

О Т З Ы В

официального оппонента, доктора технических наук Ашихмина Сергея Геннадьевича 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

В условиях интенсивного освоения глубоких горизонтов месторождений водорастворимых руд проблема обеспечения устойчивости выработок и сохранности водозащитной толщи имеет первостепенное значение. Применение систем разработки с закладкой выработанного пространства является одним из наиболее надежных способов управления горным давлением. В качестве закладочного материала широко применяются отходы соляного производства, что дополнительно решает проблему их экологически безопасной утилизации.

Несмотря на широкое применение, в современной практике проектирования горных работ (в том числе в нормативных документах) учет влияния закладочного массива на несущую способность междукамерных целиков носит преимущественно эмпирический характер. Применение современных численных методов может повысить качество проектных решений. Однако классические геомеханические модели (линейно-упругая, Кулона-Мора и др.) не вполне адекватно описывают реальное физическое поведение сыпучего или слабосцементированного закладочного материала из солеотходов, для которого характерны нелинейное объемное уплотнение, дилатансия и зависимость прочностных свойств от уровня всестороннего обжатия.

В связи с этим, диссертационная работа А.А. Селихова, посвященная экспериментальному исследованию и обоснованию применения современных упругопластических моделей шатрового класса для достоверного прогноза напряженно-деформированного состояния (НДС) закладочного массива при совместном взаимодействии с междукамерными целиками, является весьма актуальной и своевременной для горной науки и практики.

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна диссертационной работы Селихова Александра Александровича заключается в разработке и параметрическом обеспечении комплексного подхода к нелинейному моделированию закладочных массивов из соляных отходов. В работе экспериментально подтвержден неассоциированный характер закона пластического течения для раздробленных соляных пород в сдвиговой части поверхности текучести при сохранении ассоциированного закона в области нормального уплотнения (шатровой части), установлена логарифмическая зависимость угла внутреннего трения раздробленных соляных пород от уровня средних напряжений, устраняющая погрешности моделей с неизменными параметрами прочности. Также автор изучил механизм изменения формы единой поверхности пластического течения при формировании цементационных связей (при добавлении цемента), описывающий переход от хрупкого разрушения при малых величинах обжатия к пластическому течению при высоких и предложил новый закон пластического упрочнения, математически описывающий эволюцию предела текучести при объемном сжатии и позволяющий учитывать нелинейный характер уплотнения и набора прочности материала.

Таким образом, совокупность выполненных исследований позволила автору разработать экспериментально и теоретически обоснованный подход к прогнозу

ОТЗЫВ

ВХ. № 9 80 от 29.04.26
АУ УС

напряженно-деформированного состояния закладочного массива при совместном взаимодействии с междукамерными целиками. Полученные закономерности расширяют представление о механическом отклике закладочных материалов при различных траекториях нагружения и могут служить основой для разработки новых инженерных решений при проектировании подземных сооружений.

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

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации Селихова Александра Александровича, в достаточной степени обоснованы и подтверждаются результатами методически взаимоувязанных лабораторных и численно-аналитических исследований. На всех этапах работы применялись современные вычислительные средства и апробированные программные комплексы.

Лабораторные исследования также проводились на современном оборудовании с реализацией сложных траекторий нагружения. Достоверность полученных результатов подтверждается хорошей сходимостью данных физического эксперимента и результатов численного моделирования в программном комплексе, реализующем прогноз НДС закладочного материала методом конечных элементов. Математические выкладки и физические допущения корректны и не противоречат фундаментальным законам механики деформируемого твердого тела.

Таким образом, все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются обоснованными, достоверными и подтверждаются совокупностью проведенных теоретических построений, численных расчетов и корректной интерпретацией результатов.

4. Научные результаты, их ценность

В диссертационной работе получены значимые научные результаты, касающиеся совершенствования методов численного моделирования геомеханических процессов в закладочных массивах, сформированных из селеотходов. Автором разработана и верифицирована методика калибровки параметров сложных упругопластических моделей на основе стандартных и усложненных лабораторных экспериментов. Впервые для закладочного материала на основе галитовых отходов получены полные наборы деформационных и прочностных констант, а также эволюционные параметры законов упрочнения.

Разработаны практические номограммы для определения «коэффициента степени нагружения междукамерного целика», позволяющие количественно оценивать снижение интенсивности напряжений сдвига в зависимости от степени заполнения камеры выработки и типа применяемой закладки (сухой или твердеющей).

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 работы заключается в развитии геомеханических представлений о процессах деформирования сыпучих и слабосцементированных соляных закладочных массивов, а также в обосновании необходимости применения единой

каплеобразной поверхности пластического течения для разных режимов деформирования сцементированных отходов.

Практическая значимость состоит в том, что разработанная методика может быть напрямую интегрирована в процесс проектирования систем разработки калийных месторождений. Установлено, что применение закладки со степенью заполнения камеры менее 60% не оказывает значимого поддерживающего эффекта, в то время как заполнение на уровне 85–90% кардинально повышает долгосрочную устойчивость целиков. Предложенные подходы позволяют оптимизировать составы закладочных смесей и параметры закладочных работ. Результаты исследований могут быть внедрены в инженерные расчёты, а также использоваться при создании цифровых геомеханических моделей закладываемых выработок калийных рудников.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы, в частности, откалиброванные модели поведения материалов и разработанные инженерные номограммы, могут быть рекомендованы к широкому использованию в профильных проектных и научно-исследовательских институтах и горнодобывающих компаниях при проектировании горных работ, оценке долгосрочной устойчивости целиков и обосновании параметров закладочных комплексов.

7. Замечания и вопросы по работе

1. При калибровке моделей лабораторные испытания проводились при уровнях бокового обжатия до 20 МПа. Однако, на рассматриваемых автором глубинах (порядка 400 м), литостатическое давление составляет около 9–10 МПа. Хотя в целике возникают высокие концентрации напряжений, сам закладочный массив (даже уплотненный) редко испытывает всестороннее обжатие в 20 МПа. Настройка закона упрочнения на столь высокие диапазоны могла привести к снижению точности аппроксимации в зоне низких давлений (0–5 МПа), которая является критически важной для начального этапа включения закладки в работу.

2. При моделировании долгосрочной устойчивости целиков в 4 главе для соляных пород вмещающего массива обоснованно применяется реологическая модель, тогда как для закладки используется упругопластическая. За счет какого механизма расчетная схема позволяет учитывать фактор времени при длительном уплотнении закладочного массива, если сама модель закладки не содержит явных вязкоупругих компонентов?

3. Предложенные автором практические номограммы для определения «коэффициента степени нагружения междукамерного целика» получены для конкретных геометрических параметров. Позволяет ли разработанный алгоритм, представленный в виде блок-схемы, напрямую использовать эти номограммы для участков месторождения с иными пролетами выработок, или при изменении геометрии проектировщику потребуется полное перестроение графиков?

4. При проектировании систем разработки на Верхнекамском месторождении калийных солей важнейшим моментом является оценка допустимых прогибов водозащитной толщи. При этом используется в том числе коэффициент усадки закладки. В этой связи было бы целесообразно оценить влияние исследованных автором компрессионных свойств закладочных материалов на этот параметр. Это могло бы повысить практическую значимость работы.

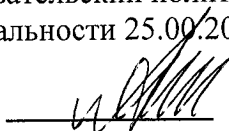
Приведенные выше замечания и вопросы не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку работы.

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

Профессор кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Доктор технических наук по специальности 25.00.20



Ашихмин Сергей Геннадьевич

Сведения об официальном оппоненте:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Почтовый адрес: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д.29

Официальный сайт в сети Интернет: pstu.ru

эл. почта: geotech@pstu.ru телефон: +7 (342) 219-84-24

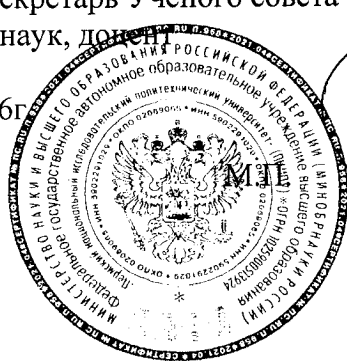
Подпись Ашихмина С.Г. заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ПНИПУ

Канд.ист.наук, докт.ст.

20.04.2026г.

(дата)



Макаревич Владимир Иванович