

О Т З Ы В

официального оппонента, кандидата технических наук Куранова Антона Дмитриевича на диссертацию Селихова Александра Александровича на тему: «Геомеханическое обоснование модели деформирования закладочного массива из отходов соляной промышленности», представленную 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

Разработка месторождений водорастворимых руд (в частности, калийных солей) традиционно сопряжена с высокими рисками катастрофического разрушения водозащитной толщи и затопления рудников. Для минимизации конвергенции выработок и обеспечения стабильности междукammerных целиков на больших глубинах безальтернативным решением становится закладка выработанного пространства. При этом наиболее экономически и экологически целесообразным материалом являются отходы обогащения – раздробленные соляные породы.

Несмотря на развитие численных методов, в инженерной практике до сих пор преобладают упрощенные подходы к оценке взаимодействия закладки и массива, использующие эмпирические коэффициенты или простейшие геомеханические модели, которые не учитывают особенностей поведения закладочных материалов, склонных к проявлению нелинейных упругопластических свойств. Это зачастую ведет к грубым ошибкам при прогнозировании несущей способности системы «целик-закладка».

В этой связи диссертационная работа Селихова А.А., направленная на адаптацию, параметризацию и верификацию современных упругопластических моделей шатрового класса для достоверного описания поведения закладочных массивов, является актуальной научно-практической задачей, имеющей важное значение для горнодобывающей отрасли.

2. Научная новизна диссертации

Автором получен ряд новых научных результатов, существенно расширяющих представления о механике деформирования сыпучих и слабощементированных соляных сред:

1. Экспериментально установлено и математически описано нелинейное снижение угла внутреннего трения раздробленных соляных пород (по логарифмическому закону) при возрастании уровня средних напряжений.

2. Доказано, что деформирование раздробленной соли в сдвиговой области подчиняется неассоциированному закону пластического течения, тогда как в области нормального уплотнения (шатровая поверхность) реализуется ассоциированный закон.

3. Раскрыт и параметризован механизм изменения поверхности пластического течения при добавлении в соляные отходы цементного вяжущего: показано формирование единой поверхности пластического течения, описывающей переход от хрупкого разрушения к пластическому течению.

4. Сформулирован новый закон пластического упрочнения для исследуемых материалов, связывающий эволюцию предела текучести при объемном сжатии с накопленными пластическими деформациями.

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-79 от 29.04.26
АУ УС

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

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением фундаментальных законов механики деформируемого твердого тела и метода конечных элементов; представительным объемом численных экспериментов по оценке НДС системы «междукамерный целик – закладочный массив»; корректным использованием методов математической статистики при обработке данных; а также успешной верификацией адаптированных геомеханических результатами комплексных лабораторных испытаний, натурными наблюдениями за конвергенцией горных выработок и сопоставлением с исследованиями ведущих отечественных и зарубежных ученых в области механики соляных пород.

4. Научные результаты, их ценность

К наиболее ценным научным результатам работы относятся:

1. Сформированная база деформационных, прочностных и эволюционных параметров моделей Cap Model и Soft-Rock Plasticity для закладочных смесей на основе галитовых отходов (как в сыпучем состоянии, так и с добавлением цемента).

2. Разработанная трехмерная численная модель взаимодействия междукамерного целика и закладочного массива, позволившая отказаться от эмпирических поправочных коэффициентов в пользу прямого физического моделирования процессов отпора.

3. Построенные инженерные номограммы для определения коэффициента степени нагружения междукамерного целика ($K_{сн}$), явно демонстрирующие, что значимый эффект разгрузки наступает лишь при заполнении выработки свыше 80%.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях - 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 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus; получено 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии теории предельного состояния и пластичности геоматериалов применительно к раздробленным соляным породам. Обоснование неассоциированного закона течения для сдвиговой зоны и ассоциированного для шатровой зоны вносит существенный вклад в физику сыпучих сред.

Практическая значимость работы выражается в создании готового инструментария для проектировщиков. Предложенная методика и номограммы позволяют инженерным службам рудников количественно оценивать эффективность различных типов закладочных материалов, обосновывать технологически целесообразный уровень закладки камер и гарантировать долгосрочную устойчивость междукамерных целиков.

Результаты диссертационного исследования приняты к использованию в ООО «СПБ-Гипрошахт», что подтверждается актом об использовании результатов кандидатской диссертации от 18 апреля 2025 г.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты исследований, методики калибровки моделей и полученные массивы данных рекомендуется использовать при разработке проектной документации на системах с закладкой на калийных рудниках. Полученные результаты также представляют значимость для научно-исследовательских центров и институтов для обоснования решений, связанных с прогнозом напряженно-деформированного состояния закладочных массивов при совместном взаимодействии с междукамерными целиками.

7. Замечания и вопросы по работе

– Векторный анализ приращений пластических деформаций (рис. 37-38) позволил автору сделать важный вывод о неассоциированном характере закона течения для сдвиговой части и ассоциированном – для шатровой. Каким образом данная сложная комбинированная схема течения была технически реализована (или аппроксимирована) при задании входных параметров в ПК Abaqus для выбранных моделей?

– На стр. 55 в Таблице 7 указано, что значения угла дилатансии ψ для галитовых отходов при низких давлениях достигают $60,34^\circ$. Данные значения представляются физически завышенными, так как для сыпучих геоматериалов угол дилатансии обычно не превышает $20-30^\circ$ и, как правило, не может быть больше угла внутреннего трения. Дополнительно, на стр. 84 указано значение угла $\beta=66,1^\circ$, однако в итоговой Таблице 19 (стр. 93) приводится диапазон $65-74,78^\circ$. Требуется пояснение данных расхождений.

– В диссертации и автореферате получены эмпирические математические зависимости (например, полином второй степени для закона упрочнения – формула 71, или логарифмическая зависимость угла трения от напряжений – формула 72). Поскольку данные уравнения получены для частного случая конкретных закладочных материалов, в работе необходимо привести области допустимых значений.

– На стр. 126 в Таблице 28 представлены деформационные параметры соляных пород для междукамерных целиков с различным содержанием нерастворимого остатка. При этом модуль упругости E для всех вариантов принят равным 20 ГПа. Указанное значение больше соответствует свойствам монолитного образца каменной соли в лабораторных условиях, в то время как для массива горных пород (с учетом структурного ослабления и масштабного эффекта) модуль деформации должен быть существенно ниже.

– Результаты 4 главы базируются на трехмерном численном моделировании системы «целик-закладка», однако ни в автореферате, ни в диссертации не представлено детального описания параметров построенной макромодел. В то время как для лабораторного образца (стр. 92) выполнен подробный анализ сеточной сходимости, для полномасштабной модели указано лишь использование элементов C3D10 и толщина сетки в 4–6 элементов. Отсутствует оценка качества конечных элементов в зонах концентрации напряжений и обоснование общего размера модели.

Заключение по диссертации

Диссертация «Геомеханическое обоснование модели деформирования закладочного массива из отходов соляной промышленности», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика полностью отвечает 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 Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор Селихов Александр Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Официальный оппонент

Директор по проектированию технологических дисциплин

ООО «Институт Гипроникель»

кандидат технических наук



Куранов Антон Дмитриевич

15.04.2026г

Сведения об официальном оппоненте:

ООО «Институт Гипроникель»

Почтовый адрес: 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский проспект, д.11

Официальный сайт в сети Интернет: <https://gipronickel.ru/>

эл. почта: gn@nornik.ru телефон: +7 (812) 335-31-24