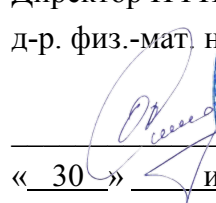


УТВЕРЖДАЮ:

Директор ПФИЦ УрО РАН
д-р. физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН


О.А. Пleshchikov
« 30 » июня 2025 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук

Диссертация «Разработка методов математического моделирования процессов деформирования соляных междокамерных целиков» выполнена в лаборатории механики горных пород «Горного института Уральского отделения Российской академии наук» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра («ГИ УрО РАН»).

Соискатель Цаюков Андрей Андреевич с 2012 года по настоящее время работает в «ГИ УрО РАН». В настоящее время он является инженером лаборатории механики горных пород. В 2014-2017 гг. соискатель обучался в очной аспирантуре «ГИ УрО РАН», на сегодняшний день являющегося филиалом ПФИЦ УрО РАН, по специальности 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Научный руководитель – руководитель научного направления "Горные науки" Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией механики горных пород «Горного института Уральского отделения Российской академии наук» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН»), академик РАН, д-р. техн. наук Барях Александр Абрамович.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

I. Оценка выполненной соискателем работы

Диссертационная работа посвящена разработке новых подходов к математическому моделированию деформационных процессов, протекающих в несущих элементах камерной системы отработки калийных и соляных месторождений, междуканальных целиках.

Соискателем справедливо отмечается, что применительно к камерной системе разработки существующие методы расчёта устойчивых целиков не позволяют точно спрогнозировать срок их службы и не учитывают характер их деформирования. Вместе с тем современные инженерные системы анализа напряжённо-деформированного состояния твёрдых тел в основном используют стандартные геомеханические модели, которые не отражают в полной мере особенности деформирования и разрушения соляных пород, вмещающих горные выработки. В связи с чем разработка новых методов математического моделирования деформационных процессов в междуканальных целиках представляет особую актуальность для теории и практики освоения георесурсов и обеспечения безопасности ведения горных работ.

Основная идея диссертационной работы заключается в поэтапном построении математических моделей деформирования и разрушения соляных образцов и междуканальных целиков, основанных на лабораторных экспериментах и натурных наблюдениях, которые учитывают особенности продольно-поперечного деформирования соляных пород и влияние фактора времени.

В своей диссертационной работе соискатель представил математические модели деформирования и разрушения крупномасштабных соляных образцов, которые наиболее точно описывают лабораторные эксперименты на одноосное сжатие с контролем продольных и поперечных деформаций. Также представил способы их численной реализации. Обобщил полученные модели путём включения учёта фактора времени и отметил вязкопластические законы, которые адекватно описывают процессы релаксации и ползучести, полученные в лабораторных условиях. На основе представленных моделей разработал метод математического моделирования процессов деформирования и разрушения двухпластового канального блока в режиме ползучести, адекватно описывающий результаты натурных наблюдений. Предложил схему прогнозирования состояния междуканальных целиков и остаточного срока их службы с помощью построенной модели деформирования канального блока во времени. Продемонстрировал возможность использования данной модели для расчёта скоростей оседаний земной поверхности и последующего геомеханического анализа состояния водозащитной толщи.

II. Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации

При непосредственном участии соискателя проведены: постановка задач, анализ и обработка результатов лабораторных и натурных исследований, разработка и численная реализация математических моделей, разработка программного кода, многовариантные численные эксперименты, обработка и анализ полученных результатов, разработка методики практической реализации, формулировка основных выводов и научных положений.

III. Степень достоверности полученных результатов

Достоверность результатов работы соискателя обеспечивается представительным объёмом лабораторных и натурных исследований, корректным применением методов механики деформируемого твёрдого тела и численных методов, сходимостью численных решений, приемлемым качественным и количественным соответствием полученных результатов экспериментальным данным и специфике деформирования соляных пород.

IV. Новизна и практическая значимость исследования

По результатам диссертационного исследования построена упруго-вязкопластическая модель деформирования и разрушения междукамерных целиков, базирующаяся на лабораторных экспериментах и натурных наблюдениях, а также учитывающая характер деформирования соляных пород. Предложены способы её численной реализации.

На основе полученной модели разработана схема прогнозирования состояния междукамерных целиков и остаточного срока их службы.

Предложенная методика оценки и прогноза оседаний земной поверхности на основе математического моделирования горизонтальной конвергенции очистных камер при помощи построенной упруго-вязкопластической модели деформирования и разрушения междукамерных целиков может использоваться на участках калийных рудников, где невозможны маркшейдерские наблюдения и инструментальные измерения горизонтальной конвергенции ввиду ограниченного доступа в выработки.

V. Ценность научных работ соискателя

В диссертационной работе построена трёхмерная математическая модель упруго-вязкопластического деформирования и разрушения соляных образцов во времени, учитывающая особенности их продольно-поперечного деформирования. Разработан метод моделирования процессов ползучести в соляных породах, вмещающих горные выработки,

основанный на введении в вязкопластическую модель дополнительного внутреннего параметра, предела ползучести, и на модификации метода проекции напряжений. Предложен закон вязкопластичности подобный модели Перича. Построен алгоритм численной реализации модифицированного метода проекций напряжений, основанный на неявной схеме Эйлера интегрирования методом обратного отображения. Разработан алгоритм реализации модифицированного метода проекции напряжений для критерия пластичности Кулона-Мора, учитывающий особенности вычисления предела ползучести и эквивалентного напряжения ползучести. Предложена методика анализа безопасных условий подработки водозащитной толщи, основанная на оценке оседаний земной поверхности по прогнозным скоростям горизонтальной конвергенции очистных камер, описываемым разработанной упруго-вязкопластической моделью деформирования и разрушения междуканальных целиков с применением модифицированного метода проекции напряжений.

Основные положения диссертационной работы использованы при анализе напряженно-деформированного состояния междуканальных целиков, оценке развития процесса сдвижения во времени и прогнозе безопасных условий подработки водозащитной толщи на участках шахтных полей рудников ПАО «Уралкалий».

VI. Специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»:

- п. 1. «Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород и грунтов в естественных условиях и его изменение во времени, в том числе в связи с проведением горных выработок, строительством сооружений, газовых и нефтяных скважин, эксплуатацией месторождений.»
- п. 5 «Теоретические основы, математические модели и способы управления состоянием и поведением массивов горных пород и грунтов с целью обеспечения устойчивости горных выработок, подземных и наземных сооружений, предотвращения проявлений опасных горно-геологических явлений.»
- п. 6 «Теоретические основы прогнозирования геомеханических процессов в массивах горных пород и грунтов, в том числе антропогенных, служащих средой и материалом различных горнотехнических конструкций.»

VII. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, 8 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, в том числе 6 в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Наиболее значимые из работ, опубликованных по представленной теме:

1. Baryakh A. Elastic-viscoplastic deformation models of salt rocks / A. Baryakh, **A. Tsayukov** // *Frattura ed Integrita Strutturale*. – 2024. – Vol. 18, No. 70. – P. 191-209. – DOI 10.3221/igf-esis.70.11
2. Baryakh A. Justification of fracture criteria for salt rocks / A. Baryakh, **A. Tsayukov** // *Frattura ed Integrita Strutturale*. – 2022. – Vol. 16, No. 62. – P. 585-601. – DOI 10.3221/IGF-ESIS.62.40
3. Барях А.А. Математическое моделирование процесса деформирования и разрушения образцов соляных пород / А.А. Барях, **А.А. Цаюков**, А.В. Евсеев, И.С. Ломакин // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2021. – № 3. – С. 13-23. – DOI 10.15372/FTPRPI20210302
4. Baryakh A.A. Operational control of rib pillar stability / A.A. Baryakh, A.V. Evseev, I.S. Lomakin, **A.A. Tsayukov** // *Eurasian Mining*. – 2020. – No. 2. – P. 7-10. – DOI 10.17580/em.2020.02.02
5. Baryakh A. Mathematical modelling of fracture process of pillars / A. Baryakh, **A. Tsayukov**, A. Evseev, I. Lomakin // *ISRM International Symposium - EUROCK 2020, Trondheim, Virtual, June 2020*.
6. Baryakh A. Mathematical modelling of limit states for load bearing elements in room-and-pillar mining of saliferous rocks / A. Baryakh, S. Lobanov, I. Lomakin, **A. Tsayukov** // *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*, Saint Petersburg, May 2018. Vol. 1-2. – Saint Petersburg: Taylor & Francis Group, London, UK, 2018. – P. 767-774.
7. Evseev A. Experimental and theoretical studies of undermined strata deformation during room and pillar mining / A. Evseev, V. Asanov, I. Lomakin, **A. Tsayukov** // *EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*, Saint Petersburg, Russia, May 2018. Vol. 2-2. – Saint Petersburg: Taylor & Francis Group, London, UK, 2018. — P. 985-990.
8. Барях А.А. Сейсмо-геомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках / А.А. Барях, И.А. Санфиров, А.К. Федосеев, А.И. Бабкин,

VIII. Апробация диссертационной работы

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на международных Европейских симпозиумах по геомеханике «EUROCK 2018» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.) и «EUROCK 2020» (г. Тронхейм, Норвегия, 2020 г.), научных сессиях ГИ УрО РАН «Стратегия и процесса освоения георесурсов» (г. Пермь, 2017, 2018, 2023, 2024 гг.), XXIII Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2023 г.), отчётной конференции по итогам 1 этапа выполнения проекта «Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях» (г. Пермь, 2024 г.), II Всероссийской конференции «Разрушение горных пород и минералов» (г. Екатеринбург, 2025 г.).

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

Диссертационная работа Цаюкова Андрея Андреевича «Разработка методов математического моделирования процессов деформирования соляных междокамерных целиков» рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Заключение принято на заседании Объединённого учёного совета Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук. Присутствовало 36 из 52 человек. Результаты голосования «за» – 36 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет, протокол заседания Объединённого ученого совета ПФИЦ УрО РАН № 6/25 от 27.06.2025 г.

Председатель Объединенного ученого совета,
академик РАН



В.П. Матвееenko

Ученый секретарь Объединенного ученого совета,
к.ф.-м.н.



А.Г. Вотинова