

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ОНИЩЕНКО СЕРГІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ



УДК 622.673:539.4

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ГОЛОВНИХ ГУМОТРОСОВИХ
КАНАТІВ ШАХТНИХ ПІДЙОМНИХ УСТАНОВОК
З УРАХУВАННЯМ ПОРУШЕНОЇ ГЕОМЕТРІЇ СТОВБУРІВ

05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Основний обсяг видобутку руд чорних і кольорових металів здійснюється за рахунок розробки родовищ, що залягають на великих глибинах. При цьому, у більшості діючих стовбурів вугільних і рудних шахт України через складні гірничо-геологічні та технічні умови, відбувається порушення вертикальності осей просторового характеру. Як наслідок – геометричні параметри армування стовбурів шахт, у т.ч. після аварій, мають відхилення від проектних значень. Переміщення посудини у підйомній системі з порушеною геометрією стовбура суттєво впливає на розподіл зусиль між тяговими елементами (тросами) плоского гумотросового каната, відповідно на його працездатність та безпеку експлуатації шахтної підйомної установки.

У практиці експлуатації гумотросових канатів можливі розриви їхніх тягових елементів, що впливають на розподіл сил у тяговому органі, відповідно, на його міцність, тягову здатність, реальний запас міцності. Норми експлуатації головних гумотросових канатів на шахтних підйомних установках, які б регламентувалися правилами безпеки, відсутні. В окремих випадках, особливо в аварійних, єдино можливий терміновий підйом може бути здійснений канатом з ушкодженими тросами. Тому допустимість такого підйому має бути обґрунтована й максимально повно враховувати різноманітні експлуатаційні чинники, що впливають на напружено-деформований стан (НДС) каната. Основними з них є конструкція та технічний стан підйомної машини, напрямних посудини, характер взаємодії плоского гумотросового каната та барабанів (шківів) машини, наявність розривів тросів, що мають бути враховані в процесі проектування та експлуатації шахтної підйомної машини з плоскими гумотросовими тяговими органами.

Тому встановлення закономірностей формування й перерозподілу напружено-деформованого стану головних гумотросових канатів при їх взаємодії з механічною системою шахтної підйомної установки, з урахуванням впливу порушеної геометрії стовбурів, конструктивних і експлуатаційних параметрів шахтних підйомних установок та можливих розривів тросової основи канатів для обґрунтування методу їх розрахунку, є **актуальним науковим завданням** дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є складовою наукових досліджень кафедри будівельної, теоретичної та прикладної механіки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» відповідно до плану держбюджетних робіт Міністерства освіти і науки України на період з 2015 р. по 2020 р., в яких автор брав участь як виконавець: «Наукове обґрунтування технічних рішень із забезпечення енергоефективності та експлуатаційної безпеки сучасних шахтних підйомно-транспортних комплексів» (ГП-477, № ДР 0115U002298); «Теоретико-прикладні основи створення енергоефективних та екологічно безпечних систем глибоководного підйому корисних копалин» (ГП-485, № ДР 0116U004622); «Науково-прикладні засади створення сучасних підйомно-транспортних установок з гумотросовими тяговими органами» (ГП-495, № ДР 0117U001133); «Науково-прикладні засади створення та інженерної підтримки експлуатації

підйомно-транспортних машин з плоскими тягово-несучими органами із застосуванням CALS-технологій» (ГП-498, № ДР 0118U003188); «Науково-прикладні засади створення підйомно-транспортних установок з композитними тяговими органами на основі метамодельовання складних багатозв'язних дискретно-континуальних механічних систем» (ГП-506, № ДР 0120U10214).

Мета роботи полягає у науковому обґрунтуванні методу розрахунку головних гумотросових канатів шахтних підйомних установок на основі встановлених закономірностей зміни напружено-деформованого стану канатів за умов їх взаємодії з механічною системою шахтної підйомної установки з урахуванням сумісного впливу пошкоджень тягових елементів, конструктивних і експлуатаційних параметрів підйомної машини та геометричних відхилень армування стовбурів від проектних значень для забезпечення працездатності канатів та підвищення рівня ефективності використання й експлуатаційної безпеки сучасних шахтних підйомних комплексів.

Завдання, які необхідно вирішити для досягнення мети, полягають у наступному:

- виконати аналіз умов експлуатації існуючих шахтних підйомних установок та встановити можливі шляхи підвищення рівня ефективності їх використання та експлуатаційної безпеки, збільшення термінів експлуатації головних канатів;

- дослідити експлуатаційні параметри системи «підйомна машина – канати – підйомна посудина – армування» для діючих шахтних стовбурів з порушеною геометрією;

- встановити вплив механічної системи підйомної установки на навантаження в головному гумотросовому канаті та елементах підйомної машини;

- дослідити вплив зміщення центру маси посудини в площині каната на його тягову здатність, як складової механічної системи «посудина – армування»;

- дослідити залежність тягової здатності каната, що здійснює підйом посудини зі зміщеним центром маси, від розривів тросів та встановити вплив розриву на зміщення центру маси посудини відносно приводного барабана підйомної машини;

- дослідити напружено-деформований стан каната під впливом комплексу чинників, включно таких, як конструкція та технічний стан підйомної машини, напрямних посудини, характер взаємодії плоского гумотросового каната та барабанів (шківів) машини тощо;

- розробити методику розрахунку гумотросового каната з урахуванням експлуатаційних параметрів підйомної машини, можливого руйнування тросів та зміщення посудини, як складової системи «посудина – армування» для діючих шахтних стовбурів з порушеною геометрією.

Об'єкт дослідження – процеси формування, перерозподілу та зміни напружено-деформованого стану головних гумотросових канатів, що виникають при експлуатації підйомної установки у шахтних стовбурах з порушеною геометрією та їх вплив на конструкційні й експлуатаційні параметри канатів.

Предмет дослідження – взаємозв'язок конструкційних і експлуатаційних параметрів головних гумотросових канатів і параметрів механічної системи пі-

дійомної установки за умов її експлуатації в шахтних стовбурах з порушеною геометрією.

Ідея роботи полягає у використанні встановлених залежностей зміни напружено-деформованого стану головного гумотросового каната при його експлуатації на підйомній машині у шахтному стовбурі з порушеною геометрією та обґрунтуванні методу розрахунку головних гумотросових канатів підйомних установок нового технічного рівня для забезпечення працездатності канатів, підвищення рівня ефективності використання й експлуатаційної безпеки сучасних шахтних підйомних комплексів.

Методи досліджень. У роботі використовувались теоретичні й експериментальні методи дослідження. Поставлені завдання вирішувались шляхом: узагальнення й аналізу результатів попередніх досліджень за літературними та патентними джерелами; виконання комплексу досліджень із застосуванням апробованих аналітичних та чисельних методів розрахунку напружено-деформованого стану гнучких композитних тягових органів. У теоретичних дослідженнях використовувалися положення і методи теорії пружності та механіки композитних матеріалів, а при проведенні обчислювального експерименту – апробовані методи твердотільного тривимірного комп'ютерного моделювання з використанням скінченно-елементного аналізу в середовищі SolidWorks/COSMOSWorks.

Наукові положення, що захищаються:

1) За одноканатною схемою підвішування посудини зростання зусиль, зумовлених поворотом посудини в горизонтальній площині, пропорційне квадрату добутку кута повороту посудини і кроку укладання тросів у канаті та обернено пропорційне квадрату відстані від горизонтальної площини розташування осі обертання приводного барабана до площини підвішування посудини.

2) При багатоканатному підвішуванні посудини зростання внутрішніх сил розтягу найбільш навантажених тросів, зумовлених поворотом посудини в горизонтальній площині й відхиленнями напрямних від проектного розташування, пропорційне квадрату кроку розташування канатів та квадрату відстані осі симетрії тросів крайніх канатів від осі симетрії розташування тросів в усіх канатах системи підвішування посудини і обернено пропорційне квадрату відстані від осі барабана підйомної машини до перерізу підвішування посудини.

Наукова новизна отриманих результатів:

1) Вперше розроблено математичні моделі для визначення напружено-деформованого стану головних гумотросових канатів за умов їх експлуатації на підйомних установках у шахтних стовбурах з порушеною геометрією.

2) Вперше встановлено аналітичні залежності для визначення напружено-деформованого стану плоского головного гумотросового каната шахтної підйомної установки з урахуванням відхилень геометричних параметрів армування стовбура від проектних значень. Встановлено залежності напружено-деформованого стану головного гумотросового каната внаслідок зміщення та повороту посудини для одноканатної і багатоканатної схеми її підвішування з урахуванням впливу порушеної геометрії шахтних стовбурів та просторового деформування плоского каната.

3) Вперше встановлено напружено-деформований стан головного гумотросового каната при взаємодії з механічною системою «підйомна посудина – армування» у шахтних стовбурах з порушеною геометрією. Отримані в загальному вигляді у замкненій формі аналітичні вирази дозволяють визначати додаткові внутрішні сили опору тросів каната та максимальні значення коефіцієнтів концентрації напружень у тросах каната, що знаходиться під впливом зовнішніх чинників, у разі розриву одного з тросів. Для визначення величини втрати тягової здатності плоского гумотросового каната побудовано аналітичне рішення за умов сумісного впливу пошкоджень його тягових елементів, конструктивних параметрів підйомної машини та відхилень армування стовбура від проектних значень.

4) Вперше обґрунтовано метод розрахунку напружено-деформованого стану плоского головного гумотросового каната шахтної підйомної машини з урахуванням впливу комплексу зовнішніх чинників, включно таких, як конструкція та технічний стан підйомної машини, напрямних посудини, характер взаємодії плоского гумотросового каната та барабанів (шківів) машини, наявність розривів тросів.

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів підтверджується використанням апробованих методів досліджень, задовільною збіжністю розрахункових і експериментальних даних. Отримані результати можна вважати достатньо достовірними, оскільки вони отримані шляхом аналітичного розв'язання моделі напружено-деформованого стану каната, побудованої на основі лінійної теорії пружності, механіки шаруватих композитних матеріалів з використанням загально прийнятих припущень. Відхилення максимальних розрахункових напружень в гумовій оболонці каната відрізняються від експериментально визначеної у попередніх дослідженнях границі міцності не більш ніж на 20%.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей формування й перерозподілу напружено-деформованого стану головного гумотросового каната на основі визначення механіки його просторового деформування та взаємодії з елементами підйомної установки при експлуатації в реальних складних гірничо-технічних умовах шахтних стовбурів з порушеною геометрією.

Практичне значення роботи полягає в наступному:

1) Розроблено алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану плоского гумотросового каната, що надає можливість встановлювати стан каната під впливом комплексу чинників, включно таких, як конструкція та технічний стан підйомної машини, напрямних посудини, характер взаємодії плоского гумотросового каната та барабанів (шківів) машини, наявність розривів тросів тощо.

2) Розроблено рекомендації з визначення напружено-деформованого стану плоского гумотросового каната підйомної машини у разі локального пошкодження тягового осердя та особливостей технічного стану підйомного комплексу, включно й відхилень напрямних посудини.

3) Розроблено методику розрахунку плоского головного гумотросового каната з урахуванням впливу його позацентрового розтягнення та пошкодження тросової основи.

4) Обґрунтовано технічні вимоги до конструкції плоских гумотросових канатів та норми їх відбраковування для випадку використання на шахтних підйомних установках у стовбурах з порушеною геометрією.

Реалізація результатів роботи. Методику визначення напружено-деформованого стану головного гумотросового каната з урахуванням умов його приєднання до конструктивних елементів шахтної підйомної установки та методику визначення допустимих відхилень посудини в стовбурі шахти введено в ІТМ ім. М.С. Полякова НАН України (акт впровадження від 22.12.2020 р.) та ДП «Дніпродіпрошахт» (акт впровадження від 30.12.2020 р.). Результати досліджень використано в навчальному процесі при підготовці фахівців у рамках дисциплін, що читаються на кафедрах механіко-машинобудівного факультету НТУ «Дніпровська політехніка».

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно обґрунтована мета та ідея роботи, визначено завдання дослідження і наукові положення, вибрано методи дослідження, проведено математичне моделювання та розрахунково-теоретичні дослідження, обробка, аналіз і узагальнення отриманих результатів; здобувачем зроблено висновки і розроблені рекомендації для практичного застосування отриманих науково-технічних результатів. Текст дисертації і автореферат написані автором особисто.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були оприлюднені на Міжнародній науково-практичній конференції «Енергозбереження та енергоефективність» (Дніпро, 2017, 2019), Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-хімічні геотехнології» (Дніпро, 2018), Міжнародній конференції «Виробництво та експлуатація сталевих канатів – проблеми та рішення» (Одеса, МАДСК, 2019), Міжнародній конференції «Essays of Mining Science and Practice» (Дніпро, 2019), Міжнародній науково-практичній конференції «Сатпаєвські читання» (Казахстан, Алмати, 2020), Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку територій: теорія і практика» (Харків, 2020).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 друкованих робіт, з яких 8 статей у фахових виданнях, у тому числі 2 статті у виданнях, що входять до наукометричної бази даних Scopus, та 6 публікацій у збірниках матеріалів і тез доповідей на наукових конференціях, у тому числі 1 публікація у збірнику міжнародних конференцій, що входить до наукометричної бази даних Scopus.

Структура і обсяг роботи. Повний обсяг дисертації становить 170 сторінок друкованого тексту і містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та два додатки. Основну частину викладено на 151 сторінках. Список використаних джерел складається зі 124 найменувань і займає 14 сторінок. Дисертація містить 76 рисунків і 6 таблиць, з них 10 рисунків і 2 таблиці повністю займають 7 сторінок. Два додатки займають 5 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання наукових досліджень, зазначено ступінь наукової новизни одержаних

результатів, розкрито їх практичну значущість. Наведено результати реалізації та апробації результатів досліджень.

У розділі 1 виконано аналіз науково-технічної інформації з теми роботи.

На теперішній час на всіх гірничодобувних підприємствах України та за кордоном застосовуються підйомні установки попереднього покоління зі сталевими головними канатами. На сучасному етапі з'явилася технічна можливість синтезувати підйомну систему нового покоління, яка за рахунок меншої жорсткості на згин гумотросових канатів, у порівнянні з традиційними сталевими канатами, може бути обладнана приводними барабанами (шківками) в декілька раз меншого діаметра, має більш досконалі техніко-економічні показники, надійність, довговічність, продуктивність та експлуатаційну безпеку в робочих і екстремальних режимах. Але теоретичні основи розрахунку і експлуатації таких систем для шахтних стовбурів з порушеною геометрією, відсутні.

Над питаннями розвитку механіки еластомерних конструкцій гірничих машин, створення теоретичних і експериментальних методів аналізу напружено-деформованого стану гумотросових стрічок та канатів працювали відомі вчені В.І. Дирда, Л.В. Колосов, В.А. Ропай, І.В. Бельмас, К.С. Заболотний, А. Carbogno, Д.Л. Колосов та ін. Об'єднує роботи зазначених авторів те, що всі вони спрямовані на вирішення задач, пов'язаних із взаємодією посудини, центр маси якої лежить на осі каната, але не враховують зміщення, викликаного випадковим формуванням матеріалу в посудині та її переміщенням в системі «посудина – армування», включно і у випадках відновлення стовбурів після аварій. Вказане суттєво впливає на розподіл зусиль між тросами каната, відповідно на його міцність та безпеку експлуатації шахтного підйомного комплексу.

Таким чином, встановлення механіки просторового деформування та напружено-деформованого стану головного гумотросового каната при взаємодії з елементами шахтної підйомної установки за умов її експлуатації у стовбурах з порушеною геометрією для забезпечення безаварійної експлуатації шахтних підйомних комплексів, є актуальним завданням дисертаційного дослідження.

За результатами проведеного в розділі 1 аналізу сформульовано наукову задачу, мету і завдання дослідження.

У розділі 2 виконано дослідження впливу форми поперечного перерізу тросів гумотросового каната на опір стисканню та зсуву гумової матриці. Встановлення залежності жорсткості шару гуми, розташованої між тросами, від форми їх поперечного перерізу, кроку їх розташування та механізму їх взаємодії з шаром гуми дозволяють встановити одну з особливостей умов деформування гумотросового каната при його експлуатації на підйомній машині.

Взаємодія тросів та гумової матриці відповідає умовам деформування шаруватого композитного матеріалу з м'якими та жорсткими шарами. Напружено-деформований стан таких конструкцій залежить від жорсткості гумових прошарків на стискання та зсув. Симетричність побудови перерізів тросів дозволяє для кожного з випадків розглядати лише четверту частину гумового прошарку (рис. 1).

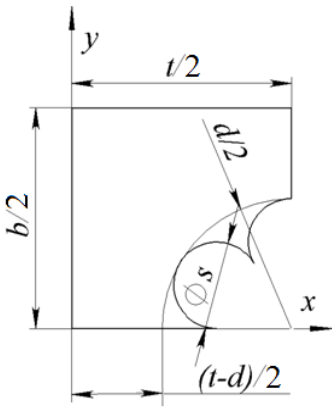


Рисунок 1 – Форма гумового елемента

Відповідно до схем перерізів гумового прошарку за умов виконання граничних умов, визначали жорсткість для каната з тросом одиничного розрахункового діаметра ($d = 1$) для різних значень товщини каната, кроку розташування тросів, віднесених до діаметра. При цьому товщину каната та крок укладання тросів, приймали відповідно в межах $1,05d \leq b \leq 1,95d$ та $1,05d \leq t \leq 1,95d$ з кроком $0,05d$. Для вказаних параметрів каната визначали силу стискування P_{cm} , що призводила до одиничного взаємного зміщення тросів каната. Розв'язання задачі здійснювалось чисельним методом.

Приклад отриманих результатів наведено на рис. 2. Графіки побудовані у координатних осях, що відповідають величинам параметрів t та b , зменшеним на $1,05d$.

Встановлено, що жорсткість гумового прошарку, розташованого між тросами, на стискування в площині каната та зсув вздовж тросів, залежить від геометричних параметрів каната: кроку укладання тросів та товщини каната, віднесених до діаметрів тросів. При цьому на значення жорсткості на стискування та зсув більше впливає крок укладання тросів. Зростання товщини каната менш суттєве – воно зумовлює практично лінійне зростання вказаних жорсткостей. Суттєва зміна (зменшення) жорсткості на стискування гумового прошарку має місце при збільшенні кроку укладання від мінімального ($1,05d$) до двох діаметрів троса, а при подальшому зростанні кроку жорсткість залишається практично незмінною.

Для випадку різних кутів повороту перерізів тросів встановлено мінімальне та максимальне зусилля притискування для переміщення на величину, що дорівнює радіусу троса. Встановлено значення відношень інтенсивностей розподілених максимальних та мінімальних сил тиску тросів до інтенсивностей сил тиску, отриманих експериментально при випробовуваннях на руйнування (продавлювання тросами гумової оболонки). Ці відношення становлять $0,892$ та $1,014$ від усередненого значення модуля зсуву при робочих навантаженнях та при руйнуванні гумової оболонки каната, що свідчить про достатній рівень достовірності отриманих розрахункових результатів.

У гумотросових канатах для врівноваження моментів скручування тросів використовують троси з протилежними напрямками скручування стренг. Скручування тросів у процесі навантаження каната призводить до повороту перерізу поверхні взаємодії тросів та еластичної оболонки. Для встановлення виникаючих при такому деформуванні напружень, побудовано твердотільну модель регулярно повторюваного елемента еластичної оболонки гумотросового каната з використанням засобів САПР. Матеріал моделі – гума, троси розташовані в середній площині оболонки. Переміщення поверхонь задано відповідно до описаних вище умов. Кільцеві переміщення задано рівними $0,1$ рад, діаметр троса 10 мм. Розв'язання задачі здійснювалось чисельним методом. На рис. 3 наведе-

но приклад розподілу нормальних напружень σ_x в регулярно повторюваному елементі еластичної оболонки каната.

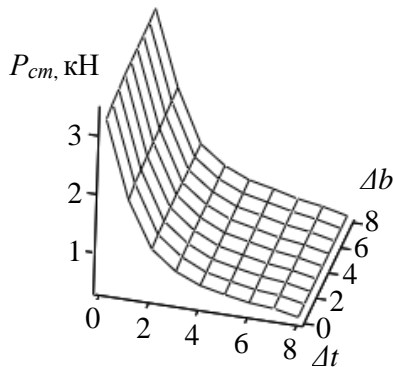


Рисунок 2 – Значення сили стискування P_{cm} для каната за різних значень параметрів Δt та Δb при розташуванні стренг каната відповідно до рис. 1

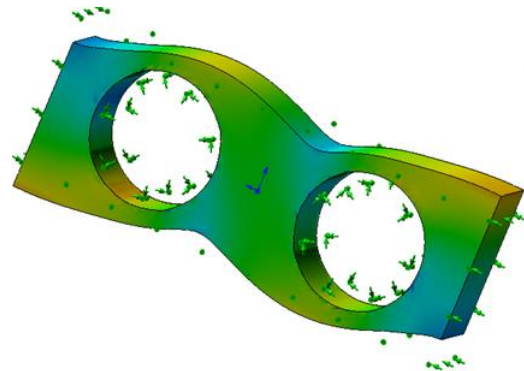


Рисунок 3 – Розподіл нормальних напружень σ_x в регулярно повторюваному елементі еластичної оболонки гумотросового каната (рис. 1) для різних значень параметрів Δt та Δb

Отриманий НДС регулярно повторюваного елемента еластичної оболонки гумотросового каната відповідає механізму його деформування. Жорсткість гумового прошарку на зсув впливає на зміну розподілу сил та переміщень тросів каната. Ці зміни відбуваються за довжиною каната. Однакові переміщення тросів та розподіли сил їх натягу в двох типах каната з однаковими механічними та геометричними параметрами, окрім жорсткості на зсув, відрізняються поміж собою пропорційно відношенню кореня квадратного із жорсткості гумового прошарку на зсув. Перевищення жорсткості, визначеної без урахування форми гуми, розташованої поміж тросами, може призводити до чотирьохкратної похибки у визначенні взаємного впливу розривів тросів, локальних змін їх навантаження тощо.

Отримані в розділі 2 математичні моделі взаємодії тягових елементів плоского гумотросового каната з урахуванням будови скручених зі стренг тросів, геометричних параметрів каната, механічних характеристик матеріалу еластичної оболонки та її форми дозволяють оцінювати вплив вказаних параметрів на працездатність головного гумотросового каната шахтної підйомної установки.

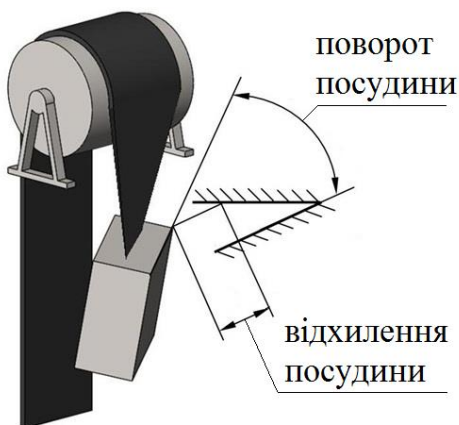


Рисунок 4 – Схема зміщення посудини відносно проектного розташування

У розділі 3 виконано дослідження напружено-деформованого стану підйомного гумотросового каната внаслідок зміщення та повороту посудини в шахтному стовбурі з порушеною геометрією.

Поворот посудини навколо власної осі (рис. 4) разом з приєднаним канатом пов'язаний з просторовим його деформуванням та нерівномірним розподілом сил розтягу тросів за шириною каната. Переміщення кінців тросів у перерізі приєднання до посудини пропорційні абсолютному значенню номеру троса i , кроку їх розташування t та куту φ повороту перерізу каната

$$r_i = (|i| - 0,5) t \varphi.$$

Відносні подовження тросів вздовж осі x , що набули гвинтової форми, на ділянці каната довжиною L

$$\varepsilon_i = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^{M-1} D_m \cos(\mu_m (i - 0,5)),$$

$$\text{де } D_m = \sum_{k=1}^M \left(\sqrt{\left(\frac{\left(k - \frac{M}{2}\right) t \varphi}{L} \right)^2 + 1} - 1 \right) \cos(\mu_m (k - 0,5)); \quad \mu_m = \frac{\pi m}{M}; \quad M - \text{кількість}$$

тросів у канаті; $i = \pm 1, \dots, M/2$.

Розв'язок системи рівноваги тросів у гумотросовому канаті в переміщеннях знаходили у формі

$$u_i = \sum_{m=1}^{M-1} \left(A_m e^{\beta_m x} + B_m e^{-\beta_m x} \right) \cos(\mu_m (i - 0,5)) + \frac{P x}{M E F} + c,$$

де A_m, B_m, c – сталі інтегрування; $\beta_m = \sqrt{2 \frac{G d k_G}{(t-d) E F} [1 - \cos(\mu_m)]}$; $E F$ – приведена жорсткість тросів на розтягнення; G – модуль пружності гуми на зсув; k_G – коефіцієнт впливу форми гуми, розташованої між тросами на жорсткість її зсуву; P – сила натягу каната.

Сили розтягу тросів

$$p_i = E F \sum_{m=1}^{M-1} \left[\left(A_m e^{\beta_m x} - B_m e^{-\beta_m x} \right) \beta_m + D_m \right] \cos(\mu_m (i - 0,5)) + \frac{P}{M}. \quad (1)$$

Допустимі кути повороту посудини з умови міцності

$$\varphi \leq \frac{L}{t} \sqrt{\frac{2 \left([P] - \frac{P}{M} \right)}{E F \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{k=1}^M \left(k - \frac{M}{2} \right)^2 \cos(\mu_m (k - 0,5)) \cos(\mu_m (M - 0,5))}}. \quad (2)$$

Аналіз отриманих виразів (1–2) дозволив сформулювати **перше наукове положення**.

Відповідно до отриманих умов були визначені залежності нерівностей. Визначали допустимі кути повороту для канатів, що мають 4, 6, 8, 10, 12 тросів при різних значеннях кроку їх укладання в канатах. Приклад результатів розрахунків наведено на рис. 5.

Побудовані графіки (рис. 5) показують, що збільшення довжини каната призводить до практично лінійного зростання допустимих кутів повороту посудини. Відношення допустимого кута повороту до робочого навантаження каната за умови попередження виникнення в тросах сил стискання, зменшується зі

зростанням кількості тросів в канаті та залежить від кроку укладання тросів. Для оцінки впливу обох вказаних чинників побудовано поверхні, що описують розподіли допустимих кутів повороту посудини за її відстані від барабана у 200 м. Приклад поверхні показано на рис. 6.

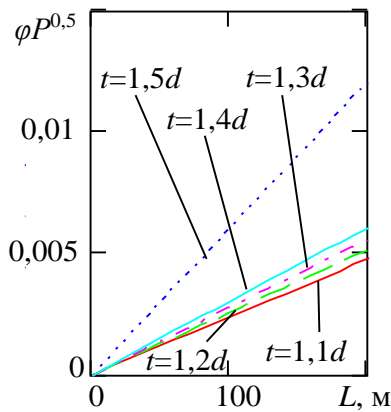


Рисунок 5 – Залежність допустимого кута повороту посудини в її напрямних з умови відсутності стиснутих тросів (для каната з десяти тросів)

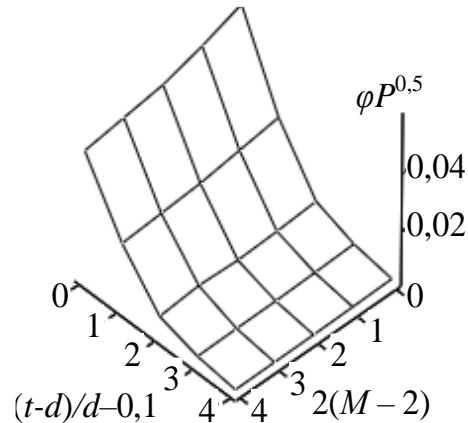


Рисунок 6 – Залежність допустимого кута повороту посудини в її напрямних з умови відсутності стиснутих тросів каната при різних значеннях кроку укладання та кількості тросів у канаті

Наведені графіки (рис. 6) показують, що збільшення кількості тросів у канаті та збільшення кроку укладання тросів в ньому веде до зменшення допустимих кутів повороту перерізів приєднання кінців каната до барабана та до посудини.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що зменшення довжини відрізка каната між барабаном та посудиною веде до зростання сил розтягу найбільш навантажених тросів та величини сили зовнішнього навантаження, потрібної для недопущення втрати стійкої форми середніми найменш навантаженими тросами. Вказані величини залежать і від кута повороту посудини в горизонтальній площині, відповідно й обмежують його значення.

З метою підвищення безпеки використання гумотросових канатів як головних у роботі розглянуто багатоканатну схему підвішування посудини на прикладі трьох канатів. Канати запропоновано виготовляти однаковими за кількістю тросів, кроком їх розташування в канаті та діаметром тросів. Як і розглянуто вище, перерізи суміжних канатів відхиляються в площині каната по нормалі до неї та повертаються на кут φ . Навантаження крайніх тросів

$$p_{\max} = EF \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{k=1}^M \left(\sqrt{\left(\frac{\left(k - \frac{M}{2}\right)t \varphi}{L} \right)^2 + 1} - 1 \right) \cos(\mu_m(k-0,5)) \cos(\mu_m(M-0,5)) + \frac{X}{3M} + \frac{EF}{2} \left(\frac{\Omega + \Delta}{L} \right)^2, \quad (3)$$

де X – максимальне зусилля натягу канатів підйомної машини; Δ , Ω – відповідно, відхилення осі симетрії перерізів нецентрального каната в площині каната та в напрямку, нормальному до неї.

Зменшення навантаження на середній канат, відповідно впливає і на значення допустимого з умови упередження виникнення напружень стискання

тросів, кута повороту посудини в напрямних

$$\frac{\varphi}{\sqrt{\frac{X}{3M} - EF \frac{\Omega + \Delta}{3L}}} \leq \frac{L}{t \sqrt{\frac{MEF}{2} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{k=1}^M \left(k - \frac{M}{2}\right)^2 \cos(\mu_m(k-0,5)) \cos\left(\frac{\mu_m}{2}\right)}}. \quad (4)$$

Аналіз отриманих виразів (3–4) дозволив сформулювати **друге наукове положення**.

Криволінійність напрямних посудини викликає її відхилення від осі підйому в площині каната. Переміщення тросів в канаті регулярної структури

$$\begin{aligned} A \frac{d^2 u_i}{dx^2} + B [u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}] &= 0; & D \frac{d^4 w}{dx^4} - BC_0 \left[\frac{du_{i+1}}{dx} - \frac{du_{i-1}}{dx} + 4C_0 \frac{d^2 w}{dx^2} \right] &= 0; \\ A \frac{d^2 u_1}{dx^2} + B \left[u_2 - u_1 + 2C_0 \frac{dw}{dx} \right] &= 0; & D \frac{d^4 w}{dx^4} - BC_0 \left[\frac{du_2}{dx} - \frac{du_1}{dx} + 2C_0 \frac{d^2 w}{dx^2} \right] &= 0; \\ A \frac{d^2 u_M}{dx^2} + B \left[u_{M-1} - u_M - 2C_0 \frac{dw}{dx} \right] &= 0; & D \frac{d^4 w}{dx^4} - BC_0 \left[\frac{du_M}{dx} - \frac{du_{M-1}}{dx} + 2C_0 \frac{d^2 w}{dx^2} \right] &= 0, \end{aligned}$$

де $A = EF$; $B = \frac{G}{t} b$; $C_0 = \frac{d+t}{2}$; $D = EI$; b – товщина каната; I – приведений момент інерції перерізу троса; u , w – переміщення уздовж тросів та в напрямку, нормальному до тросів, але в площині каната.

З урахуванням граничних умов, у межах прийнятих припущень, отримано закономірності, що дозволяють визначати напружено-деформований стан головного гомотросового каната, зумовленого його деформуванням у площині каната. Приклади графічних залежностей, що ілюструють НДС каната, наведено на рис. 7 та рис. 8.

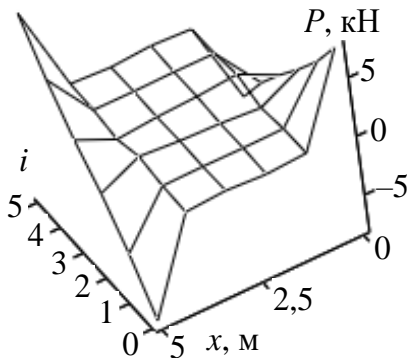


Рисунок 7 – Залежність внутрішніх сил P розтягу тросів з номерами i вздовж осі каната x

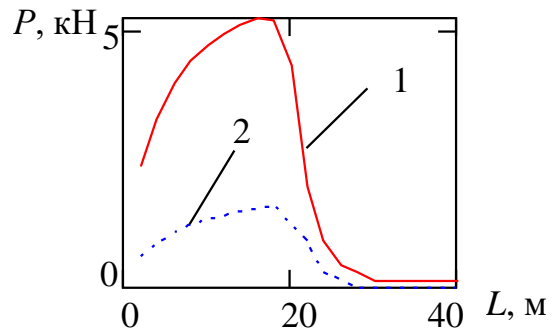


Рисунок 8 – Залежність сил від довжини каната при відхиленні посудини на 10 мм:
1 – додаткове зусилля розтягу троса каната,
2 – сила тиску посудини на напрямні

Наведені рисунки (рис. 7) демонструють вплив зміщення посудини відносно проекційної осі підйому на нерівномірність деформацій та внутрішніх сил розтягу тросів. Переміщення та зусилля вздовж каната змінюються локально. При цьому зміни переміщень відбуваються симетрично як за довжиною, так і за шириною каната. Сили змінюються протисиметрично відносно середини каната як

за його довжиною, так і за його шириною. Вказані чинники супроводжуються деформуванням каната в його площині.

Відповідно до наведених графічних залежностей (рис. 8) горизонтальне зусилля притискання посудини до напрямних менше від абсолютного значення додаткового зусилля, що виникає в крайніх тросах каната. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що довжина ділянки каната, на якій реалізуються крайові ефекти, пов'язані з нерівномірним розподілом сил між тросами та їх переміщеннями в площині нормальної осі каната, зростає зі зростанням жорсткості тросів каната на згин та розтяг, та зменшується зі зростанням модуля пружності гуми на зсув та товщини каната.

Отримані в розділі 3 результати дозволили встановити вплив відхилень напрямних стовбурів шахт на НДС канатів та на сили тиску посудини на криволінійні напрямні. Сили тиску посудини на викривленні напрямні, які розраховано за отриманими залежностями, мають бути враховані при визначенні можливості експлуатації шахтної підйомної установки зі встановленими дефектами.

У **четвертому розділі** обґрунтовано метод розрахунку НДС головного гумотросового каната шахтної підйомної установки з урахуванням впливу розривів тросової основи та комплексу чинників.

Для можливості визначення величини втрати тягової здатності головного гумотросового каната побудовано узагальнене аналітичне рішення для випадку сумісного впливу пошкоджень тягових елементів плоского тягового органа та конструктивних й експлуатаційних параметрів шахтної підйомної установки, включно, з урахуванням відхилень армування стовбура від проектних значень.

1 Побудова моделі гумотросового каната підйомної машини з урахуванням розриву тросової основи. Для визначення характеру взаємодії тросів у канаті, як в механічній системі, розглянемо навантаження окремого троса довжиною dx , вирізаного з каната (рис. 9).

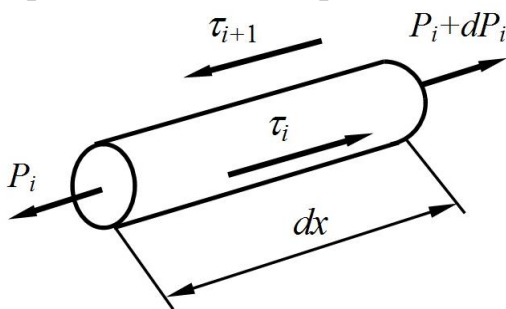


Рисунок 9 – Відрізок троса

Умова рівноваги відрізка троса довжиною dx

$$dP_i + d \cdot (\tau_{i+1} - \tau_i) dx = 0, \quad (5)$$

де d – діаметр троса;

$$\tau_i = \frac{G}{t-d} k_G [u_i - u_{i-1}], \quad (6)$$

де u_i – переміщення i -го троса вздовж каната (осі x).

Після підстановки (6) у формулу (5) отримаємо

$$\frac{d^2 u_i}{dx^2} + \frac{G d k_G}{(t-d) E F} (u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}) = 0. \quad (7)$$

Номер троса розглянуто як дискретну координату. Розв'язки систем диференціальних рівнянь (7) шукали у вигляді добутків двох функцій

$$u_i = \sum_{m=1}^{M-1} \left(A_m e^{\beta_m x} + B_m e^{-\beta_m x} \right) \cos(\mu_m (i - 0,5)) + \xi x + \varepsilon, \quad (8)$$

де A_m , B_m , ξ , ε – невідомі сталі інтегрування.

Значення внутрішніх сил розтягу тросів з урахуванням закону Гука, відповідно до виразу (8)

$$p_i = E F \left[\sum_{m=1}^{M-1} \left(A_m e^{\beta_m x} - B_m e^{-\beta_m x} \right) \beta_m \cos(\mu_m (i - 0,5)) + \xi \right]. \quad (9)$$

2 Побудова рішень з розподілу сил та переміщень тросів в загальній формі для різних граничних умов його деформування. Скористаємося отриманими рішеннями для визначення коефіцієнтів концентрації напружень для каната, зумовлених його навантаженням силою розтягу, створеною масою підвішеної посудини, з урахуванням розривів тросової основи для різних граничних умов його деформування.

Канат довільної довжини з M тросів віднесено до поздовжньої осі координат. Перерізи початку та кінця каната – L_1 та L_2 . Вважали, що в перерізі $x = l$ ушкоджено Θ -й трос. Цім перерізом канат розділено на дві частини, яким надано номери 1 та 2. Номери тросів позначено літерою i ($1 \leq i \leq M$).

Доданий стан не повинен змінювати попередній стан на межах у перерізі $x = L_1$, у перерізі $x = L_2$. Рішення для переміщень та сил на вказаних частинах без урахування зовнішнього навантаження прийнято у наступній формі

$$u_{i,\rho,\varpi} = \sum_{m=1}^{M-1} \left(A_{m,\rho,\varpi} e^{\beta_m x} + B_{m,\rho,\varpi} e^{-\beta_m x} \right) \cos(\mu_m (i - 0,5));$$

$$p_{i,\rho,\varpi} = E F \sum_{m=1}^{M-1} \left(A_{m,\rho,\varpi} e^{\beta_m x} - B_{m,\rho,\varpi} e^{-\beta_m x} \right) \beta_m \cos(\mu_m (i - 0,5)),$$

де $u_{i,\rho,\varpi}$, $p_{i,\rho,\varpi}$ – відповідно переміщення вздовж осі каната i -го троса та внутрішня сила опору його розтягу з індексами, що враховують належність параметру першій або другій частині та характер граничних умов на відповідній частині; $A_{m,\rho,\varpi}$, $B_{m,\rho,\varpi}$ – невідомі сталі інтегрування; $\rho = 1, 2$ – номер частини; ϖ – покажчик характеру граничних умов, приймає значення n та c відповідно для випадку завдання кінематичних або природних граничних умов.

Умова сумісності деформування двох частин каната

$$u_{i,1,\varpi} - u_{i,2,\varpi} = \begin{cases} 0, & i \neq \Theta; \\ U_0, & i = \Theta, \end{cases}$$

$$p_{i,1,\varpi} - p_{i,2,\varpi} = 0,$$

$$p_{\Theta,1,\varpi} = -p_{\Theta,2,\varpi},$$

де U_0 – невідома величина зазору поміж кінцями пошкодженого розривом тягового елемента; $p_{\Theta,2,\varpi}$ – внутрішнє зусилля навантаження Θ -го троса до його ушкодження в перерізі $x = l$.

Граничні умови враховують особливості підйомної установки та відхилення напрямних посудини від проектних значень. Отримаємо математичну модель напружено-деформованого стану каната шахтної підйомної установки. Кількість рів-

нянь дорівнює кількості $4(M - 1) + 1$ невідомих сталих інтегрування. Система рівнянь є достатньою для її розв'язання та отримання єдиного рішення для кожної пари прийнятих граничних умов. У розділі побудовано аналітичні рішення з розподілу сил та переміщень тросів для наступних випадків завдання граничних умов.

2.1 Граничні умови, завдані законами розподілу переміщень тягових елементів. Для випадку, коли відомий закон розподілу переміщень тягових елементів $f_{pn}(j)$ з номерами j , що становлять множину J .

Визначення невідомих сталих та невідомого зазору поміж кінцями ушкодженого троса дозволяють розрахувати показники НДС каната – переміщення тросів (8) та сили їх навантаження (9) для узагальненого випадку впливу конструкції машини (граничних умов взаємодії каната з елементами підйомної машини).

Аналогічним чином розглянуто інші окремі випадки завдання граничних умов.

2.2 Граничні умови, завдані законами розподілу сил розтягу тросів. Для випадку, коли відомий закон розподілу сил розтягу тросів $f_{pc}(j)$ з номерами j , що становлять множину J , переміщення на відріжку з номером ρ .

2.3 Граничні умови, завдані законами розподілу переміщень на першому кінці каната та сил розтягу тросів на другому. Для випадку, коли задано переміщення на межі першої та сили на межі другої частини.

2.4 Граничні умови, завдані законами розподілу сил на першому та переміщень на другому кінцях каната. Для випадку, коли завдано закони розподілу сил на першому та переміщень на другому кінцях каната.

2.5 Особливі випадки граничних умов деформування каната. Особливими вважали випадки, коли троси не навантажені або відсутнє викривлення перерізу каната.

Механіка деформування та отримані залежності показують, що основним наслідком руйнування троса є утворення зазору між кінцями троса в перерізі його руйнування. Його величина залежить від граничних умов та від відстаней від перерізу розриву до кінців каната. Величини утворених зазорів зменшуються зі зростанням відстані від перерізу руйнування тросів до кінців тягового органа.

Отримані в розділі 4 у загальному вигляді, у замкненій формі, аналітичні вирази дозволяють визначати напружено-деформований стан плоского гумотросового каната шахтної підйомної машини з урахуванням впливу комплексу зовнішніх чинників, включно таких, як конструкція та технічний стан підйомної машини, напрямних посудини, характер взаємодії плоского гумотросового каната та барабанів (шківів) машини, наявність розривів тросів та обґрунтовано визначати можливість подальшої експлуатації підйомної установки в шахтних стовбурах з порушеною геометрією, включно і після аварій та техногенних катастроф.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна науково-технічна задача забезпечення працездатності канатів та підвищення рівня ефективності використання й експлуатаційної безпеки сучасних шахтних підйомних установок з головними гумотросовими канатами на основі встановлення механізму та закономірностей формування й перерозподілу напружено-деформованого стану канатів при їх взаємодії з механічною системою

шахтної підйомної установки з урахуванням впливу технічного стану підйомної машини, просторового деформування каната та можливих розривів його тросової основи для обґрунтування методу розрахунку головних гумотросових канатів при їх експлуатації в реальних складних гірничотехнічних умовах вертикальних стовбурів з порушеною геометрією, включно і після аварій та техногенних катастроф.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Виконано аналіз умов експлуатації існуючих шахтних підйомних установок та встановлено можливі шляхи підвищення їх експлуатаційної безпеки, ефективності використання та збільшення термінів експлуатації головних канатів для забезпечення безаварійної експлуатації шахтних підйомних комплексів в умовах їх реконструкції, ремонту та переобладнання.

2. Розроблено математичні моделі взаємодії тягових елементів плоского гумотросового каната з урахуванням будови скручених зі стренг тросів, геометричних параметрів каната, механічних характеристик матеріалу еластичної оболонки та її форми, що дозволяють оцінювати вплив вказаних параметрів на працездатність головного гумотросового каната шахтної підйомної установки.

3. Встановлено, що жорсткість гумового прошарку, розташованого між тросами, на стискання в площині каната та зсув вздовж тросів, залежить від геометричних параметрів каната: кроку укладання тросів та товщини каната, віднесених до діаметрів тросів. Суттєва зміна (зменшення) жорсткості на стискання гумового прошарку має місце при збільшенні кроку укладання від мінімального ($1,05d$) до двох діаметрів троса, а при подальшому зростанні кроку жорсткість залишається практично незмінною.

4. Встановлено, що випадкове формування маси матеріалу в посудині та її переміщення в підйомній системі суттєво впливає на розподіл зусиль між тросами плоского підйомного каната, відповідно на його тягову здатність. Відхилення посудини та її повороти, зумовлені порушенням геометрії стовбурів, призводять до скручування каната, деформування (згину) каната в його площині, що впливають на напружено-деформований стан каната.

5. Побудовано узагальнене аналітичне рішення для випадку сумісного впливу пошкоджень тягових елементів плоского гумотросового каната та конструктивних параметрів шахтної підйомної машини, відхилень армування стовбура від проектних значень. Отримані в загальному вигляді, у замкненій формі аналітичні вирази дозволяють визначати додаткові внутрішні сили навантаження тросів каната, максимальні значення коефіцієнтів концентрації напружень у тросах каната, що знаходиться під впливом зовнішніх чинників, у разі розриву одного з тросів.

6. Обґрунтовано алгоритм встановлення напружено-деформованого стану каната, зумовленого розривами різних тросів, у різних перерізах, що дозволяє визначати можливість подальшої експлуатації підйомної установки в шахтних стовбурах з порушеною геометрією, включно і після аварій та техногенних катастроф.

7. Обґрунтовано метод визначення напружено-деформованого стану плоского гумотросового каната шахтної підйомної машини з урахуванням впливу комплексу зовнішніх чинників, включно таких, як конструкція та технічний

стан підйомної машини, напрямних посудини, характер взаємодії плоского гумотросового каната та барабанів (шківів) машини, наявність розривів тросів тощо.

8. Результати дисертаційної роботи у вигляді методики визначення напружено-деформованого стану головного гумотросового каната з урахуванням умов його приєднання до конструктивних елементів шахтної підйомної установки та методики визначення допустимих відхилень посудини в стовбурі шахти впроваджено в ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України та ДП «Дніпродіпрошахт».

ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ Й ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ВІДОБРАЖЕНО У НАСТУПНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЯХ:

Праці, які відображають основні наукові результати дисертації

Статті в зарубіжних фахових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Kolosov, D., Bilous, O., Tantsura H., & Onyshchenko, S. Stress-strain state of a flat tractive-bearing element of a lifting and transporting machine at operational changes of its parameters // *Solid State Phenomena*, 2018, Volume 277, pp. 188–201. Режим доступу: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.188> (*Scopus*)

2. Belmas, I.V., Kolosov, D.L., Kolosov, A.L., & Onyshchenko, S.V. Stress-strain state of rubber-cable tractive element of tubular shape // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2018, Volume 2, pp. 60–69. Режим доступу: <http://doi.org/10.29202/nvngu/2018-2/5> (технічні науки, *Scopus*)

Статті у провідних фахових виданнях, включених до переліку МОН України:

3. Закономірності напружено-деформованого стану головного гумотросового каната з урахуванням впливу порушеної геометрії стовбуру / Д.Л. Колосов, С.В. Онищенко, О.І. Білоус, Г.І. Танцура // *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка» (технічні науки). – 2019. – №58 – С. 167-177.* Режим доступу: <http://doi.org/10.33271/crpnmu/58.167>

4. Часткове відновлення тягової спроможності гумотросового тягового органа з ушкодженою тросовою основою / І.В. Бельмас, Д.Л. Колосов, С.В. Онищенко, І.Т. Бобильова // *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка» (технічні науки). – 2020. – №60 – С. 196-206.* Режим доступу: DOI: [10.33271/crpnmu/60.196](https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.196)

5. Вплив відхилень розташування посудини шахтної підйомної установки на напружений стан головного гумотросового каната / Д.Л. Колосов, О.І. Білоус, Г.І. Танцура, С.В. Онищенко, О.М. Черниш // *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка» (технічні науки). – 2020. – №62. – С. 196-204.* Режим доступу: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/62.196>

6. Дослідження напруженого стану оболонки композитного тягового органа від дії дотичного навантаження / Д.Л. Колосов, С.В. Онищенко, О.І. Білоус, Г.І. Танцура // *Гірнична електромеханіка та автоматика (технічні науки). – 2020. – №103. – С. 67-73.*

7. Колосов Д.Л. Обґрунтування методу розрахунку напружено-деформованого стану підйомного гумотросового каната з урахуванням впливу розривів тросової основи та комплексу чинників / Д.Л. Колосов, С.В. Онищенко

// Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка» (технічні науки). – 2020. – №63. С. 98-114. Режим доступу: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.098>

8. Belmas, I., Kolosov, D., Bilous, O., & Onyshchenko, S. Stress-strain state of a conveyor belt with cables of different rigidity and their breakages // Fundamental and applied researches in practice of leading scientific schools, 2018, Volume 26 (2), pp. 231-238. (технічні науки)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

9. Belmas, I., Kogut, P., Kolosov, D., Samusia, V., Onyshchenko, S. Rigidity of elastic shell of rubber-cable belt during displacement of cables relatively to drum // E3S Web of Conf. Volume 109, 2019. International Conference Essays of Mining Science and Practice. Режим доступу: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900005> (Scopus)

10. Kolosov, D., Onyshchenko, S. Analysis of the stress-strain state of the tubular rubberized rope with cable breakage // Materials of the international scientific & practical conference “Energy efficiency and energy saving 2017”. – Dnipro, 2017. – P. 23-24.

11. Belmas, I., Kolosov, D., Samusya, V., Bilous, O., Tantsura, H., Onyshchenko, S. Rigidity of elastic shell of rubber-cable belt during cable displacement // Materials of the international scientific & practical conference “Physical & chemical geotechnologies – 2018”. – Dnipro, 2018. – P. 151-153.

12. Колосов Д.Л. Вплив повороту посудини на напружено деформований стан підйомного гумотросового каната при багатоканатній схемі його підвішування / Д.Л. Колосов, С.В. Онищенко // Бюл. 13, МАДСК. – Одеса, 2019. – С. 33-39.

13. Kolosov D.L., Onyshchenko S.V. Stresses in elastic shell of rubber-cable tractive element during mutual shear displacement of cables. “Satpayev’s readings”, Vol. 1. – Almaty, 2020. – P. 585-589.

14. Колосов Д.Л. Напружений стан оболонки гнучкого композитного тягового органа внаслідок взаємного зсуву тросів / Д.Л. Колосов, С.В. Онищенко // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку територій: теорія і практика». – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – С. 421-424.

Особистий внесок здобувача в роботи, опубліковані зі співавторами:

[1, 2, 4, 7, 9, 10] – отримання аналітичних залежностей для розрахунку напружено-деформованого стану каната при зміні його геометричних та експлуатаційних параметрів, [3, 5, 12] – математичне моделювання, опрацювання й аналіз результатів досліджень, [6, 8, 11, 13, 14] – розробка та дослідження математичних моделей формування й перерозподілу напружено-деформованого стану гумотросового каната.

АНОТАЦІЯ

Онищенко С.В. Обґрунтування методу розрахунку головних гумотросових канатів шахтних підйомних установок з урахуванням порушеної геометрії стовбурів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за

спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального наукового завдання з підвищення рівня експлуатаційної безпеки сучасних шахтних підйомних установок з головними гумотросовими канатами на основі встановлення закономірностей формування й перерозподілу напружено-деформованого стану головних гумотросових канатів при їх взаємодії з механічною системою шахтної підйомної установки з урахуванням впливу порушеної геометрії стовбурів, експлуатаційних параметрів шахтних підйомних установок та можливих розривів тросової основи канатів для обґрунтування методу їх розрахунку.

Виконано дослідження впливу форми поперечного перерізу тросів гумотросового каната на опір стисканню та зсуву гумової матриці. Враховано геометричні параметри каната, конструкції скручених зі стренг тросів каната, механічні характеристики матеріалу еластичної оболонки та її форму. Оцінено вплив вказаних параметрів на працездатність головного гумотросового каната шахтної підйомної установки.

Виконано дослідження напружено-деформованого стану підйомного гумотросового каната внаслідок зміщення та повороту посудини в шахтному стовбурі з порушеною геометрією. Проаналізовано вплив відхилень напрямних стовбурів шахт на напружено-деформований стан каната та на зміну тиску посудини на криволінійні напрямні.

Розроблено та обґрунтовано метод розрахунку напружено-деформованого стану підйомного гумотросового каната з урахуванням впливу розривів тросової основи та комплексу чинників. Отримано аналітичні вирази у загальному вигляді, у замкненій формі, що дозволяють визначати додаткові внутрішні сили навантаження тросів каната, максимальні значення коефіцієнтів концентрації напружень у тросах каната, що знаходиться під впливом зовнішніх чинників. Обґрунтовано алгоритм, розроблено та впроваджено методичні рекомендації зі встановлення напружено-деформованого стану каната, зумовленого розривами різних тросів у різних перерізах. Рекомендації дозволяють визначати можливість подальшої експлуатації підйомної установки в шахтних стовбурах з порушеною геометрією, включно після аварій та техногенних катастроф.

Ключові слова: шахтна підйомна установка, плоский гумотросовий канат, напружено-деформований стан, порушена геометрія стовбурів, поворот посудини, зміщення посудини, розрив тросової основи, комплекс чинників, технічний стан, метод розрахунку.

АННОТАЦИЯ

Онищенко С.В. Обоснование метода расчета головных резиновых канатов шахтных подъемных установок с учетом нарушенной геометрии стволов. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», г. Днепр, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи повышения уровня эксплуатационной безопасности современных шахтных подъемных

установок с головными резиновыми канатами на основании установления закономерностей формирования и перераспределения напряженно-деформированного состояния головных резиновых канатов при их взаимодействии с механической системой шахтной подъемной установки с учетом влияния нарушенной геометрии стволов, эксплуатационных параметров шахтных подъемных установок и возможных разрывов тросовой основы канатов для обоснования метода их расчета.

Выполнено исследование влияния формы поперечного сечения тросов резинового каната на сопротивление сжатию и сдвигу резиновой матрицы. Учтены геометрические параметры каната, конструкции скрученных из стренг тросов каната, механические характеристики материала эластичной оболочки и ее форма. Оценено влияние указанных параметров на работоспособность головного резинового каната шахтной подъемной установки.

Установлены аналитические зависимости для определения напряженно-деформированного состояния плоского головного резинового каната шахтной подъемной установки с учетом отклонений геометрических параметров армировки ствола от проектных значений. Установлены зависимости напряженно-деформированного состояния головного резинового каната в результате смещения и поворота сосуда для одноканатной и многоканатной схемы ее подвешивания с учетом влияния нарушенной геометрии шахтных стволов и пространственного деформирования плоского каната.

Выполнены исследования напряженно-деформированного состояния подъемного резинового каната в результате смещения и поворота сосуда в горизонтальной плоскости ствола. Проанализировано влияние отклонений направляющих стволов шахт на напряженно-деформированное состояние каната и на изменение давления сосуда на криволинейные направляющие.

Разработан и обоснован метод расчета напряженно-деформированного состояния подъемного резинового каната с учетом влияния разрывов тросовой основы и комплекса факторов. Получены аналитические выражения в общем виде, в замкнутой форме, позволяющие определять дополнительные внутренние силы нагружения тросов каната, максимальные значения коэффициентов концентрации напряжений в тросах каната, находящегося под влиянием внешних факторов. Обоснован алгоритм, разработаны и внедрены методические рекомендации по установлению напряженно-деформированного состояния каната, обусловленного разрывами различных тросов в различных сечениях. Рекомендации позволяют определять возможность дальнейшей эксплуатации подъемной установки в шахтных стволах с нарушенной геометрией, включительно после аварий и техногенных катастроф.

Результаты диссертационной работы в виде методики определения напряженно-деформированного состояния головного резинового каната с учетом условий его присоединения к конструктивным элементам шахтной подъемной установки и методики определения допустимых отклонений сосуда в стволе шахты внедрены в ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины и ГП «Днепрогипрошахт».

Ключевые слова: шахтная подъемная установка, плоский резиново-тросовый канат, напряженно-деформированное состояние, нарушенная геометрия ство-

лов, поворот сосуда, смещение сосуда, разрыв тросовой основы, комплекс факторов, техническое состояние, метод расчета.

ABSTRACT

Onyshchenko S.V. Justification of method of calculation of head rubber-cable ropes of mine hoists considering disturbed shaft geometry. – Qualifying scientific work published as a manuscript.

Thesis for a scientific degree of Candidate of Technical Sciences on a specialty 05.02.09 – dynamics and strength of machines. Dnipro University of Technology, Dnipro, 2021.

The thesis is devoted to the solution of an acute scientific problem of increasing the level of operational safety of modern mine hoists with the head rubber-cable ropes on a basis of establishing the laws of formation and redistribution of a stress-strain state of head rubber-cable ropes during their interaction with mechanical system of a mine hoist considering the parameters of mine hoists and possible breakages of a cable base of ropes to justify the method of their calculation.

A study of influence of a cross-section shape of cables of a rubber-cable rope on compression and shear strength of the rubber matrix is performed. A discrete change in the number of rope cables with variable cross-section, the structure of rope cables made of twisted strands, mechanical characteristics of elastic shell material, and its shape are considered. The influence of the specified parameters on efficiency of a design of a hoist is estimated.

A study of the stress-strain state of the hoisting rubber-cable rope due to displacement and rotation of the vessel in a horizontal plane of a shaft if performed. The influence of deviations of mine shafts on the stress-strain state of a rope and on the influence of vessel pressure on curved shaft guides are analyzed.

The method of calculation of a stress-strain state of a hoisting rubber-cable rope considering influence of breakages of a cable base and a complex of factors is developed and justified. Analytical expressions are obtained in a general, closed form, which allows determining additional internal loads on rope cables, maximum values of stress concentration coefficients in rope cables, which are under the influence of external factors. The algorithm is justified, methodical recommendations for establishing the stress-strain state of the rope caused by breakages of different cables in different cross-sections are developed and implemented. Recommendations allow determining the possibility of further operation of a hoist in mine shafts with disturbed geometry, including after accidents and technogenic disasters.

Keywords: mine hoist, flat rubber-cable rope, stress-strain state, disturbed shaft geometry, vessel rotation, vessel displacement, cable base breakage, complex of factors, technical condition, calculation method.

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі будівельної, теоретичної та прикладної механіки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Колосов Дмитро Леонідович, завідувач кафедри будівельної, теоретичної та прикладної механіки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Дирда Віталій Ілларіонович, завідувач відділу механіки еластомерних конструкцій гірничих машин Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (м. Дніпро)

кандидат технічних наук, доцент,
Романюк Олександр Дмитрович, завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки Дніпровського державного технічного університету (м. Кам'янське) Міністерства освіти і науки України

Захист відбудеться “14” травня 2021 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 08.080.08 в НТУ «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, проспект Дмитра Яворницького, 19.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці НТУ «Дніпровська політехніка» за адресою: 49005, м. Дніпро, проспект Дмитра Яворницького, 19.

Автореферат розіслано “14” квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



К.А. Зіборов

Онищенко Сергій Валерійович

**ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ГОЛОВНИХ
ГУМОТРОСОВИХ КАНАТІВ ШАХТНИХ ПІДЙОМНИХ УСТАНОВОК
З УРАХУВАННЯМ ПОРУШЕНОЇ ГЕОМЕТРІЇ СТОВБУРІВ**

(Автореферат)

Підписано до друку 04.03.2021. Формат 60x84/16
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 404

Видавництво ПП Вахмістров О.Є.
Адреса видавництва та друкарні: 49000, м. Дніпро,
вул. Пісаржевського, 18.