

ОТЗЫВ
официального оппонента

заведующего кафедрой Теоретической и прикладной механики
Белорусского государственного университета,
доктора физико-математических наук, профессора

Журавкова Михаила Анатольевича

на диссертационную работу Цаюкова Андрея Андреевича
«РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
СОЛЯНЫХ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.8.6 «Геомеханика,
разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Диссертационная работа изложена на 199 страницах машинописного текста, включает введение, пять глав, заключение, содержит 78 рисунков, 26 таблиц, 2 приложения и список используемых источников из 166 наименований, в том числе 72 зарубежных.

Актуальность диссертационного исследования

Камерно-столбовая система разработки месторождений полезных ископаемых, в том числе солей, широко используется в мировой горнодобывающей промышленности. Такие конструктивные элементы системы, как междукammerные целики, играют ключевую роль в поддержании выработанных пространств, обеспечении сохранности водозащитной толщи и предотвращении аварийных ситуаций, связанных с интенсификацией деформаций земной поверхности, возможным образованием провалов, разрушением инфраструктуры и затоплением рудников.

Устойчивость целиков зависит от множества факторов, влияющих на их напряженно-деформированное состояние и несущую способность. При этом, важность выделения определяющих факторов и их правильного учета обуславливает выбор эффективных расчетных моделей. Большинство традиционных подходов к расчету устойчивости целиков ориентировано на упрощенные схемы анализа и определение уровня напряжений, действующих на целики относительно их

максимальной несущей способности. Очевидно, что такие методы недостаточны для точного прогнозирования продолжительности периода эксплуатации целиков и своевременного выявления возможных рисков потери их устойчивости. Дополнительная сложность связана с разнообразием и существенной вариацией горно-геологических условий в районах ведения горных работ. Каждый участок отличается уникальными характеристиками пластов, неоднородностью строения породной толщи, а также разнообразием и степенью воздействия техногенных факторов. Все это обуславливает различие сценариев взаимодействия междукамерных целиков с окружающим породным массивом и затрудняет разработку универсального подхода к прогнозированию их устойчивости.

«Стандартные» геомеханические модели, используемые в современных инженерных расчетных программах и программных комплексах, часто не способны адекватно описать сложный механизм деформирования и разрушения горных пород и массивов в реальных условиях.

Таким образом, **задача** разработки новых подходов и методик, позволяющих адекватно оценивать состояние и с высокой степенью точности прогнозировать поведение междукамерных целиков и подработанного пространства является **актуальной**. Решение данной задачи возможно лишь путем комплексного научного подхода, объединяющего экспериментальное изучение свойств горных пород и массивов, теоретические исследования и построение новых механико-математических и геомеханических моделей.

Степень обоснованности и достоверность научных положений и выводов

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обеспечивается:

- проведением большой серии лабораторных экспериментов и натурных наблюдений с корректной обработкой их результатов, что позволило сформировать обширную базу исходных данных для валидации и верификации разработанных геомеханических моделей;
- построением геомеханических моделей поведения породных структур соляных пород на основе законов и базовых моделей механики деформируемого твердого тела;

- использованием современных численных методов и сертифицированного программного обеспечения;
- выполнением сравнительного анализа результатов численного моделирования и расчетов с данными экспериментов и натурных наблюдений.

Перечисленные аспекты позволяют сделать вывод, что выдвигаемые на защиту **научные положения и представленные выводы обоснованы** и гарантируют их применение в дальнейших исследованиях и практических инженерных решениях.

Научная новизна, полученных результатов исследования, заключается:

1. В построении упруго-вязкопластической модели деформирования образцов соляных пород большого размера, основанной на результатах лабораторных экспериментов и учитывающей особенности продольно-поперечного деформирования породных образцов, что представляется важным при изучении напряженно-деформированного состояния междукammerных целиков.

2. В разработке модели ползучести соляных пород с помощью модификации метода проекции напряжений и вязкопластического закона, подобного модели Перича, а также в численных реализациях модифицированного метода проекции напряжений для различных критериев разрушения.

3. В предложенной методике анализа безопасных условий подработки водозащитной толщи, основанной на оценке оседаний земной поверхности по прогнозным скоростям горизонтальной конвергенции очистных камер, рассчитываемым на основании разработанной упруго-вязкопластической модели деформирования и разрушения междукammerных целиков.

Практическая значимость диссертационного исследования

Практическое значение полученных результатов диссертационной работы заключается:

- в разработанной модели деформирования и разрушения междукammerных целиков соляных пород во времени, использующей минимальное число исходных параметров и основанной на реальных механических свойствах горных пород;

- в предложенной методике контроля устойчивости и оценки остаточного срока службы целиков;
- в построенной методике оценки текущих величин и прогнозирования оседаний земной поверхности на территориях рудников, где проведение традиционных маркшейдерских работ и измерение поперечных деформаций целиков невозможно.

Предложенные подходы к моделированию геомеханического состояния конструктивных породных образований имеют хорошие перспективы дальнейшего расширения возможностей при расчете устойчивости междокамерных целиков и могут служить основой для разработки новых инженерно-технических решений.

Соответствие диссертационной работы критериям, установленным ВАК РФ

Диссертация Цаюкова Андрея Андреевича представляет собой завершённую научную работу, соответствующую квалификационным требованиям. Цель исследования, заявленная автором, и заключающаяся в «построении математических моделей и разработке методов их численной реализации, адекватно отражающих процесс деформирования и разрушения соляных пород и междокамерных целиков», успешно реализована и раскрыта в тексте диссертации.

Полученные научные материалы изложены последовательно и логично, сопровождаются подробными иллюстрациями результатов. Выводы, сформулированные по каждой главе, обоснованы проведенными исследованиями и согласуются с содержанием соответствующих разделов. Итоговое заключение резюмирует ключевые положения диссертации. Текст написан четко, достаточно ясно и в целом профессионально грамотно.

Избранная тема и представленное содержание полностью соответствуют паспорту специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика». Оформление работы выполнено согласно действующему стандарту ГОСТ 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации».

Автореферат достаточно полно воспроизводит содержание основного текста диссертации.

Замечания и вопросы по работе

По диссертации имеются следующие замечания:

1. На мой взгляд не совсем корректное название диссертационной работы: «Разработка методов математического моделирования ...». В диссертации речь идет о «...построении математических моделей и разработке методов их численной реализации...». Разработка методов математического моделирования представляет собой более общую и более сложную задачу и не рассматривается в диссертации.

2.1. В тексте диссертации имеются неточности и некорректности стилистического изложения и использования научно-технических терминов. Например:

стр. 6. «особенности продольно-поперечного деформирования соляных пород» - но более корректно говорить не о собственно породах, а о породных образованиях – образцах, целиках.

стр. 6. «подобрать критерии», «подобрать ... вязкопластические законы» - в диссертационных научных исследованиях использование слова «подбирать» является не совсем приемлемым.

стр. 21. «Для задач механики конечные элементы представляют собой упругие элементы» - это утверждение слишком ограничивает класс и тип конечных элементов, которые имеются в настоящее время в различных программных продуктах.

стр. 31. «построены ... зависимости поперечных *перемещений* от продольных ...» - описка, так как речь идет о деформациях.

стр. 38. «Критерий прочности Треска ... *априори*, не подходит для горных пород ...» - весьма спорное утверждение.

стр. 50. «Ограничение *избытка* поперечных деформаций...».

стр. 60. «...главное уравнение равновесия записывается в *скоростной форме*...».

стр. 90. «... достаточно часто существующие *математические модели* ... не обеспечивают заданный срок службы ...» - модели позволяют выполнить расчеты и моделирование.

2.2. В диссертации весьма часто встречаются «сленговые выражения», которые в строгих научных публикациях лучше не употреблять. Например:

стр. 33. «... некоторые критерии разрушения/пластичности имеют *плоское* представление предельной поверхности...»; «...

представление таких предельных поверхностей выполняется с помощью *многогранной формы их записи* в пространстве главных напряжений...»; «... функции Φ и Ψ теряют свою непрерывную дифференцируемость в рамках общей поверхности текучести...»; стр. 39. «Многогранное представление имеет вид ...»; стр. 51.

«В многогранном представлении ...»;

стр. 49. «Поперечные деформации кубического образца *ровно* как для линейного критерия Кулона-Мора...»;

стр. 65. «Работая в пространстве главных напряжений ...»;

стр. 101. «Попробуем реализовать данную модель ...»;

стр. 105. «т.е. процесс ползучести *не запустится* ...»;

стр. 111. «*весьма интересная* математическая модель ...»;

стр. 165. «осуществляется согласно *реологическому походу*...».

3. Не совсем корректно и четко сформулированы выводы по главе 3.

Так, например, это относится к выводу первому: «Показано, что *все законы вязкопластичности* (Бингама, Дюво-Лионса, Пержины и Перича), совмещённые с критериями Кулона-Мора и объёмным параболическим, отражают нарастание продольной деформации соляных образцов в процессе ползучести (*так все без исключения, или только те, которые исследованы в диссертации?*), в то время как релаксационные процессы способны приемлемо описать только двухпараметрические законы (Пержины и Перича) (*как первая часть вывода связана со второй?*)».

в выводе втором: «...варьирование исключительно параметров вязкости (?) ... выглядит привлекательным (?) ...»

4. Главы два и три перегружены теоретическим материалом по моделям, описывающим НДС твердых деформируемых тел. На мой взгляд можно было дать ссылки на соответствующие литературные источники, а больше уделить внимания именно применению моделей к описанию исследуемых геомеханических процессов.

5. В диссертации не совсем корректно введено понятие *предела ползучести*. Автору следовало бы назвать этот параметр как-то иначе.

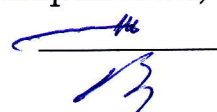
Подчеркну, что высказанные замечания не носят принципиальный характер и не влияют на общее положительное впечатление от диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Цаюкова Андрея Андреевича выполнена на актуальную тему, представляет собой законченную научно-квалифицированную работу, имеет научную и практическую значимость, и отвечает требованиям ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ согласно п.9 «Положение о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. №842 (ред. от 25.01.2024), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Цаюков Андрей Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой Теоретической
и прикладной механики Белорусского
государственного университета,

д.ф.-м.н., профессор  Журавков Михаил Анатольевич

Белорусский государственный университет

220030, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 4

Официальный сайт: <https://bsu.by>

Телефон: +375 29 6859733

E-mail: zhuravkov@bsu.by

Я, Журавков Михаил Анатольевич, автор отзыва, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись д.ф.-м.н., профессора Журавкова М.А. заверяю.

25 августа 2025 г.

М.П.

