКМС. В диссертации нет описания природного поля напряжений в окрестности ВКМС.

2. Далее, на стр. 103, при формулировке краевых условий, сделано предположение об отсутствии горизонтальных перемещений на вертикальных границах расчетной области, т.е. принята гипотеза А.Н.Динника. Почему для рассматриваемого объекта эта гипотеза справедлива?

3. В тексте встречаются стилистические неточности (например, «вследствие применения модифицированного метода» на стр. 128, 132, 149, 153 и др., «неассоциированный Кулон-Мор» на стр. 85, 148 и др.) и не общепринятые термины («предел напряжённого состояния», стр. 108)

Заключение по диссертации

Диссертационная работа Цаюкова Андрея Андреевича «Разработка методов математического моделирования процессов деформирования соляных междуканальных целиков» представляет собой выполненное на высоком научном уровне законченное исследование, где получены новые закономерности процессов деформирования и разрушения соляных пород и массивов, которое имеет очевидное практическое применение в горном деле для обоснования технологий разработки месторождений твердых полезных ископаемых.

Диссертация соответствует пунктам 1 и 2 паспорта специальности 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика». По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости, представленная работа соответствует квалификационным требованиям ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ согласно пункту 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор, Цаюков Андрей Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата

технических наук по специальности 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Отзыв на диссертацию А. А. Цаюкова составлен доктором физ.-мат наук Назаровой Ларисой Алексеевной (специальности 01.02.07. – Механика сыпучих тел, грунтов и горных пород, 01.02.04. – Механика деформируемого твердого тела,) и доктором физ.-мат наук Шером Евгением Николаевичем (специальность 01.02.04. – Механика деформируемого твердого тела). Отзыв рассмотрен, обсужден и одобрен на совместном семинаре Лаборатории горной информатики и Лаборатории механики взрыва и разрушения горных пород Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук», протокол № 2 от 02 сентября 2025 года.

Главный научный сотрудник
лаборатории горной информатики ИГД СО РАН,
д.ф.-м.н.

 Назарова Л.А.

И.о. заведующего лабораторией механики взрыва
и разрушения горных пород ИГД СО РАН,
д.ф.-м.н.

 Шер Е.Н.

Подписи д.ф.-м.н. Назаровой Ларисы Алексеевны и д.ф.-м.н. Шера Евгения Николаевича удостоверяю.
Ученый секретарь ИГД СО РАН,
к.т.н.

 Коваленко К.А.
03 сентября 2025 г.

