

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 539.3; 539.422.23; 622.83

ЛОПАТИН
Сергей Николаевич

**ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД
С ПОДЗЕМНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Минск, 2023

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель

ЖУРАВКОВ Михаил Анатольевич,
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты:

КУКАРЕКО Владимир Аркадьевич,
доктор физико-математических наук, профессор, начальник центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения объединенного института машиностроения НАН Беларуси;

ЧИГАРЕВ Виталий Анатольевич,
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической механики и механики материалов Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Защита состоится 7 апреля 2023 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.07 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, аудитория 202. Телефон ученого секретаря совета: (+37517) 275-74-26, e-mail: Pavel.Shirvel@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «3» марта 2023 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.07
кандидат физико-математических наук, доцент



П. И. Ширвель

© Лопатин С. Н., 2023

© Белорусский национальный
технический университет, 2023

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из важнейших направлений геомеханических исследований является математическое и компьютерное моделирование соответствующих процессов. Моделирование позволяет решать широкий спектр задач геомеханики, включая задачи прочности, устойчивости и долговечности подземных сооружений и вмещающих породных массивов, с достаточной степенью достоверности. В связи с этим дальнейший прогресс в геомеханике определяется, в том числе, развитием, разработкой и совершенствованием методов математического и компьютерного моделирования механических процессов.

К настоящему времени в данной области выполнено большое количество исследований как по изучению механизмов деформирования и разрушения горных пород и массивов, так и по решению прикладных задач геомеханики об оценке прочности, устойчивости и долговечности породных массивов с подземными сооружениями. Вместе с тем, на сегодняшний день не существует ни универсального алгоритма, позволяющего достоверно решать широкий спектр задач подземной геомеханики, ни универсальных критериев оценки прочности, устойчивости и долговечности породных массивов с подземными сооружениями. Исследования, изложенные в настоящей диссертационной работе, посвящены существенному продвижению в решении большого круга задач, входящих в обозначенное научное направление.

В работе предлагается алгоритм решения задач прочности, устойчивости и долговечности породных массивов с подземными сооружениями, основанный на концепциях механики сплошных сред, а также на применении современных средств компьютерного моделирования соответствующих геомеханических процессов, и, в некоторых случаях, гибридных численно-аналитических подходов. Введен комплексный критерий предельного состояния (ПС), позволяющий оценивать переход породных массивов с подземными сооружениями в предельное состояние. Данный критерий представляет собой систему критериев предельного состояния, которая применяется с учётом механической специфики каждого конкретного критерия, а также с учётом класса решаемой задачи и типа напряженно-деформированного состояния (НДС) рассматриваемого участка массива горных пород с подземным сооружением.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, проектами и темами. Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденным постановлением Совета министров Республики Беларусь № 190 от 12.03.2015 г. (пункты 5, 10, 12), а также приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг., утвержденных указом № 156 от 07.05.2020 г. (пункты 1, 3).

Работа выполнялась в рамках следующих научно-технических программ и тем научных исследований:

– ГПНИ «Конвергенция–2020». Подпрограмма «Методы математического моделирования сложных систем». Задание 1.8.01.1 «Разработать математические модели

и методы решения новых классов краевых задач механики сплошных сред применительно к актуальным современным проблемам науки и техники», № ГР 20161712;

– ГПНИ «Конвергенция–2025». Подпрограмма «Математические модели и методы». НИР 1.7.01.1 «Разработать механико-математические модели для изучения сопряженных нестационарных гидро/газо/ геомеханических процессов в породных массивах для описания и прогнозирования катастрофических событий в регионах крупномасштабного освоения подземного пространства», № ГР 20211797, в рамках задания 1.7.01 «Механико-математическое моделирование сложных природных и техногенных процессов и объектов на различных масштабных уровнях»;

– НИР «Выполнить численное (математическое) моделирование процессов сдвижения породного массива и определить высоту распространения водопроводящих трещин при очистной выемке по слоям 2, 2–3, 3 запасов главного западного направления гор. –445 м. рудника 2 РУ лавой без закладки и с различными вариантами частичной закладки выработанного пространства, с учетом взаимного расположения существующих выработанных пространств на Втором и Третьем калийных горизонтах», № ГР 20212809;

– НИР «Выполнить модельные исследования по оценке геомеханических и динамических процессов, протекающих в разломных и приразломных зонах исследуемой области, испытывающих влияние горных разработок», № ГР 20171701;

– НИР «Выполнить модельные исследования геомеханического и геодинамического состояний породного массива на базе современных цифровых технологий с учетом результатов геодезического и сейсмологического мониторингов», № ГР 20171698;

– НИР «Модельные исследования и выдача прогноза устойчивости конвейерных ходков в загрузочном комплексе при различных вариантах привязки кровли»;

– НИР «Расчет конструкции постоянной крепи скипового ствола в интервале относительных отметок от –675,900 (абс. отм. –535,330) до –704,100 (абс. отм. –563,530), загрузочных камер и интервалов примыкания шахтного ствола к кровле и почве загрузочных камер по объекту: «Строительство горно-обогатительного комплекса мощностью от 1,1 до 2,0 млн. тонн хлорида калия в год на сырьевой базе Нежинского (восточная часть) участка Старобинского месторождения калийных солей»;

– Erasmus + ICM, Keele University, UK, № KA107-2016-1;

– грант БГУ «Разработка алгоритма математического и компьютерного моделирования поведения массива горных пород в окрестности геотехнических сооружений, закреплённых штанговой крепью», приказ ректора БГУ № 327-ОД от 20.05.2022.

Цели и задачи исследования. Цель работы состоит в разработке методики и алгоритмов оценки предельного состояния массивов горных пород и расположенных в них подземных сооружений (геотехнических систем) с использованием понятия комплексного критерия оценки предельного состояния, на основании положений и подходов механики сплошных сред, а также современных численных и аналитических методов.

Для достижения основной цели исследования решены следующие задачи:

– введено понятие предельного состояния массивов горных пород с подземными сооружениями и критерий ПС. С точки зрения введенного определения ПС проанализированы существующие критерии прочности горных пород. Произведено

их обобщение применительно к рассмотрению ПС массивов горных пород и проведена классификация соответствующих критериев ПС. Даны рекомендации по выбору критериев ПС при решении прикладных задач о прочности, устойчивости и долговечности геотехнических систем;

– разработаны алгоритмы построения комплексного критерия ПС для задач определения статической и длительной прочности массивов горных пород и геотехнических сооружений;

– выполнен анализ базовых механико-математических моделей и постановок модельных граничных задач подземной геомеханики применительно к исследованию ПС массивов горных пород и подземных сооружений;

– разработан универсальный алгоритм численного моделирования геомеханических процессов, позволяющий решать широкий спектр задач подземной геомеханики по исследованию НДС и ПС массивов горных пород и подземных сооружений;

– выполнено решение модельных задач подземной геомеханики для доказательства эффективности разработанного подхода и алгоритмов исследования ПС подземных геотехнических систем;

– выполнено решение ряда важных инженерно-технических задач применительно к месторождениям калийных солей Республики Беларусь;

– построено решение одного класса модельных динамических задач геомеханики при помощи аналитического метода, основанного на асимптотическом интегрировании системы разрешающих уравнений. Для рассматриваемого класса задач предложены динамические критерии ПС массивов горных пород, отличные от классических. Применение предложенных критериев продемонстрировано на примере решения прикладных задач геодинамики.

Объектом исследования являются геотехнические системы, состоящие из массивов горных пород и расположенных в них подземных сооружений.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние геотехнических систем, предельное состояние массивов горных пород и подземных сооружений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке концепции комплексного критерия предельного состояния массивов горных пород в окрестности подземных геотехнических сооружений, а также в разработке алгоритма численного решения задач о прочности, устойчивости и долговечности массивов горных пород и подземных геотехнических сооружений с использованием комплексного критерия предельного состояния; выводе дисперсионного соотношения для инерционной волны при воздействии данной волны на двухслойную геосреду и оценке предельного состояния поверхности контакта слоёв.

Положения, выносимые на защиту. Новыми результатами, выносимыми на защиту диссертации, являются:

1. Комплексный критерий оценки предельного состояния массивов горных пород.

2. Методика и алгоритмы оценки предельного состояния подрабатываемых массивов горных пород и расположенных в них подземных сооружений (геотехнических систем) с использованием комплексного критерия оценки предельного состояния.

3. Алгоритм численного решения задач о прочности, устойчивости и долговечности геотехнических систем на базе методики оценки их предельного состояния, основанной на концепциях и подходах механики деформируемых твердых тел, а также на современных информационных технологиях численного моделирования.

4. Постановка и решение прикладных задач об определении НДС, предельного состояния, оценке прочности, устойчивости и долговечности подземных геотехнических сооружений различного назначения, пройденных в многослойном массиве калийных солей.

5. Решение задачи об определении НДС двухслойной упругой геосреды под воздействием динамической волновой нагрузки на основе аналитического асимптотического метода в двумерном и трёхмерном случаях. Вывод дисперсионного соотношения для рассматриваемых упругих волн.

Личный вклад соискателя ученой степени. Представленные в работе новые научные результаты получены автором лично. Часть результатов опубликована в соавторстве. Научный руководитель М. А. Журавков принимал участие в выборе направлений исследований, постановке задач, анализе и интерпретации полученных результатов [1, 3, 4, 5, 6, 8, 10]; соавторам В. А. Братову, Ю. Д. Каплунову и Д. А. Приказчикову принадлежат постановка задачи, асимптотическая формулировка разрешающих уравнений и первоначальное численное приближение решаемой задачи [2, 7], соавторам С. С. Хвесене и М. А. Николаичу [1, 4, 6, 8] принадлежит оценка достоверности полученных результатов, соавтору К. А. Рипка принадлежит построение цифровой геометрической модели рассматриваемой в работе [3] геотехнической системы. Результаты, полученные соавторами, не входят в настоящую диссертационную работу.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Материалы диссертации докладывались на следующих международных и республиканских научных конференциях: VIII Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике «Механика-2019» (Минск, Республика Беларусь, 2019); Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, Российская Федерация, 2019 и 2021); XIV международная научно-практическая конференция Украинской школы горной инженерии «Интеллектуальные системы и цифровые технологии в горной промышленности» (Бердянск, Украина, 2020); DUT-BSU Scientific Research Cooperation and Teaching Management Seminar (Минск, Беларусь – Далянь, КНР, 2020); VII Международная научно-техническая конференция «Теоретическая и прикладная механика» (Минск, Республика Беларусь, 2021); 6 th International Conference on the Development of Industrial Engineering (Novo Mesto, Slovenia, 2021); 78-я и 79-я научные конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета (Минск, Республика Беларусь, 2021 и 2022); XVII and XVIII International forum-contest of students and young researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 2021 и 2022); XIII Белорусская математическая конференция (Минск, Республика Беларусь, 2021); IV Международный научно-технический и инвестиционный форум по химическим технологиям и нефтегазопеработке (Минск, Республика Беларусь, 2021); – International Workshop on Computational Mechanics of Granular Materials (Минск, Беларусь – Далянь, КНР, 2021 и 2022).

Полученные результаты также докладывались на семинарах кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, на международных исследовательских семинарах по прикладной математике, организованных Кильским университетом (School of Computing and Mathematics, Keele University, United Kingdom), а также на совместных

исследовательских семинарах Белорусского государственного университета и Дalianьского политехнического университета (Dalian Polytechnical University, China).

Результаты, представленные в диссертационной работе, использовались при выполнении ряда хозяйственных договоров между БГУ и горнодобывающими предприятиями Республики Беларусь, а также при проведении фундаментальных исследований в рамках государственных программ научных исследований. Кроме того, полученные результаты используются в учебном процессе кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета при написании курсовых и дипломных работ, а также при чтении специальных курсов для студентов и магистрантов специальности «Механика и математическое моделирование».

Опубликование результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе, в 3 статьях в рецензируемых научных журналах в соответствии с пунктом 19 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республики Беларусь (общим объемом 1, 2 авторского листа), в 2 статьях в других рецензируемых научных изданиях, в 1 статье в сборнике материалов конференции и 4 тезисах докладов конференций. Из 6 статей 2 статьи опубликованы в научных изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science. Общий объём публикаций по теме диссертации составляет 2 авторских листа.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, 4 глав основного текста, заключения и библиографического списка. Она изложена на 181 страницах, из которых 134 страницы содержат основной текст с рисунками, 9 страниц содержат список использованных источников и 38 страниц содержат приложения. В приложениях к диссертации, помимо прочего, приведены документы об использовании результатов исследований.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе выполнен обзор литературы, посвящённой вопросам прочности и разрушения горных пород. Произведено обобщение критериев прочности горных пород на случай породных массивов и приведены рекомендации по их использованию. Установлено, что в случае массивов более корректно использовать термин «предельное состояние массива горных пород» вместо термина «прочность массива горных пород», поскольку нарушение тех или иных критериев прочности не всегда приводит к переходу геотехнических систем в состояние, не пригодное для дальнейшей эксплуатации. Обоснована актуальность проведения исследований в направлении разработки критериев предельного состояния массивов горных пород и предложена концепция комплексного критерия предельного состояния породных массивов, основанная на определенной комбинации существующих критериев предельного состояния горных пород с учётом типа НДС рассматриваемого участка массива горных пород.

В диссертации под предельным состоянием породных массивов и геотехнических систем понимается такое их состояние, при котором в рассматриваемой области массива горных пород или в геотехническом сооружении имеют место значительные по размерам зоны нарушения критериев ПС (зоны нарушения сплошности среды,

разрушения, трещиноватости и т. д.), совокупность которых приводит к полному разрушению или потере устойчивости рассматриваемого объекта в целом. Под геотехнической системой, в свою очередь, в работе понимается механическая система «вмещающий массив горных пород – инженерное подземное сооружение в совокупности всех составляющих его элементов».

Во второй главе рассматриваются основные механико-математические модели, используемые для описания механического поведения горных пород и массивов. Данные модели включают в себя упругую модель (1), модель Кулона-Мора (2), модель запредельного деформирования (3), а также различные реологические модели, основанные на теории наследственной ползучести (4)–(7).

$$\sigma_{ij} = \sum_{kl} C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (1)$$

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + C, \quad (2)$$

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + C + E^* \varepsilon^*, \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = C_1 \sigma_{eqv}^{C_2} t^{C_3} e^{-C_4/T}, \quad (4)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_1 \sigma_{eqv}^{C_2} t^{C_3+1} e^{-C_4/T}}{C_3+1} + \varepsilon_0, \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = C_1 \sigma_{eqv}^{C_2} e^{-C_3/T}, \quad (6)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_1 \sigma_{eqv}^{C_2} t^{C_3+1} e^{-C_4/T}}{C_3+1} + C_5 \sigma_{eqv}^{C_6} t e^{-C_7/T} + \varepsilon_0, \quad (7)$$

где φ – угол внутреннего трения; C – структурное сцепление; E^* – модуль деформации на нисходящей ветви диаграммы деформирования горной породы; ε^* – деформация на нисходящей ветви диаграммы деформирования горной породы; σ_{eqv} – интенсивность напряжений по Мизесу; C_i – реологические константы.

Приведены математические постановки основных задач геомеханики и варианты задания граничных условий в зависимости от рассматриваемых глубин. Рассмотрены статические и динамические задачи. Описан алгоритм решения данных задач в вязкоупругопластической постановке. Ключевым этапом разработанного алгоритма является оценка предельного состояния массива горных пород по комплексному критерию предельного состояния. Данный этап начинается с определения типа обобщённого НДС рассматриваемого участка массива горных пород с использованием коэффициента Надаи-Лодэ (8):

$$\mu = \frac{2(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (8)$$

Значения $\mu \in [-1; -0,5)$ соответствуют областям обобщённого растяжения, $\mu \in [-0,5; 0,5]$ – областям обобщённого сдвига, а $\mu \in (0,5; 1]$ – областям обобщённого сжатия.

Исходя из типа обобщённого НДС, все критерии предельного состояния массивов горных пород можно условно разделить на три группы: критерии, определяющие переход массива в предельное состояние в результате сжатия, в результате растяжения и в результате сдвига. На сегодняшний день в геомеханике общепринятыми являются критерий Кулона-Мора (9) и критерий Друкера-Прагера (10). Именно эти два критерия наиболее часто используются в научной литературе для оценки прочности горных пород или предельного состояния породных массивов. Оба этих критерия характеризуют разрушение/предельное состояние, которое наступает в результате сдвига или отрыва.

$$\tau_n \leq \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (9)$$

$$\sqrt{I_2} \leq \alpha I_1 + s,$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}, \quad s = \frac{6C \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}. \quad (10)$$

Однако использование данных критериев не позволяет определять в породном массиве те области, которые переходят в предельное состояние в результате растяжения или сжатия. В связи с этим, наряду с критериями (9) и (10), для оценки предельного состояния массивов горных пород предлагается использовать также критерии, оценивающие переход массива в результате сжатия (11), (12) и критерии, оценивающие переход массива в результате растяжения (13), (14).

$$\begin{cases} |\sigma_3| < \sigma_{compr} \\ \sigma_3 < 0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} |\varepsilon_3| < \varepsilon_{compr} \\ \varepsilon_3 < 0 \end{cases}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} \sigma_1 < \sigma_{tens} \\ \sigma_1 > 0 \end{cases}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_1 < \varepsilon_{tens} \\ \varepsilon_1 > 0 \end{cases}, \quad (14)$$

где σ_{compr} и σ_{tens} – пределы прочности породы на сжатие и растяжение соответственно; ε_{compr} и ε_{tens} – предельно допустимые деформации породы при сжатии и растяжении соответственно.

Следует отметить, что в отличие от общепринятых критериев, критерии (12) и (14) записаны в терминах деформаций, а не в терминах напряжений. Данное обстоятельство является весьма важным, поскольку в задачах геомеханики связь между напряжениями и деформациями практически всегда нелинейная, и, кроме того, зачастую не выполняется принцип суперпозиции деформаций. В связи с этим важно проверять переход массивов горных пород в предельное состояние не только в результате превышения допустимых напряжений, но и в результате превышения допустимых деформаций. Для проверки предельного состояния массивов горных пород в областях обобщённого сдвига, в свою очередь, следует использовать критерий (15):

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_3 \leq \varepsilon_{lim}, \quad (15)$$

где ε_{lim} – максимально допустимая относительная деформация.

Таким образом, **базовая система критериев, входящих в комплексный критерий предельного состояния (16)**, включает в себя, как минимум, 7 критериев (9)–(15), а также выражение (3) в форме условия ПС для оценки предельного деформирования массива горных пород, применяемые в соответствующих областях определенного типа обобщённого НДС, которые определяются выражением (8). В работе также рассмотрено и проанализировано большое количество других критериев предельного состояния и предложена **расширенная система комплексного критерия предельного состояния (17)**.

Понятие комплексного критерия предельного состояния в данной главе также обобщается на случай задач исследования длительной устойчивости массивов горных пород, которые отличаются от статических задач прочности тем, что требуется определить переход массива горных пород в предельное состояние с учётом временных эффектов. Учёт временных эффектов осуществляется за счёт применения моделей ползучести (4)–(7) в зависимости от типа решаемой задачи. В данном случае для оценки предельного состояния используются те же критерии, что и в статическом случае, но предельные значения входящих в них величин заменяются их «длительными» аналогами. Как правило, длительные предельные значения для горных пород, составляющих массив, не превышают мгновенных предельных значений.

Кроме того, в задачах об определении долговечности геотехнических систем могут использоваться критерии, записанные в терминах перемещений, такие как, например, критерий (18).

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[|\sigma_3| \leq \sigma_{compr}, \varepsilon_3 \leq \sigma_{compr} \right] n\mu \mu \in \left(\frac{1}{2}; 1 \right) \\ \left[|\sigma_1 - \lambda\sigma_3| \leq \sigma_{compr}, \sqrt{I_2} \leq \alpha I_1 + s, \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \leq \varepsilon_{lim} \right] n\mu \mu \in \left[-\frac{1}{2}; \frac{1}{2} \right], \\ \left[\sigma_1 \leq \sigma_{tens}, \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{tens} \right] n\mu \mu \in \left(-\frac{1}{2}; -1 \right) \\ \left[\sigma_1 - \lambda\sigma_3 + E^* \varepsilon^* \right] \leq \sigma_{compr}^0 n\mu \mu \in [-1; 1] \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[|\sigma_3| \leq \sigma_{compr}, \sigma_{eqv} \leq \sigma_{compr}, \varepsilon_3 \leq \sigma_{compr} \right] n\mu \mu \in \left(\frac{1}{2}; 1 \right) \\ \left[\begin{array}{l} |\sigma_1 - \lambda\sigma_3| \leq \sigma_{compr}, \sqrt{I_2} \leq \alpha I_1 + s, \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \leq \varepsilon_{lim}, \\ \tau_{oct} \leq a + b \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \frac{I_1^3}{I_1} - 27 \leq \eta, \tau_{max} \leq \sigma_{shear}, \\ \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \leq \varepsilon_{lim}, \frac{\sqrt{2}}{2(1+\nu)}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \leq \varepsilon_{lim} \end{array} \right] n\mu \mu \in \left[-\frac{1}{2}; \frac{1}{2} \right], \\ \left[\sigma_1 \leq \sigma_{tens}, \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{tens}, \sigma_1 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3) \leq \sigma_{tens} \right] n\mu \mu \in \left(-\frac{1}{2}; -1 \right) \\ \left[\left[\sigma_1 - \lambda\sigma_3 + E^* \varepsilon^* \right] \leq \sigma_{compr}^0, \tau^2 \leq 8\sigma_{tens}(\sigma_n + \sigma_{tens}) \right] n\mu \mu \in [-1; 1] \end{array} \right. \quad (17)$$

где σ_{compr}^0 – остаточная прочность массива.

$$u_i \leq u_{lim}, \quad (18)$$

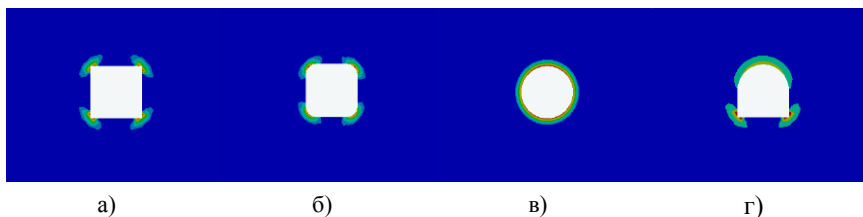
где u_i – перемещения породного массива к данному моменту времени в определенном направлении или векторная сумма перемещений по всем осям; u_{lim} – допустимые перемещения массива для рассматриваемых условий.

В третьей главе эффективность предложенного алгоритма решения задач прочности, устойчивости и долговечности породных массивов с подземными сооружениями, а также предложенного комплексного критерия предельного состояния продемонстрирована на примере решения трёх прикладных задач. Численное решение данных задач получено при помощи метода конечных элементов.

Первая задача является классической и связана с оценкой статического предельного состояния массивов горных пород в окрестности подземных выработок различного поперечного сечения, находящихся на различных глубинах (малых, умеренных и больших) в различных горно-геологических условиях. В результате решения данной задачи установлено, что существующие критерии предельного состояния горных пород дают весьма неоднозначные и порой противоречивые оценки состояния массива в окрестности подземных выработок. Так, например, оценка предельного состояния массива горных пород в окрестности выработок всех исследуемых форм поперечного сечения согласно критерию Кулона-Мора (9) показала, что породный массив в окрестности выработок любого поперечного се-

чения на глубинах более 300 м, находится в предельном состоянии. При этом характерный размер областей предельного состояния превышает характерные размеры выработок, как минимум, в 3 раза. Таким образом, исходя из оценки предельного состояния массива по критерию Кулона-Мора (9), следует вывод о том, что горные работы проводить на всех глубинах, превышающих 300 м, небезопасно. Вместе с тем, общеизвестно, что подземные выработки на таких глубинах находятся в эксплуатационно-пригодном состоянии.

С другой стороны, оценка предельного состояния массива горных пород в окрестности этих же выработок по критерию максимальных деформаций сжатия показывает, что предельное состояние в окрестности выработок не наступает практически ни в одном из рассмотренных случаев, за исключением формирования локальных участков на больших глубинах (рисунок 1). Данные рисунка 1 свидетельствуют о том, что проведение горных работ в массивах калийных солей на глубинах вплоть до 1200 м безопасны и могут проводиться без дополнительных мер охраны выработок. Очевидно, что данный вывод не соответствует действительности.



а)

б)

в)

г)

красный цвет – зоны ПС

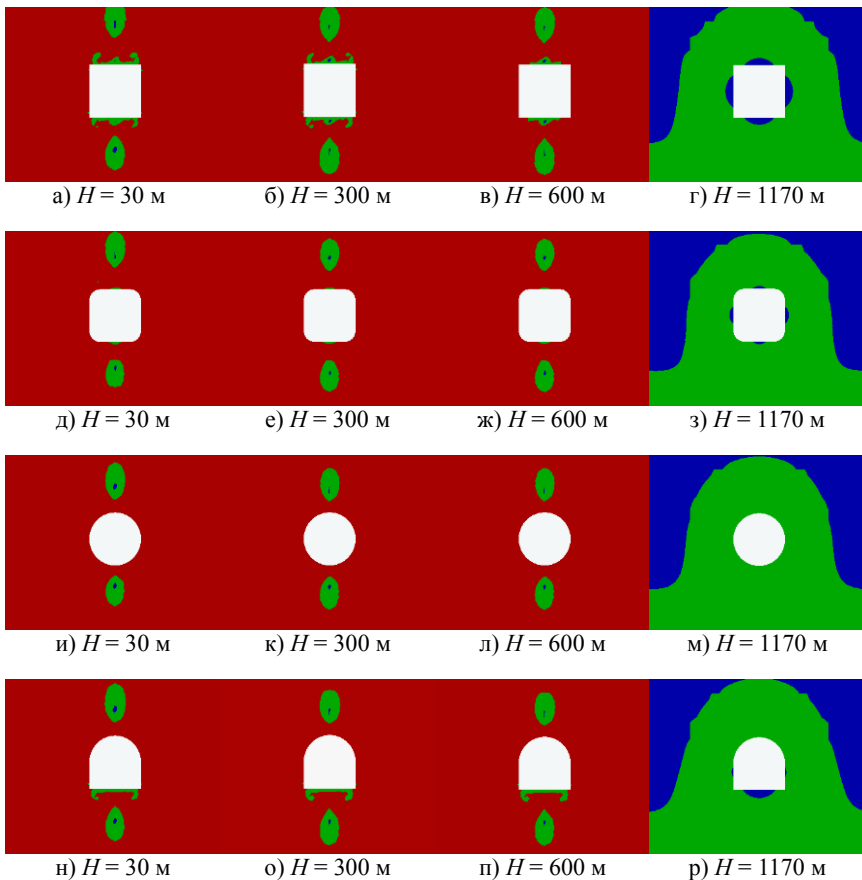
a – прямоугольное сечение; *б* – скруглённое сечение;

в – круглое сечение; *г* – арочное сечение

Рисунок 1 – Оценка состояния массива калийных пород в окрестности одиночной выработки различных сечений на больших глубинах по критерию максимальных сжимающих деформаций (12) на глубине $H=1170$ м

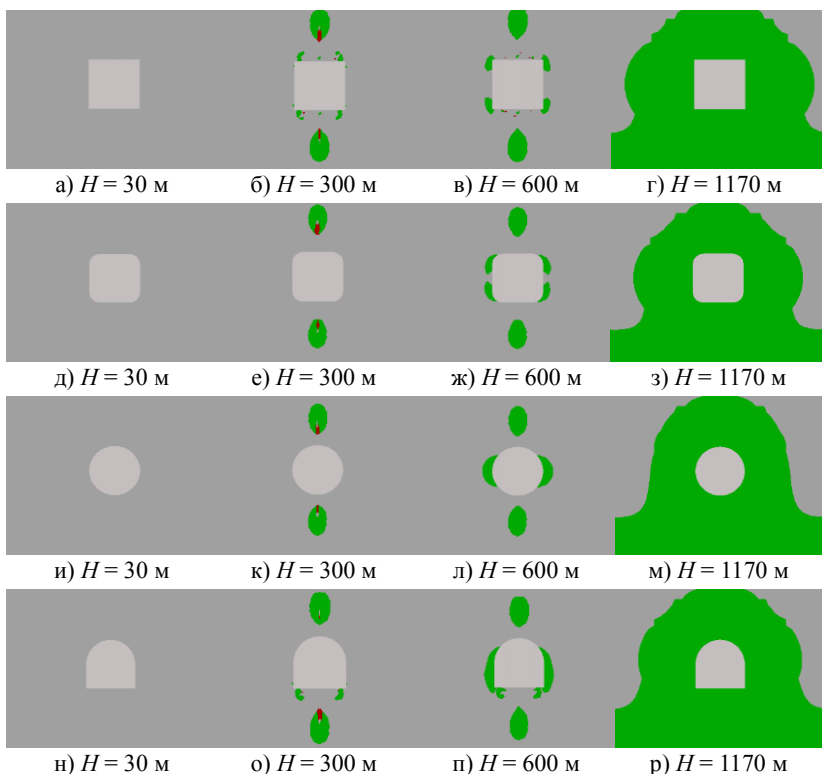
Показано, что полная и достоверная оценка состояния массивов горных пород в окрестности подземных сооружений возможна только при использовании комплексного критерия предельного состояния.

Первым шагом в выполнении процедуры такого анализа является оценка типа обобщённого НДС в окрестности выработок в соответствии с выражением (8). Рисунок 2 показывает, что в окрестности одиночных выработок в массиве формируется сложное НДС. Данный факт дополнительно подтверждает вывод о том, что использование только общепринятых «сдвиговых» критериев для оценки предельного состояния массивов горных пород является некорректным. Как показано на рисунке 2, на малых и умеренных глубинах в окрестности выработок формируются как зоны обобщённого сжатия, так и зоны обобщённого сдвига. На больших глубинах преобладает состояние обобщённого сдвига, но присутствуют также и области обобщённого растяжения, которые при оценке предельного состояния нельзя игнорировать. Согласно данным рисунка 2, механическое состояние массива в окрестности подземной выработки значительно различается на умеренных и больших глубинах.



красный цвет – области обобщённого сжатия, зеленый цвет – области обобщённого сдвига, синий цвет – области обобщённого растяжения
Рисунок 2 – Распределение значений коэффициента Надай-Лоде (8) в окрестности одиночной выработки различных поперечных сечений на разных глубинах

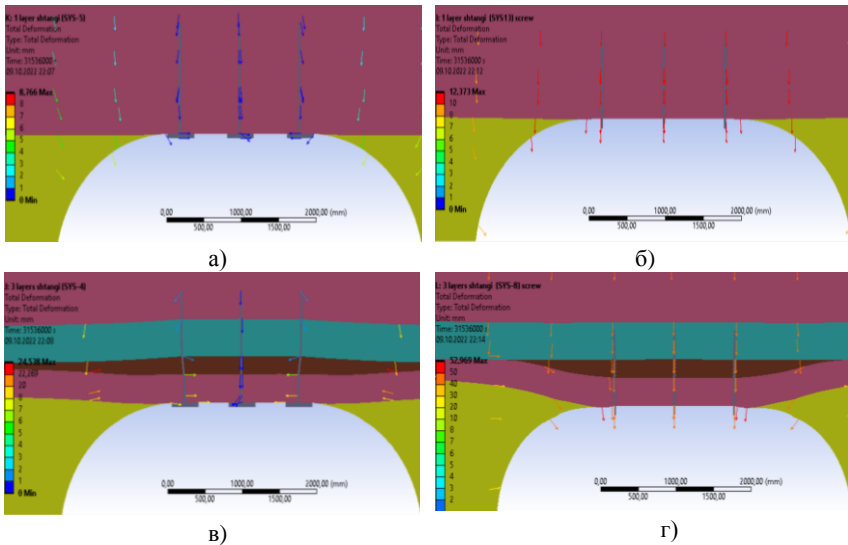
На рисунке 3 представлена оценка предельного состояния массива в окрестности подземной выработки, выполненная согласно базовой (16) и расширенной (17) системам комплексного критерия предельного состояния. Данные рисунка 3 показывают, как формируются зоны предельного состояния в окрестности одиночных выработок. Из рисунков видно, что на умеренных глубинах в окрестности выработок формируются лишь локальные области предельного состояния, а на больших глубинах вся окрестность выработок находится в предельном состоянии, причём величина данной окрестности может превышать характерный размер выработки.



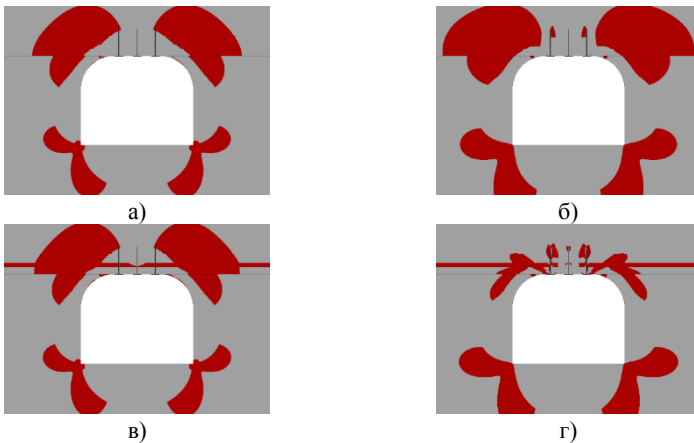
зелёный цвет – зоны ПС по базовой системе критериев,
 зелёный и красный цвета – зоны ПС по расширенной системе критериев
Рисунок 3 – Оценка предельного состояния массива в окрестности одиночных выработок по комплексному критерию в соответствии с базовой и расширенной системами критериев

В данной главе показано, что на форму и размеры зон предельного состояния основное влияние оказывает глубина ведения горных работ, физико-механические свойства пород, составляющих массив, и форма сечения выработки. При этом следует отметить, что рассмотренные модельные задачи решались в трехмерной постановке.

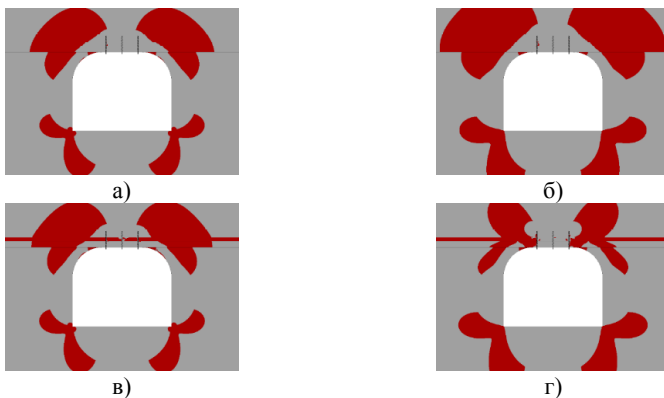
Вторая задача связана с оценкой предельного состояния закрепленного анкерной крепью породного массива в окрестности одиночной выработки за краткосрочный период (1 год). При решении задачи рассматривались случаи различного геологического строения породного массива в кровле одиночной выработки при использовании штанг винтового и поддерживающего типов. В результате решения задачи установлено, что механическое поведение закрепленной породной толщи значительно различается в зависимости как от применяемого типа анкерного крепления, так и от геологического строения кровли выработки. Отдельные результаты расчетов приведены на рисунке 4. Оценки предельного состояния породного массива в окрестности закрепленных выработок представлены на рисунках 5 и 6.



a – в случае установки поддерживающих штанг в однослойной кровле; *б* – в случае установки винтовых штанг в однослойной кровле; *в* – в случае установки поддерживающих штанг в многослойной кровле; *г* – в случае установки винтовых штанг в многослойной кровле
 Рисунок 4 – Полные перемещения закреплённого массива в окрестности одиночной выработки спустя 1 год после установки штанг



красный цвет – зоны ПС
a – в случае однослойной кровли сразу после установки штанг; *б* – в случае однослойной кровли спустя 1 год после установки штанг; *в* – в случае многослойной кровли сразу после установки штанг; *г* – в случае многослойной кровли спустя 1 год после установки штанг
 Рисунок 5 – Оценка предельного состояния породного массива по комплексному критерию в случае закрепления кровли штангами поддерживающего типа



красный цвет – зоны ПС

a – в случае однослойной кровли сразу после установки штанг; *б* – в случае однослойной кровли спустя 1 год после установки штанг; *в* – в случае многослойной кровли сразу после установки штанг; *г* – в случае многослойной кровли спустя 1 год после установки штанг

Рисунок 6 – Оценка предельного состояния породного массива по комплексному критерию в случае закрепления кровли винтовыми штангами

Анализ результатов выполненных расчетов, представленных на рисунках 4–6, позволяет сделать следующие выводы:

1. Установка как поддерживающих, так и винтовых штанг позволяет уменьшить размеры зон предельного состояния в области их установки за рассматриваемый период времени по сравнению с зонами предельного состояния в окрестности выработки без использования анкерного крепления.

2. В случае многослойной кровли установка винтовых штанг позволяет закреплённой области породного массива перейти из предельного состояния в безопасное за рассматриваемый период времени. Установка поддерживающих штанг, в свою очередь, значительно сокращает размеры зон предельного состояния до локальных в кровле выработки.

3. В незакреплённых областях происходит постепенное увеличение размеров зон предельного состояния. Средний размер увеличения зон предельного состояния за 1 год при этом составляет 9–18 %.

Третья задача связана с оценкой предельного состояния сложного геотехнического сооружения, включающего в себя шахтный ствол, сопряжение шахтного ствола с горизонтальной выработкой, саму выработку и конструктивные элементы крепи подземного сооружения, такие как анкеры, пенобетон, бетон и компенсационные щели, в течение длительного периода времени – 50 лет. При этом рассматриваемое геотехническое сооружение находится на большой глубине 1150 м. При решении задачи учитывалось, что породный массив в окрестности рассматриваемого подземного сооружения имеет сложное геологическое строение (учитывалось наличие 10 геологических слоев с различными физико-механическими свойствами). Результаты оценки предельного состояния шахтного ствола по комплексному критерию предельного состояния представлены на рисунке 7, а результаты оценки предельного состояния сопряжения ствола с горизонтальной выработкой – на рисунке 8.



а)

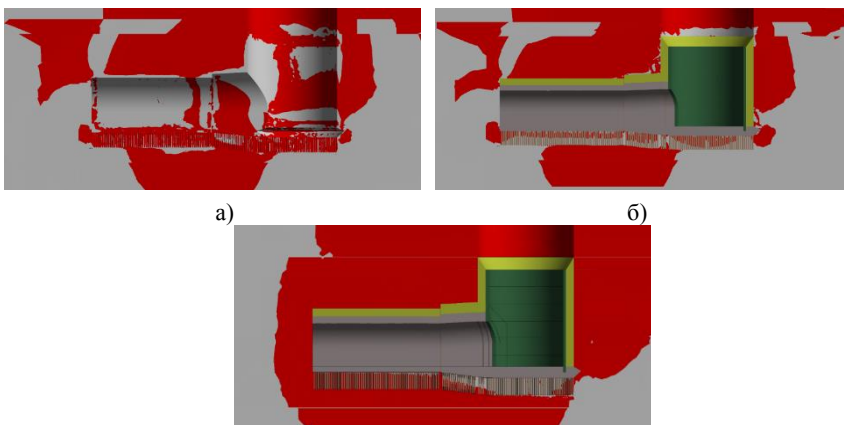
б)

красный цвет – зоны ПС

а – после проходки шахтного ствола; *б* – спустя 50 лет

Рисунок 7 – Оценка предельного состояния породного массива в окрестности шахтного ствола

Данные рисунка 7 свидетельствует о том, что практически весь контур шахтного ствола находится в предельном состоянии. Наибольшие по размеру зоны ПС возникают в интервалах залегания карналлит-галитовых пород. Размеры зон ПС в данном случае могут превышать диаметр шахтного ствола. Спустя 50 лет зоны предельного состояния несколько уменьшаются. Данные рисунка 8, в свою очередь, свидетельствует о том, что практически весь контур подземного сооружения также находится в предельном состоянии. При этом с течением времени размеры зоны ПС в окрестности сооружения изменяются по форме и увеличиваются в размерах.



а)

б)

в)

красный цвет – зоны ПС

а – после проходки; *б* – после установки постоянной крепи; *в* – спустя 50 лет

Рисунок 8 – Оценка предельного состояния породного массива в окрестности сопряжения шахтного ствола с горизонтальной выработкой

В четвертой главе рассматривается задача о воздействии инерционной волны на двухслойную среду (рисунок 9). Задача решается при помощи аналитического метода, основанного на асимптотическом интегрировании системы разрешающих

уравнений (19) с граничными условиями (20). К сферам приложений решения данной задачи относится, например, развитие теоретических основ методов подземной сейсмотомографии и геофизики, а также решение некоторых классов задач о динамических сдвигах в области тектонических нарушений.

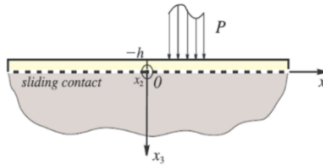


Рисунок 9 – Полупространство под действием инерционной нагрузки в трёхмерной постановке

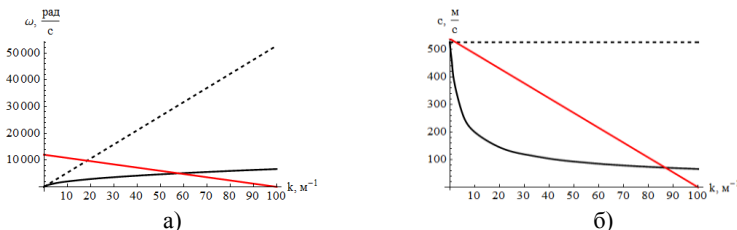
$$\operatorname{div} \sigma = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (19)$$

$$\sigma_{3i}|_{x_3=-h} = 0, \quad (20)$$

$$\sigma_{33}|_{x_3=-h} = -P(x_1, x_2, t) = Ma(x_1, x_2, t).$$

В результате решения сформулированной модельной задачи выведено дисперсионное соотношение для рассматриваемой волны (21), на основании которого предложен критерий предельного состояния массива горных пород при решении задач такого типа. Идея данного критерия заключается в сравнении значений угловой ω и фазовой c скоростей с предельными значениями. При этом значения ω и c определяются при помощи соотношения (21). Примеры оценки предельного состояния массива горных пород по данным критериям представлены на рисунке 10.

$$\left((1 + q_2^2)^2 - 4q_1q_2 \right) + \frac{Mkc^2}{\mu} q_1 (q_2^2 - 1) = 0. \quad (21)$$



сплошная линия – график зависимости для случая инерционной волны; пунктирная линия – график зависимости для случая волны Рэлея; красная линия – предельное значение a – по критерию максимально допустимой угловой частоты; b – по критерию максимально допустимой фазовой скорости
Рисунок 10 – Оценка состояния толщи соляных пород при распространении инерционной волны

Кроме того, в работе выведены эффективные граничные условия (22) на поверхности полупространства $x_3 = 0$, а также проведена оценка предельного состояния поверхности полупространства по соответствующему критерию.

$$\begin{aligned} \sigma_{33}|_{x_3=0} = & \rho_c \frac{\partial^2 v_3}{\partial t^2} + \frac{\rho_c h^3}{6} \left(2c_{2c}^2 (1 - \kappa_c^2 \Delta^2 v_3 - \kappa_c^2 \Delta \frac{\partial^2 v_3}{\partial t^2} - 2c_{1c}^{-2} \frac{\partial^4 v_3}{\partial t^4}) \right) + \\ & + \frac{h^2}{2} \left((1 - 2\kappa_c^2) \rho_c \operatorname{div} \frac{\partial^2 \mathbf{w}}{\partial t^2} + c_{1c}^{-2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \right), \end{aligned} \quad (22)$$

$$\sigma_{13}|_{x_3=0} = 0, \sigma_{23}|_{x_3=0} = 0.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Определение ПС обобщено на случай массивов горных пород. На основании обобщённого определения введено определение критерия ПС массивов горных пород и выполнен анализ существующих критериев прочности горных пород. Произведено их обобщение применительно к рассмотрению ПС породных массивов и проведена классификация соответствующих критериев ПС. Даны рекомендации по выбору критериев ПС при решении прикладных задач о прочности, устойчивости и долговечности геотехнических систем. Выполнен анализ базовых механико-математических моделей и постановок модельных граничных задач подземной геомеханики применительно к исследованию ПС массивов горных пород и подземных сооружений [1, 8, 9, 10].

2. Разработан комплексный критерий оценки ПС массивов горных пород и геотехнических сооружений. Основная идея данного критерия заключается в том, что ПС массивов горных пород и геотехнических сооружений должно оцениваться по специальной системе критериев с учётом типа НДС, формирующегося в рассматриваемой области массива и элементах подземного сооружения, а также физической специфики каждого из используемых в системе критериев. Показано, что для полной и достоверной оценки ПС породных массивов необходимо использовать базовую систему, состоящую из 8 специализированных критериев ПС. Для более достоверной оценки предельного состояния породных массивов базовая система критериев может быть расширена при наличии необходимых исходных данных о физико-механических свойствах пород, составляющих массив [1, 3, 8, 9, 10].

3. Разработан алгоритм решения задач о прочности, устойчивости и долговечности геотехнических систем на базе методики оценки их ПС на основе концепций и подходов механики деформируемых твердых тел, а также современных информационных технологий численного моделирования. Эффективность разработанного алгоритма продемонстрирована на примере решения ряда модельных задач об оценке прочности и долговечности массивов горных пород в окрестности подземных сооружений [1, 3, 4, 5, 6, 8, 9 10].

4. Решены важные прикладные задачи об определении НДС и ПС геотехнических систем, а также об оценке прочности, устойчивости и долговечности ответственных подземных геотехнических сооружений различного назначения, пройденных в многослойном массиве калийных солей для месторождений Республики Беларусь [1, 3, 4, 5, 6, 8, 10].

5. Построено аналитическое решение модельной задачи для одного из классов динамических задач геомеханики по расчёту НДС двухслойной геосреды под воздействием динамической волновой нагрузки при различных условиях контакта между компонентами среды на основе аналитического асимптотического метода в двухмерном и трёхмерном случаях. Выведено дисперсионное соотношение для упругих волн в рассматриваемом случае. Показано, что в случае динамических задач геомеханики концепция предельных состояний массивов горных пород также применима. Оценка динамического предельного состояния проиллюстрирована на прикладном примере [2, 7].

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

Результаты, представленные в диссертационной работе, могут в дальнейшем использоваться научно-исследовательскими учреждениями, проектными и конструкторскими организациями, связанными с расчётами прочности, устойчивости и долговечности подземных сооружений и вмещающих массивов горных пород, а также для численного моделирования механического поведения породных массивов и подземных геотехнических сооружений для широкого диапазона исходных данных. Результаты и выводы исследований могут быть использованы при разработке прикладных методик расчета и прогнозирования НДС, прочности и устойчивости ответственных подземных геотехнических систем, находящихся в сложных условиях.

Использование результатов исследований при выполнении прикладных научно-исследовательских и проектных работ позволяет значительным образом повысить надежность и точность выполнения расчетов, сократить затраты на проведение натурных и экспериментальных исследований, проверить множество технических решений и выбрать оптимальное.

Кроме того, результаты исследований могут использоваться в учебном процессе при чтении специальных курсов по механике сплошных сред, геомеханике, компьютерному моделированию и численным методам. Результаты исследований использованы при выполнении важных прикладных научно-исследовательских программ и тем.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1 Журавков М. А., Хвесеня С. С., Лопатин С. Н., Николайчик М. А. Устойчивость и прочность подземных сооружений // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2019. – № 4. – С. 84–88.

2 Bratov V. A., Kaplunov J. D., Lapatsin S. N., Prikazchikov D. A. Elastodynamics of a coated half-space under a sliding contact // *Mathematics and Mechanics of Solids*. – 2022. – Vol. 27, № 8. – P. 1480–1493.

3 Журавков М. А., Лопатин С. Н., Рипка К. А. О моделировании механического поведения закрепленных анкерной крепью породных массивов // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2022. – № 2. – С. 67–76.

Статьи в других научных изданиях

4 Журавков М. А., Лопатин С. Н., Хвесеня С. С. Оценка областей нарушения сплошности и разрушения в окрестности выработанного пространства // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2019. – Т. 6, № 2. – С. 103–107.

5 Журавков М. А., Лопатин С. Н., Численное моделирование реологических процессов при недостаточном количестве реологических констант // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 79–85.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

6 Zhuravkov M. A., Hvesenya S. S., Lapatsin S. N. Durability analysis of underground structures based on various creep models of the enclosing salt rock massif [Electronic resource] // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 201: Ukrainian School of Mining Engineering – 2020: XIV Internat. Research and Practice Conf., Berdyansk (Ukraine), 7-11 September 2020 г. / Ukrainian School of Mining Engineering. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/61/e3sconf_usme_2020_01007.pdf. (дата обращения: 11.10.2022).

Тезисы докладов

7 Lapatsin S., Prikazchikov D. Rayleigh-type wave on an elastic half-space with an added mass distributed along the surface // *6th International Conference on the Development of Industrial Engineering: Book of Abstracts, Novo Mesto, 2021 April 2021 / Faculty of Industrial Engineering*. – Novo mesto, 2021. – P.16.

8 Lapatsin S. N., Zhuravkov M. A., Nikolaitchik M. A. Computer-aided modeling of the daylight surface subsidence under the influence of mining near tectonic irregularities // *XVIII International forum-contest of students and young researchers: topical issues of rational use of natural resources, Saint-Petersburg, 31 May – 06 June 2021: in 2 vol. / Saint-Petersburg Mining University; ed. V. T. Borzenkov*. – Saint-Petersburg, 2021. – Vol. 1. – P. 208–209.

9 Lapatsin S. N. Mathematical modeling of long-term mechanical behavior of supported rock mass in the vicinity of a single mining excavation // *XIII Belarusian mathematical conference: materials of international scientific conference, Minsk, 22–25 Nov 2021. In 2 vol. / Belarusian State University, Institute of Mathematics of BAS; ed. V. V. Lepin*. – Minsk: Institute of Mathematics of BAS; *Belarusskaya nauka*, 2021. – Vol. 2. – P. 104–105.

10 Журавков М. А., Лопатин С. Н. Геомеханика глубоких подземных сооружений // *Нефтехимия* – 2021: материалы IV Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 ноября 2021 г. / *Белорусский государственный технический университет*. – Минск: БГТУ, 2021. – С. 280–283.

РЭЗЮМЭ

Лапацін Сяргей Мікалаевіч

Лімітавы стан масіваў горных парод з падземнымі збудаваннямі

Ключавыя словы: лімітавы стан масіваў горных парод, падземныя збудаванні, комплексны крытэрыі лімітавага стану, метады канчатковых элементаў, напружана-дэфармаваны стан

Мэта працы: Распрацоўка ўніверсальнага алгарытму рашэння задач трываласці, устойлівасці і даўгавечнасці масіваў горных парод з падземнымі збудаваннямі, а таксама распрацоўка комплекснага крытэрыя лімітавага стану згаданых масіваў.

Метады даследавання: метады канчатковых элементаў, асімптатычны метады, мадэль дэфармаванага цвёрдага цела, параўнальны аналіз.

Атрыманыя вынікі:

1. Распрацаваны комплексны крытэрыі лімітавага стану масіваў горных парод;
2. Распрацаваны ўніверсальны алгарытм лікавага рашэння задач трываласці, устойлівасці і даўгавечнасці задач падземнай геамеханікі;
3. Пабудаваны кампутарныя мадэлі пародных масіваў з падземнымі збудаваннямі і праведзена ацэнка імгненнага і працяглага лімітавага стану падземных масіваў;
4. Вырашана задача аб распаўсюджванні інэрцыйнай хвалі на паверхні двухслаёвага геалагічнага асяроддзя. Выведзены дысперсійныя суадносіны для інэрцыйнай хвалі і праведзена ацэнка лімітавага стану паверхні спалучэння пластоў.

Навуковая навізна складаецца ў распрацоўцы ўніверсальнага алгарытму рашэння задач аб трываласці, устойлівасці і даўгавечнасці пародных масіваў з падземнымі збудаваннямі, а таксама ў распрацоўцы комплекснага крытэрыя лімітавага стану масіваў горных парод. Апроч гэтага, навізна складаецца ў распрацоўцы кампутарных мадэляў пародных масіваў саляных парод з падземнымі збудаваннямі, а таксама ў высновах, датычных фармавання абласцей лімітавага стану ў масівах горных парод у наваколлі падземных збудаванняў у імгненнай і працяглай даляглядах. Нарэшце, навуковая навізна складаецца ў выснове дысперсійных суадносін для інэрцыйнай хвалі пры ўздзеянні падземнай хвалі на двухслаёвае геаасяроддзе і ацэнцы лімітавага стану паверхні кантакту пластоў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання: распрацаваныя мадэлі могуць быць скарыстаны ў горназдабыўнай прамысловасці для павелічэння дакладнасці разлікаў падземных збудаванняў і пародных масіваў з імі на трываласць, устойлівасць і даўгавечнасць.

РЕЗЮМЕ

Лопатин Сергей Николаевич

Предельное состояние массивов горных пород с подземными сооружениями

Ключевые слова: предельное состояние массивов горных пород, подземные сооружения, комплексный критерий предельного состояния, метод конечных элементов, напряженно-деформируемое состояние

Цель работы: Разработка алгоритма решения задач прочности, устойчивости и долговечности массивов горных пород с подземными сооружениями, а также разработка комплексного критерия предельного состояния упомянутых массивов.

Методы исследования: метод конечных элементов, асимптотический метод, модель деформированного твердого тела, сравнительный анализ.

Полученные результаты:

1. Разработан комплексный критерий предельного состояния массивов горных пород;

2. Разработан универсальный алгоритм численного решения задач прочности, устойчивости и долговечности задач подземной геомеханики;

3. Построены компьютерные модели породных массивов с подземными сооружениями и проведена оценка мгновенного и длительного предельного состояния данных массивов;

4. Решена задача о распространении инерционной волны на поверхности двухслойной геосреды. Выведено дисперсионное соотношение для рассматриваемой волны и проведена оценка предельного состояния поверхности сопряжения слоев.

Научная новизна заключается в разработке универсального алгоритма решения задач о прочности, устойчивости и долговечности породных массивов с подземными сооружениями, а также в разработке комплексного критерия предельного состояния массивов горных пород. Помимо этого, новизна заключается в разработке компьютерных моделей породных массивов соляных пород с подземными сооружениями, а также в выводах, касающихся формирования областей предельного состояния в массивах горных пород в окрестности подземных сооружений в мгновенной и длительной перспективах. Наконец, научная новизна состоит в выводе дисперсионного соотношения для инерционной волны при воздействии данной волны на двухслойную геосреду и оценке предельного состояния поверхности контакта слоёв.

Рекомендации по использованию и область применения: разработанные модели могут быть использованы в горнодобывающей промышленности для повышения точности расчётов подземных сооружений и вмещающих породных массивов на прочность, устойчивость и долговечность.

SUMMARY

Lapatsin Siarhei Nikolaevich

Limit state of the rock masses with underground structures

Keywords: limit state of rock masses, underground structures, complex limit state criterion, finite element method, stress-strain state

Purpose of work: Development of a universal algorithm for solving problems of strength, stability and durability for rock masses with underground structures and the development of a complex criterion for the limit state assessment of rock masses.

Research methods: finite element method, asymptotic method, deformable solid model, comparative analysis.

Obtained results:

1. Complex limit state criterion for rock masses is introduced;
2. A universal algorithm for numerical solution of strength, stability and durability problems in underground geomechanics is developed;
3. Computer-aided models of rock masses with underground structures were created. The assessment of the static and long-term limit state of these rock masses was carried out;
4. The problem of inertial wave propagation on the surface of a two-layered geomechanics has been solved. The dispersion relation for the considered wave is derived. The limit state of the contact surface is also evaluated.

Scientific novelty consists in the development of a universal algorithm for solving problems of strength, stability and durability of rock masses with underground structures, as well as in the development of the complex limit state criterion for rock masses. In addition, the scientific novelty lies in the development of computer-aided models of salt rock masses with underground structures, as well as in the conclusions regarding the formation of the limit state zones in the rock mass near underground structures in static and long-term perspective. Finally, the scientific novelty lies in the derivation of the dispersion relation for an inertial wave under influencing a two-layered geomechanics and in the assessment of the limit state of the contact surface between those layers.

Recommendations for using the results and scope of applications: Developed models can be used in the mining industry to increase the accuracy of strength, stability and durability calculations of underground structures and enclosing rock masses.

Научное издание

ЛОПАТИН
Сергей Николаевич

**ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД
С ПОДЗЕМНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Подписано в печать 28.02.2023. формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.

Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,17. Тираж 80. Заказ 117.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.