

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

НИТУ МИСИС



д.т.н., проф.

М.Р. Филонов

24 апреля 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Селихова Александра Александровича на тему «Геомеханическое обоснование модели деформирования закладочного массива из отходов соляной промышленности», представленной 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

В современных условиях освоения глубоких горизонтов месторождений водорастворимых руд всё большую значимость приобретают вопросы обеспечения геомеханической устойчивости подземных выработок и сохранения сплошности водозащитной толщи. Особенно остро эта проблема стоит при камерной системе разработки, где ключевым элементом поддержания массива являются междукammerные целики, склонные к ползучести и локальному разрушению. Одним из наиболее эффективных способов управления горным давлением и предотвращения аварий является закладка выработанных пространств отходами соляной промышленности. При их проектировании и эксплуатации важно учитывать не только прочностные характеристики самого целика, но и сложный нелинейный характер работы сыпучего закладочного материала. В то же время традиционные подходы, основанные на эмпирических коэффициентах или простейших моделях сплошной среды (упругих или идеально-пластических), зачастую оказываются недостаточными для описания процессов объемного уплотнения, дилатансии и деформационного упрочнения раздробленных соляных пород.

Актуальность диссертационной работы Селихова Александра Александровича определяется необходимостью повышения точности геомеханических расчётов и разработки более реалистичных моделей, отражающих физико-механическое поведение закладочных материалов под нагрузкой. В работе предложена и верифицирована модель деформирования закладочного массива на основе упругопластической теории шатрового типа (с учётом перехода от фрикционного к когезионно-фрикционному поведению), позволяющая выявить и

ОТЗЫВ

количественно оценить поддерживающий эффект закладки в зависимости от степени заполнения выработок.

Разработка и применение подобного подхода представляет значительный интерес как с научной точки зрения – в аспекте развития моделей механики сыпучих и слабосцементированных геоматериалов, так и с инженерной – при проектировании систем разработки, оптимизации параметров закладочных работ и обеспечении безопасности подземных сооружений с одновременной экологичной утилизацией промышленных отходов.

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна диссертационной работы Селихова Александра Александровича заключается в разработке и численной реализации подхода к моделированию геомеханических процессов в системе «целик-закладка», основанного на использовании упругопластических моделей шатрового класса. Закладочный массив из отходов соляной промышленности рассматривается не как линейно-упругая или идеально-пластическая среда, а как уплотняющийся геоматериал, что позволяет физически корректно воспроизводить процессы необратимого объемного сжатия, деформационного упрочнения и дилатансии с учётом изменения напряженного состояния. Методика включает комплексное определение параметров поверхностей пластического течения и потенциала, задание эволюционных законов упрочнения, а также математическое описание перехода от фрикционного к когезионно-фрикционному поведению при добавлении цементационного вяжущего.

Автором выявлены количественные зависимости изменения прочностных и деформационных свойств раздробленной соли от уровня всестороннего обжатия, а также обоснован неассоциированный характер закона пластического течения при сдвиге. В работе получены новые результаты по сравнению с традиционными подходами: экспериментально доказано, что угол внутреннего трения раздробленных соляных пород не является константой, а нелинейно по логарифмическому закону снижается с ростом средних напряжений. Получен новый закон пластического упрочнения и показано, что введение цементационных связей изменяет форму поверхности пластического течения, образуя единую асимметричную каплеобразную поверхность, объединяющую области сдвигового, переходного и шатрового деформирования.

Таким образом, в диссертации представлены научно обоснованные, оригинальные и практически значимые результаты, расширяющие современные представления о механике деформирования и разрушения сыпучих и слабосцементированных закладочных материалов.

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

Научные положения, сформулированные в диссертации Селихова Александра Александровича, имеют высокую степень обоснованности и достоверности, что подтверждается логикой изложения, полнотой экспериментально-численного обоснования и

репрезентативностью полученных результатов. Все этапы исследования – от проведения комплексных лабораторных испытаний до решения прикладных инженерных задач – опираются на современные методы механики деформируемого твердого тела, численного моделирования и математической статистики. Выводы подкреплены результатами обширных лабораторных и параметрических численных расчётов, в которых варьируются уровни всестороннего обжатия, физико-механические свойства закладочных материалов и степень заполнения выработанного пространства. Применение комплексного подхода и сопоставление моделей шатрового класса с классическими геомеханическими моделями (линейно-упругой и на основе критерия Кулона-Мора) обеспечивают объективность и достоверность обоснований.

Достоверность результатов дополнительно подтверждается высокой сходимостью расчетных данных с результатами лабораторных экспериментов и натурными наблюдениями за конвергенцией выработок. Автором выполнен последовательный анализ изменения механизмов разрушения при добавлении цементационных связей, влияния нелинейного уплотнения, а также сравнение поведения междукамерных целиков при различных эксплуатационных условиях и типах закладки.

Рекомендации, сформулированные в работе, логично вытекают из анализа полученных результатов и ориентированы на инженерное применение – в расчётах долгосрочной устойчивости междукамерных целиков, обосновании рациональных параметров закладочных работ и определении требуемой степени заполнения очистных камер с помощью разработанных номограмм. Все рекомендации являются практико-ориентированными и могут быть использованы как при проектировании систем разработки месторождений водорастворимых руд, так и при оптимизации рецептуры применяемых закладочных смесей.

4. Научные результаты, их ценность

В диссертационной работе получены новые научные результаты, представляющие ценность как для развития теории геомеханики, так и для прикладных инженерных расчётов. Автором предложен и реализован подход к моделированию поведения закладочных массивов из отходов соляной промышленности, основанный на использовании упругопластических моделей шатрового типа, что позволило воспроизвести ключевые механизмы деформирования: необратимое объемное уплотнение, дилатансию, деформационное упрочнение и переход от фрикционного к когезионно-фрикционному поведению при добавлении цемента.

Результаты диссертационной работы 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 международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Ценность научных результатов заключается в возможности их использования при создании цифровых геомеханических моделей, разработке нормативных подходов к расчёту параметров систем разработки с закладкой и при оценке безопасности эксплуатации подземных объектов на месторождениях водорастворимых руд.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии научных представлений о геомеханике сыпучих и слабощементированных соляных сред и формировании численного подхода, учитывающего реальные механизмы уплотнения и сдвигового разрушения закладочных материалов. В работе обосновано влияние физико-механических свойств и цементационных связей на напряжённо-деформированное состояние массива, показана необходимость перехода от классических упругопластических моделей к моделям с деформационным упрочнением и неассоциированным законом пластического течения.

Практическая значимость состоит в возможности применения разработанной методики при проектировании и эксплуатации подземных сооружений на калийных рудниках. Полученные результаты позволяют с высокой точностью прогнозировать напряженно-деформированное состояние междукамерных целиков при совместном взаимодействии с закладочным массивом, обосновывать параметры закладочных работ (в частности, требуемую степень заполнения очистных камер) и выявлять рациональные составы закладочных смесей. Методика может использоваться при разработке инженерных решений, оценке техногенного риска и создании цифровых геомеханических моделей, применяемых в производственной и экспертной деятельности.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Материалы и результаты, представленные в диссертационной работе, могут быть использованы при решении широкого круга практических и научных задач в области горной геомеханики. В частности, разработанный подход может быть применён при расчётах напряжённо-деформированного состояния и прогнозировании долгосрочной устойчивости междукамерных целиков при совместном взаимодействии с закладочными массивами на месторождениях водорастворимых руд.

Методика определения параметров упругопластических моделей с упрочнением и реализации численного анализа может использоваться в проектных организациях при обосновании параметров систем разработки с закладкой выработанного пространства, выборе типа закладочного материала и определении требуемой степени заполнения камер. Результаты расчётов позволяют более точно учитывать влияние нелинейного уплотнения и физико-механических свойств закладочного массива на его поддерживающий эффект, что особенно актуально при ведении горных работ на больших глубинах.

Кроме того, полученные данные, разработанные инженерные номограммы и выявленные зависимости могут быть интегрированы в действующие геомеханические программные продукты, использованы при подготовке экспертных заключений, а также при обучении и переподготовке специалистов в области инженерной геомеханики и проектирования горных предприятий.

Основные результаты диссертации рекомендуются к внедрению в таких отечественных организациях, как ООО «ПРОТЕХ ИНЖИНИРИНГ», АО «ВНИИ Галургия», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» «Научный центр геомеханики и проблем горного производства» и других.

7. Замечания и вопросы по работе

1. В ряде разделов (например, при обсуждении влияния гранулометрического состава и влажности) указывается на их существенное влияние на механический отклик закладочного материала, однако их количественная трактовка в рамках предложенных математических моделей не представлена. Уточнение этого аспекта могло бы усилить обоснованность интерпретации результатов.

2. Несмотря на заявленную комплексную геомеханическую модель системы взаимодействия закладочного массива и целика, ориентированную на учет нелинейных свойств и ползучести, расчёты напряженно-деформированного состояния целика выполнены с использованием высокого статического модуля упругости 20 ГПа. Указание на ограничения применения такого модуля для массива и возможные искажения деформаций на начальном этапе нагружения следовало бы раскрыть более подробно.

3. При описании результатов лабораторных испытаний и калибровки моделей автором установлена логарифмическая зависимость угла внутреннего трения от уровня средних напряжений. Однако в тексте диссертации недостаточно подробно раскрыто, каким именно образом данный переменный параметр был технически реализован при трехмерном макромасштабном моделировании в программном комплексе Abaqus. Ясное описание алгоритма внедрения нелинейной зависимости существенно повысило бы воспроизводимость результатов численного анализа.

4. Формулировки ряда промежуточных выводов, например, по результатам анализа существующих геомеханических моделей в главе 1, носят описательный характер. Введение более строгих количественных обобщений, в форме уравнений или графиков корреляции для каждой из существующих моделей, усилило бы научную строгость изложения.

5. Недостаточно представлены рекомендации по практическому внедрению полученных результатов в проектную деятельность – например, в контексте прямой адаптации к действующим указаниям по защите рудников от затопления.

8. 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.

Отзыв на диссертацию и автореферат диссертации Селихова Александра Александровича обсужден и утвержден на заседании кафедры «Физических процессов горного производства и геоконтроля» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», протокол № 9 от «13» апреля 2026 года.

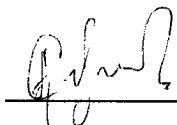
Председатель заседания

Заведующий кафедрой «Физических процессов и геоконтроля» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
д.ф.-м.н., доцент


Винников Владимир Александрович

Секретарь заседания

Доцент кафедры «Физических процессов и геоконтроля» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
к.т.н.,



Пугач Александр Сергеевич

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Почтовый адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д.4, стр. 1

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

эл. почта: kancela@misis.ru, телефон: +7 495 955-00-32