



МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“

МИННОТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА: РАЗРАБОТВАНЕ НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ

Маг.инж. Данаил Йорданов Терзийски

**ОПТИМИЗАЦИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ СХЕМИ ЗА СТРОЕНЕ НА
РУДНИЧНИ ПЪТИЩА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

за придобиване на образователна и научна степен „доктор“ по професионално направление 5.8 Проучване, добив и обработка на полезни изкопаеми, научна специалност:
„Открит и подводен добив на полезни изкопаеми“

**Научен ръководител:
Доц. д-р Евгения Александрова**

СОФИЯ, 2024 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Разработване на полезни изкопаеми“ към Миннотехнологичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“, София, на 26.11.2024 г., съгласно Ректорска заповед № Р-804 от 19.11.2024 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на от часа в зала на Миннотехнологичен факултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в канцеларията на Сектор „Следдипломна квалификация“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. проф. д-р Ивайло Копрев – МГУ „Св. Ив. Рилски“, София
2. доц. д-р Весела Петрова – МГУ „Св. Ив. Рилски“, София
3. проф. д-р Красимир Кръстанов – ВТУ „Тодор Каблешков“, София
4. доц. д-р Веска Лашева – ХТМУ, София
5. доц. д-р Борислав Николов – ТУ, София

Резервни членове:

1. доц. д-р Захари Динчев - МГУ „Св. Ив. Рилски“, София
2. проф. д-р Радослав Къртов – Академия на МВР, София

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1.
2.

Дисертантът е редовна форма на обучение към катедра „Разработване на полезни изкопаеми“ на Миннотехнологичен факултет.

Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: Маг.инж. Данаил Йорданов Терзийски

Заглавие: Оптимизация на технологичните схеми за строене на руднични пътища

СЪДЪРЖАНИЕ НА АВТОРЕФЕРАТА

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	5
Актуалност на проблема	5
Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване.....	5
Научна новост.....	6
Практическа приложимост.....	6
Апробация.....	6
Публикации.....	6
Структура и обем на дисертационния труд.....	6
II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	7
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ НА СЪВРЕМЕННОТО СЪСТОЯНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ, СТРОИТЕЛСТВО, ЕКСПЛОАТАЦИЯ И ПОДДЪРЖАНЕ НА РУДНИЧНИТЕ ПЪТИЩА	7
1.1. Съвременно състояние и приложение на рудничния транспорт в открити рудници и кариери	7
1.2. Видове и особености при работа на рудничния транспорт в откритите рудници и кариери в Р България	11
1.3. Особенности на елементите от конструкцията на рудничните пътища	12
1.4. Методи за оценка на състоянието на рудничните пътища и проблеми на качеството по време на строителството и експлоатацията	13
Изводи към първа глава	14
ГЛАВА 2. ОПТИМИЗИРАНЕ НА КОНСТРУКТИВНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА РУДНИЧНИТЕ ПЪТИЩА	15
2.1. Съвременни предпоставки за оптимизиране на конструктивните параметри на рудничните пътища	15
2.2. Теоретични основи при оразмеряване на рудничните пътища в план и профил	16
2.3. Методика за оптимизиране надлъжния профил на рудничните пътища	17
2.4. Обосноваване конструкцията на пътната настилка на рудничните пътища..	19
Изводи към втора глава	24
ГЛАВА 3. КОМПЛЕКСЕН АНАЛИЗ НА СЪСТОЯНИЕТО НА РУДНИЧНИТЕ ПЪТИЩА И МЕТОДИ ЗА НАМАЛЯВАНЕ ВЪЗДЕЙСТВИЕТО НА ДЕФЕКТИТЕ ПО ПЪТНОТО ПЛАТНО ВЪРХУ ЕКСПЛОАТАЦИОННИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА РУДНИЧНИЯ ТРАНСПОРТ	25
3.1 Методи за измерване и анализ на деформациите по пътната настилка на обслужващите пътища в открити рудници	25
3.2. Технологични схеми за повишаване ефективността на изграждане и уплътняване на пътната настилка на рудничните пътища.....	28
3.3 Апробиране на технология за уплътняване с тежкотоварни самосвали	31
Изводи към трета глава	34

ГЛАВА 4. ОБОСНОВАВАНЕ И ПРИЛОЖЕНИЕ НА КРИТЕРИИ ПРИ ОПТИМИЗИРАНЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ СИСТЕМИ ЗА СТРОИТЕЛСТВО НА РУДНИЧНИ ПЪТИЩА	35
4.1. Обвързване на проектните параметри на рудничните пътища с елементите от конструкцията на открития рудник	35
4.2 Методи и алгоритми за оптимизиране технологичните схеми за строене на руднични пътища	36
4.3 Оптимизиране на технологичните схеми за строителство на рудничен път..	37
<i>Изводи към четвърта глава</i>	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
ОСНОВНИ НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ	49
ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА	50
ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА	50

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Откритият начин на разработване на находища на полезни изкопаеми остава основното направление в световната миннодобивна промишленост. Около 90% от суровините за различните промишлености се добиват по открит начин.

Стратегическата цел на всяко минно-добивно предприятие е постигането на ниска себестойност на произвежданите концентрати и съпътстващи продукти, съобразено с пазара. Рудничният транспорт се явява свързващо звено в общия технологичен процес при добива на полезни изкопаеми. Разходите за транспортиране и свързаните с него спомагателни работи са около 45-50%, а в някои случаи достигат и до 70% от общите разходи за добив на полезното изкопаемо.

Състоянието на рудничните пътища до голяма степен определя ефективната експлоатация на технологичния автотранспорт. Във връзка със значителното увеличаване на товароносимостта и осовото натоварване, използването на съвременни автосамосвали предизвиква нови изисквания към конструкцията на пътната настилка, технологията на строителство и комплексната механизация на пътно-строителните работи. Липсата на комплексна методика за оценка на деформациите по вътрешнорудничните пътища както и на пътните условия на експлоатация на рудничния автотранспорт е актуален пробем. Решенията относно конструкцията на пътната настилка, технологията и механизацията на пътно-строителните работи се приемат без отчитане на техническото развитие на автомобилостроенето и условията на експлоатация. Ето защо, поставената цел в дисертационния труд е свързана с намирането на научни и научно-приложни подходи за оптимизация на технологичните схеми за строене на рудничните пътища с възможност за отчитане на по-голям фактори и критерии, съдържащи както физически така и икономически критерии, свързани с експлоатационните разходи на рудничния транспорт, разходите за поддържане качеството на пътната настилка и не на последно място очакваната печалба от разработването на находището в дългосрочен план.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е **Оптимизация на технологичните схеми за строене на руднични пътища.**

За постигане на поставената цел са решени следните основни задачи:

1. Анализирано е съвременното състояние на рудничните пътища в откритите рудници и методите за контрол на техническото им състояние.
2. Оптимизирани са конструктивните елементи на рудничните пътища въз основа на физически критерии и технико-икономически показатели.
3. Разработени са методи за намаляване на деформациите по рудничните пътища и методология за повишаване на носещата способност на пътната настилка на рудничните пътища
4. Обосновавани и приложени са критерии за оптимизация на транспортните схеми при проектиране на крайните граници на откритите рудници.

При разработване на темата на дисертационния труд е възприет комплексен подход, включващ анализ и обобщение на научните и практическите резултати на вече проведени изследвания, статистическа и аналитична обработка на данни при математическото моделиране.

Научна новост

Формулирани са теоретичните основи за избор на оптимални наклони на рудничните пътища при различни модели самосвали и товароносимост. Получена е корелационната връзка между изменението на оптималните наклони на рудничните пътища и качеството на пътната настилка.

Установени са зависимостите между оптималната дебелина на пътната настилка, полезната товароносимост на самосвалите и годишната производителността на рудника по минна маса.

Предложена е методология за оптимизиране на технологичните схеми за трасиране на рудничните пътища с възможности за интегриране в алгоритми за търсене на алтернативни решения при разработване на модели на открити рудници.

Практическа приложимост

Предложени са технологични решения за изграждане на устойчиви пътни настилки с използване на тежкотоварни самосвали.

Определена е методология за изследвания на деформациите по пътното платно на рудничните пътища в минни обекти.

Апробация

Резултатите от дисертационната работа са реализирани в условията на открити рудници при разработването на рудни находища, както за изследване на деформациите по пътното платно, така и за оптимизиране на конструкцията на пътната настилка и технологиите за нейното изграждане.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в три научни статии, две от които са в съавторство. Публикациите са представени както следва: Сборник с доклади от 66-та Международна научна конференция – МГУ „Св. Иван Рилски“, 2023 г., Сборник с доклади от 67-ма Международна научна конференция на МГУ „Св. Иван Рилски“, 2024 г. и в Доклади на Българската академия на науките - Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences Tome 77, No 1, 2024.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **146** страници, като включва увод, **четири** глави за решаване на формулираните основни задачи, заключение, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията, използвана литература и приложения. Цитирани са общо **91** литературни източници, като **55** са на латиница и **36** на кирилица. Работата включва общо **64** фигури, **8** снимки, **25** таблици и **15** приложения. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ НА СЪВРЕМЕННОТО СЪСТОЯНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ, СТРОИТЕЛСТВО, ЕКСПЛОАТАЦИЯ И ПОДДЪРЖАНЕ НА РУДНИЧНИТЕ ПЪТИЩА

1.1. Съвременно състояние и приложение на рудничния транспорт в открити рудници и кариери

Откритият начин на разработване на находища на полезни изкопаеми остава основното направление в световната миннодобивна промишленост. За повишаване производителността на миннодобивните предприятия се проектират и внедряват различни методи за отработване на откритите рудници, особено при тяхното удължаване (*Галушко, 1980*). Рудничният транспорт се явява свързващо звено в общия технологичен процес. Разходите за транспортиране и свързаните с него спомагателни работи са около 45-50%, а в някои случаи достигат и до 70% от общите разходи за добив на полезното изкопаемо (*Колчанов, 2010*).

Към особеностите на рудничния транспорт, предопределен от спецификата на минните изработки, се отнасят (*Василев, 1997*) значителния обем на товаропотоците, съставляващи десетки милиона тона за година, и продължителни срокове на тяхното функциониране (почти през целия срок на експлоатация); къси транспортни разстояния (средно от 2 до 4 km); движение на натоварените транспортни средства при стръмни наклони (често гранични по отношение на техническите възможности на самосвалите); периодично изместване на забоите (добивни и насипищни); високата плътност (от 1 до 5 t/m³), якост и абразивност, нееднородност на късовия състав на транспортираната минна маса, предизвикваща ударно въздействие при натоварване и разтоварване.

Характерно за откритите рудници е използването на почти всички видове технически средства за преместване на товарите. Според начина на преместване на товари, вида на ходовото устройство и на пътя, най-разпространените видове рудничен транспорт са железопътен, автомобилен, конвейерен, хидравличен, гравитационен, воден и комбиниран.

Транспортните комуникации, в частност автомобилните пътища, са един от основните елементи при разкриване на рудничното поле и открития рудник. От тяхното състояние до голяма степен зависи ефективността от използването на рудничния транспорт и откритото разработване на находището като цяло (*Копрев, 2015*). С отчитането на това, че ефективността на откритото разработване на находищата на полезни изкопаеми при използване на автомобилен транспорт зависи от параметрите и качеството на рудничните пътища, следва най-прецизно да се подходи към въпроса за тяхното проектиране, поддържане и превантивно контролиране.

Транспортните схеми и движението на транспортните средства се определят от минно-техническите условия на разработване на находището, направлението и разстоянието на транспортиране на откривката и полезното изкопаемо, както и възможностите за маневриране (сн.1.1). Рудничните пътища трябва да обезпечават минимална технологична връзка между забоите в рудника и местата за разтоварване на повърхността (*Кътов и др., 1985*).

Проектирането и строителството на руднични пътища бележи значителен теоретичен и практически опит (Василев, 1990; Галушко, 1980; Колчанов, 2010, Копрев, 2015; Сидяков, 2011 и други).

С най-голям относителен дял в структурата на себестойността при транспортиране на минната маса са разходите за техническо обслужване и ремонт на транспортните средства (самосвали и дъмпери), които са в границите 30-40%. Практиката показва, че износването на самосвалите с голяма товарносимост в процеса на експлоатация се отличава в различните открити рудници и зависи както от минно-техническите, така и от пътно-транспортните фактори. Към пътно-транспортните фактори се отнасят основно неравностите по пътното платно, които водят до намаляване на средната скорост на движение на самосвалите и съответно тяхната производителност, също така влошаване на ходовата част (шасито), мощността на двигателя и металната конструкция на самосвала (Копрев, 2015). В съвременните открити рудници и кариери вътрешните руднични пътища не винаги съответстват на технологичните изисквания при строителството и експлоатацията, поради временния характер на съоръженията.



Снимка 1.1 Общ вид на транспортна схема в открит рудник

Пътищата, разположени на работните площадки, срокът на експлоатация на които е ограничен от няколко месеца до една година, са с недостатъчно уплътнена основа и при липсата на ефективна система за отвеждане на повърхностните води се образуват различни по вид деформации като неравности (набраздявания), пропадания или потъвания, „дупки“ и други (сн.1.2).



Снимка 1.2 Деформации на пътното платно на рудничен път

Временните капитални траншеи, обслужващи бордовете на открития рудник обикновено служат в продължение на няколко години (от 3 до 5 години). Пътната настилка е дву- или трислойна и обикновено е изградена от чакъл или трошен камък. Строителството на вътрешните руднични пътища се извършва по опростена технология без да се обръща особено внимание на уплътняването на горните слоеве от пътната настилка. В резултат на това, пътната инфраструктура в определени участъци е изградена без необходимата специализирана технология. По време на експлоатацията на временните руднични пътища не се спазват технологичните изисквания, например не се отделя особено внимание на състоянието на отводнителните канавки. В резултат на това се появяват дефекти както по пътищата, така и в работната зона на рудника. Напречният профил на пътя е с обратен наклон и вдлъбната форма (сн.1.3). Това е предпоставка за задържане на вода в транспортната ивица, особено през есенния период, което води до разуплътняване на пътното покритие и натрупване на дефекти (сн.1.4 и сн.1.5).



Снимка 1.3 Рудничен път с неправилен профил, предизвикващ пропадания



Снимка 1.4 Рудничен път с неподдържана дренажна система



Снимка 1.5 Рудничен път с пластични деформации

Отстраняването на дефектите по пътищата се извършва чрез засипването им с чакъл и трошен камък, подравняването и уплътняването на които става посредством булдозер или автогрейдер. Причините за възникването на деформации в пътното платно и неговото разрушаване често пъти са свързани с недостатъчната носеща способност на пътната настилка. Конструкцията на пътя е опростена, имайки предвид временния характер на вътрешните руднични пътища, природните условия, параметрите на рудничния товаропоток и физико-механичните свойства на материалите. Технологията на строителство и ремонт на пътищата също е опростена,

което също води до по-бързото износване и влошаване на състоянието на пътното платно.

Недостатъчното системно наблюдение и контрол върху качеството на пътностроителните материали и експлоатационните характеристики на пътната настилка е друг съществен аспект. Липсват цифрови методи и модели за оценка на резултатите от работата на рудничния транспорт, което оказва негативно влияние върху ефективността на управление и обслужване на транспортната система в открития рудник.

Повишаването на ефективността на открития добив на полезни изкопаеми може да се постигне именно с оптимизирането на пътните условия за експлоатация на технологичния транспорт.

Факторите, които оказват влияние върху пътните условия, а оттам и върху ефективността на рудничния автотранспорт са представени на фигура 1.1.



Фигура 1.1 Структура и взаимно свързани фактори, определящи пътните условия и ефективността на рудничния автотранспорт

Проведените изчисления и анализи в редица открити рудници, показват че изпълнението на проектната технология на строителство на рудничните пътища може да доведе до следните резултати: намаляване на разхода на гориво с около 7%, намаляване на разходите за основен ремонт с 25%, по-висока производителност на автотранспорта с 3%, по-висок коефициент на използване на автопарка с 15%; повишаване пробег на едрогабаритните гуми с 18% (Бахтурин, 2009).

Установено е, че отстраняването или намаляването на отказите на гумите, поради разкъсване, разслояване и пробиване, може да увеличи срокът им на

използваемост с 40-50%. С 25 – 40% може да се намали броят на отказите, ако се намали динамичното натоварване при движение от металната конструкция на самосвала.

1.2. Видове и особености при работа на рудничния транспорт в откритите рудници и кариери в Р България

Съгласно регистърът на действащите концесии за добив на полезни изкопаеми към 01.01.2024 г. (Министерството на енергетиката) 527 от находищата се разработват, като разпределението им по групи е както следва: метални полезни изкопаеми - 20 бр., неметални полезни изкопаеми - индустриални минерали – 75 бр.; нефт и природен газ - 17 бр., твърди горива - 16 бр., строителни материали - 320 бр., скално-облицовъчни материали - 79 бр.; минни отпадъци - 1 бр. Посочените данни показват значимостта на добива на полезни изкопаеми за икономиката на нашата страна, тъй като минералните суровини са в основата на всяка друга индустрия. Освен това, над 80% от минно-добивните работи се извършват по открит начин.

Представените данни за развитието на открития добив на полезни изкопаеми в нашата страна показват, че приоритетно като основен рудничен транспорт се прилага автомобилният. Най-често използваните руднични самосвали в условията на откритите рудници (рудник „Елаците“, рудник „Асарел“, рудник „Ада тепе“, мина „Станянци“, мина „Бели брег“, и кариери за добив на строителни материали като варовици, доломити, мергели и други - „Каменец“, „Янаклъка“, „Драгоево“, „Кариерата и редица други) в Р България са БелАЗ-75473, БелАЗ-5473, БелАЗ-540А, БелАЗ-75131, БелАЗ-7555, НІТАСНІ, БелАЗ-75135, КамАЗ 45143, MAN, Mercedes, Камаз 55111, ТАТРА Т815, Дъмпер Cat 745С, Дъмпер САТ 745G, САТ 770G с товароносимост от 10 до 130 t. С най-висок относителен дял са 130-тонните БелАЗ 75131 – около 52%.

Същевременно транспортно-експлоатационните качества на технологичните автопътища дори и в най-съвременните открити рудници в България все още изискват подобрене.

Автомобилните пътища на работните стъпала, срокът на експлоатация на които като правило е от няколко месеца до година-две, се изпълняват във вид на подравняване на слой с дебелина 20 – 30 см на скална основа или с дебелина 50 см, ако работното стъпало е върху слаба носеща основа. Този слой се формира често пъти от раздробена скална маса, която се уплътнява с помощта на булдозери в процеса на подравняване, а след това от автосамосвалите в процеса на тяхната експлоатация.

Естествено степента на уплътнение на тези пътища е недостатъчна и често пъти неравномерна. Това и липсата на ефективно повърхностно отвеждане на водите обуславя интензивното натрупване на такива дефекти като пропадания, вълнообразни гребени, дупки и изнасяне на материал от пътната настилка.

Независимо от редицата изследвания, внедрените нови технологии и оптимизирането на транспортните схеми в откритите рудници, не винаги се намира адекватно или цялостно решение за постигане на желаните технико-икономически

показатели на рудничния транспорт. Проблемите, свързани с проектирането, строителството, експлоатацията и поддържането на рудничните пътища остават актуални и са ключово направление за изследване и разработване в минно-добивния отрасъл.

1.3. Особености на елементите от конструкцията на рудничните пътища

Ефективното осигуряване на безопасно и високопроизводително движение на технологичния транспорт и спомагателната механизация по вътрешнорудничните пътища е важна задача както по време на проектирането, така и по време на строителството на откритите минни изработки. Безопасността, скоростта, комфорта и пропускателната способност са приоритетните характеристики на рудничните пътища, за които се определят геометричните им параметри.

В таблица 1.3 са представени данни за параметрите на рудничните пътища за някои открити рудници и кариери в Р България.

Пътната настилка при постоянните руднични пътища при необходимост се изгражда от три различни материала (набл.1.4).

През последните години се наблюдава ръст в номиналната стойност на товароносимостта на самосвалите, използвани в откритите рудници и кариери. Прави впечатление, че от средата на миналия век до сега, се използват все по-често самосвали с товароносимост почти 20 пъти по-голяма (от 15 тонни до над 280 тонни).

Таблица 1.3

Параметри на рудничните пътища за някои открити рудници и кариери в Р България

№	Параметри	№1	№2	№3	№4	№5	№6
1	Максимален надлъжен наклон на пътя, ‰	100	100	120	80	100	100
2	Максимален напречен наклон на пътното платно, %	2,0	2,5	2,0	3,0	2,5	2,0
3	Минимална широчина, m	24,0	10,0	25,0	21	20	18
4	Размери на канавките (широчина x дълбочина), m	2,5x1	2,0x0,8	3,0x1,0	2,3x0,9	2,0x1,0	1,8x0,8
5	Брой транспортни ивици	2	2	2	2	2	2
6	Обща дължина на наклонените участъци, km	8	4	6	5	2,5	3,0

В таблица 1.4 са представени някои видове материали за пътното строителство.

Таблица 1.4

Материали, използвани при строителството на руднични пътища

Строителен материал	Брой открити рудници и кариери	Относителен дял, %
Откривка	10	95
Пясък	2	20
Пясъчник	2	20
Глина	1	10
Трошен камък	4	45
Чакъл	2	30

Водещи производители на тежкотоварни самосвали карьерен тип са „Либхер“ (1999 г. е произведен първия самосвал с товароносимост 225 t), „Катерпилар“ (през 2009 г. е създаден първия прототип 450 t), „Комацу“ - модела „930E“ с пълна товароносимост 470 t, „БелАЗ“, „Волво“, „Мицубиши“ и други. Тази тенденция е характерна и за условията на откритите рудници в България, например в рудниците „Асарел“ и „Елаците“ се използват автосамосвали с товароносимост 130 t (БелАЗ 75131, БелАЗ-75135).

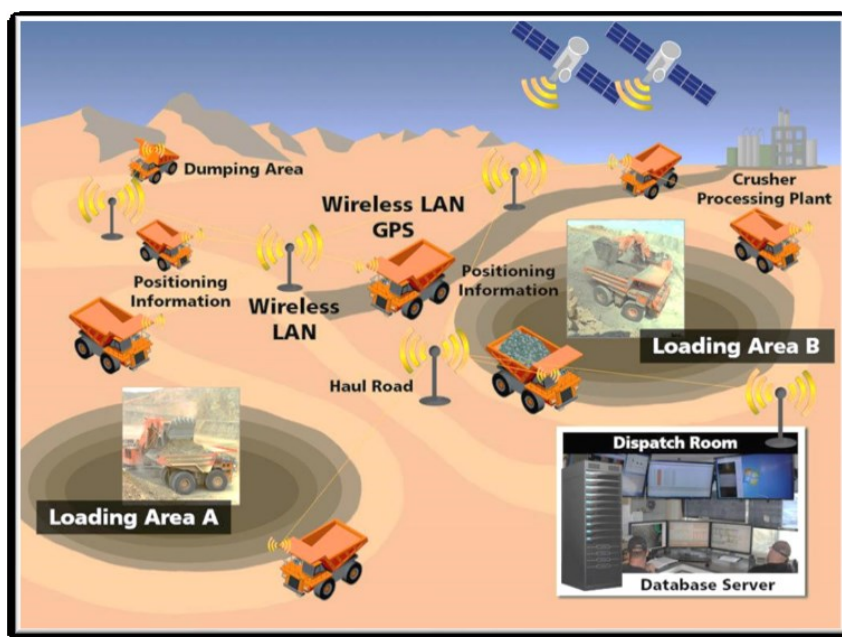
Рудничните пътища се проектират по такъв начин, че широчината им да превишава 3,5 – 4,0 пъти широчината на самосвала с голяма товароносимост.

Практическият опит в редица открити рудници с прилагането на автомобилен транспорт показва, че оптимални работни условия се постигат при максимален продължителен наклон не повече от 8 – 10%. Оптималният наклон от практиката при експлоатацията на тежкотоварни самосвали се счита в границите на 6 ÷ 8%.

1.4 Методи за оценка на състоянието на рудничните пътища и проблеми на качеството по време на строителството и експлоатацията

Всяка транспортна инфраструктура в минното производство изисква периодично обслужване, поради износване, въздействие на климатичните особености на територията на находището и други, при което рудничните пътища не са изключение. Планираните режими за поддържане и ремонт на рудничните пътища не могат да се дефинират като най-ефективния вариант.

Една от алтернативите за преодоляване на подобни трудности е мониторинга на работата на минната механизация, оказваща влияние върху пътните условия в режим на реално време. На фигура 1.10 е илюстриран подобен мониторинг.



Фигура 1.10 Схемa на предаване на данните за определяне на местоположението и състоянието на рудничните автосамосвали (<https://www.wencomine.com/post/hitachi-wenco-join-forces-revolutionize-mining-industry>)

Съвременните технологии предлагат решения със специализирани устройства, получаващи информация от бордовия компютър на самосвала за всички необходими данни, които след това се обработват със стандартни софтуерни продукти.

Предходните изследвания описват голям брой методи за оценка на качеството на рудничните пътища в т.ч. измерване на параметрите на вибрации, изместване на коша на самосвала, сканиране на напукаността на пътното платно и други. Основният недостатък на всички методи е сложността при обработка на данните спрямо мястото на установяване на дефектите по рудничните пътища и оценка на влиянието им върху конструкцията на транспортното средство.

Някои производители на минна механизация са разработили и внедрили собствени системи за контрол на състоянието на рудничните пътища.

Мониторингът на тези данни позволява на минно-добивните предприятия да идентифицират и ремонтират пътни участъци, които биха могли да повлияят на продължителността на курса на самосвала и срока на експлоатация на елементите на рудничния транспорт (руднични пътища, самосвали и спомагателна механизация). В резултат на обезпечаване на надеждно поддържане на рудничните пътища, а това означава по-безопасни условия на работа, се намалява механичното износване и физическото натоварване, повишава се комфорта при движение на самосвала, намаляват се разходите за гориво, а също и разходите за гуми във връзка с неблагоприятните работни условия, разходите за експлоатация като цяло и други компоненти, респ. повишава се техническата готовност на транспортните средства.

Изводи към първа глава:

1. Откритият добив на полезни изкопаеми запазва тенденции на висок относителен дял спрямо останалите минно-добивни технологии и е предпочитан в сравнение с подземния добив.

2. В откритите рудници в България се прилагат почти всички видове рудничен транспорт като за условията на разработваните рудни находища и кариери за добив на инертни и строителни материали се е утвърдил автомобилният транспорт.

3. Решаващ фактор за прогнозиране срока на експлоатация на рудничните пътища е отчитането на скоростния режим на движение на транспортните средства (в частност на автосамосвалите) по проблемните участъци с наличието на различни видове деформации.

4. Въз основа на извършения анализ е изведен предварителен извод, че при изследванията свързани с мониторинга на качеството на пътното платно е целесъобразно да се използва комплексен подход, съчетаващ теоретичните и експерименталните методи за наблюдение и регистриране параметрите на различните видове деформации.

5. Установено е, че ефективността на рудничния транспорт се определя от състоянието на рудничните пътища, броят и техническите параметри на самосвалите и се оценява производителността и себестойността, които до висока степен зависят от наличието на дефекти по пътното платно.

ГЛАВА 2. ОПТИМИЗИРАНЕ НА КОНСТРУКТИВНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА РУДНИЧНИТЕ ПЪТИЩА

2.1. Съвременни предпоставки за оптимизиране на конструктивните параметри на рудничните пътища

Рудничните пътища, предназначени за извозване на минната маса представляват сложни инженерни съоръжения, при които трябва внимателно да се вземат конкретни проектни решения преди да започне експлоатацията на открития рудник.

Изследователският подход включва преглед и анализ на научната литература, за да се установи цялостно разбиране на текущото състояние на познанията при оптимизацията на технологичните схеми при строителството на руднични пътища. Различните видове модели за оптимизиране строителството на рудничните пътища обикновено се включва основно два аспекта: минимално транспортно разстояние и енергопотребление.

В работата си Liu и Chai (2019) се фокусират върху оптимизирането на рудничните пътища с цел минимизиране на променливата консумация на енергия по време на извозване на минната маса. За да симулират характеристиките и ограниченията на показателите в стохастичната система, те разработват смесено-интегрална програма за моделиране, която включва променливи във времето параметри.

Златанов (2008) се фокусира по-специално върху състоянието на пътищата в големи открити мини, като „Мини Марица-изток“ ЕАД, „Мини Бобов дол“, „Асарел-Медет“ и други. Един от основните проблеми, подчертан от автора е неправилното инсталиране и поддръжка на отводнителни съоръжения, особено като сондажи.

В своето проучване Zhang et al. (2022) изследват оптималната съвместна работа на самосвал-багер за транспортни системи в открити рудници.

Thompson (2011) обобщава, че през последното десетилетие са разработени усъвършенствани насоки за проектиране и управление за удовлетворяване на изискванията на диспечеризацията в откритите рудници за по-безопасни и по-ефективни системи за превозване на минната маса, както и изискванията на производителите на автосамосвали за предвидима и контролирана работна среда.

Фигура 2.1 онагледява водещите параметри и показатели, свързани с рудничните пътища за автотранспорт в откритите рудници. Диаграмата илюстрира взаимодействието между различни фактори, които влияят върху проектирането, строителството и експлоатацията на рудничните при ефективно и безопасно движение на самосвалите.

Постигането на оптимални резултати при проектирането на пътища изисква задълбочен анализ на отличителните характеристики и приоритети на всеки параметър, като се набляга на критичната необходимост от балансиран и интегриран подход при разработването на цялостен математичен модел.



Фигура 2.1. Основните параметри, свързани с рудничните пътища при използването на автотранспорт в открити рудници

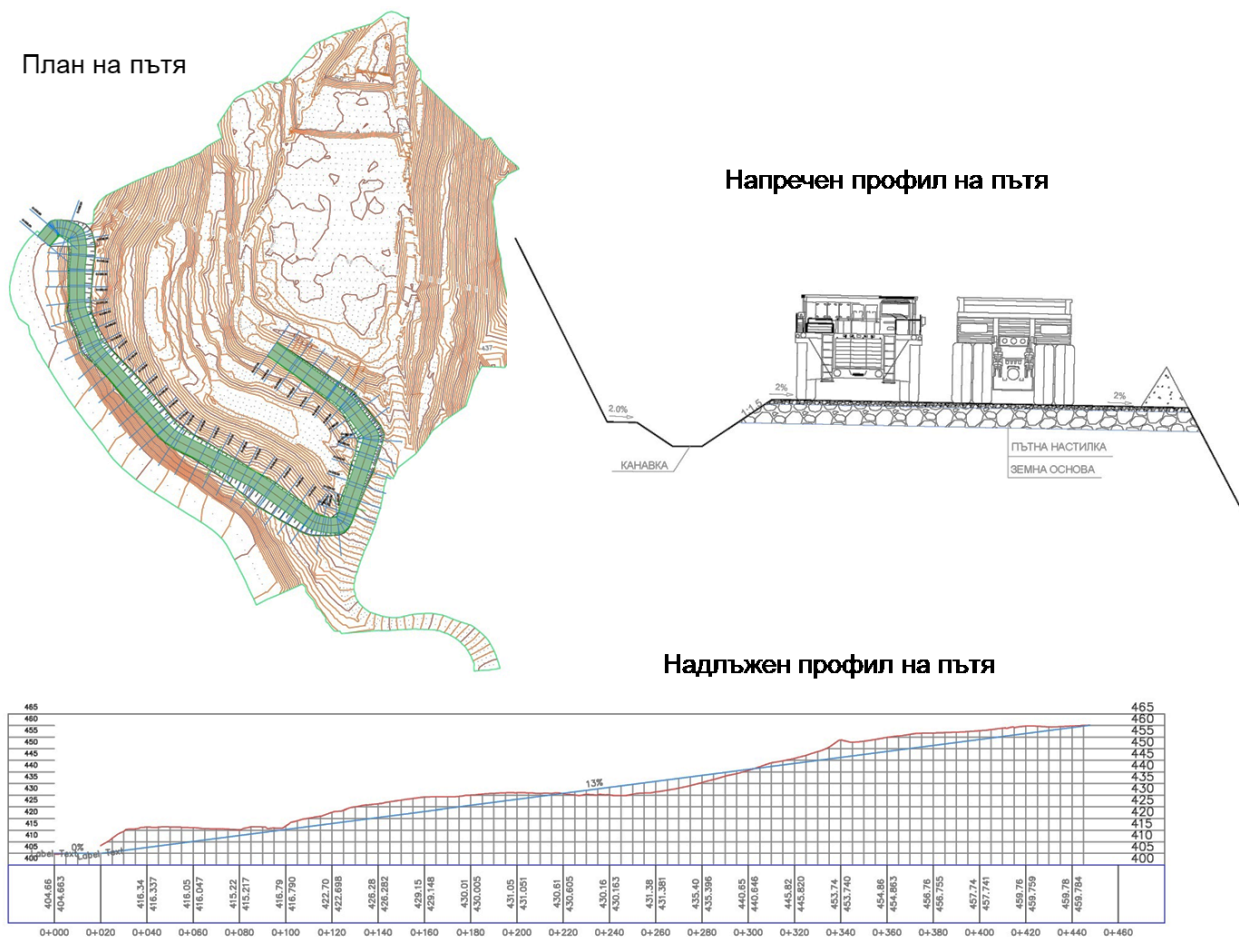
Необходимостта от синхронизиране на специфичните показатели и приоритети на всеки параметър за осигуряване на изчерпателно и ефективно решение за строителство на руднични пътища подчертава значението на съгласувания и последователен подход в процеса на моделиране.

2.2. Теоретични основи при оразмеряване на рудничните пътища в план и профил

Начинът на разкриване на работните хоризонти и разположението на пътищата свързващи рудничните комуникации с пътищата с общо предназначение се определя след задължително отчитане преместването на контурите на открития рудник за периода на неговото съществуване.

Елементите на рудничните пътища се определят, съгласно хоризонталната проекция на трасето - *планът* на пътя и вертикалните – *надлъжен и напречни профили* (фиг. 2.2). Пътят в план се състои от праволинейни и криволинейни участъци, а в профил – от хоризонтални и наклонени участъци, а също и от преходни участъци между тях, които осигуряват плавни преходи за транспортните средства.

Основните параметри на трасето са: големина на ръководящия наклон; денивелацията или разликата във височините в началото и края на трасето; минимални радиуси на криволинейните участъци; теоретична и действителна на трасето; брой и конструкция на пунктовете на присъединяване на хоризонталните участъци (пътища) към наклонените.



Фигура 2.2. Елементи на рудничните пътища в план и профил

Надлъжният профил на трасето се характеризира с големината на ръководящия наклон и дължината на отделните елементи от трасето.

Формата на трасето в план се определя в съответствие с: размерите на рудничното поле; крайната дълбочина на рудника; ръководящия наклон и елементите на профила на трасето.

Друг важен елемент на рудничните пътища е пропускната способност, която се определя от максималния брой самосвали, които могат да преминат за единица време. Тя зависи от броя на платната за движение, качеството и състоянието на проходимата част, скоростта на движение на автомобилите и може да се определи по една от формулите (Копрев и др., 2022):

Превозната способност на пътя се определя от възможния обем на товара, превозван от него за единица време.

2.3. Методика за оптимизиране надлъжния профил на рудничните пътища

Едно от направленията за оптимизиране надлъжния наклон на рудничните пътища е въз основа на физически критерии:

- относителният разход на гориво при изкачване (или спускане) за извозване на един тон минна маса на разстояние един метър (g/tm);

- общото време за движение по наклонените участъци на натоварените и празните самосвали съответно при изкачване и спускане (s);
- комплексен относителен критерий, отразяващ производението на разхода на гориво за извозване на минната маса по наклонени участъци и времето за движение (gs/tm).

От физиката е известен принципа на най-малкото действие (принципът на Хамилтон), който при известни допускания и опростявания може да се приложи при транспортните системи в откритите рудници.

Относителният разход на гориво на натоварените самосвали при изкачване се определя от израза:

$$P = \frac{2,725 \cdot 10^{-3} g_n (k_m + 1) \left(\frac{\omega_o}{i} + 1 \right)}{\eta_a} + \frac{g_x}{1000 i G v_{n_i}}, \text{ g/tm}, \quad (2.11)$$

където: g_n е относителният разход на гориво при номинално натоварване на двигателя, g/kWh;

k_m - коефициентът на тарата на самосвала;

ω_o - коефициент на съпротивление при изкачване;

η_a - коефициент на полезно действие на трансмисията (предавката) на двигателя на автосамосвала;

i - надлъжен наклон на рудничния път;

g_x - относителният разход на гориво при движение на празните самосвали при спирачен режим, g/h;

G - товароносимост на самосвала, t;

v_{n_i} - скорост на движение на празните самосвали при спускане в участъци с наклон i , km/h.

При движение на самосвала при спускане по наклон, относителният разход на гориво на се определя от израза:

$$P = \frac{2,725 \cdot 10^{-3} g_n (k_m + 1) \left(\frac{\omega_o}{i} + 1 \right)}{\eta_a} + \frac{g'_x}{1000 i G v_{r_i}}, \text{ g/tm}, \quad (2.12)$$

където g'_x е относителният разход на гориво при движение на натоварените самосвали при спирачен режим, g/h;

v_{r_i} - скорост на движение на натоварените самосвали при спускане в участъци с наклон i , km/h.

Поради сложното аналитично описание при изчисляване на η_a се препоръчва да се използват експериментални зависимости от общото съпротивление на движение.

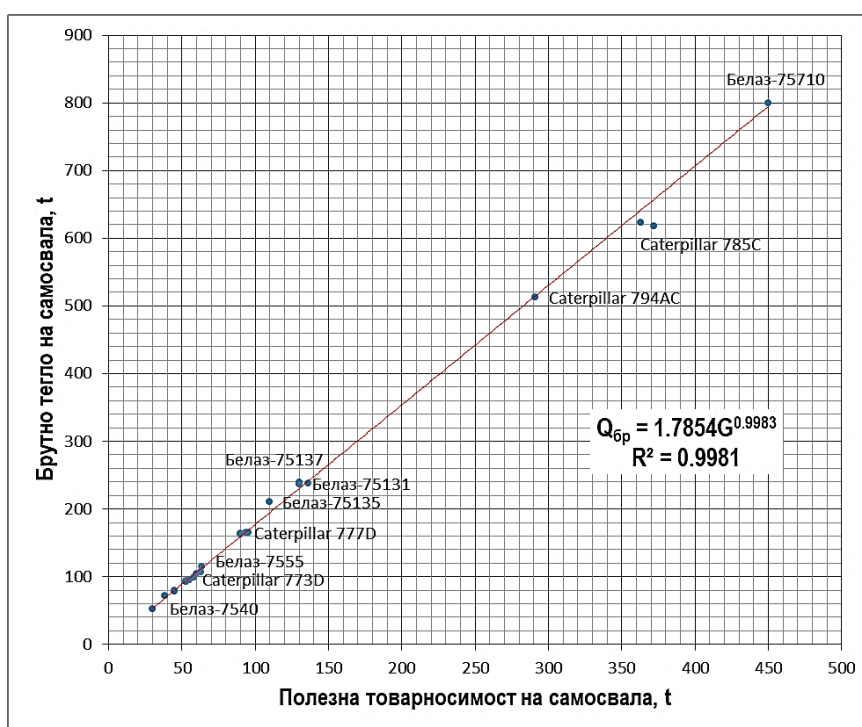
Оптималните наклони по отношение на продължителността на курса на самосвала са с 18-20% по-високи от оптималните наклони по критерия за специфичен разход на енергия.

2.4 Обосноваване конструкцията на пътната настилка на рудничните пътища

При оразмеряване на пътната настилка е необходимо да се отчете осовото натоварване на самосвалите, тъй като натоварването върху задната ос на натоварения самосвал превишава нормативните стойности за пътища с общо предназначение над 40 пъти и повече. Въз основа на направените изводи, внедряването на самосвали с по-голяма товарносимост 110 – 130 t и повече налагат съществени изменения на параметрите и конструкциите на пътната настилка на рудничните пътища.

Зависимостта между пълната маса (брутното тегло) на рудничните самосвали ($Q_{бр}$, t) и неговата товарносимост (G , t) (фиг.2.7) има вида:

$$Q_{бр} = 1,7854G^{0,9983}, \quad (2.15)$$



Фигура 2.7 Графика на зависимостта на пълната маса на самосвала ($Q_{бр}$, t) и товарносимостта (G , t)

Понастоящем не съществуват утвърдени или универсални методи за изчисляване на конструкцията на трошено-каменна настилка за руднични автомобилни пътища. Редица автори използват методите за отчитане на напрегнато-деформирано състояние и пластични деформации на многослоен масив (Колчанов, 2010; Сидяков и др., 2011). Методиката е намерила практическо приложение при оразмеряване на трошено-каменни настилки за автосамосвали тип Komatsu 930E с товарносимост 290 t в открити рудници в Канада (Tannant and Regensburg, 2001).

Пътната настилка се изчислява в съответствие с необходимата степен на надеждност, при която съществува вероятност за безотказна работа в продължение на междуремонтния период.

Един от основните показатели на пътната настилка е носещата способност на пътя. За да се даде оценка по този показател е необходимо да се определи:

- модула на еластичност на конструкцията в зависимост от общия брой на приложените изчислителни натоварвания;
- устойчивостта на срязване на слабосвързаните материали от конструктивните слоеве и основата;
- опънните напрежения при свързаните слоеве.

Изчислява се еквивалентното натоварване от единично колело, което се създава в пътната настилка при същото ниво на напрегнато-деформирано състояние, каквото се наблюдава при едновременното въздействие на разглежданата група колела на транспортното средство. Еквивалентното натоварване се определя от израза (Сидяков и др., 2011):

$$Q_{i,екв.} = Q_k K_d (\sum g_i + 1) (\sum q_i + 1), \quad (2.16)$$

където: Q_k е натоварването от разглежданото колело на транспортното средство, kN ;

K_d – коефициентът на динамичност от приложеното натоварване, приеман за 1,1;

$\sum g_i$ - сумата от коефициентите, характеризиращи влиянието на предните колела (g^+) и задните колела (g^-) на напрегнато-деформираното състояние под разглежданото колело на транспортното средство;

$\sum q_i$ - сумата от коефициентите, характеризиращи влиянието на другите колела за разглежданата ос.

Коефициентите g^+ , g^- и q се определят по номограмите, представени в приложения №1-3 (в дисертационния труд) в зависимост от отношението $\frac{E_{cp}}{E_o}$, $\frac{h}{D}$ и $\frac{r}{D}$:

където E_{cp} е среднопритеглената стойност на модула на еластичност на пътната настилка, MPa ;

E_o – модулът на еластичност на основата, MPa ; определя се в зависимост от изчислителната стойност на естествената влажност на основата, определена от полски изследвания при многократно преминаване на транспортните средства (табл. №2.6);

h – общата дебелина на слоевете на пътната настилка, cm ;

D – диаметърът на отпечатъка на движещото се колело, определен чрез израза:

$$D = \sqrt{\frac{40K_d Q_{i,екв.}}{\pi r}}, \text{ cm}; \quad (2.18)$$

r – атмосферното налягане в гумите на самосвала, MPa ;

r – разстоянието от изчислителното сечение до разглежданата точка, cm .

Таблица 2.6

Модул на еластичност на основата, изградени от различни материали

Основа (материал)	Изчислителни характеристики		
	Модул на еластичност, E_0 , МПа	Ъгъл на вътрешно триене, φ_0, \dots°	Кохезия, C_0 , МПа
Пясък, едрозърнест, чакълест	130	42	0,005
Пясък, среднозърнест	120	40	0,005
Пясък, дребнозърнест	100	38	0,005
Пясък, еднороден	75	33	0,005
Глина, едрозърнеста пясъчлива	65	40	0,005

Върху носещата способност на пътната настилка оказва влияние интензивността на движение или товаропотокът, който се формира в открития рудник. При равномерно движение на самосвалите и други обслужващи транспортни средства, броят на самосвалите за единица време (час, денонощие) може да се определи с формулата:

$$N = f \left(\sum_{i=1}^n N_i S_i + \sum_{j=1}^m N_j S_j \right), \text{ бр./ден.}, \quad (2.20)$$

където: f е коефициент, отчитащ броя транспортните ивици и разпределението на движението по тях (за едноивично движение $f=1,0$; за двуивично движение $f=0,55$ и за триивично движение $f=0,50$);

N_i – броят на самосвалите в денонощие с отчетено натоварване на всяка ос $Q_{i,екв.}$;

S_i – корекционен коефициент за определяне на изчислителното натоварване спрямо еквивалентното $Q_{i,екв.}$, (приложения №№4-6);

N_j – броят на спомагателните транспортни средства с отчетено натоварване на всяка ос $Q_{i,екв.}$;

S_j – корекционен коефициент за определяне на изчислителното натоварване спрямо еквивалентното $Q_{i,екв.}$ за спомагателните транспортни средства, (приложения №№4-6).

n – броят на осите на самосвалите;

m – броят на осите на спомагателните транспортни средства.

Конструкцията на пътната настилка трябва да удовлетворява изискванията за надеждност и здравина по критерия модул на еластичност (Сидяков и др., 2011):

$$K_{н.сп.} \leq \frac{E_{сп.}}{E_{дон}}, \quad (2.26)$$

където: $K_{н.сп.}$ е коефициент на носещата способност на конструкцията на пътната настилка;

E_{cp} – средната стойност на модулът на еластичност на конструкцията на пътната настилка, МПа;

$E_{дон}$ – минимално необходимата допустима стойност на модулът на еластичност на конструкцията на пътната настилка, МПа.

Конструкцията на пътната настилка се счита за здрава, ако коефициентът на носещата способност по всеки от разгледаните критерии е по-голям или равен на посочените стойности в таблица 2.8 с отчитане на коефициента на надеждност K_n .

Таблица 2.8

Коефициенти на надеждност и носеща способност при проектиране на конструкцията на пътна настилка на руднични пътища

Тип на пътната настилка на рудничните пътища	Коефициент на надеждност, K_n	Коефициент на носеща способност, $K_{н.сп.}$
За постоянни пътища и капитални траншеи	0,95	1,00
За постоянни вътрешноруднични пътища	0,90	0,94
За временни руднични пътища	0,60	0,63

Счита се, че решението е оптимално, когато изчислителните стойности на E_{cp} са с разлика по-малка от 3% в сравнение с определените по номограмата. Това условие се проверява с формулата:

$$\frac{E_{cp} - K_{н.сп.} E_{дон}}{K_{н.сп.} E_{дон}} \leq 3\% . \quad (2.27)$$

Пътната настилка се оразмерява и по условието за срязване в основата или при слаба основа. Извършва се проверка на условието (Сидяков и др., 2011):

$$K_{н.сп.} \leq \frac{\tau_{дон}}{\tau} , \quad (2.28)$$

където: $\tau_{дон}$ е допустимото срязващо напрежение, МПа;

τ - активното срязващо напрежение от натоварването, определено по номограмата, представена в приложение 10, МПа.

Намирането на оптимално решение при оразмеряване на конструкцията на срязване е при изпълнение на условието:

$$\frac{\tau_{дон} - K_{н.сп.} \tau}{K_{н.сп.} \tau_{дон}} \leq 3\% . \quad (2.32)$$

Процесът на неравномерно динамично натоварване на пътната настилка при движение на самосвалите по вътрешните руднични пътища представлява сложен инженерно-геоложки и геотехнически казус, който не подлежи на лесно аналитично описание чрез класическите закони на механиката или физиката. За подобен род явления широко приложение при търсене на емпирични връзки намира уравнението от вида $y=x^n$, където n е реален числов показател и $0 < n < 1$. Емпирично полученият степенен показател n отразява нелинейната връзка между натоварването и отговора (реакцията)

на настилката, като тази нелинейност се дължи на сложния характер на процесите в структурата на настилката.

При преминаването на транспортни средства, пътната настилка е подложена на съчетание от сили, включително нормални (вертикални) натоварвания и срязващи сили.

Въз основа на експериментални данни и разгледани варианти на най-често прилаганите самосвали в откритите рудници в България с товарносимост от 45 до 130 t при изменение на товарооборота от 2 до 10 млн. t за година и срок на експлоатация от 1 до 10 години. В резултат на моделирането са получени зависимости, които дават възможност да се изчисли общата дебелина на пътната настилка (h , m), дебелината на долния (h_d , m) и горния слой (h_r , m).

Получени са следните зависимости например, при използване на самосвали тип БелАЗ-5473 (45 t):

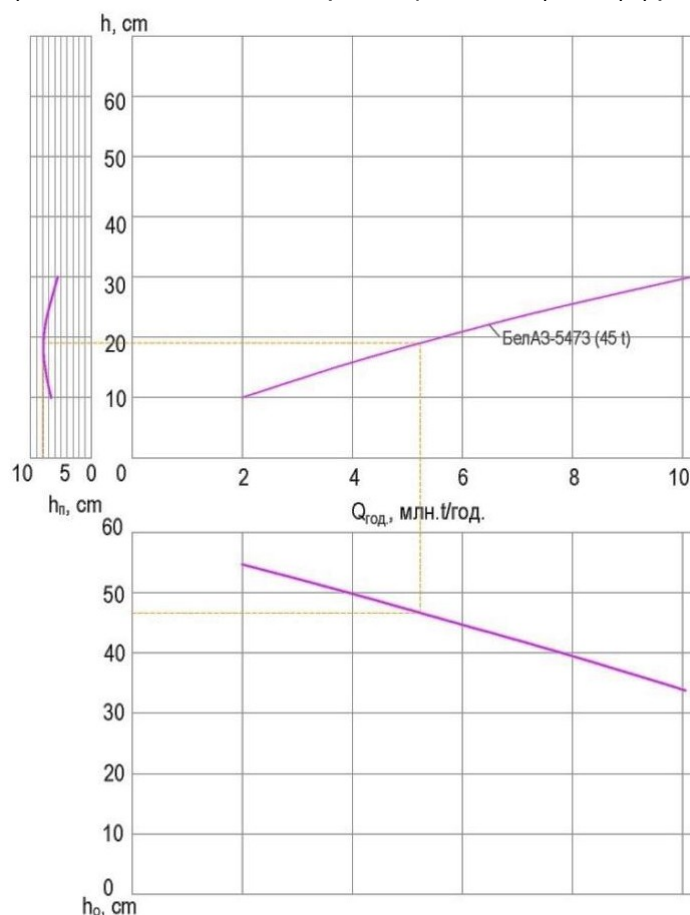
- обща дебелина на пътната настилка

$$h = 6,0593Q_{200}^{0,6808}, \text{ cm} \quad (2.37)$$

- дебелина на основата

$$h_o = 1,8799Q_{200}^{1,1134}, \text{ cm} \quad (2.38)$$

С получените регресионни модели са построени графики, с помощта на които може да се определи общата дебелина на пътната настилка (h , m), дебелината на основния слой (h_o , m) и дебелината на покриващия слой (h_n , m) (фиг.2.8).



Фигура 2.8 Графики за определяне дебелината на пътната настилка при скална основа при движение на 45 тонни самосвали

За повишаване на носещата способност при обводняване на слаби, склонни към размекване литоложки разновидности от земната основа, се препоръчва насипването на чакъл и пясък. За дрениране на водите, дебелината на слоя от пясък може да се приеме 30 cm.

Изводи към втора глава:

1. Представен е обобщен преглед на различните параметри и свързани с тях проблеми за оптимизация на технологичните схеми за строене на руднични пътища. Чрез синтезиране и анализиране на резултатите от редица научни и научно-приложни изследвания, предложени в разгледаните литературни източници, се стига до извода, че всеки конкретен параметър от конструкцията на рудничните пътища е свързан със специфични изисквания, както при проектирането, така и по време на експлоатацията и поддръжката на пътните условия в откритите рудници.

2. Предложени са физически критерии за определяне оптималния наклон на рудничните пътища. В резултат на извършения анализ са установени зависимости между изменението на коефициента на полезно действие на предавките на двигателя на рудничните самосвали, скоростта на движение и относителния разход на гориво в зависимост от общото съпротивление при движение по наклонени участъци.

3. Влошаването на пътната настилка води до увеличаване на оптималния наклон на пътя, причината за което е намаляване на транспортните разстояния, респ. специфичния разход на гориво.

4. Увеличаването на дълбочината на открития рудник води до изместване на областта на оптималност на надлъжния наклон на рудничните пътища, съгласно техническите ограничения.

5. Анализирана е значимостта на проектната конструкция и дебелината на пътната настилка върху ефективността на работа на рудничния транспорт. Въз основа на практически наблюдения и изследвания на различни модели руднични самосвали са установени корелационни зависимости между дебелината на пътната настилка и годишния обем на превозваната минна маса. Извършената интерпретация на връзката между посочените показатели от вида $y=x^n$ е резултат от баланса между способността на настилката да абсорбира и разпределя натоварването и степента, до която настъпват трайни или възстановими деформации. Анализът показва, че при $0 < n < 1$, увеличението на натоварването води до по-малко пропорционално увеличение на деформацията. Установена е нелинейна реакция от страна на материала на настилката, при която по-големите натоварвания не предизвикват толкова значителни увеличения на деформацията, както при по-малките натоварвания. Такива емпирични уравнения са изключително полезни в инженерната практика за прогнозиране на поведението на настилката при различни условия на натоварване; оценка на трайността и дълготрайността на настилките и за разработване на типови проекти за експлоатация, ремонт и поддържане на руднични пътища. Освен това, получените графики могат да намерят практическо приложение за изграждане на руднични пътища с устойчива конструкция и дълъг експлоатационен период.

ГЛАВА 3. КОМПЛЕКСЕН АНАЛИЗ НА СЪСТОЯНИЕТО НА РУДНИЧНИТЕ ПЪТИЩА И МЕТОДИ ЗА НАМАЛЯВАНЕ ВЪЗДЕЙСТВИЕТО НА ДЕФЕКТИТЕ ПО ПЪТНОТО ПЛАТНО ВЪРХУ ЕКСПЛОАТАЦИОННИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА РУДНИЧНИЯ ТРАНСПОРТ

3.1 Методи за измерване и анализ на деформациите по пътната настилка на обслужващите пътища в открити рудници

За оптимизиране на производствените показатели на рудничния транспорт, както и за намаляване на текущите разходи за поддръжка на обслужващите пътища, е необходимо да се разгледа възможността за разработване на методология за измерване и анализ на деформациите, възникнали по пътната настилка на обслужващите руднични пътища с относително лесни за усвояване и провеждане методи за определен интервал от време и за конкретни транспортни участъци.

Методологията за измерване и последващ анализ на деформациите (дефектите) трябва да включва регулярни измервания, максимално опростени, лесно усвоими от работния персонал, отговарящ за поддръжката на рудничните пътища и надеждно контролируеми в реално време (т.е. по време на самите измервания).

Заснемането на дефектите по рудничните пътища може да се извърши и със съвременни фотограметрични методи, след което да се дигитализират и да се обработят получените резултати. Предимството на метода се изразява в по-високата точност, но за сметка на това изисква допълнителна обработка на данните, което отнема време.

При опростения подход с ръчно замерване на дефектите по пътното платно, измерванията могат да се обезпечат със степен на достоверност в границите на допустимата инженерна грешка до 5%. В зависимост от конкретните условия на изследвания обект се определя извадка с минимален брой измервания с достатъчна представителност.

Методологията за измерване на деформациите на пътното платно на рудничните пътища се включва следните дейности:

1) Определяне на характерни участъци от рудничните пътища в зависимост от конструкцията на пътната настилка. За тези участъци се вземат проби за отделните слоеве и от земната основа (ненарушен масив);

2) Изследваните участъци се разделят на еднакви разстояния с произволна дължина l_j (за да се отчете случайния характер на възникване на деформации). С оглед на достатъчна видимост при замерванията се налага ограничение в границите $20 \text{ m} \leq l_j \leq 50 \text{ m}$, т.е. не по малки от 20 m и не по-големи от 50 m;

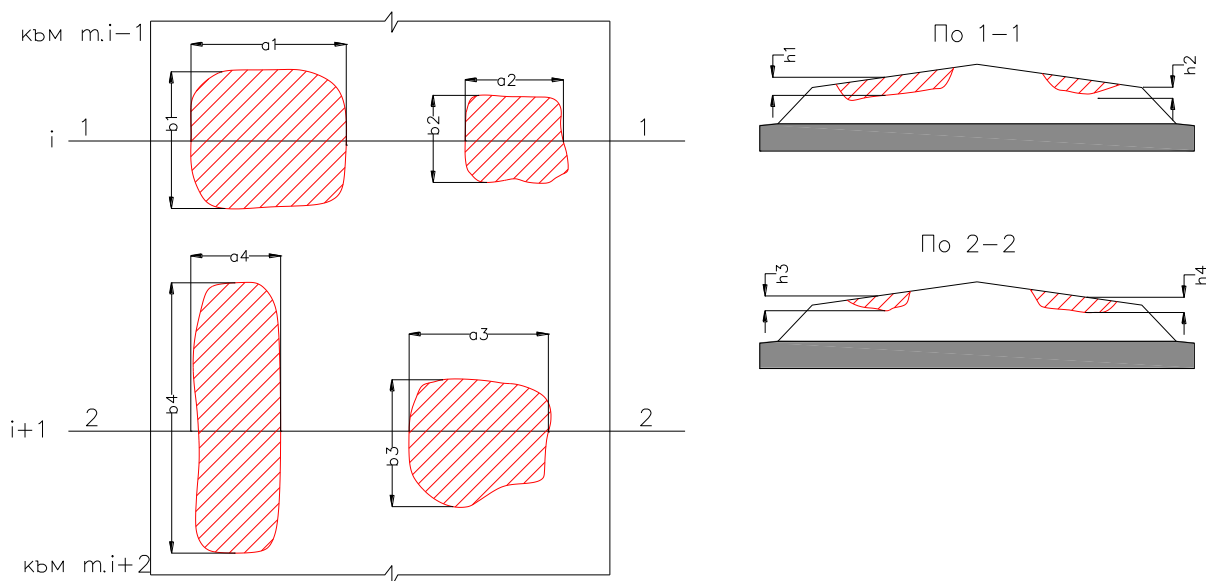
3) Установените дефекти се оконтуряват по размерите a_j и b_j до получаване на правилна геометрична фигура;

4) Измерва се най-голямата дълбочина h_j на съответната остатъчна деформация;

5) Получените резултати от измерванията се въвеждат в електронни таблици, съдържащи информация за координатите на участъка и размерите на установените

деформации в трите направления.

Същността на методика за измерване на деформациите е илюстрирана на фигура 3.1.



Фигура 3.1 Общ вид на регулярните измервания на деформациите на рудничния път

В таблицата се съдържа информация и за липсващите обеми от покритието на пътната настилка за всяка установена деформация с натрупване по дължината на изследвания участък.

Представената методика е апробирана за условията на открит руден рудник, където са извършени замервания на деформациите по вътрешнорудничните пътища на три отделни хоризонта – 705, 1020 и 1035 (сн.3.1).



Снимка 3.1 Общ изглед на транспортната площадка на хоризонти 705, 1020 и 1035

За строене на постоянните пътища се използват верижни булдозера тип CAT 10 R и CAT 8 N, колесни булдозери тип CAT 834 G и CAT 834 H, автогрейдери CAT 16 H, автосамосвали БелАЗ 75473, и челни товарачи CAT 966 K за товарене на скална маса и верижен булдозер CAT 8 T. Технологиата на строителство включва трасиране на пътя по проект; полагане на основа с дебелина 50 cm от скален материал с размери 75 – 150 mm; полагане на чакъл с размери 25 – 75 mm и дебелина на слоя 30 cm; полагане на износващ слой 7 – 25 mm, с дебелина на слоя 10 cm и изкоп на водоотливни съоръжения с автобагер Liebherr A 902.

За оценка на деформационното състояние на земната повърхност на вътрешнорудничните пътища се използва като критерий относителната дефермируемост на пътното покритие (Марков и др., 2004), която се изчислява от израза:

$$r = \frac{S_{\partial}}{S_{\text{общо}}}, \quad (3.1)$$

където: S_{∂} е площта на участъците с деформации по проходимата част от пътя, m^2 ;

$S_{\text{общо}}$ - общата площ на изследвания участък, m^2 .

На базата на изчисления критерий оценката се извършва по 3-бална скала:

I – $r=0,3 - 0,5$ - повърхността на проходимата част от участъка е относително равна; проектният профил е съхранен; отсъстват деформации, поради недостатъчна плътност и носеща способност на конструкцията; скоростта на движение не се ограничава от състоянието на пътното платно.

II – $r=0,5 - 0,7$ – напречният профил на голям брой места е износен; по оста на движение са налице вдлъбнатини с малка дълбочина; при преминаване на натоварения самосвал пътната настилка се деформира незначително, но без забележими остатъчни деформации;

III - $r=0,7 - 0,9$ – значително износване на напречния профил поради неравности, предизвикани от недостатъчната носеща способност на пътната настилка; при преминаване на самосвалите се забелязват остатъчни деформации по проходимата част.

Съгласно предложени критерии състоянието на пътното платно за изследваните хоризонти е съответно:

Хоризонт 705 – $r = 0,57$ – II степен на износване на пътя;

Хоризонт 1020 – $r = 0,18$ – състоянието на пътното платно е добро, проходимата част от участъка е относително равна; без трайни остатъчни деформации;

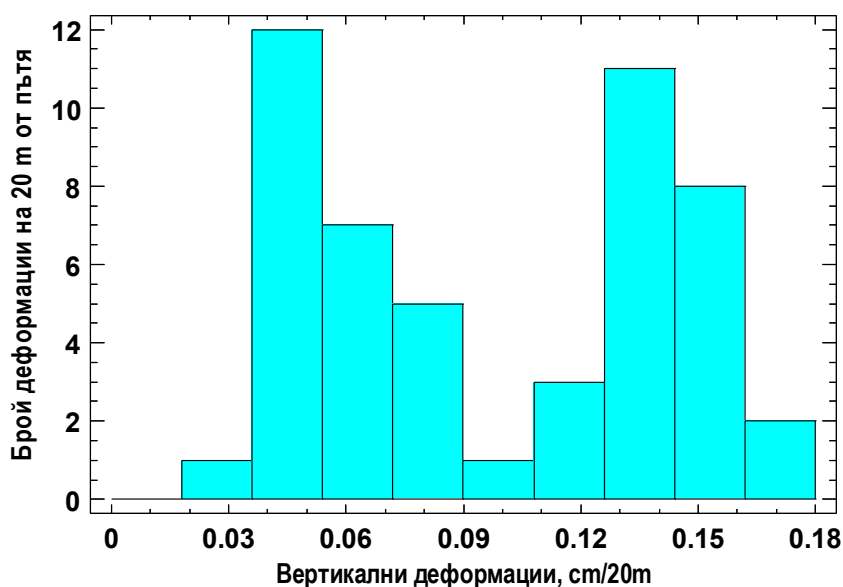
Хоризонт 1035 – $r = 0,22$ – състоянието на пътното платно е задоволително.

Един от основните показатели за качеството на рудничните пътища, което определя експлоатационните показатели на автосамосвалите, е равността (гладкостта) на пътя.

Ако на участък, с дължина равна на основата на самосвала, са налице 5 деформации с дълбочина от 3 до 5 cm или една неравност с дълбочина 10 cm с размери в план, непривишаващи отпечатъка на контакта на гумата с пътя, скоростта на движение на самосвалите в тези участъци не трябва да бъде по-висока от 25 km/h. При увеличаване на броя на дефектите скоростта на движение трябва да се поддържа в интервала от 15 до 20 km/h. В участъци от пътя с деформации с дълбочина над 20 cm експлоатацията на самосвалите се забранява.

Въз основа на получените резултати от измерванията могат да се направят предложения за нормативните стойности на неравностите по рудничните пътища.

На фигури 3.2 е представено разпределението на вертикалните деформации (неравностите) за съответните хоризонти.



Фигура 3.2 Разпределение на вертикалните деформации през 20 m спрямо надлъжната ос на транспортната площадка на хоризонт 705

3.2. Технологични схеми за повишаване ефективността на изграждане и уплътняване на пътната настилка на рудничните пътища

От съществено значение за повишаване експлоатационното състояние на рудничните пътища е уплътняването на пътната настилка, след нейното изграждане.

Практическият опит е доказал приложимостта на два вида уплътнителна техника за пътната настилка в руднични условия – вибрационни и статични валяци (Avalle, 2006; Kramadibrata et al., 2002; Tannant and Regensburg, 2001).

Анализът на съществуващите математически модели, които отразяват влиянието на разгледаните фактори върху ефективността на уплътняване дават основание да се изследва възможността за съвместно уплътняване с автосамосвали (Арефъев, 2015). Същността на технологичните схеми за уплътняване на настилка при строителство на руднични пътища се изразява в строго спазване на изискванията за броя на преминаванията по една и съща ивица от пътното платно, зададената скорост и натоварване на самосвалите. Процесът на уплътняване преминава през три етапа:

1) Валиране на ниска скорост при минимално натоварване за уплътняване на горния слой и постигане на нужната плътност;

2) Валиране или непосредствено уплътняване на пътната настилка до необходимата дълбочина при постепенно увеличаване на скоростта на движение и натоварването на самосвалите;

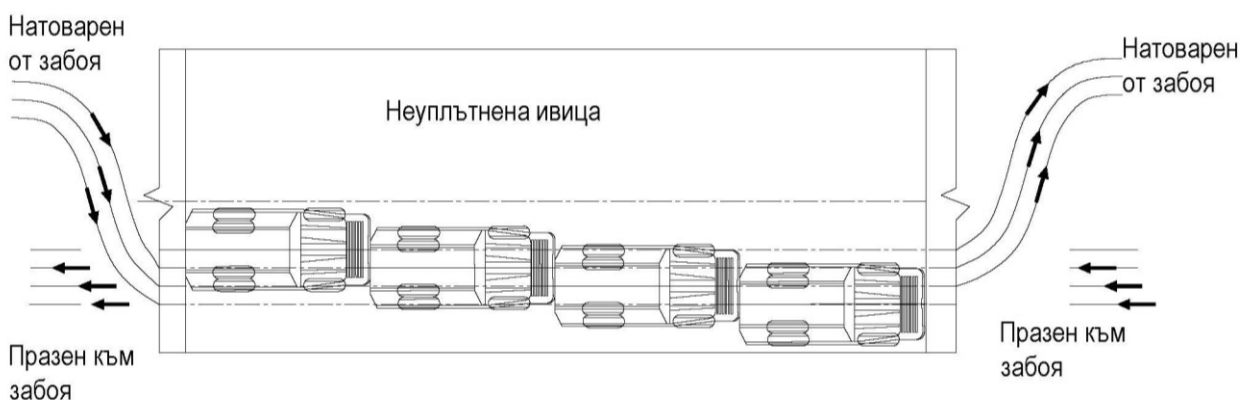
3) Заклиняване или окончателно уплътняване, извършено при минимална скорост с максимално натоварен самосвал. По този начин завършва формирането на структурата на материалите от пътната настилка като на повърхността на пътното платно се придава максимална заравненост и якост при уплътнен горен слой.

Въз основа на изследванията са разработени две технологични схеми на уплътняване с автосамосвали:

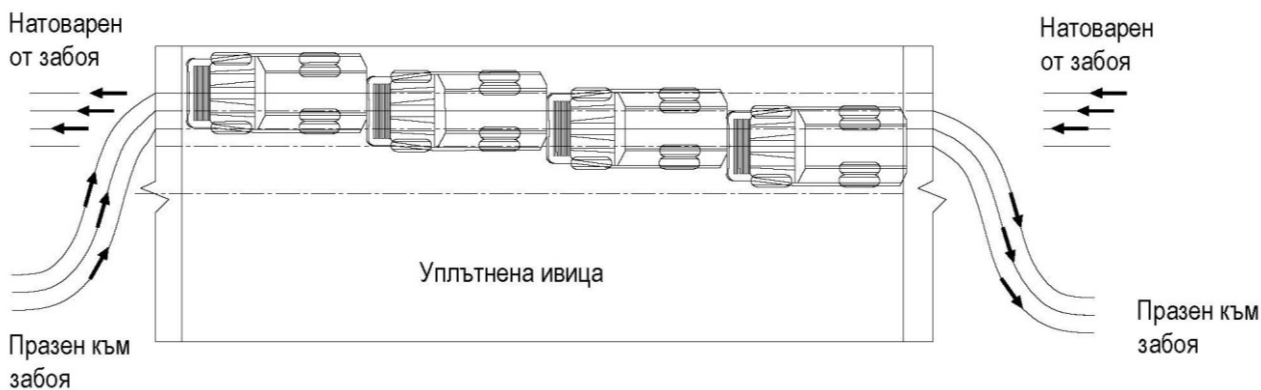
- при движение на самосвалите в участъци, без да бъдат изключени от транспортната схема на открития рудник, т.е. участъците се използват за извозване на минната маса;

- при движение на самосвали, предвидени само за процеса на уплътняване на пътната настилка по време на строителството на рудничните пътища.

При първата схема на движение по уплътнявания участък без изключването на самосвалите от транспортната схема на рудника се извършва преминаване на натоварени и празни самосвали (фиг.3.6 и фиг.3.7). Първоначално се уплътнява ивицата за преминаване на празните самосвали. През първия етап на уплътняване преминава празен самосвал, а през втория и третия етап – натоварените самосвали, с определените за целта количества (табл.3.5). По време на уплътняване на ивицата за движение на празните самосвали, натоварените самосвали се пренасочват от диспечера на движението. Разходът на време и загубите от производителността на самосвалите в резултат на намаляване на скоростта на движение по уплътнявания участък са незначителни (по-малко от 1%). Общите разходи на време зависят от интензивността на движение по уплътнявания участък.



Фигура 3.6 Схема на уплътняване на ивицата за преминаване на празните самосвали без изключването им от транспортната схема на открития рудник



Фигура 3.7 Схема на уплътняване на ивицата за преминаване на натоварените самосвали без изключването им от транспортната схема на открития рудник

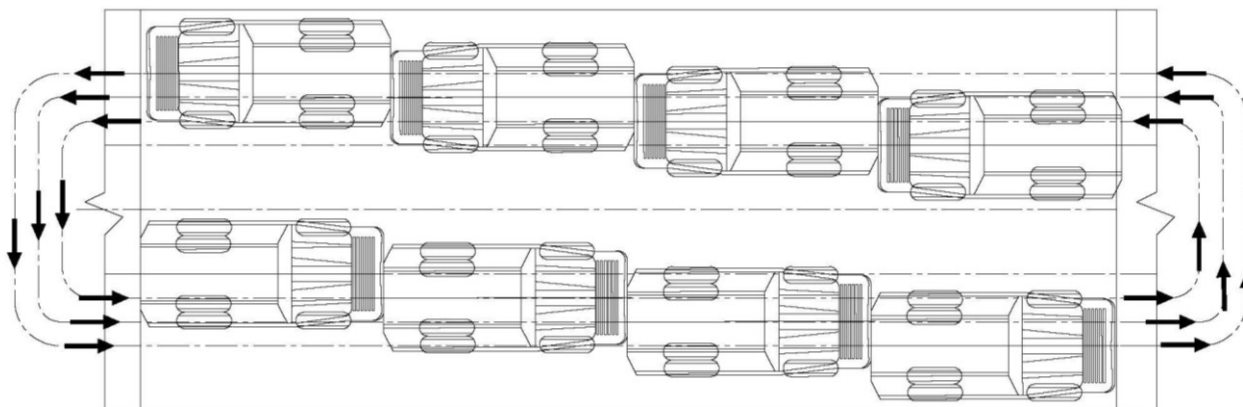
Таблица 3.5

Технологични препоръки за уплътняване на пътна настилка на постоянни руднични пътища с автосамосвали с товароносимост 130 t

Етапи на уплътняване	Препоръчителни параметри					Време за уплътняване, h
	Режим на натоварване, %	Скорост на движение, km/h	Дебелина на уплътнявания слой, m	Брой		
				самосвали	преминавания	
Валиране на горния слой	0	2	0,3	2*	2	1,2
Уплътняване в дълбочина	50 75	5 10	до 0,5 до 0,7	2	5-8 5-8	3,8
Заклиняване или окончателно уплътняване	100	2	до 0,5	2	3-6	1,2 - 3,0

Забележка: *За ефективното препокриване на предходните преминавания на самосвала е необходимо да се използват поне два броя. Участъкът е с дължина 200 m и ширина 20 m.

По втората схема (фиг.3.8) самосвалите работят само по уплътняване. В този случай при тяхното движение трябва строго да се изпълняват изискванията за технологията в режим на скорост и натоварване.



Фигура 3.8 Схема на уплътняване на ивицата за преминаване на празните и натоварените самосвали с изключването им от транспортната схема на открития рудник

Процесът на уплътняване се извършва чрез ръководителя на участъка и регулира посоката на движение, скоростта и натоварването и броя на преминаванията по една и съща ивица в съответствие с препоръчителните параметри (табл.3.5). Освен това визуално се контролира качеството на уплътняване по отношение на пропадания и наличието на вълнообразни (или гребеновидни) деформации от движението на самосвалите.

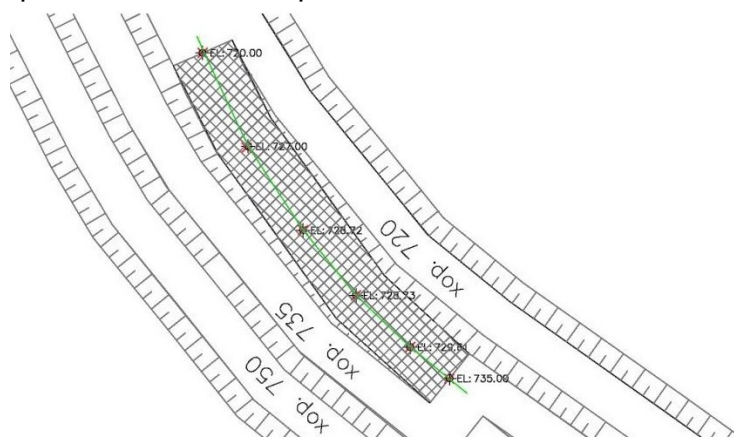
3.3 Апробиране на технология за уплътняване с тежкотоварни самосвали

За апробиране на представената по-горе технология за строителство на руднични пътища са извършени експериментални изследвания на опитен участък в открит рудник за добив на руда. Опитният участък е разположен на югозападния борд на рудника на обслужващ път от хоризонт 735 до хоризонт 720.

Строителството на участъка е извършено през 2023 г., съгласно разгледаната технология за уплътняване на пътната настилка с използване на технологичния автотранспорт.

Същевременно успоредно със строителството на опитния участък е прокаран рудничен път от хоризонт 705 до хоризонт 690 в североизточната част на рудника, при който пътното строителните работи са извършени по конвенционална технология без прилагане на специални методи за уплътняване.

Прокарването на обслужващия път е с проектна широчина и наклон 9%, с използването на Пробивно-взривни работи и натоварване на скалната маса с челен товарач САТ 966 К (фиг.3.10). Едновременно с изземването и натоварването в автосамосвали БелАЗ 75473 се прокарват канавките, предпазните берми и грубо подравняване на дребнокъсовия материал останал в основата на пътя.



Фигура 3.10 План на опитния участък

За да се избегне образуването на пропадания и нарязване на гумите се нанася чакъл с размери на фракцията 25 – 75 mm с дебелина 30 cm. Подравняването се извършва с булдозера. След това се оросява с около 10 литра на 1 m². Уплътняването е чрез две преминавания на самосвал тип БелАЗ 75473 и две преминавания на самосвали БелАЗ 75135 и БелАЗ 75131. По този начин се имитира различно натоварване.

Насипването на материала е със самосвали БелАЗ 75473 по цялата площ на участъка, като се оставя достатъчно разстояние между купчините за оптималната работа на булдозера при подравняване. Разстилането се извършва с булдозер САТ 8Т, а изравняването на автогрейдер САТ 16Н.

Уплътняването на слоя е по технологичната схема при движение на самосвалите БелАЗ 75473, БелАЗ 75135 и БелАЗ 75131 по участъка без да бъдат изключвани от транспортната схема за извозване на минна маса от рудника. Завършващия етап от изграждането на конструкцията на пътя е полагането на слой с дебелина 10 cm и едрина на фракцията 7 – 25 mm. Успоредно с изграждането на повърхностния слой се

оформя и предпазен вал от трошен камък.

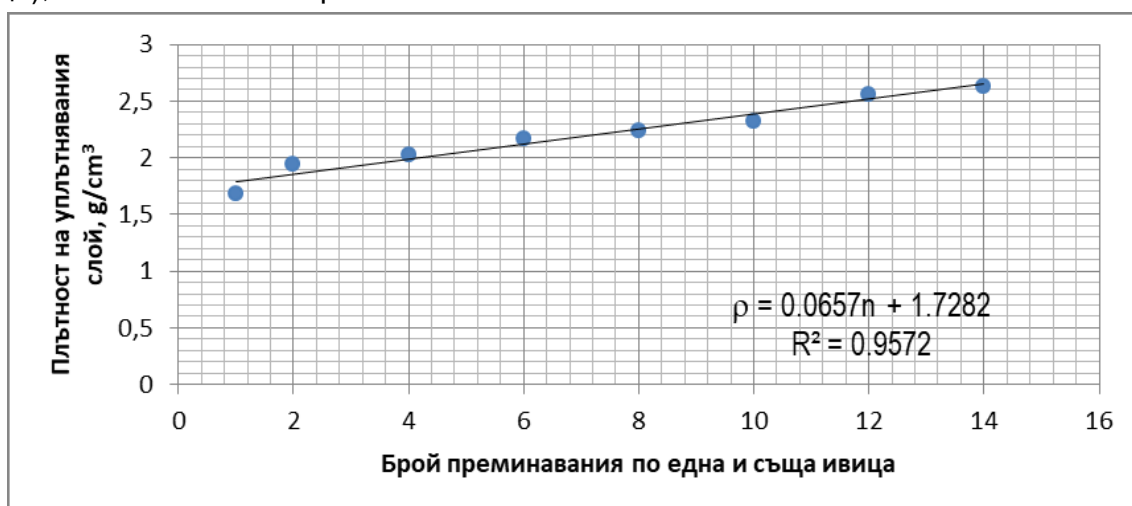
По изложената по-горе технология е изградена пътната настилка, състояща се от основен слой с дебелина 50 cm и трошен камък с размери на късовете 75 – 150 mm (скален материал от откривката), слой от 30 стот чакъл с размери 35 – 75 mm и повърхностен слой от дребен чакъл – 7-25 mm. Повърхностният слой се уплътнява с оглед неговото заклиняване при движение на самосвалите.

По време и след строителството на участъка е извършена оценка на експлоатационните качества на рудничния път, като е направен сравнителен анализ на резултатите с аналогичен рудничен път.

Като критерии за сравняване на експерименталния участък с аналогичния са приети плътността на слоевете от пътната настилка, надлъжната и напречната заравненост, наклона на пътя и работоспособността на пътната настилка.

Оценката на плътността и заравнеността на експерименталния участък се извършва за всеки слой и за пътната настилка като цяло. За аналогичния участък такава оценка е само за пътната настилка.

С цел определяне на броя на преминаванията за постигане на необходимия коефициент на уплътняване $K_y=0,95$ след всеки 2-3 преминавания по една и съща ивица (следа), като е изчислена фактичката плътност на слоя.



Фигура 3.11 Зависимост между броя на преминаванията по една и съща ивица и плътността на слоевете след уплътняване с автосамосвали

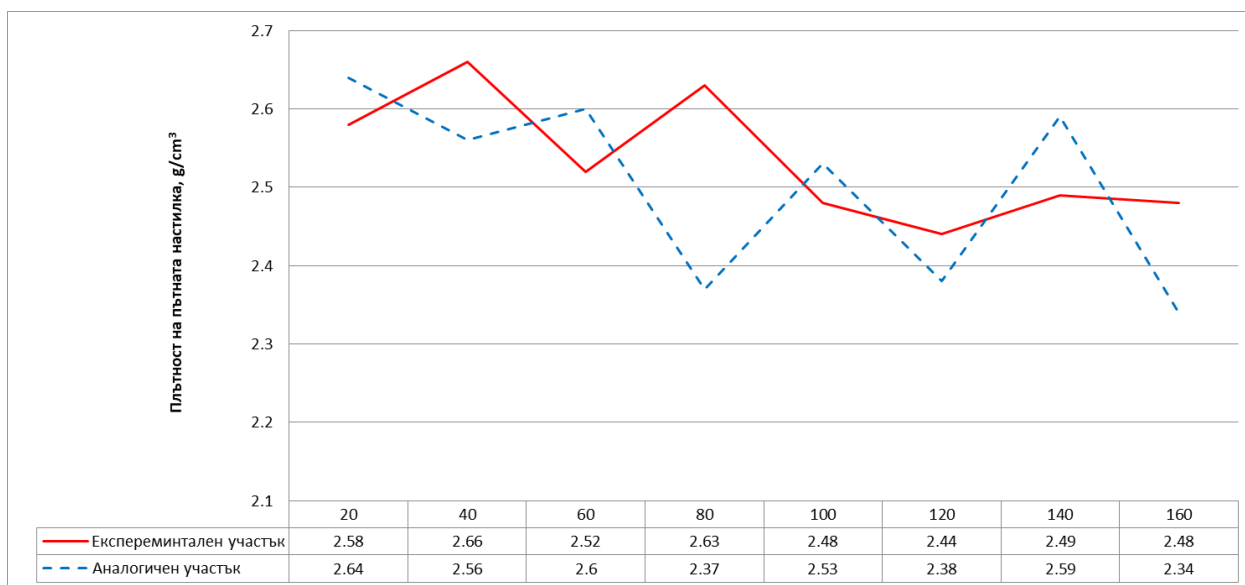
Анализът на получената линейна зависимост показва, че от съществено значение е първоначалната плътност на насипания материал.

От фигура 3.12 се установява, че плътността на пътната настилка на експерименталния участък е по-висока и има сравнително по-добри показатели, сравнени с тези на аналогичен участък от рудничен път в открития рудник. Коефициента на вариация на плътността при опитния участък е 0,08, докато при аналогичния участък е 0,11. Като средна стойност на плътността в първия случай се установява $2,54 \text{ g/cm}^3$, а при традиционно изградена конструкция – $2,50 \text{ g/cm}^3$.

Плътността на пътната настилка е оценена по стойността на еластичните деформации, възникнали при движение от задните колела на натоварен самосвал БелАЗ 75131. Във всяка точка (места) са извършени минимум по две повторни

замервания. Ако разликата между две измервания превишава допустимите стойности, се извършва контролно замерване.

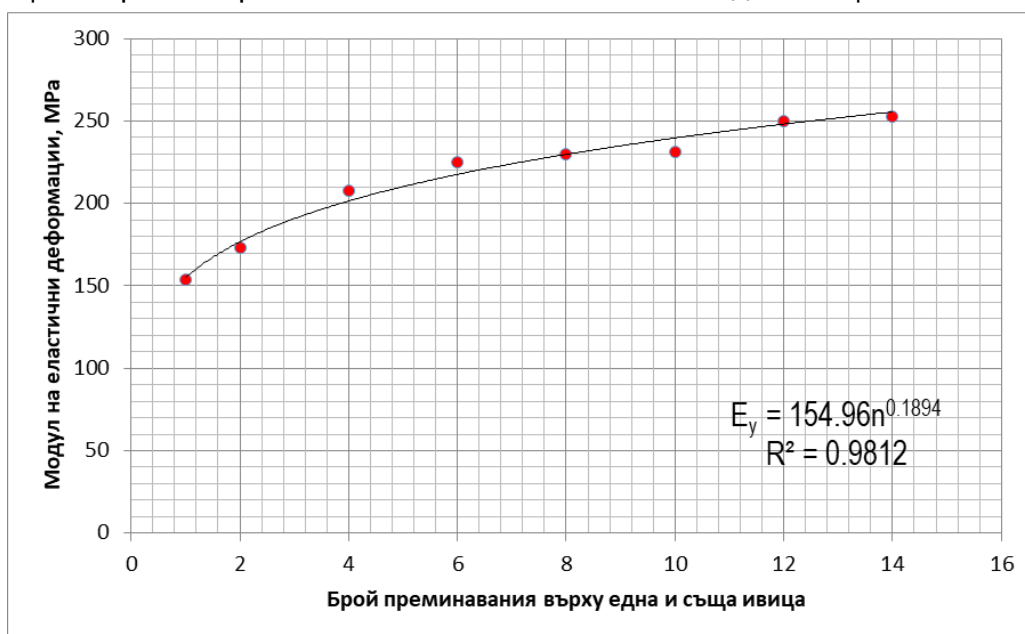
Преди и след преминаването на самосвалите е измерено налягането на гумите на самосвала.



Фигура 3.12 Изменение на плътността на пътната настилка при експерименталния и аналоговия участък

В зависимост от еластичните деформации е определен фактическия модул на еластичност на пътната настилка.

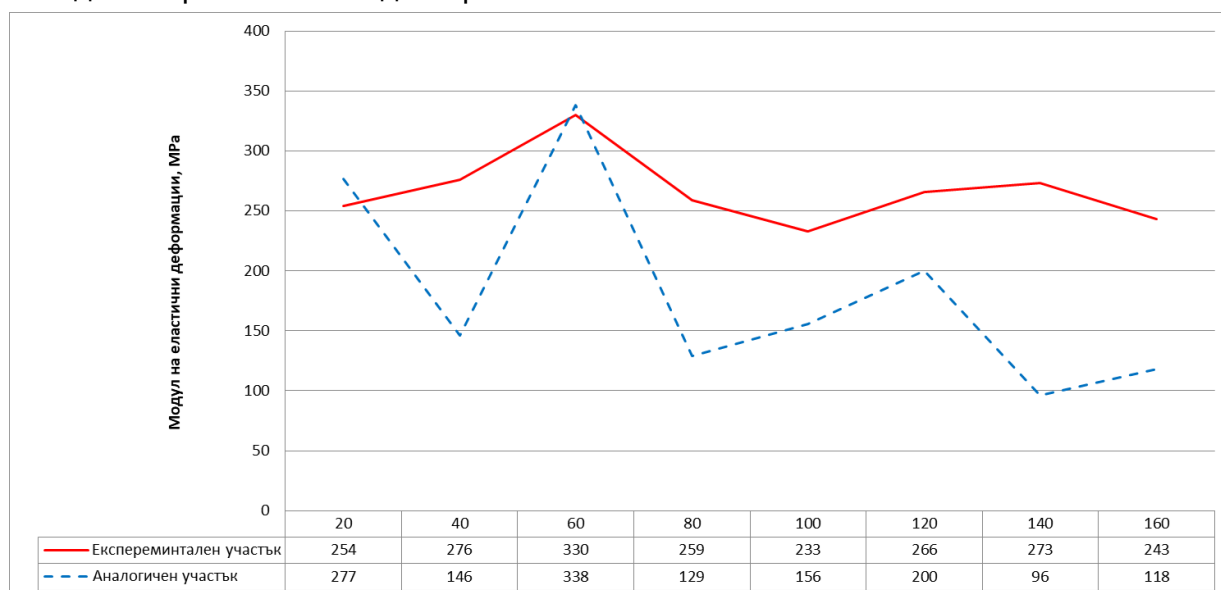
На фигура 3.13 е представена зависимостта между модула на еластична деформация и броя на преминаванията на самосвала по една ивица.



Фигура 3.13 Зависимост между модула на еластична деформация и броя на преминаванията на самосвала по една ивица

Сравнителният анализ на получените резултати показва, че експерименталният участък е значително по-добре подравнен и е средно на места с 1-2 cm превишение на 10 m, докато при аналоговия участък се срещат неравности с до 15 – 20 cm. При

останалите параметри като надлъжен наклон и напречно сечение на пътя не се наблюдават практически видими разлики.



Фигура 3.14 Изменение на модула на еластични деформации на пътната настилка при експерименталния и аналоговия участък

Плътноста на пътната настилка при опитния участък е повишена средно с 10%.

В резултат на прилаганата технология за уплътняване посредством автосамосвали на експериментален участък с дължина 160 m са реализирани икономии на чакъл, както и по-ниски разходи за пътно-ремонтни дейности.

Изводи към трета глава:

1. Представена е методология за изследване и комплексен анализ на деформациите на пътното платно на рудничните пътища. Получените резултати от апробирането ѝ в конкретен минен обект показва, че методологията намира широка област на практическо приложение при експлоатацията, поддържането и ремонтните дейности на рудничните пътища, планиране и нормиране на производителността и разхода на гориво на рудничните автосамосвали, за обосноваване на автомобилния парк, режима на минните работи, избора на оптимални трасета и т.н.

2. Въз основа на обосновани технологични схеми за изграждане на конструкцията на руднични пътища при тяхното строителство са обосновани етапи на уплътняване на пътната настилка с използване на тежкотоварни автосамосвали.

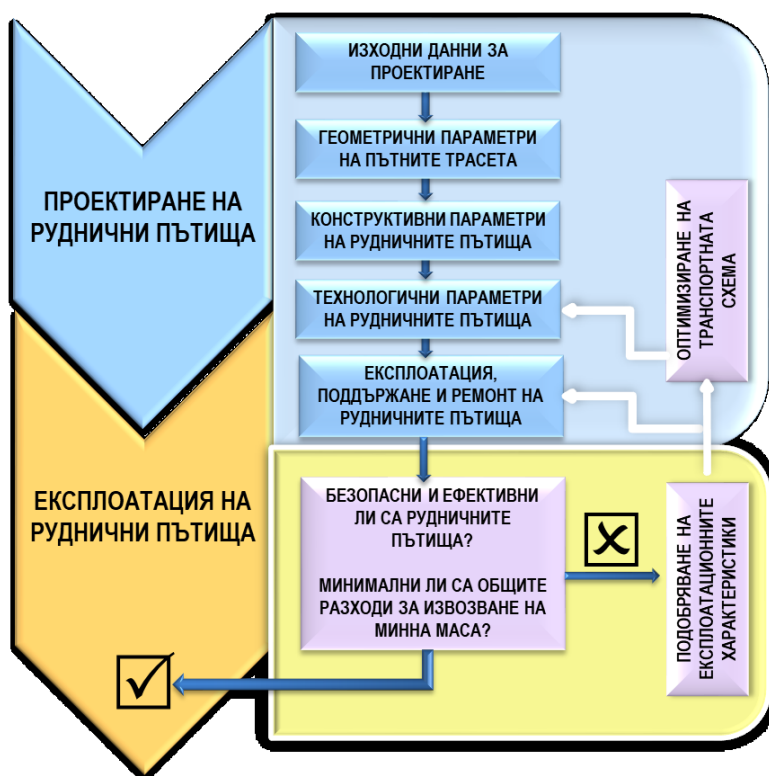
3. Апробирана е технологията за уплътняване на опитен участък. Въз основа на получените резултати е извършена оценка на експлоатационните свойства на пътната настилка в зависимост от техническите характеристики на уплътняване с автосамосвали.

4. Предложените методики и получените зависимости могат да се използват в минни предприятия за повишаване на технико-икономическите показатели на рудничния транспорт и оптимизиране технологичните схеми за строене на руднични пътища.

ГЛАВА 4. ОБОСНОВАВАНЕ И ПРИЛОЖЕНИЕ НА КРИТЕРИИ ПРИ ОПТИМИЗИРАНЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ СИСТЕМИ ЗА СТРОИТЕЛСТВО НА РУДНИЧНИ ПЪТИЩА

4.1. Обвързване на проектните параметри на рудничните пътища с елементите от конструкцията на открития рудник

Изборът на оптимални параметри по отношение на транспортната схема и конструктивните елементи на временните и постоянните руднични пътища оказва непосредствено влияние върху крайните граници на открития рудник, дълбочината на разработване и производствените показатели. Оразмеряването на временните и постоянните руднични пътища е въз основа на изискванията, произтичащи от техническите характеристики на транспортните средства, габаритните размери, екологичните, безопасните и икономическите показатели при работа. *Thompson и др. (2019)* предлагат интерактивен подход за етапите на проектиране, строителство и експлоатация на рудничните пътища (Фиг.4.1).



Фигура 4.1. Връзка между геометричните, конструктивните и технологичните параметри на рудничните пътища през етапите на проектиране, експлоатация, поддържане и ремонт (*Thompson et al., 2019*)

По време на проектиране на рудничните пътища следва да се имат предвид следните по-важни аспекти:

- *Максимални приходи при определяне на оптималните граници на открития рудник.*
- *Минимални разходи за транспортиране на минна маса през целия период на експлоатация на открития рудник.*
- *Максимални безопасни условия при извозване на минната маса.*

- *Максимална производителност.*
- *Минимално въздействие върху околната среда.*

4.2 Методи и алгоритми за оптимизиране технологичните схеми за строене на руднични пътища

Съществуващите методи и алгоритми за оптимизация на проектните решения при строителството на руднични пътища включват комбинирани числени методи и симулации, които се прилагат за решаване на належащи задачи в областта на минно-добивната дейност.

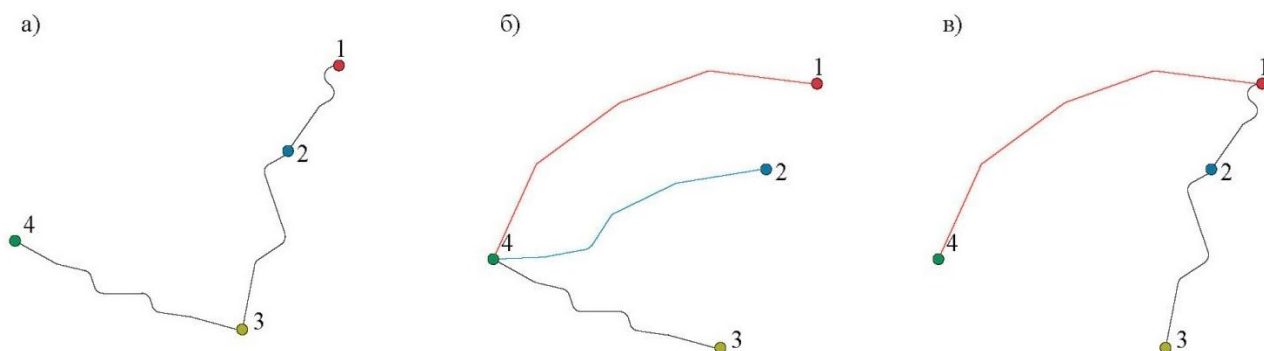
Методи и алгоритми за проектиране на постоянни руднични пътища. Въпреки, че технологичните схеми за строителство на постоянни и временни руднични пътища се прилагат аналогично на тези от конвенционалната пътна мрежа, например процесите свързани със земните работи (трасиране, баланс на земните маси изкоп-насип и др.) или оценката на оптималните геометрични параметри, съществуват редица особености при рудничните пътища, изискващи специфични методи за оптимизиране. Голяма част от оптимизационните задачи в областта на минно-добивните работи съдържа съвкупност от параметри и ограничения, които могат да бъдат зададени или изчислени въз основа на повтарящи се процеси (например продължителността на курса на самосвала), разработени в различни варианти.

Алгоритъм за опростяване на трасетата на рудничните пътища. За да се минимизират транспортните разстояние, проектирането на трасето на рудничния път се извършва въз основа на изключване на пикови стойности от него, т.е. опростяване на трасето. Освен многократното прилагане на конвенционалния метод за определяне на евклидовото разстояние (дължината на трасето), могат да се приложат и алгоритми за опростяване на линиите, включително следните: Wall-Danielson (*Wall u Danielson, 1984*), Latecki-Lakamper (*Latecki u Lakamper, 1999*), Douglas-Peucker (*Douglas u Peucker, 1973*), Visvalingam-Whyatt (*Visvalingam u Whyatt, 1993*) и Zhao-Saalfeld алгоритъм (*Zhao u Saalfeld, 1997*).

Методи за оптимизиране чрез дискретизация. Методите чрез дискретизация намират широко приложение при проектирането и оптимизирането на горски пътища. Подходът се изразява в разделяне на участък от терена на отделни клетки и свързването на всяка една от тях с определени възли, които представляват възможните трасета за достъп.

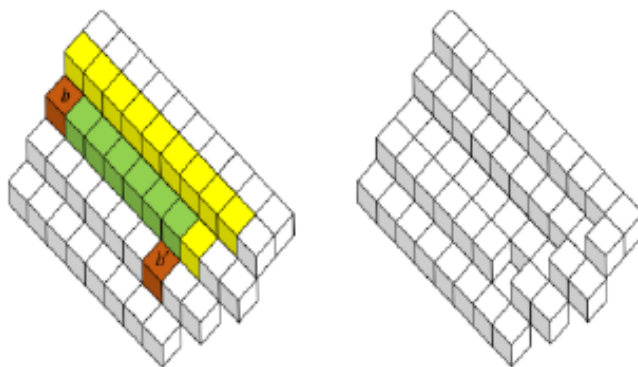
Методът за анализ на най-икономичния път (LCPA), базиран на дигитални изображения или растери, е използван главно за анализ и определяне на оптималното трасе на местно ниво, като например трасета за тръбопроводи, транспортиране на материали в строителни обекти и не на последно място - проектиране на руднични пътища (*Baek u Choi, 2017*). Методът LCPA се реализира на три етапа: през първия етап се определят транспортните разходи за преминаване по трасето през всяка точка (фиг.4.8 а), като стойността се записва към текущото положение, през втория етап се задават трасето от всяка точка до крайната точка поотделно (фиг.4.8 б), а през третия

етап се търси най-икономичното трасе въз основа на получените резултати, записани през първия и втория етап (фиг.4.8 в).



Фигура 4.8 Етапи на метода за анализ на най-икономичния път
(https://www.bluemarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-26/Pro/Least_Cost_Path_Analysis.htm)

За проектиране и оптимизиране технологичните схеми на временните руднични пътища често пъти се използва *метода на блоковите модели* (фиг.49). Той е един от най-ефективните и успешно прилагани методи за решаване на минни задачи, свързани с оптимизиране на крайните граници на открит рудник, определяне на етапите на развитие на минните работи, посоката и скоростта на удълбаване, планиране на производствената мощност на рудника и други, особено в случаите на обосноваване на голям брой технологични възможни решения.



Фигура 4.9. Модел на временен рудничен път (Nancel-Penard и др., 2019)

От направения анализ по-горе се установява, че при решаването на оптимизационните задачи неизбежно се изключват някои от параметрите, които на по-късен етап се изчисляват и се вземат под внимание по време на проектирането и определянето на оптималната скорост и посока за развитие на минните работи.

4.3. Оптимизиране на технологичните схеми за строителство на рудничен път

Автоматизираното проектиране на открити рудници осигурява краткосрочно създаване на технологично осъществими проекти след завършване на оптимизационния процес по определен алгоритъм. Този подход допълва блоковите модели и служи като

основа за по-нататъшни изменения в проекта на рудника за планиране развитието на минните работи. Въпреки, че подходът може да отнеме известно време, поради ръчно въвеждане на корекции и е по-продължителен в сравнение с евристичните методи, ползващи алгоритмите за насочени графи, той предоставя по-надежден начин за получаване на проектни решения, съответстващи на технологичните изисквания и ограничения на елементите от конструкцията на открития рудник (напр. радиус на кривите, надвишение на пътя за транспорт в рудника, необходимост от хоризонтални участъци при присъединяване на рудничните пътища с работните хоризонти и др.).

Обект на изследване е оптимизиране на рудничен път като част от задачата за оптимизация на крайните граници на открит рудник. Разработва се находище на златосъдържаща руда със срок на експлоатация 35 години и производствена мощност 500 000 тона.

Първоначално с използване на блоков модел на находището е създаден икономически модел, използвайки стандартна методология за включване на разходите за добив на руда и откривка, както и разходите за преработка на рудата. Действителните стойности на посочените разходи не могат да бъдат предоставени, поради търговска конфиденциалност. Приблизителна стойност за разходите за добив е изчислена и възлиза на около 48 \$ на тон руда.

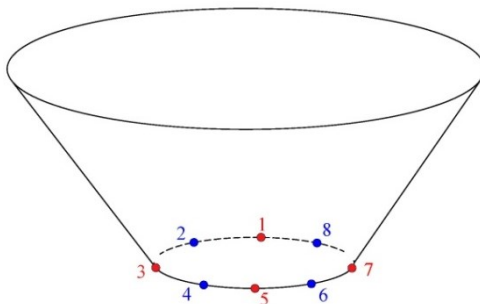
Алгоритъмът включва разходи за добив, разходи за изземване на откривката, разходи за преработка, разходи за администриране, разходи за работна заплата, разходи за данъци и такси разходи за продажби. Приетата цена на златото (Au) е 58 \$ на грам. Поради конфиденциалност печалбата за крайния вариант на отработване на находището по открит начин е представена като стандартна стойност, определена спрямо максималната печалба за всеки от разглежданите алтернативни варианти на разработване.

Използвайки утвърдения подход за определяне на крайните граници на открития рудник, посредством алгоритъма за оптимизация на Лерчс-Гросман за икономическия модел се построява модел за открит рудник. За да се създаде технологично осъществим контур на рудника, като ограничение за алгоритъма е зададен общ ъгъл на работния борд 42° .

В зависимост от посоката на развитие на минните работи и въз основа на получените крайни граници на открития рудник чрез алгоритъма на Лерчс-Гросман, могат да се разгледат следните алтернативни решения за избор на местоположение и проектни трасета на рудничните пътища: 1) от дъното на рудника до крайните граници на рудника (отдолу нагоре); 2) от крайните граници на рудника до дъното на рудника (отгоре надолу); или 3) комбиниран вариант. И трите подхода са приложими. За конкретното изследване е въприет първия подход, поради вида на формата на рудното тяло, но за улеснение в настоящото изследване е използван първият подход, поради формата на рудното тяло. Предимството на този подход е минимизиране на загубите на полезно изкопаемо в дълбочинната част от рудника.

Позовавайки се на указанията на *Nancel-Penard et al. (2017)* и *D. Liu et al. (2020)*, разгледани са четири първоначални местоположения (точки 1,3,5 и 7, фиг.4.11) по

периметъра на дъното на рудника, които формално отговарят на четири различни стратегии за транспортна връзка между дъното на рудника и повърхността при предварително зададен наклон на пътя от 8 и 10% и крайни граници на рудника. За следващия етап на проектиране се избират нови четири местоположения за извършване на втората итерация (точки 2, 4, 6 и 8, фиг.4.11).



Фигура 4.11. Проектни точки за начало на рудничния път, разположени по периметъра на дъното на рудника

Всяка една от предложените стратегии дава вероятно трасе на вътрешнорудничния път отдолу нагоре до пресичането му с релефа на повърхността и достигане на крайната граница на открития рудник. Свързването на входящата капитална траншея с транспортната схема в открития рудник, както и изходящата траншея с външното насипище е извършено ръчно.

Широчината на пътя е изчислена за двувично движение $V=20$ m, с минимален радиус на кривите в присъединителните участъци $R=25$ m при максимална скорост на движение на самосвалите $v=20$ km/h, напречен наклон $i_n=3\%$ и коефициент на сцепление $\psi_{sc}=0,16$ (Копрев и др., 2017).

При определянето на оптималния вариант за разработване на находището по открит начин са взети под внимание основните критерии, разгледани по-горе. Първоначалните изходни параметри при проектирането са:

1. Количество на добитата руда – количеството руда с по-високо съдържание от бортовото, което се изземва в крайните граници на открития рудник;
2. Количество на откривката – количеството на откривката, което трябва да бъде иззето до достигане на крайните граници на открития рудник;
3. Коефициент на откривка – стойността на коефициента на откривка трябва да бъде по-ниска от тази на граничния коефициент на откривка;
4. Обща недисконтирана стойност на печалбата – общите финансови резултати от минното производство, определени въз основа на крайните граници на рудника и посоката на развитие на минните работи при удължаване;
5. Обща площ на рудника в крайните му граници – тази площ може да се разглежда като площ на нарушените терени за бъдеща рекултивация след края на експлоатацията на рудника;
6. Общо количество CO_2 емисии от автосамосвалите – екологично въздействие върху околната среда, вследствие на разработване на находището по открит начин;

7. Обща продължителност на курса на самосвалите – показател, използван за определяне на инвентарния автомобилен парк, което косвено отразява безопасните условия на работа на рудничния транспорт.

Някои от тези показатели са колинеарни, тъй като представляват допълнени варианти на други. Затова, за оценка на проектните алтернативи е използван показателят за обща недисконтирана стойност на печалбата. Екологичното въздействие е оценено чрез общото количество CO₂ емисии от самосвалите, а продължителността на курса на самосвалите не е взета като основен параметър. Площта на открития рудник по крайните му граници се изменя с до 10 dka, което е значително, но е използвана като допълнителен параметър.

Алгоритъмът е приложен за първите четири местоположения за начало на вътрешните руднични пътища при предварително зададени наклони (8% и 10%). Получените вариантни решения са класифицирани по съответните критерии. Следва повторна итерация със следващите четири стратегии. Следва отново класифициране на получените варианти и така могат да продължат итерациите до стесняване на областта на възможните решения – стратегии. В края на алгоритъма следва обобщаване на получените алтернативни решения, които се оценяват във основа на критериите за общата стойност на недисконтирана печалба и общото количество CO₂ емисии от самосвалите.

Разгледани са две стратегии за разкриване и посока на развитие на транспортната схема – по часовниковата стрелка при наклон 8% и 10% на рудничните пътища. Използвани са същите точки за начално положение на извозните пътища. В таблица 4.1 са представени резултатите при оптимизиране на технологичната система за строителство на руднични пътища при развитие на посоката на трасето по часовниковата стрелка.

Таблица 4.1

Стратегии при наклон на пътя 10%

№	Стратегии	Количество руда [Mt]	Количество откривка [Mt]	Коефициент на откривка [t/t]	Дължина на вътрешните руднични пътища [m]
1	ЧС	17.07	19.94	1.17	1862.6
2	ЧС	17.02	19.58	1.15	1812.2
3	ЧС	16.98	19.76	1.16	1761.8
4	ЧС	16.91	19.89	1.18	1741.6
5	ЧС	16.88	19.68	1.17	1638.7
6	ЧС	16.96	19.76	1.17	1614.9
7	ЧС	16.96	19.93	1.18	2069.5
8	ЧС	16.96	20.52	1.21	1869.3
1	ОЧС	17.05	19.64	1.15	1753.4
2	ОЧС	16.96	20.21	1.19	1855.7
3	ОЧС	16.96	20.12	1.19	1943.1
4	ОЧС	16.97	19.86	1.17	2026.8
5	ОЧС	16.99	19.91	1.17	1862.6
6	ОЧС	16.91	19.95	1.18	1732.0
7	ОЧС	16.91	19.66	1.16	1590.8
8	ОЧС	16.99	19.26	1.13	1639.4

Забележка: ЧС - по часовниковата стрелка (посока на развитие на трасето на пътя); ОЧС – обратно на посоката на часовниковата стрелка

Таблица 4.2

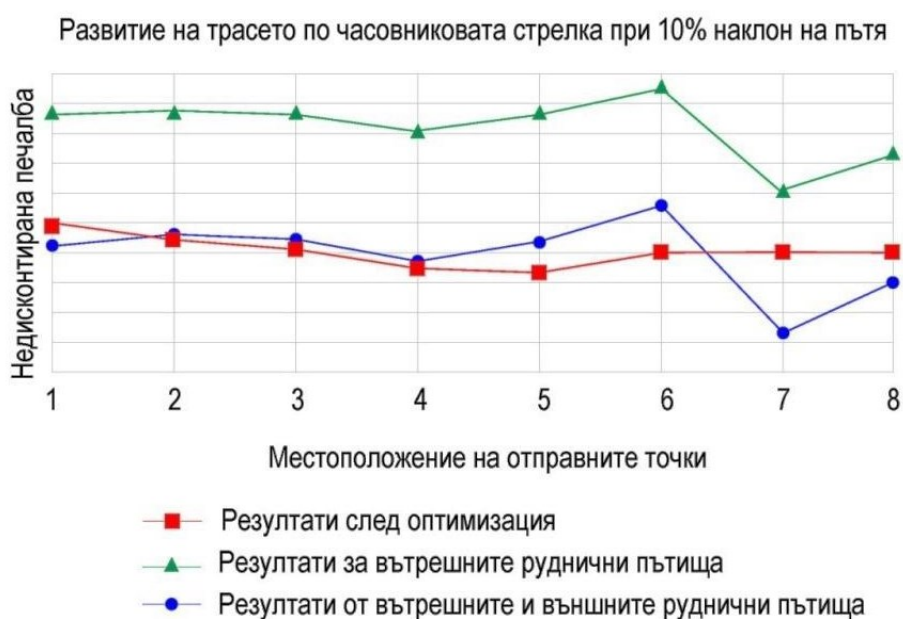
Стратегии при наклон на пътя 8%

№	Стратегии	Количество руда [Mt]	Количество откритка [Mt]	Коефициент на откритка [t/t]	Дължина на вътрешните руднични пътища [m]
1	ЧС	17.08	21.37	1.25	2035.3
2	ЧС	17.07	21.21	1.24	1939.5
3	ЧС	17.03	21.52	1.26	2010.7
4	ЧС	16.98	21.75	1.28	2121.7
5	ЧС	16.96	21.85	1.29	2246.6
6	ЧС	16.99	21.92	1.29	2421.1
7	ЧС	16.98	21.72	1.28	2464.7
8	ЧС	16.97	21.90	1.29	2220.0
1	ОЧС	17.07	21.43	1.26	2057.6
2	ОЧС	16.98	21.78	1.28	1966.9
3	ОЧС	16.98	21.65	1.27	1912.5
4	ОЧС	16.99	21.42	1.26	2507.1
5	ОЧС	17.01	21.69	1.28	2399.1
6	ОЧС	16.98	22.10	1.30	2209.1
7	ОЧС	16.99	21.55	1.27	2199.4
8	ОЧС	17.06	21.19	1.24	2112.2

Забележка: ЧС - по часовниковата стрелка (посока на развитие на трасето на пътя); ОЧС – обратно на посоката на часовниковата стрелка.

Методиката за избор на окончателна стратегия продължава с оценка на транспортните разходи като в случая се използва модела за разход на гориво (Hays, 1990).

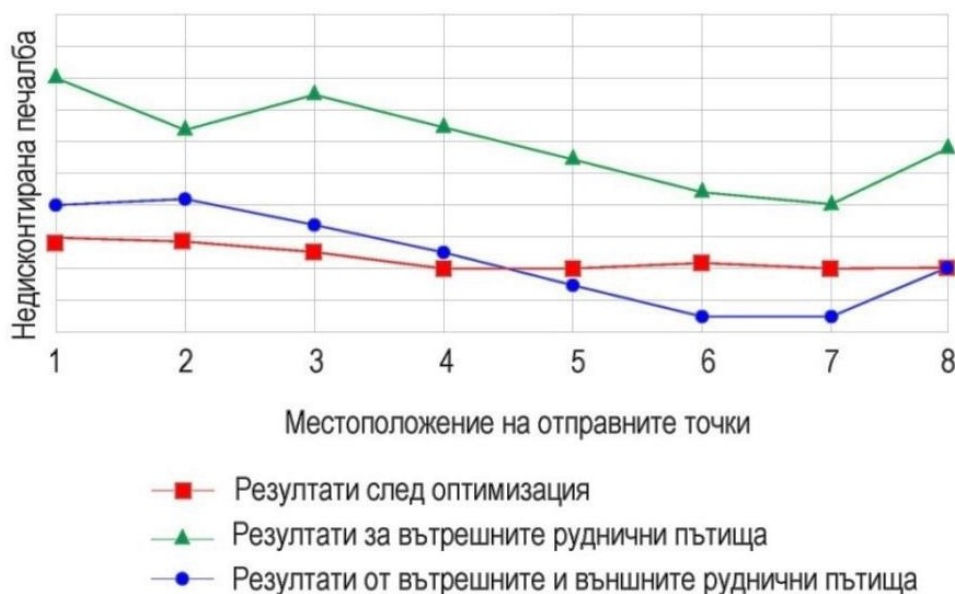
Резултатите, представени на фигури 4.13 – 4.16 доказват допускането, че оптимизирането на проектните модели на открит рудник се влияя от прилаганата методология за оценка на общата стойност на недисконтираната печалба.



Фигура 4.13 Обща стойност на недисконтираната печалба при наклон на пътя 10% и развитие на трасето по посока на часовниковата стрелка

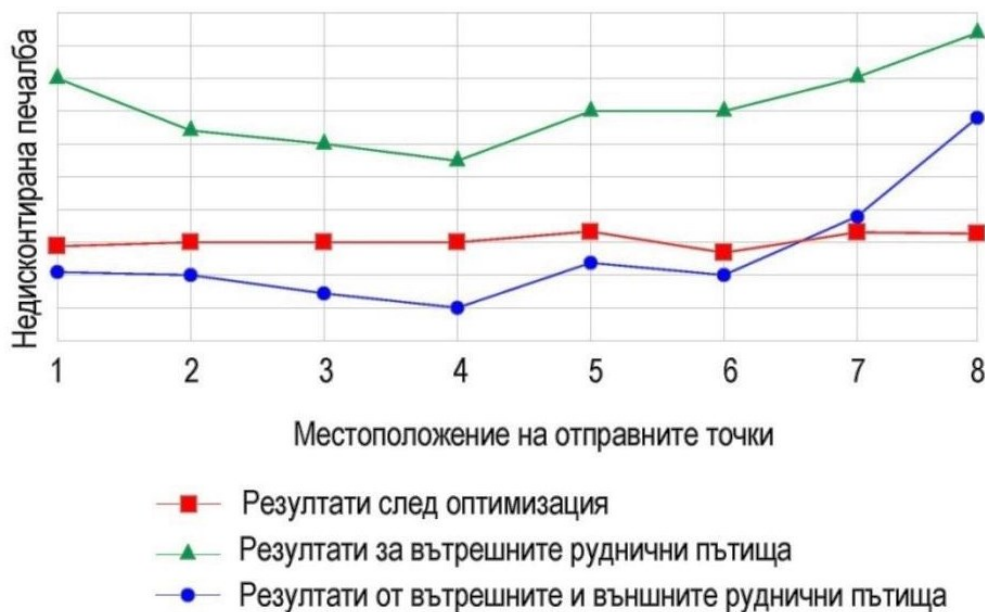
По-високите стойности на недисконтираната печалба при вътрешнорудничните пътища се дължи на факта, че не са отчетени транспортните разстояния за извозване на минната маса извън границите на рудника, а това показва надценяване на резултатите при конкретната стратегия. Могат да се считат за достоверни получените резултатите относно недисконтираната печалба при отчитане на транспортните разходи и за двата вида руднични пътища - постоянните и временните при извозване на рудата до обогатителна фабрика и откривката до външни насипища.

Развитие на трасето по часовниковата стрелка при 8% наклон на пътя

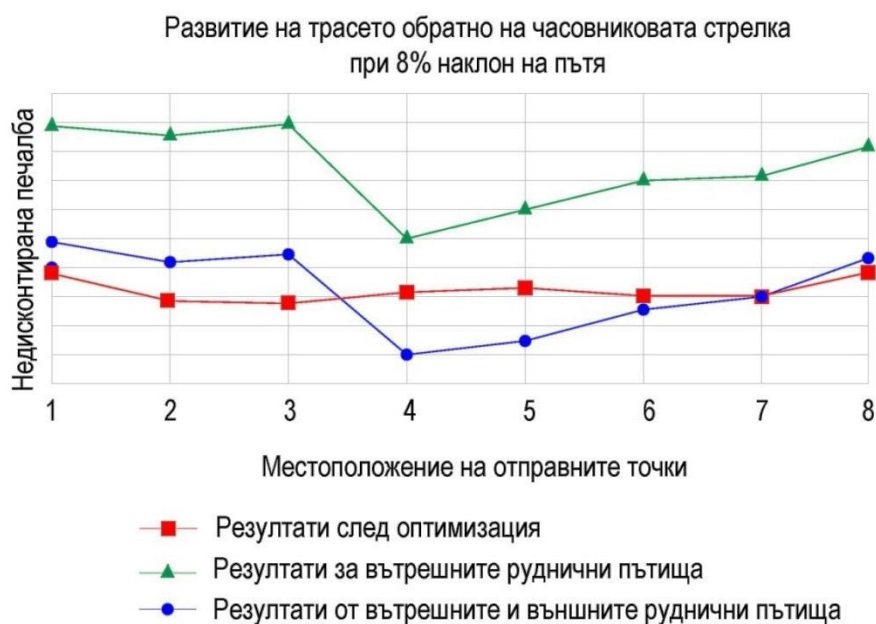


Фигура 4.14 Обща стойност на недисконтираната печалба при наклон на пътя 8% и развитие на трасето по посока на часовниковата стрелка

Развитие на трасето обратно на часовниковата стрелка при 10% наклон на пътя



Фигура 4.15 Обща стойност на недисконтираната печалба при наклон на пътя 10% и развитие на трасето по посока обратна на часовниковата стрелка



Фигура 4.16 Обща стойност на недисконтираната печалба при наклон на пътя 10% и развитие на трасето по посока обратна на часовниковата стрелка

Може да се отбележи също високата степен на корелация между транспортните разстояния в границите на рудничното поле и наклона на рудничните пътища ($R^2=0,8269$ при наклон 10% на пътния участък и $R^2=0,892$ при наклон 8% на пътя). Обяснението за това са по-късите транспортни при постоянните (външни) пътища в сравнение с вътрешнорудничните пътища.

Въпреки, че някои стойности за прогнозната печалба при проектиране на крайните граници на открития рудник след оптимизация са много близки до резултатите от прилагането на комбинирания подход за рудничния транспорт, се наблюдава слаба корелационна зависимост между изследваните параметри. Следователно, недисконтираната печалба, определена за сумарните транспортни разстояния вътре и извън рудника (вътрешни и външни руднични пътища), се счита за по-надежден показател за представяне на ефективността, следвайки допусканията, предложени в методиката на Yarmuch et al. (2020), а именно:

$$P_{\text{нед}} = P - \sum_{i=1}^m V_i L_i C, \$ \quad (4.18)$$

където: $P_{\text{нед}}$ е общата стойност на недисконтираната печалба, \$;

P – печалбата от експлоатацията на рудника, без да са отчетени транспортните разходи, \$;

V_i - общо количество руда и откривка от i -ия работен хоризонт в рудника, t ;

L_i – транспортното разстояние от i -ия хоризонт до повърхността в границите на открития рудник, m ;

C – разходи за извозване на минната маса, \$/tm.

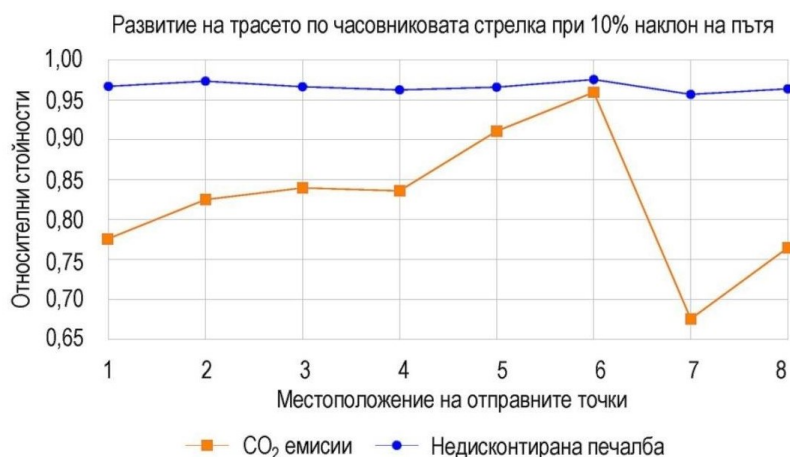
Освен това, може да се отчете общото количество CO_2 емисии за всяка една от стратегиите при определяне на крайните граници на открития рудник, като се използват полеви данни от измервания. Емисиите на CO_2 от дизеловото гориво в t/h могат да се изчислят чрез следното уравнение:

$$CO_2 = FC.CF \quad , \quad (4.19)$$

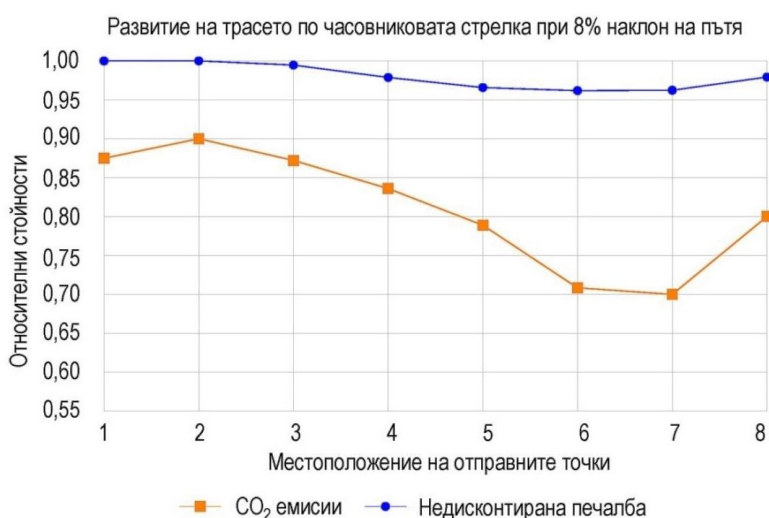
където: FC е разходът на дизелово гориво (L/h);

CF – преобразователен коефициент.

Като водещи параметри за ефективността, емисиите на CO_2 трябва да бъдат минимизирани, докато недисконтираната печалба трябва да бъде максимизирана. Стойностите на основните параметри за ефективността са представени за стратегията за развитие на трасето на рудничните пътища по часовниковата стрелка в Таблица 4.3. Резултатите от двата варианта и проектните стратегии по отношение на първоначалните местоположения на вътрешнорудничните пътища са онагледени с фигури 4.17 и 4.18.



Фигура 4.17. Кохерентност на оптималността на решението за стратегия на развитие на пътното трасе по посока на часовниковата стрелка с наклон на пътя от 10%



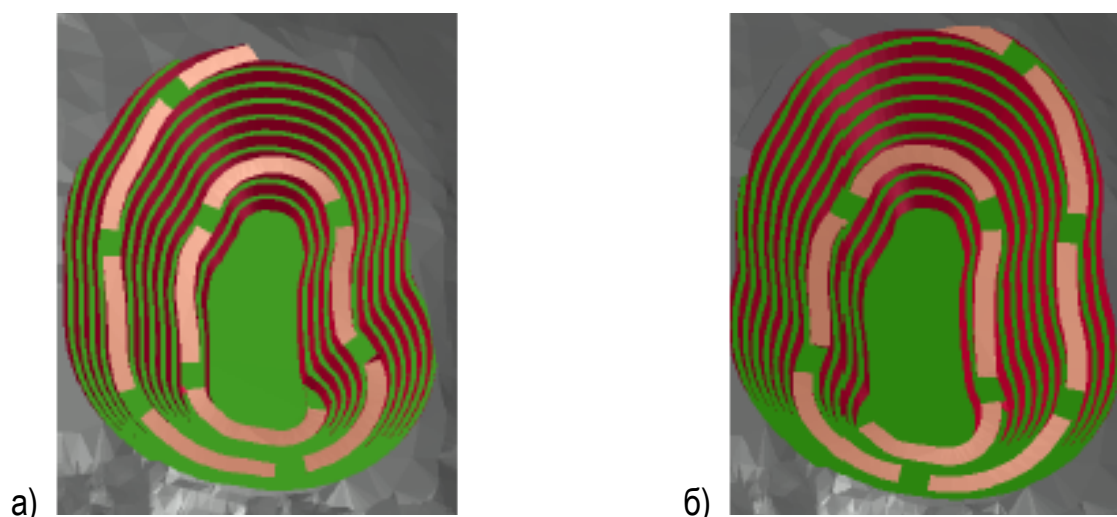
Фигура 4.18. Кохерентност на оптималността на решението за стратегия на развитие на пътното трасе по посока на часовниковата стрелка с наклон на пътя от 8%

За да бъде проектното решение оптимално е необходимо по възможност и двете криви да достигнат едновременно стойност единица или поне близка до единица.

Относителни стойности на параметрите за ефективност при наклон на пътя 10%

№	Вариант	Площ [дка]	Относителни стойности на CO ₂ емисии	Относителни стойности на недисконтирана печалба
1	ЧС	173.1	0.7800	0.9820
2	ЧС	174.5	0.8324	0.9844
3	ЧС	177.0	0.8478	0.9834
4	ЧС	179.1	0.8439	0.9786
5	ЧС	178.1	0.9161	0.9825
6	ЧС	173.4	0.9614	0.9910
7	ЧС	170.9	0.6750	0.9615
8	ЧС	173.5	0.7646	0.9731
1	ОЧС	175.0	0.7730	0.9796
2	ОЧС	176.4	0.7609	0.9729
3	ОЧС	174.8	0.7335	0.9697
4	ОЧС	172.5	0.7065	0.9665
5	ОЧС	170.9	0.7833	0.9775
6	ОЧС	177.7	0.8049	0.9744
7	ОЧС	179.2	0.8535	0.9796
8	ОЧС	174.6	1.0000	1.0000

Въз основа на извършените анализи на възможните проектни решения се установява, че стратегията при първоначална точка 8 по периметъра на дъното на открития рудник и развитие на пътното трасе отдолу нагоре по посока на часовниковата стрелка и наклон на пътя 10% е с оптимални параметри и може да се приеме като ефективен вариант за крайните граници на открития рудник. Аналогични са разсъжденията по отношение на получените резултати при първоначална точка 6 по периметъра на дъното на открития рудник и развитие на пътното трасе отдолу нагоре по посока обратна на часовниковата стрелка и наклон на пътя 10%.



Фигура 4.21 Оптимални решения за крайните граници на открития рудник: развитие на пътното трасе по посока на часовниковата стрелка (а) и посока обратна на часовниковата стрелка (б)

И при двата варианта капиталната траншея е разположена на достатъчно разстояние от пресечно-трошачната инсталация и е в противоположна посока на външното насипище. Освен това, общото количество на CO₂ емисии от самосвалите показва силна линейна корелационна зависимост с общата стойност на недисконтираната печалба.

Изводи към четвърта глава:

1. Предложена е методология за оптимизиране на технологичните схеми за трасиране местоположението на рудничните пътища, която може да бъде интегрирана в редица алгоритми за търсене на алтернативни решения при разработване на модели на открити рудници.

2. Анализирани са предимствата и недостатъците на проектирането посредством блокови модели на открития рудник, въз основа на което е възприет подход с автоматизирано проектиране. Получени са резултати от конструирането на 32 варианта на модел на открит рудник, при които с достатъчна степен на надеждност са определени оптималните параметри на рудничните пътища за всяка зададена стратегия на развитие на трасето на пътя. Установените корелационни зависимости между транспортните разстояния и наклона на пътя могат да бъдат използвани като допълнителни средства за оптимизиране крайните граници на открития рудник или недисконтираната печалба в зависимост от транспортните разходи

3. Определена е граничната стойност на средната абсолютна грешка, служеща за критерий при избора на оптимално решение. Установена е възможност за дефиниране на доверителни интервали с помощта на които могат да се прогнозират други параметри от производствените процеси в рудника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на разработването на тезата на дисертационния труд, основните научни резултати, изводи и препоръки могат да се сведат до следните по-важни изводи:

Запазването на тенденцията за висок относителен дял на открития добив на полезни изкопаеми спрямо останалите минно-добивни технологии е предпоставка за непрекъснатото търсене на технологични решения за повишаване ефективността при разработване на находища на минерални ресурси.

Независимо от широкото приложение на всички видове транспорт в откритите рудници и кариери, автомобилният транспорт се е утвърдил в условията на разработваните рудни находища и кариери за добив на инертни и строителни материали в България.

За постигането на високи експлоатационни характеристики на рудничните пътища е целесъобразно прилагането на комплексен подход, съчетаващ теоретични и експериментални методи за наблюдение, регистриране и контрол на конструктивните параметри за конкретните условия на експлоатация. Комплексният подход дава възможност за откриване на основните проблеми при строителството и експлоатацията на рудничните пътища и насоките за бъдещата оптимизация на конкретни елементи. Така например, теоретичните методи позволяват да се установи функционалната връзка между натоварването от автосамосвалите и появата на дефекти по рудничните пътища в зависимост от скоростта на движение и товароносимостта на самосвала. Експерименталният метод е въз основа на база данни, получени по време на измерванията на натоварванията при движение на самосвалите в открития рудник, които се обработват с методите на математическата статистика и регресионния анализ.

Логичен извод е, че ефективността на рудничния транспорт се определя от състоянието на рудничните пътища, броят и техническите характеристики на самосвалите и нейната оценка е базирана на производителността и себестойността на извозване на минната маса, които до висока степен зависят от наличието на дефекти по пътното платно.

За повишаване на ефективността при експлоатацията на рудничните пътища и производителността на транспорта в откритите рудници е необходимо да се вземат под внимание постигнатите резултати при оптимизация на технологичните схеми за строене на руднични пътища. Всеки конкретен параметър от конструкцията на рудничните пътища е свързан със специфични изисквания, както при проектирането, така и по време на експлоатацията и поддръжката на пътните условия в откритите рудници. Затова трябва да се предприеме целенасочен и интегриран подход при разработването на математичните модели за оптимизация на технологията на строене на рудничните пътища. На примера на редица литературни източници и практически изследвания в наши открити рудници са предложени физически критерии за определяне оптималния наклон на рудничните пътища. Установени са корелационни зависимости, например за изменението на коефициента на полезно действие на предавките на двигателя на

рудничните самосвали, скоростта на движение и относителния разход на гориво в зависимост от общото съпротивление при движение по наклонени участъци.

Един от изводите, който може да се направи по отношение на конструктивните параметри на рудничния път е, влошените качества на пътната настилка, които предопределят по-високи стойности на оптималния наклон на пътя. От друга страна с удълбаване на минните работи и увеличаване на дълбочината на открития рудник допринася до технически ограничения в стойността на наклона на пътя.

За проектиране на руднични пътища с висока носеща способност и дълготрайност могат да се ползват корелационните зависимости между дебелината на пътната настилка и годишния обем на превозваната минна маса.

Изследването на деформациите по пътното платно на рудничните пътища за конкретен минен обект, както и разработената методология, успешно могат да се апробират в разработването на комплексен подход за практическо приложение при експлоатацията, поддържането и ремонтните дейности, планиране и нормиране на производителността и разхода на гориво на рудничните автосамосвали, за обосноваване на автомобилния парк, режима на минните работи, избора на оптимални трасета и т.н. в открити рудници и кариери.

Обосноваването технологични схеми за изграждане на конструкцията на руднични пътища при тяхното строителство са приложими за използване на тежкотоварни автосамосвали без да е необходима специализирана техника като валяци. Получените резултати от апробираната технология на експериментален участък в открит руден рудник доказват ефективността на уплътняване на пътната настилка и повишаване на износоустойчивостта ѝ. Предложените методики и получените зависимости могат да се използват в минни предприятия за повишаване на технико-икономическите показатели на рудничния транспорт и оптимизиране технологичните схеми за строене на руднични пътища.

Разработената методология за оптимизиране на технологичните схеми при трасиране местоположението на рудничните пътища, може да бъде интегрирана в редица алгоритми за търсене на алтернативни решения при създаване на модели на открити рудници.

В резултат на моделирането на крайните граници на открит рудник посредством автоматизирано проектиране са отразени оптималните параметри на рудничните пътища за различни стратегии на развитие на транспортната схема. Оценена е степента на надеждност и корелационните зависимости между транспортните разстояния и наклона на пътя. По този начин могат да се реализират прогнозни оценки на останалите параметри от производствените процеси в открития рудник.

ОСНОВНИ НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

В дисертационния труд са представени нови решения на научно-практическите задачи за обосноваване на оптимални технологични схеми за строене на рудничните пътища в откритите рудници въз основа на комплексно прилагане и съобразяване с техническите изисквания, физическите и икономическите критерии, оказващи значително влияние върху ефективността на разработване на находища по открит начин.

Основните научни и научно-приложни приноси могат да се обобщят по следния начин:

1. Предложени са и са обосновани физически критерии (относителни разходи на гориво на транспортните средства при движение в наклонени участъци на натоварени и празни самосвали, време за движение и относително съпротивление за движение) за избор на оптимални наклони на рудничните пътища при различни модели самосвали и товароносимост.

2. Разработена е методика за определяне на оптималните наклони на рудничните пътища, осигуряването на които води до повишаване на ефективността на минните работи, подчинено на теоретичните алгоритми за избор на транспортните схеми в откритите рудници.

3. Получена е корелационната връзка между изменението на оптималните наклони на рудничните пътища и качеството на пътната настилка.

4. Обосновани са техническите ограничения на наклоните на рудничните пътища в зависимост от коефициента на полезно действие при различни предавки на двигателя и разход на гориво.

5. Установени са зависимостите между оптималната дебелина на пътната настилка, полезната товароносимост на самосвалите и годишната производителността на рудника по минна маса.

6. Предложени са технологични решения за изграждане на устойчиви пътни настилки с използване на тежкотоварни самосвали, изключващи специализирана техника. Технологията е апробирана в конкретни условия при разработването на открит руден рудник.

7. Определена е методология и е разработена методика за провеждане на изследвания на деформациите по пътното платно на рудничните пътища.

8. Предложена е методология за оптимизиране на технологичните схеми за трасиране местоположението на рудничните пътища, която може да бъде интегрирана в редица алгоритми за търсене на алтернативни решения при разработване на модели на открити рудници.

9. Установени са корелационни зависимости между транспортните разстояния и наклона на пътя, които могат да бъдат използвани като допълнителни средства за оптимизиране крайните граници на открития рудник или недисконтираната печалба в зависимост от транспортните разходи.

ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Терзийски, Д., С. Асеновски, И. Копрев (2024). Усъвършенствани стратегии за оптимизация за строителство на пътища в открити рудници: подход с акцент върху геотехническата стабилност. 67-ма Международна научна конференция на МГУ „Св. Иван Рилски“.
2. Terziyski, D. (2024). Optimization of Technological Schemes for Construction of Open Mine Roads. Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences Tome 77, No 1, 2024, p. 101-110, ISSN: 1310–1331 (Print), 2367–5535 (Online).
3. Terziyski, D., Kaykov, D. (2023). A simulation of the materials flow in a quarrying operation. Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 66, pp. 69-73 ISSN 2738-8816

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА КЪМ АВТОРЕФЕРАТА

1. Арефьев, С. 2015. Экспериментальная оценка зависимости качества дорожных одежд от уплотнения их карьерными автосамосвалами. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1, с. 5-11.
2. Бахтурин, Ю. Современные тенденции развития карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2009. -№7. -С. 403-414
3. Васильев М.В. Строительство карьерных автомобильных дорог / М.В. Васильев, В.П. Смирнов, В.С. Торев – М.: Черметинформация, 1997. –Т. 3: серия I. –45 с.
4. Галушко, В. Г. 1980. Случайные процессы и их применение на автотранспорте. Киев, "Вища школа".
5. Колчанов А. 2010. Проектирование карьерных дорог. Журнал "Горная Промышленность" №6 (94) 2010, стр.56
6. Копрев И. 2015. Руднични пътища. София, Авангард Прима, София (на български)
7. Копрев И., Джобов И. 2017, Раководство по процеси при открития добив на полезни изкопаеми. Авангард Прима, София
8. Копрев И., Е. Александрова. 2022. Открит добив на полезни изкопаеми. ИК МГУ „Св. Иван Рилски“, София.
9. Кътов, П., Й. Йорданов, Г. Лабаков, Т. Кисьов. Справочник за машиниста на строителни машини. С., Техника, 1985.
10. Марков, И., Ат. Смилянов, В. Баликов. 2004. Алгоритъм за намиране на аналитични функции за описване изменението на експлоатационните разходи за текущо поддържане на рудничните пътища. Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски”, Годишник, том 47, свитък II, Добив и преработка на минерални суровини, София 2004, стр. 7-9
11. Сидяков В., Колчанов А., Стенин Ю. 2011. Карьерные автомобильные дороги: проектирование, строительство, содержание. М.: Недра; 2011. 143 с.

12. A Valle, D. 2006. Reducing haul road maintenance costs and improving tyre wear through the use of impact rollers. Mining for Tyres, Perth, 4-6 December 2006
13. Baek J., Cho, Y. 2017. A new method for haul road design in open-pit mines to support efficient truck haulage operations, *Applied Sciences*, 7(7), 747.
14. Douglas D., Peucker T., 1973. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, *The Canadian Cartographer*, 10, 112–122.
15. Kramadibrata, S., Rai, M.A., Simangunsong, G.M., Mulyana, C.Y., Laksana, G.S., Widodo, N.P., Matsui, K. 2002. Analysis of rolling resistance coefficient of dried silt and wet silt at laboratory scale. *Proc. Mine Planning and Equipment Selection*, Bouzov, Czech Republic.
16. Latecki L. J., Lakamper R., 1999. Polygon evolution by vertex deletion, in: *Scale-space theories in computer vision*, eds.
17. Liu G., S. Chai (2019) Optimizing Open-Pit Truck Route Based on Minimization of Time-Varying Transport Energy Consumption, *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, Article ID 6987108, <https://doi.org/10.1155/2019/6987108>.
18. Nancel-Penard P., Parra A., Morales M., Díaz C., Widzyk- Capehart E., 2019. Value-optimal design of ramps in open pit mining, *Archives of Mining Sciences*, 64(2), 399-413.
19. Nielsen, M., Johansen P., Olsen, O. F., Weickert, J. *Proceedings of International*
20. Tannant, D., B. Regensburg. 2001. Guidelines for mine haul road design. https://www.researchgate.net/publication/277759950_Guidelines_for_Mine_Haul_Road_Design
21. Thompson R. 2011. Mine haul road design and management: a review of current practice, *Transactions Society of Mining, Metallurgy and Exploration (SME)*, 328,474–484.
22. Thompson R., Peroni R., Visser A. T., 2019. *Mining haul roads. Theory and practice*. CRC Press/Balkema, Leiden.
23. Visvalingam M., Whyatt J. D., 1993. Line generalisation by repeated elimination of points, *The Cartographic Journal*, 30 (1), 46-51.
24. Wall K., Danielsson P. E., 1984. A fast sequential method for polygonal approximation of digitised curves, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, 220–227.
25. Yarmuch J., Brazil M., Rubinstein H., Thomas, D. A., 2020. Optimum ramp design in open pit mines, *Computers & Operations Research*, 115, 104739.
26. Zhang Y., Z. Zhao, L. Bi, L. Wang, Q. Gu (2022) Determination of Truck–Shovel Configuration of Open-Pit Mine: A Simulation Method Based on Mathematical Model, *Sustainability* 2022, 14(19), 12338, <https://doi.org/10.3390/su141912338>.
27. Zhao Z., Saalfeld A. Linear-time sleeve-fitting polyline, In *Autocarto 13, ACSM/ASPRS'97 Technical Papers*, Seattle, Washington, April 1997, vol. 5, pp. 214–223.