

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 539.3; 531.3; 004.942; 622.83

НИКОЛАЙЧИК
Михаил Александрович

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
«ШАХТНЫЙ СТВОЛ – МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД
В ОКРЕСТНОСТИ ШАХТНОГО СТВОЛА»**

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:	ЧИГАРЕВ Юрий Власович , доктор физико-математических наук, профессор; МОЖАРОВСКИЙ Валентин Васильевич , доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной математики и программирования УО «Гомельский государственный университет»
Оппонирующая организация	Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Защита состоится 17 ноября 2023 г. в 11⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.07 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013 г. Минск, пр. Независимости, 65, к. 1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря: +375 17 275 74 26; e-mail: Pavel.Shirvel@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «16» октября 2023 г.

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



П. И. Ширвель

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире практика изучения и оптимизации производственных объектов путем создания их механико-математических моделей является крайне распространенной и позволяет существенно повысить экономические показатели предприятия, а также обеспечить безопасность эксплуатации производственных объектов. В силу сложности отдельно стоит отметить процесс построения механико-математических моделей ответственных объектов предприятий горнодобывающего комплекса.

Среди особо ответственных геотехнических сооружений, требующих повышенного внимания, следует выделить шахтные стволы. Обеспечение прогнозируемой и безаварийной эксплуатации шахтных стволов является крайне важным не только для гарантированной безопасности работников горнодобывающего предприятия, осуществляющих «спуски-подъемы», но и для безопасной эксплуатации подземных сооружений и обеспечения стабильных экономических показателей горнодобывающего предприятия. Сложность моделирования и расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) шахтных стволов обусловлена большим количеством факторов, оказывающих влияние на их состояние и функционирование. Поэтому, выполнение исследований, связанных с решением задач адекватного и надежного расчета НДС, прогнозирования прочности и устойчивости элементов шахтного ствола, разработки современных технологий, позволяющих моделировать и исследовать состояние шахтных стволов и вмещающего массива горных пород представляет собой актуальную и важную задачу.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденных 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 Президента Республики Беларусь № 156 от 07.05.2020 г. (пункты 1, 3, 4).

Работа выполнялась в рамках следующих научно-технических программ и тем государственных 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», № ГР20161712;

– ГПНИ «Конвергенция–2025». Подпрограмма «Математические модели и метод». Задание 1.7.01 «Механико-математическое моделирование сложных природных и техногенных процессов и объектов на различных масштабных уровнях». 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», № ГР20211797;

– НИР в рамках совместных проектов БРФФИ-РФФИ «Исследование закономерностей экстремального упругопластического деформирования и разрушения с учетом эффектов конструктивной концентрации и контактных воздействий», № ГР20201371;

– НИР в рамках совместных проектов БРФФИ-НФЕНК «Высокопроизводительный метод дискретных элементов для гранулированных материалов произвольной формы и его применение в геотехнике холодных регионов и горнорудных районов», № ГР20221870;

– прикладная 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 2РУ лавой без закладки и с различными вариантами частичной закладки выработанного пространства, с учетом взаимного расположения существующих выработанных пространств на Втором и Третьем калийных горизонтах», № ГР20201371;

– прикладная НИР «Выполнить модельные исследования по оценке геомеханических и динамических процессов, протекающих в разломных и приразломных зонах исследуемой области, испытывающих влияние горных разработок», № ГР20171701;

– прикладная НИР «Выполнить модельные исследования геомеханического и геодинамического состояний породного массива на базе современных цифровых технологий с учетом результатов геодезического и сейсмологического мониторингов», № ГР20171698;

– прикладная НИР «Выполнить модельные исследования и выдать оценку и прогноз геомеханических и геодинамических процессов, протекающих в притектонических зонах Краснослободского глубинного разлома, включая зону перехода», № ГР20221718;

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

– прикладная 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»;

– прикладная НИР «Договор на выполнение научно-исследовательских работ по отдельным этапам работ объекта: «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»»;

– прикладная НИР «Выполнить модельные исследования напряженно-деформированного состояния бетонной крепи и тубингов на глубинах 184.5÷199.5

с учетом фактического состояния крепи на клетевом стволе на объекте: «Строительство горно-обогательного 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»;

– прикладная НИР «Провести исследования процесса сдвижения земной поверхности на участках ведения подземных горных работ методами численного моделирования и усовершенствовать правила построения предохранительных целиков под шахтные стволы с учетом последовательности и глубины отработки продуктивных пластов в условиях Старобинского месторождения», № ГР20220545;

– Грант Министерства образования Республики Беларусь «Исследование напряженно-деформируемого состояния конструктивных элементов шахтных стволов», № ГР20230705.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель исследования – разработка механико-математических и компьютерных моделей для изучения НДС элементов геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола» на различных этапах эксплуатации шахтного ствола. При этом шахтный ствол рассматривался как сложное техническое сооружение в совокупности различных ее элементов: бетонная и тубинговая крепи, система металлоконструкций, подъемный сосуд с направляющими роликами и системой подъемных канатов.

Задачи исследования:

1. Построение механико-математической модели движения шахтного подъемного сосуда с учетом его контактного взаимодействия с шахтными проводниками, позволяющей определять основные кинематические характеристики движущегося подъемного сосуда и величины его силового взаимодействия с металлоконструкциями шахтного ствола с использованием различных типов входных начальных параметров.

2. Моделирование НДС и исследование различных режимов контактного взаимодействия узла контакта подъемного сосуда с элементами системы металлоконструкций шахтного ствола:

– обоснование и адаптация механико-математической модели и построение на ее основе численной модели, позволяющей определять НДС в области контактного взаимодействия направляющего ролика с проводником;

– определение количества циклов контактного взаимодействия направляющих роликов с проводником до усталостного износа проводника в зависимости от различных конфигураций зоны контакта;

– разработка экспериментально-аналитической модели многоциклового контактного взаимодействия направляющего ролика с проводниками в условиях частичного фреттинга.

3. Разработка моделей и расчет НДС отдельных элементов геотехнической системы «шахтный ствол – околоствольный массив горных пород» при различных условиях эксплуатации рассматриваемой геотехнической системы:

– исследование влияния на НДС тубинговой крепи различных режимов подачи тампонажного раствора в околоствольное пространство массива горных пород;

– построение компьютерной модели шахтного подъемного комплекса, позволяющей определять НДС конструкций шахтного ствола при движении подъемного сосуда;

– разработка численной модели, позволяющей исследовать влияние отработки массива горных пород большими площадями на НДС геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола».

Объект исследования – геотехническая система «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола».

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов шахтных стволов и околоствольного массива горных пород.

Научная новизна

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в разработке новых оригинальных аналитических и численных моделей, построении расчетных методик, позволяющих решать задачи МДТТ, возникающие при исследовании НДС элементов ответственной геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола», в выполнении комплекса модельных и прикладных исследований, обобщение результатов которых позволило установить новые закономерности механического поведения, а так же формирования НДС в элементах рассматриваемой геотехнической системы при различных условиях эксплуатации.

Положения, выносимые на защиту

1. Аналитическая механико-математическая модель движения шахтного подъемного сосуда, учитывающая важные характеристики подъемной конструкции и позволяющая определять величины сил контактного взаимодействия подъемного сосуда с конструкциями шахтного ствола в зависимости от различных входных параметров.

2. Модели и алгоритмы численного моделирования НДС и исследования процессов взаимодействия контактной пары «направляющий ролик подъемного сосуда-шахтный проводник» при движении шахтного подъемного сосуда.

3. Модели и алгоритмы, прикладные методики расчета НДС элементов геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола» при различных условиях эксплуатации рассматриваемой геотехнической системы:

– численная модель, алгоритм и методика оценки НДС тубинговой крепи при проведении гидроизоляции околоствольного массива горных пород;

– конечно-элементная модель шахтного подъемного комплекса, позволяющая определять НДС элементов металлоконструкций шахтного ствола при движении подъемного сосуда;

– численная модель и алгоритм для исследования влияния отработки массива горных пород большими площадями на НДС геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола».

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в работе новые научные результаты получены автором лично. Часть результатов опубликована в соавторстве. Научный руководитель Журавков М. А. принимал участие в определении направлений исследований, постановке задач и обсуждении полученных результатов [1; 2; 4–15; 17–19; 21]; соавтор

Савчук В. П. принимал участие в постановке задач и обсуждении результатов расчетов [7; 11]; соавторам Богдановичу А. В., Махутову Н. А., Гаденину М. М., Резникову Д. О., Дембовскому М. А., Шемет Л. А., Юдиной О. Н., Хвесене С. С., Петровскому А. Б., Прушаку В. Я., Пузанову Д. А. принадлежит оценка достоверности полученных результатов в соответствии с моделями и алгоритмами, разработанными автором [7; 8; 10; 14; 17] соавтору Климовичу Н. М. принадлежит построение цифровой геометрической модели объектов, рассматриваемых в работах [4; 6; 14]; соавтору Маевскому П. С. принадлежит построение цифровой геометрической модели объекта, рассматриваемого в работах [2; 3; 13]; в работах [5; 18] изложены комплексные результаты, принадлежащие как автору, так и соавтору Лопатину С. Н. в рамках направлений их собственных исследований; соавторами Зеленко А. В. и Горбачем А. Н. предоставлены исходные данные для проведения расчетов, представленных в работе [9]. 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: 10-ой Международной научной конференции «Аналитические методы анализа и дифференциальных уравнений» (Минск, Беларусь, 13–17 сентября 2021 г.); XIV Международной научно-практической конференции «Украинская школа горной инженерии» (Бердянск, Украина, 7–11 сентября 2020 г.); Международных научно-практических конференциях «Теоретическая и прикладная механика» (Минск, Беларусь, 4–5 февраля 2021 г., 3–4 февраля 2022 г., 9–10 февраля 2023 г.); Международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении – 2020» (Минск, Беларусь, 17–18 сентября 2020 г.); International Workshop on Computational Mechanics of Granular Materials (Минск, Беларусь – Далянь, Китай, 19–20 мая 2022 г.); IX Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика – 2022» (Минск, Беларусь, 14–15 сентября 2022 г.); Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, Россия, 30 сентября – 4 октября 2019 г.); International forum-contest of students and young researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (Санкт-Петербург, Россия, 17–19 июня 2020 г., 31 мая – 6 июня 2021 г., 16–20 мая 2022 г.); XIII Белорусской математической конференции (Минск, Беларусь, 22–25 ноября 2021 г.); XII Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель, Беларусь, 24–25 ноября 2022 г.).

Полученные результаты докладывались также на семинарах кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета БГУ, а также на совместных исследовательских семинарах БГУ и Даляньского политехнического университета (Китай).

Результаты, представленные в диссертационной работе, использовались при выполнении 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 госу-

дарственного университета при написании курсовых и дипломных работ, а также при чтении специальных курсов для студентов и магистрантов специальности «Механика и математическое моделирование».

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 научной работе, в том числе 6 статьях в научных журналах в соответствии с пунктом 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республики Беларусь (общим объемом 2,5 авторских листа), 9 статьях в других научных изданиях, 1 статье в сборниках материалов конференций, 5 тезисах докладов конференций. Из 16 статей 3 статьи опубликованы в научных изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из терминов и определений, перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав основного текста, заключения, библиографического списка, 8 приложений. Полный объем диссертации составляет 163 страницы, из которых 111 содержат основной текст, включая 68 рисунков на 17 страницах, 9 таблиц на 3 страницах. Библиографический список содержит 128 наименований, включая собственные публикации соискателя ученой степени (на 12 страницах). Приложения занимают 40 страниц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе приведено описание элементов рассматриваемой геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола». Выполнен аналитический обзор литературы, посвященной моделированию динамики шахтного подъемного сосуда с учетом различных факторов, влияющих на его движение. Проведен анализ существующих на сегодняшний день методик оценки силового воздействия со стороны движущегося подъемного сосуда на конструктивные элементы шахтных стволов. Рассмотрены перспективные подходы к оценке НДС узла контакта направляющего ролика подъемного сосуда с шахтным проводником при эксплуатации шахтного комплекса. Представлен обзор актуальных научных работ, описывающих моделирование НДС конструкций шахтных стволов, а также околоствольного массива горных пород при различных эксплуатационных условиях.

Отмечено, что исследование геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола» как единого объекта механики деформируемого твердого тела (МДТТ) представляет собой отличительную особенность данного диссертационного исследования от работ, выполненных другими авторами. Показано, что моделирование обозначенной геотехнической системы требует решения большого набора задач, направленных на определение НДС, изучение прочности и долговечности отдельных составляющих элементов геотехнической системы. В свою очередь, для получения решения таких задач требуется корректная постановка соответствующих граничных задач и построение механико-математических моделей, достоверно описывающих рассматриваемые механические процессы. При разработке подходов и построении механико-математических

моделей к решению задач по изучению НДС отдельных составляющих элементов данной геотехнической системы учитывается, что выходные/входные данные одной задачи используются при рассмотрении других задач.

Во второй главе описан процесс построения механико-математической модели движения подъемного сосуда с учетом его контактного взаимодействия с направляющими проводниками. Отличительной особенностью построенной механико-математической модели для описания движения подъемного сосуда является учет таких факторов, как наличие четырех точек непрерывного контакта подъемного сосуда с направляющими проводниками; наличие головного и хвостового канатов; фактические физико-механические свойства полезного груза; условия разгона и торможения.

Для построения уравнений движения подъемного сосуда были введены следующие системы координат (рисунок 1): неподвижная глобальная система координат $OXYZ$; подвижная система координат $O_1X_1Y_1Z_1$, представляющую собой систему, построенную параллельным переносом системы $OXYZ$ по оси OZ на высоту центра масс подъемного сосуда; систему координат $CX'Y'Z'$ с осями, параллельными осям глобальной системы $OXYZ$ с началом координат в центре масс подъемного сосуда (т. е. система $CX'Y'Z'$ получается перемещением по осям O_1X_1 и O_1Y_1 системы $O_1X_1Y_1Z_1$); репер Кенига $Cxyz$, который строился вращением вокруг осей CX' , CY' , CZ' системы $CX'Y'Z'$. Стоит отметить, что в общем случае системы $O_1X_1Y_1Z_1$ и $CX'Y'Z'$ не совпадают, а система $CX'Y'Z'$ получена горизонтальным смещением системы $O_1X_1Y_1Z_1$.

При построении модельной задачи рассматривался контакт подъемного сосуда с проводником в четырех точках M_i , $i = \overline{1,4}$ контакта (рисунок 1). При этом узел контакта представляется состоящим из трех независимых пружин, контактирующих с тремя поверхностями проводника.

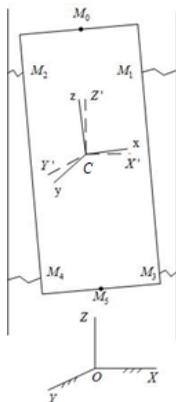


Рисунок 1 – Введенные системы координат и точки контакта подъемного сосуда с проводниками и канатами

Для получения в явном виде уравнений, описывающих движение подъемного сосуда массы M , кг под действием сил \overline{F}_i , приложенных в точках M_i , $i = \overline{0,5}$ в рамках рассматриваемой модельной задачи, использовалась теорема о движении центра масс твердого тела (подъемного сосуда) в системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ (1) и теорема об изменении кинетического момента \overline{K}'_c подъемного сосуда относительно репера Кенига (2). Уравнения, соответствующие данным теоремам, имеют вид:

$$M \cdot \overline{W}_c = \sum_{i=1}^4 \overline{F}_i, \quad (1)$$

$$\frac{d\overline{K}'_c}{dt} = \sum_{i=0}^5 \overline{CM}_i' \times \overline{F}_i, \quad (2)$$

где $\overline{W}_c = (\ddot{X}_c, \ddot{Y}_c, \ddot{Z}_c)$ – вектор ускорений центра масс подъемного сосуда, м/с²; \overline{F}_i , $i = \overline{1,4}$ – силы взаимодействия подъемного сосуда с проводником в точках контакта, Н; \overline{F}_0 , \overline{F}_5 – силы в точках подвеса M_0 и M_5 , Н; $\overline{K}'_c = (I_x \dot{\varphi}_x, I_y \dot{\varphi}_y, I_z \dot{\varphi}_z)$ – кинетический момент, м²·кг/с; I_x , I_y , I_z – моменты инерции, кг·м²; φ_x , φ_y , φ_z – углы поворота (между соответствующими осями систем S_{xyz} и $SX'Y'Z'$) подъемного сосуда, рад; \overline{CM}_i' – радиус-вектора между центром масс подъемного сосуда и точками контакта с проводником, м.

Вместе с подъемным сосудом поступательное движение со скоростью $v(t)$, м/с совершает часть уравнивающего каната от точки подвеса до нижней точки шахтного подъема. В данной точке расположена петля, соединяющая грузеный подъемный сосуд и подъемный сосуд-противовес. При этом принимаем длину данной части уравнивающего каната приближенно равной $s(t)$, м. Поэтому вертикальные компоненты сил \overline{F}_0 , \overline{F}_5 :

$$F_{0Z} = (M + \rho_y s(t))(\dot{v}(t) + g), \quad F_{5Z} = -\rho_y s(t)(\dot{v}(t) + g), \quad (3)$$

где ρ_y – линейная плотность каната, кг/м; g – ускорение свободного падения, м/с².

Для получения системы скалярных уравнений движения скипа проектируем векторное уравнение (1) на горизонтальные оси системы $OXYZ$, а уравнение (2) – на оси репера Кенига:

$$M \cdot \ddot{X}_c = c(F_x - 4X_c - 2(z_1 + z_3)\varphi_y), \quad (4)$$

$$M \cdot \ddot{Y}_c = 2c(F_y - 4Y_c + 2(z_1 + z_3)\varphi_x), \quad (5)$$

$$I_x \cdot \ddot{\varphi}_x = 2c(\Phi_x + 2(z_1 + z_3)Y_c - 2(z_1^2 + z_3^2)\varphi_x) - (z_0 F_{0Z} + z_5 F_{5Z})\varphi_x, \quad (6)$$

$$I_y \cdot \ddot{\varphi}_y = c(\Phi_y - 2(z_1 + z_3)X_c - 2(z_1^2 + z_3^2)\varphi_y) - (z_0 F_{0Z} + z_5 F_{5Z})\varphi_y, \quad (7)$$

$$I_z \cdot \ddot{\varphi}_z = 2cx_1(\Phi_z - 4x_1\varphi_z), \quad (8)$$

где $F_x, F_y, \Phi_x, \Phi_y, \Phi_z$ зависят от пройденного пути и профилировки проводников (их отклонений от вертикальной оси); z_1, z_3 – вертикальные координаты точек контакта с проводником, м; z_0, z_5 – вертикальные координаты точек контакта подъемного сосуда с головным и хвостовым канатами, м; x_1 – координата точки M_1 , м; c – жесткость пружин роликов узла контакта, Н/м.

Решение системы (4) – (8) было найдено с применением интегрального преобразования Лапласа. В результате оно имеет такой общий вид:

$$\begin{aligned}\varphi_z(t) &= \sqrt{\frac{c}{2I_z}} \cdot \int_0^t \Phi_z(\tau) \sin \omega_1(t-\tau) d\tau, \\ X_c(t) &= \int_0^t A_1(t-\tau) F_x(\tau) d\tau - \int_0^t A_2(t-\tau) \Phi_y(\tau) d\tau, \\ \varphi_y(t) &= \int_0^t A_3(t-\tau) \Phi_y(\tau) d\tau - \int_0^t A_2(t-\tau) F_x(\tau) d\tau, \\ Y_c(t) &= \int_0^t B_1(t-\tau) F_y(\tau) d\tau + \int_0^t B_2(t-\tau) \Phi_x(\tau) d\tau, \\ \varphi_x(t) &= \int_0^t B_3(t-\tau) \Phi_x(\tau) d\tau + \int_0^t B_2(t-\tau) F_y(\tau) d\tau,\end{aligned}\tag{9}$$

где функции $A_i(t)$, $B_i(t)$, $i = \overline{1,3}$ получаются путем обратного преобразования Лапласа.

Зависимость между скоростью движения подъемного сосуда $v(s)$ и крутящего момента $M_{кр}(s)$, Н·м, приложенного к барабану шахтной подъемной машины, считая канаты (головной и уравновешивающий) нерастяжимыми, были получены из теоремы об изменении кинетической энергии.

$$\frac{1}{2} M_{эф} d(v^2(s)) = \left(\frac{M_{кр}(s)}{r} + (m - M + l\rho_y - l\rho_\Gamma)g - 2g(\rho_y - \rho_\Gamma)s \right) ds, \tag{10}$$

где $M_{эф} = m + M + (\rho_y + \rho_\Gamma)l + I/r^2$, кг; m – масса незагруженного подъемного сосуда, кг; ρ_y, ρ_Γ – линейные плотности головного и уравновешивающего канатов, кг/м; I – момент инерции барабана, кг·м²; r – радиус барабана, м; l – длина канатов, м; $0 \leq s(t) \leq l$.

После деления равенства (11) на dt получено следующее уравнение:

$$M_{эф} \ddot{s}(t) = \frac{M_{кр}(t)}{r} + (m - M + l\rho_y - l\rho_\Gamma)g - 2g(\rho_y - \rho_\Gamma)s(t). \tag{11}$$

В общем случае $M_{кр}(t)$ получается из уравнения (11) по заданному закону $s(t)$ движения подъемного сосуда. Следовательно, для получения непрерывного изменения $M_{кр}(t)$ необходимо обеспечить непрерывность второй производной $\ddot{s}(t)$ на интервале $[0, t_0]$ и ее равенство нулю в крайних точках отрезка.

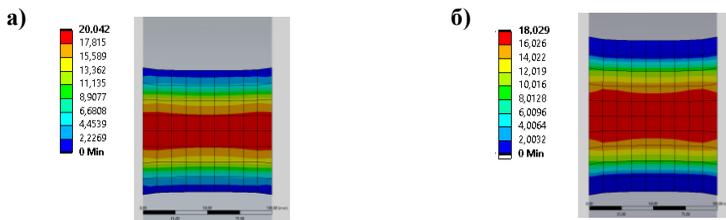
Таким образом, в главе получена аналитическая модель движения шахтного подъемного сосуда, учитывающая наличие головного и хвостового канатов, а также геометрические особенности металлоконструкций шахтных стволов.

На основании разработанной механико-математической модели предложены подходы, получены аналитические выражения и разработаны алгоритмы определения силового воздействия подъемного сосуда на направляющие проводники при его движении в шахтном стволе с использованием данных измерений, получаемых от различных источников: по результатам профилировки проводников (реальной формы их поверхности); данных от акселерометров (линейные ускорения в точках установки датчиков); данных от акселерометров и от гироскопов (углы поворота подъемного сосуда от первоначального его положения). Произведен сравнительный анализ рассматриваемых подходов и определены преимущества и недостатки каждого из них.

Выполнены прикладные расчеты для реальных условий рудников ОАО «Беларуськалий». Получены новые результаты по режимам движения грузовых подъемных сосудов в шахтных стволах рудников.

В третьей главе рассмотрена модельная задача исследования контактного взаимодействия направляющих роликов с проводником при движении подъемного сосуда. Задача о контактном взаимодействии ролика и проводника решалась на базе построенной компьютерной конечно-элементной модели изучаемого процесса. Базовая механико-математическая постановка задачи состоит в рассмотрении контактного взаимодействия упругого тора и упругопластической полуплоскости под действие нормальной нагрузки, приложенной к поверхности тора. При этом были приняты следующие допущения: материал контактирующих тел предполагается однородным изотропным, подчиняющимся закону линейно-упругого деформирования; кривизна поверхностей тел в зоне контакта влияет незначительно на НДС тел; граничные поверхности тел в области контакта заменяются эллиптическими параболоидами; точка контакта – не особая, область контакта – односвязная и ее граница представляет собой эллипс. Для верификации конечно-элементной модели использовались модельные задачи, численные решения которых сравнивались с модифицированными аналитическими решениями задачи Герца в случае упругопластического контакта.

Примеры численного решения модельных задач с картинами распределения контактного давления в зависимости от типа контакта между роликом и проводником приведены на рисунке. Анализ численного решения показал, что расхождения в размерах площадей пятна контакта, а также величинах максимального контактного давления согласно аналитическому решению и по результатам численного моделирования не превышают 10 %.



a – коэффициент трения 0,3; b – без трения
Рисунок 2 – Контактное давление, МПа

В построенной модели при расчете НДС контактной пары «ролик подъемного сосуда – проводник» используются величины сил контактного взаимодействия, полученные в результате решения задачи, рассмотренной в главе 2. Разработанный алгоритм решения модельных задач позволяет определять режимы движения подъемного сосуда, приводящие к возникновению остаточных деформаций в проводнике.

На основе разработанной конечно-элементной модели контактного взаимодействия роликов с проводником выполнено сравнение результатов усталостного анализа состояния проводника при различных типах контактного взаимодействия, различных моделях усталостного износа, а также количества роликов, взаимодействующих с проводником. При определении количества циклов до усталостного износа проводника рассмотрены различные методы корректировки среднего напряжения цикла, такие как метод Гудмана, метод Гербера, метод Содерберга.

В результате моделирования усталостного износа проводника при многоцикловом воздействии ролика подъемного сосуда получено количество циклов взаимодействия до усталостного разрушения проводника в зависимости от различных конфигураций контакта.

Также в главе 3 представлены результаты экспериментально-аналитических исследований механической контактной усталости силовой системы «ролик-вал», выполненных применительно к геотехнической системе «ролик подъемного сосуда – шахтный проводник». Протокол испытаний системы приведен на рисунке 3.

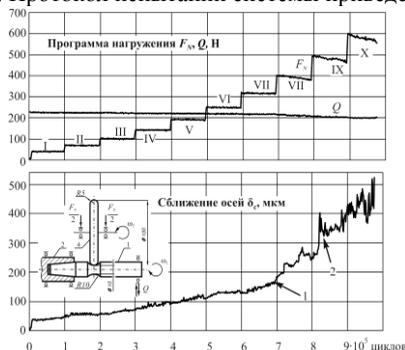


Рисунок 3 – Протокол испытаний системы ролик (сталь 25ХГТ) – вал (сталь 45) на контактно-механическую усталость

Совместно с выполнением экспериментальных исследований, решалась задача о многоцикловом контактном износе проводника под воздействием постоянной нормальной нагрузки. При этом учитывалось влияние частичного фреттинга на контактное взаимодействие тел (рисунок 4).

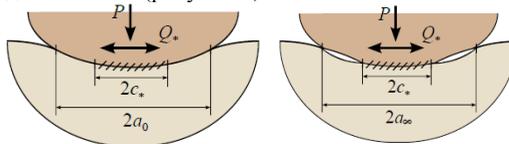


Рисунок 4 – Начальная и конечная конфигурации области контакта рассматриваемой модельной задачи

Аналитическое решение сформулированной модельной задачи строилось на основе подхода, предложенного Аргатовым И. И. в работе «A simple model for the wear accumulation in partial slip Hertzian contact».

Таким образом, на каждом этапе нагружения решалась задача контактного износа в условиях частичного фреттинга и определялись величины:

$$W(N) = W_\infty (1 - \exp(-N/N_1)); \quad a(N) = a_\infty - (a_\infty - a_0) \exp(-N/N_1);$$

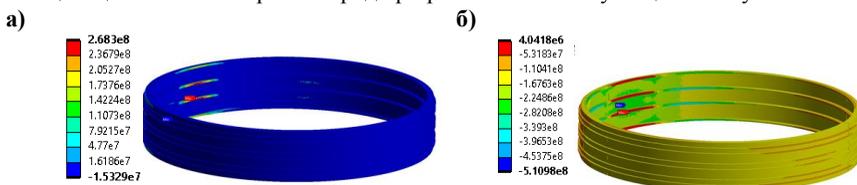
$$w(N) = \frac{a^2(N)}{6R} - \frac{x^2}{2R} + \frac{K_w \Delta x}{a(N)} PN + \frac{2P}{\pi E^*} \left(\frac{3}{2} - \ln 2 - I\left(\frac{x}{a(N)}\right) \right),$$

где $W(N)$, $a(N)$, $w(N)$ – величина износа, полуширина износа и глубина износа соответственно в зависимости от количества циклов

$$I(\xi) = 1 - \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1 - \xi^2} + \frac{\xi}{2} \ln \frac{1 - \xi}{1 + \xi}.$$

Анализ результатов моделирования показал, что величины усталостных деформаций, полученных экспериментально и вычисленных при проведении модельных расчетов, коррелируют между собой.

Глава четыре посвящена построению механико-математических моделей, позволяющих определять НДС элементов конструкций шахтного ствола и вмещающего массива горных пород при различных эксплуатационных условиях.

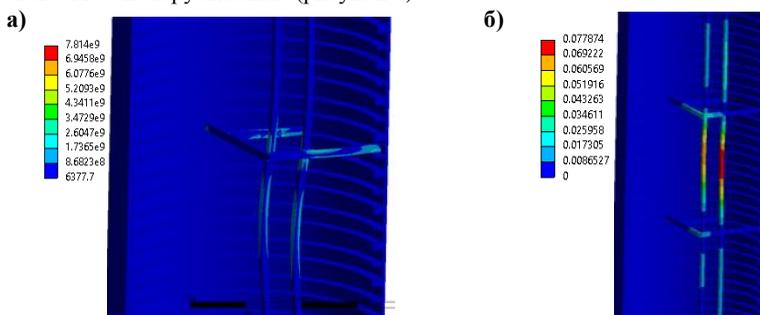


а – максимальные главные радиальные напряжения, Па; **б** – максимальные главные вертикальные напряжения, Па

Рисунок 5 – НДС тубингового кольца при действии равномерно распределенного давления величиной 2,1 МПа по большинству тубингов и воздействию давления 5 МПа на один из тубингов в кольце

Рассмотрена задача моделирования НДС тубинговой крепи при гидроизоляции шахтного ствола. Исследовано влияние на НДС тубинговой крепи различных режимов подачи тампонажного раствора и, как следствие, формирования давления на поверхности тубинговых колец. Определены величины перепада давлений между отдельными тубингами, которые могут приводить к их разрушению (рисунок 5).

Далее в главе представлены результаты конечно-элементного анализа силового воздействия со стороны движущегося подъемного сосуда на элементы металлоконструкций шахтного ствола. Конечно-элементная модель рассматриваемой системы была разработана в соответствии с проектными конструктивными решениями. Проведен конечно-элементный анализ и получены характеристики НДС элементов системы при движении подъемного сосуда. Величины нагрузок определялись с использованием ранее разработанной в главе 2 механико-математической модели, учитывающей информацию об актуальной профилировке проводников одного из стволов ОАО «Беларуськалий» (рисунок 6).



а – эквивалентные напряжения, Па; **б** – полные перемещения, м
Рисунок 6 – НДС конструкций ствола при движении подъемного сосуда

Помимо масштабной конечно-элементной модели конструкций шахтного ствола в главе описан разработанный алгоритм и построенный на его основе программный код МКЭ для определения НДС системы «проводники-расстрелы» с приложенными усилиями, имитирующими воздействие на проводники со стороны подъемного сосуда. Предложенный алгоритм позволяет в реальном масштабе времени оценить основные характеристики НДС проводников и расстрелов.

Изложены результаты исследований, связанных с изучением влияния отработки массива горных пород большими площадями на НДС геотехнической системы «околоствольный массив горных пород – шахтный ствол». Модельные исследования базировались на технологии расчета НДС массивов горных пород от глубин ведения очистных работ до дневной поверхности, основанной, в свою очередь, на одном варианте сопряженного численного метода, сочетающего использование метода конечных и метода дискретных элементов.

В результате обобщения выполненного комплекса модельных исследований установлены закономерности изменения НДС в околоствольном пространстве и в крепи ствола при приближении фронта очистных работ к шахтному стволу.

Так, например, установлено, что протяженность области «активного» влияния выработанного пространства больших размеров на геомеханическое состояние

околоствольного массива горных пород зависит от ширины и высоты очистной выработки, геологического строения породного массива, глубины ведения горных работ, а также порядка отработки (рисунок 7).

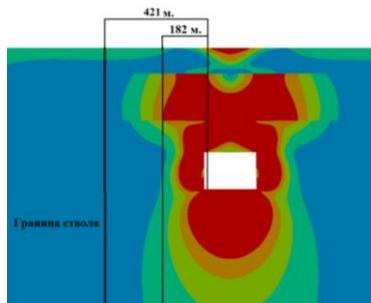


Рисунок 7 – Максимальная ширина области влияния отработанного пространства по критерию предельных деформаций

Показано, что размеры предохранительных целиков шахтных стволов, определенных на основе действующей инженерной методики, являются завышенными, особенно на больших глубинах ведения горных работ. Данные выводы существенным образом дополняют положения, используемые в настоящее время в регламентирующих документах по ведению горных работ в условиях Старобинского месторождения калийных солей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Построена аналитическая модель движения шахтного подъемного сосуда, учитывающая важные характеристики подъемной конструкции, позволяющая определять основные кинематические характеристики движущегося подъемного сосуда и величины его силового взаимодействия с металлоконструкциями шахтного ствола, с использованием различных типов входных начальных параметров (данные о профилировке проводников, информация, поступающая от системы мониторинга плавности движения, установленной на подъемном сосуде) [7; 9–11; 19].

На базе данной аналитической модели разработан программный модуль, позволяющий проводить модельные исследования. Выполнены прикладные исследования по изучению режимов движения подъемного скипа грузового шахтного ствола одного из рудоуправлений ОАО «Беларуськалий». В результате получены новые результаты по режимам движения скипов (грузовых подъемных сосудов) в шахтных стволах рудников [2; 9; 16].

2. Обоснованы механико-математические модели, разработаны численные модели и алгоритмы моделирования различных типов процесса контактного взаимодействия узла контакта подъемного сосуда (направляющих роликов) с элементами системы металлоконструкций шахтного ствола (проводником) при движении шахтного подъемного сосуда. Разработанные модели позволяют: определять вели-

чины силового воздействия со стороны подъемного сосуда, приводящие к возникновению остаточных деформаций проводников; рассчитывать количество циклов контактного взаимодействия до усталостного износа проводника в зависимости от различных конфигураций контакта [2; 3; 8; 13; 20; 21].

Выполнены прикладные исследования по изучению контактного взаимодействия конкретной конструкции направляющих роликов и проводников, эксплуатируемых в промышленных условиях рудников ОАО «Беларуськалий» [2; 3; 13; 20].

3. Построены модели и разработаны алгоритмы расчета и оценки НДС элементов геотехнической системы «шахтный ствол – околоствольный массив горных пород» при различных условиях эксплуатации рассматриваемой геотехнической системы:

– численная модель оценки НДС тюбинговой крепи при проведении гидроизоляции околоствольного массива горных пород;

На основе данной модели выполнены прикладные исследования различных режимов подачи гидроизоляционного раствора и установлены режимы, приводящие к потере прочности конструкций тюбинговой крепи шахтного ствола. Исследована устойчивость тюбинговой колонны в случае замены отдельных разрушенных тюбингов [1; 15].

– конечно-элементная модель шахтного подъемного комплекса, позволяющая определять НДС элементов металлоконструкций шахтного ствола при движении подъемного сосуда;

Выполнены прикладные исследования основных характеристик НДС металлоконструкций шахтного ствола при различных значениях силового воздействия на них со стороны движущегося подъемного сосуда [12; 15].

– численная модель для исследования влияния отработки массива горных пород большими площадями на НДС геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола».

Выполнен комплекс прикладных исследований, направленных на установление расстояний от границ ведения горных работ большими площадями на различных глубинах, обеспечивающих безопасное состояние шахтных стволов, согласно определенным критериям [4–6; 14; 17; 18].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для решения практических задач, связанных с расчетами НДС и прочности конструктивных элементов геотехнической системы «шахтный ствол – околоствольный массив горных пород» с целью повышения эксплуатационной долговечности и безопасности геотехнической системы.

Результаты и выводы диссертационных исследований могут быть использованы при выборе безопасных схем ведения горных работ в окрестности шахтных стволов при определении оптимальных размеров охранных целиков, что обеспечивает увеличение объемов извлечения полезного ископаемого.

Разработанные модели, алгоритмы, программные модули могут быть широко использованы при проектировании, строительстве и эксплуатации шахтных стволов, а также оптимизации параметров работы шахтных подъемных комплексов.

Представленные решения могут быть применены при выработке рекомендаций по оптимизации скоростного режима движения шахтных подъемных сосудов, что, в свою очередь, обеспечивает повышение экономических показателей и эффективность работы подъемного комплекса и горнодобывающего предприятия в целом.

Помимо этого, результаты исследований могут быть использованы при чтении основных и специальных курсов по механике деформируемых твердых тел, математическому и компьютерному моделированию, геомеханике, геотехнике.

Представленные в диссертационной работе результаты использовались при выполнении прикладных научно-исследовательских работ.



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. Николайчик М. А., Журавков М. А. Оценка напряженно-деформированного состояния тубинговой крепи при тампонировании околоствольного массива горных пород // Теоретическая и прикладная механика. – 2021. – Вып. 36. – С. 93–98.

2. Журавков М. А., Николайчик М. А., Маевский П. С. Контактная задача взаимодействия направляющего ролика с шахтным проводником // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 3 (56). – С. 83–89.

3. Николайчик М. А., Маевский П. С. Моделирование усталостного износа шахтного проводника при различных конфигурациях контактного взаимодействия с направляющими роликами // Теоретическая и прикладная механика. – 2022. – Вып. 37. – С. 110–117.

4. Журавков М. А., Николайчик М. А., Климович Н. М. Моделирование геомеханического состояния породного массива при обработке подземного пространства большими площадями // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 4 (61). – С. 97–104.

5. Журавков М., Лопатин С., Николайчик М. Численное моделирование оседания дневной поверхности вследствие влияния горных работ вблизи тектонических нарушений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10–1. – С. 163–172.

6. Журавков М. А., Николайчик М. А., Климович Н. М. Модифицированный алгоритм МКЭ с введением блочных упругих элементов моделирования геомеханического состояния подработанного массива горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 3. – С. 3–12.

Статьи в других научных изданиях

7. Журавков М. А., Хвесеня С. С., Савчук В. П., Николайчик М. А. Моделирование динамического воздействия подъемного сосуда на направляющие в стволе с использованием данных системы мониторинга плавности движения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6, № 2. – С. 97–102.

8. Журавков М. А., Богданович А. В., Шемет Л. А., Николайчик М. А., Дембовский И. Н., Махутов Н. А., Гаденин М. М., Резников Д. О., Юдина О. Н. Моделирование контактного взаимодействия между элементами подъемного шахтного комплекса при оценках безопасности // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. Научный информационный сборник. – 2021. – № 4. – С. 9–25.

9. Зеленко А. В., Горбач А. Н., Журавков М. А., Николайчик М. А. Непрерывный мониторинг безопасного движения подъемных сосудов в шахтных стволах // Горный Журнал Казахстана. – 2021. – № 8 (196). – С. 42–47.

10. Журавков М. А., Хвесеня С. С., Николайчик М. А. Определение силового взаимодействия скипа с направляющими по данным профилировки проводников // Актуальные вопросы машиноведения. – 2020. – Вып. 9. – С. 203–208.

11. Zhuravkov M. A., Savchuk V. P., Nikolaitchik M. A. Analytical model of skip motion taking into account influence of head and balancing ropes // Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics. – 2021. – № 2. – P. 94–102.

12. Журавков М. А., Николайчик М. А. Конечно-элементное моделирование взаимодействия подъемного сосуда с конструктивными элементами шахтного ствола // Горная Механика и Машиностроение. – 2021. – № 4. – С. 15–22.

13. Журавков М. А., Николайчик М. А., Маевский П. С. Исследование характеристик колебательной системы «направляющие ролики-шахтный проводник» // Актуальные вопросы машиноведения. – 2022. – № 11. – С. 191–195.

14. Zhuravkov M. A., Petrovskiy A. B., Prushak V. Y., Nikolaychik M. A., Puzanov D. A., Klimkovich N. M. Modeling of the geomechanical state of the rock massifs being undermined repeatedly // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series. – 2023. – Vol. 68, № 1. – P. 32–39.

15. Журавков М. А., Николайчик М. А. Построение цифровых двойников элементов рудника // Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 2. – С. 5–14.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

16. Nikolaitchik M. A. Determination of the skip force effect on guides in mine shaft [Electronic resource] // E3S Web of Conferences. Ukrainian School of Mining Engineering – 2020: XIV Internat. Research and Practice Conf., Berdyansk (Ukraine), 7–11 September 2020 г. / Ukrainian School of Mining Engineering. – 2020. – Vol. 201. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/61/e3sconf_usme2020_01017/e3sconf_usme2020_01017.html.

Тезисы докладов

17. Zhuravkov M., Hvesenya S., Nikolaitchik M. Assessment of sludge storage design strength // XVI International Forum-Contest of Students and Young researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources”, Saint-Petersburg, June 17–19, 2020 / Saint-Petersburg Mining University. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 344–345.

18. Zhuravkov M., Lapatsin S., Nikolaitchik M. Computer-aided modeling of the daylight surface subsidence under the influence of mining near tectonic irregularities // XVII International Forum-Contest of Students and Young researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources”, Saint-Petersburg, 31 May – 6 June, 2021 / Saint-Petersburg Mining University. – Saint-Petersburg, 2021. – P. 208–209.

19. Николайчик М. А., Журавков М. А. Математическое моделирование динамики шахтного подъемного сосуда // Аналитические методы анализа и дифференциальных уравнений: материалы 10-го международного семинара 13–17 сентября 2021 г., Минск, Беларусь / Институт математики НАН Беларуси. – Минск : ИВЦ Минфина, 2021. – С. 61–62.

20. Николайчик М. А. Моделирование контактного взаимодействия направляющего ролика с шахтным проводником // XIII Белорусская математическая конференция: тезисы докл. междуна. науч. конф., Минск, 22–25 ноября 2021 г. / Институт математики НАН Беларуси; сост. В.В. Лепин. – Минск : Белорусская наука, 2021. – Ч. 2. – С. 94.

21. Николайчик М. А., Журавков М. А. Математическое моделирование состояния ответственных элементов шахтного подъемного комплекса // Проблемы безопасности на транспорте: матер. XII Междунар. научн.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д.: в 2 ч., Гомель, 24–25 ноября 2022 г. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – Ч. 2. – С. 228–230.

РЭЗІЮМЭ

Нікалайчык Міхаіл Аляксандравіч

Напружана-дэфармаваны стан канструктыўных элементаў геатэхнічнай сістэмы «шахтны ствол – масіў горных парод у наваколлі шахтнага ствала»

Ключавыя словы: напружана-дэфармаваны стан, кантактнае ўзаемадзеянне, знос, шахтны ствол, шахтны пад'ёмны комплекс, масіў горных парод, метады канчатковых элементаў

Мэта даследавання: распрацоўка механіка-матэматычных і камп'ютарных мадэлей для вывучэння напружана-дэфармаванага стану элементаў геатэхнічнай сістэмы «шахтны ствол – масіў горных парод у наваколлі шахтнага ствала».

Метады даследавання: метады і падыходы механікі дэфармуемага цвердага цела, метады канчатковых элементаў, мадэлі кантактнага ўзаемадзеяння і зносу дэфармуемых цел, аналітыка-эксперыментальныя метады механікі дэфармуемага цвердага цела, параўнальны аналіз.

Атрыманыя вынікі:

1. Пабудавана аналітычная мадэль руху шахтнага пад'ёмнага посуду, якая дазваляе вызначаць велічыні сіл кантактнага ўзаемадзеяння пад'ёмнага посуду з канструкцыямі шахтнага ствала.

2. Распрацаваны мадэлі і алгарытмы лікавага мадэлявання напружана-дэфармаванага стану і даследавання ўзаемадзеяння кантактнай пары «ролік пад'ёмнага посуду – шахтны праваднік».

3. Атрыманы мадэлі і алгарытмы, прыкладныя метадыкі разліку напружана-дэфармаванага стану геатэхнічнай сістэмы «шахтны ствол – масіў горных парод у наваколлі шахтнага ствала».

Навуковая навізна атрыманых вынікаў заключаецца ў распрацоўцы новых аналітычных і лікавых мадэляў, якія дазваляюць вырашаць задачы механікі дэфармуемага цвердага цела, якія ўзнікаюць пры даследаванні напружана-дэфармаванага стану элементаў геатэхнічнай сістэмы «шахтны ствол – масіў горных парод у наваколлі шахтавага ствала», ва ўсталяванні новых заканамернасцяў фарміравання напружана стану разглядаанай геатэхнічнай сістэмы.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання: распрацаваныя мадэлі і алгарытмы могуць быць скарыстаны для рашэння практычных задач, злучаных з разлікамі на трываласць, даўгавечнасць і ўстойлівасць элементаў геатэхнічнай сістэмы «шахтны ствол – каляствольны масіў горных парод».

РЕЗЮМЕ

Николайчик Михаил Александрович

Напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола»

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, контактное взаимодействие, износ, шахтный ствол, шахтный подъемный комплекс, массив горных пород, метод конечных элементов

Цель работы: разработка механико-математических и компьютерных моделей для изучения напряженно-деформированного состояния элементов геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола».

Методы исследования: методы и подходы механики деформируемого твердого тела, метод конечных элементов, модели контактного взаимодействия и износа деформируемых тел, аналитико-экспериментальные методы механики деформируемого твердого тела, сравнительный анализ.

Полученные результаты:

1. Построена аналитическая модель движения шахтного подъемного сосуда, позволяющая определять величины сил контактного взаимодействия подъемного сосуда с конструкциями шахтного ствола.

2. Разработаны модели и алгоритмы численного моделирования напряженно-деформированного состояния и исследования взаимодействия контактной пары «ролик подъемного сосуда – шахтный проводник».

3. Получены модели и алгоритмы, прикладные методики расчета напряженно-деформированного состояния геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола».

Научная новизна полученных результатов заключается в разработке новых аналитических и численных моделей, позволяющих решать задачи механики деформируемого твердого тела, возникающие при исследовании напряженно-деформированного состояния элементов геотехнической системы «шахтный ствол – массив горных пород в окрестности шахтного ствола», в установлении новых закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния рассматриваемой геотехнической системы.

Рекомендации по использованию и область применения: разработанные модели и алгоритмы могут быть использованы для решения практических задач, связанных с расчетами на прочность, долговечность и устойчивость элементов геотехнической системы «шахтный ствол – околоствольный массив горных пород».

SUMMARY

Nikolaitchik Mikhail Aleksandrovich

Stress-strain state of the geotechnical system “mine shaft – rock mass in the vicinity of the mine shaft” structural elements

Keywords: stress-strain state, contact interaction, wear, mine shaft, mine lifting complex, rock mass, finite element method

Purpose of work: development of mechanical, mathematical and computer models to study the stress-strain state of geotechnical system “mine shaft – rock mass in the vicinity of the mine shaft” elements.

Research methods: deformable solid mechanics methods and approaches, finite element method, models of contact interaction and wear of deformable bodies, deformable solid mechanics analytical and experimental methods, comparative analysis.

Obtained results:

1. An analytical model of a mine lifting vessel motion has been developed. The model developed makes it possible to determine the magnitude of contact interaction forces of the lifting vessel with the mine shaft structures.

2. Models and algorithms for numerical simulation and study of contact pair “lifting vessel roller – mine conductor” interaction stress-strain state have been developed.

3. Models and algorithms, applied methods for calculating the stress-strain state of the geotechnical system “mine shaft – rock mass in the vicinity of the mine shaft” were obtained.

Scientific novelty of the obtained results lies in the development of new analytical and numerical models that make it possible to solve the deformable solid mechanics problems that arise when studying the stress-strain state of the geotechnical system “mine shaft – rock mass in the vicinity of the mine shaft” elements. Also the scientific novelty lies in the new patterns establishment of geotechnical system under consideration stress-strain state formation.

Recommendations for use and area of application: the developed models and algorithms can be used to solve practical problems related to the strength, durability and stability calculations of geotechnical system “mine shaft – near-shaft rock mass” elements.

Научное издание

НИКОЛАЙЧИК

Михаил Александрович

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
«ШАХТНЫЙ СТВОЛ – МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД
В ОКРЕСТНОСТИ ШАХТНОГО СТВОЛА»**

Автореферат диссертации

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

Подписано в печать 16.10.2023. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.

Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,31. Тираж 75. Заказ 850.

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.