

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Цаюкова Андрея Андреевича

«Разработка методов математического моделирования процессов деформирования соляных междокамерных целиков»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности

2.8.6 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Диссертационная работа Цаюкова А.А. посвящена вопросам разработки комплекса теоретических методов, направленных на повышение достоверности прогноза напряженно-деформированного состояния соляных междокамерных целиков. Это включает научное обоснование соответствующих элементов модели деформирования породы, включая выбор функции пластического течения и пластического потенциала, закона пластического упрочнения, а также разработки эффективных алгоритмов численной реализации уравнений пластического и вязкопластического течения.

Разработка месторождений калийных солей достаточно активно ведется как на территории Российской Федерации, так и во все мире, при этом геомеханические условия разработки таких месторождений по мере истощения запасов ухудшаются, а степень нагружения элементов системы отработки повышается, что накладывает дополнительные требования к применению научно-обоснованных методов прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива в зоне ведения горных работ. Особое внимание при этом уделяется сохранению несущей способности породных целиков как основного элемента предотвращения интенсивного развития водопроводящих трещин в породах водозащитной толщи. Таким образом, научное исследование, направленное на совершенствование прогноза напряженно-деформированного состояния породных целиков за счет разработки новых упругопластических и вязкопластических моделей деформирования соляных пород, безусловно, является актуальной.

В работе сформулированы 6 задач исследования, на которых сосредоточено внимание в диссертации. В частности, уделено внимание следующим вопросам: проведение комплекса лабораторных исследований на крупномасштабных соляных образцах для установления характера деформирования междокамерных целиков в условиях приближенных к натурным; разработке изотропной упругопластической модели среды и оценке влияния ее элементов (условие пластичности, функция пластического потенциала и др.) на возможность получения удовлетворительной сходимости численных расчетов с данными лабораторных исследований; анализу результатов физического моделирования соляных образцов малых размеров в режиме заданных нагрузок или деформаций для установления кривых ползучести и релаксации напряжений; адаптации моделей ползучести для расширения разработанной упругопластической модели среды до вязкопластической модели деформирования породы; разработке алгоритма численной реализации предложенных моделей деформирования среды, и сопоставление полученных результатов моделирования с данными инструментальных замеров деформирования целиков в шахтных условиях;

демонстрации возможностей использования построенной математической модели деформирования междукламерных целиков для оценки и прогноза их состояния, оценки оседаний земной поверхности, а также параметрического обеспечения анализа безопасных условий подработки водозащитной толщи.

На основании выполненных исследований автором сформулированы 3 научных положения. В первом научном положении постулируется, что построенная трёхмерная упругопластическая модель деформирования и разрушения соляных пород, основанная на неассоциированном критерии Кулона-Мора и ассоциированном объёмном критерии прочности, позволяет адекватно описывать результаты лабораторных испытаний крупномасштабных образцов в условиях одноосного сжатия. Во втором положении утверждается, что разработанная трёхмерная упруго-вязкопластическая модель деформирования соляных пород, базирующаяся на принятых критериях пластичности (критерий Кулона-Мора и объёмный критерий), совмещённых с вязкопластическим законом Перича, которая характеризуется относительно простым, стабильным параметрическим обеспечением и позволяет приемлемо описывать стадию установившейся ползучести и релаксацию напряжений. В третьем положении указано, что предложенный модифицированный метод проекции напряжений, реализованный для объёмного критерия пластичности и критерия Кулона-Мора в связке с вязкопластической моделью подобной закону Перича, позволяет адекватно отразить нарастание во времени деформаций междукламерных целиков, развитие зон разрушения вмещающих пород и может быть включён в методическую схему оценки и прогноза безопасных условий подработки водозащитной толщи.

В качестве научной новизны диссертационного исследования можно отметить использование результатов деформирования крупномасштабных образцов соляной породы с установлением поперечных деформаций не только в уровне боковой поверхности, но и по его ширине, что позволило получить более представительную картины его деформирования. Интересным также представляется введение понятия предела ползучести для условий пластического течения Кулона-Мора и объёмного параболического условия пластичности, что позволяет существенно расширить область практического применения вязкопластических моделей. Безусловно, к научной новизне можно отнести весь комплекс выполненных автором теоретических исследований, направленных на разработку упругопластических и вязкопластических моделей, среди которых можно выделить модифицированный метод проекций напряжений для закона подобного модели Перича и его реализация для условия пластичности Кулона-Мора, а также алгоритма численного интегрирования уравнений пластичности методом обратного отображения для представленных моделей деформирования соляных пород. К научной новизне можно отнести и реализованный в рамках диссертационного исследования подход к прогнозу безопасных условий подработки водозащитной толщи на основании прогноза оседаний земной поверхности по прогнозным скоростям горизонтальной конвергенции очистных камер, получаемых по результатам численного моделирования.

Необходимо отметить, что к безусловным достоинствам работы можно отнести предложенный автором алгоритм численного интегрирования уравнений вязко-упругопластической модели деформирования среды с учетом принятых

условий пластического течения, пластического упрочнения и пластического потенциала. Детальное описание данного алгоритма, с указанием конкретных уравнений для выполнения численного интегрирования системы нелинейных уравнений, безусловно, позволяют обеспечить повторяемость представленных научных исследований и возможность использования полученных результатов на практике при внедрении данной или сопоставимой упруго-вязкопластической модели среды.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 199 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков, 26 таблиц и 2 приложения. Список используемых источников состоит из 166 наименований, в том числе 72 зарубежных.

В первой главе представлено состояние изученности вопроса и задачи исследований. В частности, уделено внимание условиям разработки Верхнекамского месторождения калийных солей, опыту геомеханических расчетов устойчивости междокамерных целиков, анализу методов математического моделирования геомеханических процессов, а также сформулированы цели и задачи исследований. Вторая глава посвящена разработке упругопластической модели деформирования и разрушения соляных пород. Представлены результаты испытаний крупномасштабного образца соляных пород в условиях сжатия. Значительное внимание уделено выбору условия пластичности для формулировки упругопластической модели, а также представлены выводы основных уравнений деформирования породы в рамках теории пластического течения. В третьей главе уделено внимание упруго-вязкопластическим моделям деформирования и разрушения соляных пород. Приведены результаты длительных испытаний соляных пород (каменной соли и красного сильвинита) для получения диаграмм ползучести и релаксации. Представлен вывод уравнений модели длительного деформирования соляных пород в рамках теории вязкопластического течения и детально изложены вопросы численной реализации моделей. Рассмотрены несколько законов вязкопластического течения и обосновано применение закона Перича, как наиболее удовлетворительно описывающего деформирования соляных пород. В четвертой главе представлены результаты математического моделирования процессов деформирования и разрушения междокамерных целиков. Основное внимание уделено представлению результатов натурных наблюдений за деформированием междокамерных целиков из соляных пород. Представлена постановка задачи прогноза напряженно-деформированного состояния целиков в плоско-деформационной постановке, вывод основных уравнений. Приведены основные теоретические положения модифицированного метода проекций напряжений для вязкопластической модели базирующейся на условии пластичности Кулона-Мора и объёмного параболического условия пластичности. Приведены типовые параметры разработанных моделей деформирования соляных пород и результаты прогноза напряженно-деформированного состояния междокамерных целиков. В пятой главе изложены прикладные аспекты использования разработанной упруго-вязкопластической модели деформирования междокамерных целиков в оценке безопасных условий подработки водозащитной толщи. Представлен прогноз геомеханического состояния междокамерных целиков, оценка и прогноз безопасных условий подработки водозащитной толщи.

Диссертация написана четким и понятным языком, хорошо оформлена. В работе подробно изложены выводы основополагающих уравнений, детально рассмотрены другие теоретические вопросы. Результаты диссертационной работы обсуждены на конференциях всероссийского и международного уровней и достаточно полно опубликованы в 8 печатных работах в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, в том числе 6 в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

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

Основные замечания/пожелания, по существу, проведенной научной работы:

1. В работе отмечается, что междокамерные целики деформируются преимущественно в условиях одноосного сжатия. Однако такое допущение справедливо при соответствующих соотношениях высоты целика к его поперечным размерам и не является справедливым в общем виде. Таким образом учет объемной прочности пород является важным фактором для достоверного прогнозирования несущей способности и деформирования породных целиков. В целом, представленная в работе модель деформирования соляных пород данный аспект учитывает.

2. В работе значительное внимание уделяется сравнению между собой различных условий пластичности и выбранных для каждого из них функций пластического потенциала и в то же время такое сравнение выполняется только для одного вида напряженного состояния. Возникает вопрос о достаточности полноты такого сравнения, когда для конкретного напряженно-деформированного состояния породы можно подобрать такие параметры уравнений упругопластической модели с произвольным условием пластичности, при котором результаты расчета будут сопоставимыми. Следовало бы выполнить сопоставление модельного подхода с результатами лабораторных исследований при различных видах напряженного состояния.

3. В работе установлено, что применение параболического условия пластичности позволяет достаточно хорошо описать деформирования соляных пород. Однако как хорошо известно, прочность соляных пород существенно варьируется в зависимости от вида напряженного состояния, который можно охарактеризовать через угол Лоде, что в представленной функции пластического течения не учтено и накладывает определенные требования к выбору параметров модели для различных видов напряженного состояния. В то же время, не представлен алгоритм выбора параметров условия пластичности и пластического потенциала для разных видов напряженного состояния, что затрудняет его практическое использование для решения прикладных задач геомеханики.

4. Принятый в работе билинейный закон изотропного упрочнения не позволяет выйти на идеально пластическую стадию деформирования или реализовать разупрочнение пород. Возникает вопрос, каким образом согласно представленной формулировки упругопластической модели оценивается достижение предельного состояния и как ограничивается максимальная величина допустимых напряжений в соляной породе.

5. В работе предложен метод оценки срока службы породных целиков, который заключается в изменении показателя вязкости в представленной автором модели деформирования соляных пород в зависимости от продолжительности с момента отработки пласта. Не возражая в целом с таким подходом, необходимо остановиться на двух аспектах. Первый из них касается формулировки функции уменьшения коэффициента вязкости, который принят в форме зависимости от показателя «время», а не зависимости от достигнутой величины одного из параметра состояния модели, что в целом снижает удобство его использования для решения прикладных задач. Ко второму можно отнести, что из текста самой работы не ясно каким образом были определены фактические параметры функции уменьшения коэффициента вязкости. Требуется ли для получения данных параметров результаты натурных наблюдений за геомеханическим состоянием породных целиков или возможно их получить на основании лабораторных исследований.

6. Междукламерные целики месторождений ВКМКС представлены не только соляными породами, но и переслаиванием соляных пород с тонкими прослоями глинистых материалов. В многочисленных работах было показано, что мощность глинистых прослоев оказывает существенное влияние на несущую способность целиков и их способность сопротивляться деформациям. С учетом того, что диссертация посвящена вопросам деформирования целиков, целесообразно было бы учесть данный фактор, при обосновании параметров модели деформирования соляных пород.

7. В тексте диссертации встречаются не общепринятые термины, например «ассоциированный объёмный критерий прочности» и ряд других, что требует либо их пояснения или использования общепринятых терминов.

8. В работе значительное внимание уделено развитию теоретических вопросов численной реализации модели деформирования среды с применением алгоритма обратного отображения при интегрировании уравнений пластического и вязкопластического течения, теоретическая часть представлена достаточно детально для каждого из вариантов модели деформирования пород. В то же время, в работе не представлен программный код реализации данной модели, что существенно бы снизило порог вхождения для специалистов, которые бы хотели реализовать результаты научных исследований рассматриваемой диссертационной работы в практике расчетов как породных целиков, так и в целом прогноза напряженно-деформированного состояния соляного породного массива при техногенном воздействии на него.

Заключение.

Сделанные замечания имеют рекомендательный характер и не влияют на высокую оценку диссертации Цаюкова А.А. Работа выполнена на высоком теоретическом уровне, достоверность полученных результатов подтверждена как

детальными лабораторными исследованиями, так и инструментальными замерами в шахтных условиях, а полученные результаты являются новыми и имеют научную и практическую значимости. Это позволяет утверждать, что обозначенные в работе цели и задачи исследования достигнуты, а положения, вынесенные на защиту, доказаны. Диссертация «Разработка методов математического моделирования процессов деформирования соляных междокамерных целиков», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует требованиям ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ согласно п.9 «Положение о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. На основании вышеизложенного, считаю, что соискатель, Цаюков Андрей Андреевич по результатам публичной защиты диссертации вправе претендовать на присуждение ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Официальный оппонент:

Профессор кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Доктор технических наук,
доцент



Карасев Максим Анатольевич

08 сентября 2025 г.

Адрес: Васильевский остров, 21 линия, д. 2, 199106, г. Санкт-Петербург

Телефон (рабочий): +7 (812) 328-86-26

Адрес электронной почты: Karasev_MA@pers.spmi.ru

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

Подпись Карасева Максима Анатольевича заверяю

