

МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“ - СОФИЯ

МИННО-ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧЕН ФАКУЛТЕТ

Катедра „Механизация на мините“

ас. маг. инж. СТАНИМИР ГЕОРГИЕВ СТАНЧЕВ

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертационен труд за придобиване на образователната и научна степен „доктор“
по професионално направление 5.8. „Проучване, добив и обработка на полезни
изкопаеми“**

научна специалност „Механизация на мините“

**„ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕХАНИЧНИ И ТЕХНОЛОГИЧНИ ПАРАМЕТРИ НА
РОТОРНА ТРОШАЧКА-ЕКСЦЕНТРИКОВ ТИП“**

Научен ръководител: 1. доц. д-р. Димитър Василев Димитров

София, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на катедрен съвет на катедра „Механизация на мините” при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски”- София на дата: 11.05.2026 г.

Дисертационният труд е разработен в катедра „Механизация на мините“ при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ - София.

Защитата на Дисертационния труд ще се състои на2026 г. от.....часа в зала..... на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски”, София, пред Научно жури утвърдено със Заповед №..... на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски”, София.

Материалите по защитата (дисертация и рецензии) са на разположение на интересуващите се в канцеларията на сектор СДК при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски” - София.

Утвърденото Научно жури е в състав:

Вътрешни членове на Научното жури, Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, гр. София:

1. проф. д-р Ивайло Георгиев Копрев, председател, МГУ „Св. Иван Рилски“;
2. проф. д-р Евгения Иванова Александрова, МГУ „Св. Иван Рилски“.

Външни членове на Научното жури за Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, гр. София:

1. проф. д-р Красимир Тодоров Кръстанов, ВТУ „Тодор Каблешков“;
2. доц. д-р Иван Ганчев, ВТУ „Тодор Каблешков“;
3. доц. д-р Владислав Велков Иванов, ТУ- София.

Резервни членове на Научното жури:

1. доц. д-р Захари Иванов Динчев, МГУ „Св. Иван Рилски“;
2. доц. д-р Борислав Иванов Николов, ТУ- Софи

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1.
2.

Автор: ас. маг. инж. Станимир Георгиев Станчев

Научен ръководител: доц. д-р инж. Димитър Василев Димитров

Професионално направление: 5.8. „Проучване, добив и обработка на полезни изкопаеми“

Научна специалност: „Механизация на мините“

Дисертатът е редовен докторант към катедра: „Механизация на мините“ на Минноелектромеханичен факултет.

Заглавие: Изследване на механични и технологични параметри на роторна трошачкаексцентриков тип.

Тираж: 20 (двадесет) броя.

Настоящият автореферат представя основните положения, резултати, изводи и приноси на дисертационния труд. Текстът е структуриран по логиката: промишлен проблем, научна празнина, обект и предмет, цел, управляващи фактори, целеви функции, методика, резултати, статистически модели, многоцелева оптимизация и приноси.

Номерацията и съдържателната логика са съобразени със структурата на дисертацията, като са изведени само най-съществените резултати, необходими за представяне на научно-приложната и практическата стойност на труда.

СЪДЪРЖАНИЕ

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	5
1. Актуалност, промишлен проблем и научна празнина.	5
2. Обект и предмет на изследването.	6
3. Цел на дисертационния труд	7
4. Задачи на изследването	7
5. Управляващи фактори и целеви функции	8
6. Методика на изследването	9
7. Научна новост и практическа приложимост	10
II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД ПО ГЛАВИ.	10
1. Глава I. Обзор на литературата и класификационно място на РТЕТ.	10
2. Глава II. Цел и задачи на дисертационния труд	12
3. Глава III. Теоретично определяне на параметрите, САD и FEM анализ.	13
4. Глава IV. Експериментална постановка, резултати и зърнометричен анализ.	15
5. Глава V. Статистически анализ и многоцелева оптимизация	18
6. Глава VI. Заключение	28
7. Глава VII. Приноси на дисертационния труд	30
8. Глава VIII. Приложения	31
III. ОБЩИ ИЗВОДИ	33
IV. НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ	35
1. Научно-приложни приноси	36
2. Приложни приноси	36
3. Подреждане на приносите около основната теза	36
V. ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	37
VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	37

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Актуалност на темата, промишлен проблем и научна празнина.

Процесите на трошене и раздробяване са сред основните технологични операции в минната и преработвателната промишленост. Тези процеси определят последващите етапи на обогатяване, транспортиране, класификация и смилане. От тяхната ефективност зависят

както производителността на цялата технологична линия, така и себестойността на крайния продукт.

В условията на нарастващи изисквания за енергийна ефективност, устойчиво производство и по-добро използване на минералните ресурси необходимостта от по-ефективни трошачни машини придобива пряко промишлено значение.

Промишленият проблем, разгледан в дисертационния труд, произтича от факта, че трошенето и раздробяването остават енергоемки процеси. При традиционните решения част от вложената енергия се губи под формата на вибрации, нагряване, неравномерно натоварване, износване на работните органи и получаване на продукт с неблагоприятен зърнометричен състав.

Затова инженерната задача не е единствено да се увеличи пропускателната способност на машината, а да се постигне съчетание между производителност, качество на готовия продукт и ограничен относителен енергоразход.

Роторната трошачка-ексцентриков тип (РТЕТ) представлява конструктивно решение, което съчетава особености на няколко познати групи трошачни машини. Ексцентричното движение на ротора създава периодично изменение на работния просвет, а взаимодействието между ротора, материала и контраповърхността осигурява комбинирано въздействие върху частиците.

Това дава основание машината да бъде разглеждана като перспективна алтернатива при трошене на минерални и строителни материали.

Въпреки този потенциал РТЕТ не е достатъчно изследвана като самостоятелен клас трошачна машина. В литературния обзор е показано, че тя има междинно място между челюстните, валцовите и роторните/конусните решения, но в съществуващите класификационни схеми не е достатъчно ясно обособена.

Това създава научна празнина: липсва цялостна методика, която да свързва конструктивните и кинематичните особености на РТЕТ с количествено измерими технологични показатели.

Научната празнина се проявява и в недостатъчното изясняване на влиянието на основните управляващи фактори върху процеса на трошене.

Наличната литература разглежда отделни конструкции, енергийни хипотези и общи зависимости, но за конкретната машина е необходимо да се установи как реалната честота на

въртене, широчината на разтоварния отвор и броят работни камери влияят едновременно върху масовата производителност, зърнометричния състав и относителния енергоразход.

Актуалността на изследването се определя именно от тази двойна необходимост: от една страна, промишлеността се нуждае от машини с по-висока ефективност и по-добро качество на крайния продукт; от друга страна, теорията и инженерната практика се нуждаят от проверена методика за изследване и оценка на РТЕТ.

Дисертационният труд поставя тези два аспекта в единна логическа рамка и разглежда машината не само като конструкция, а като система от взаимосвързани механични, кинематични, динамични и технологични параметри.

В този смисъл изследването има както научно-приложна, така и практическа насоченост. Научно-приложната стойност се състои в обособяване на РТЕТ като обект на самостоятелен инженерно-технологичен анализ и в дефиниране на система от фактори и целеви функции.

Практическата стойност се изразява във възможността получените резултати да подпомагат проектирането, настройката и експлоатацията на подобни машини при реални технологични условия.

Основната логика на автореферата следва тази постановка. Най-напред се извежда промишленият проблем, след което се формулира научната празнина. След това се определят обектът, предметът, целта и задачите на изследването.

В следващия етап се представят управляващите фактори и целевите функции, а резултатите се разглеждат чрез теоретичен анализ, CAD/FEM моделиране, експериментални изследвания, зърнометрична оценка, статистическо моделиране и многоцелева оптимизация.

Така текстът не представлява механично съкращение на дисертацията, а последователно изложение на научната теза.

2. Обект и предмет на изследването.

Обект на изследването е роторна трошачка-ексцентриков тип (РТЕТ), разглеждана като машина за механично раздробяване на минерални и строителни материали. В работата тя се анализира чрез конструкцията на ротора, трошачната камера, ексцентриковия механизъм, работния просвет, броя на камерите и режимите на въртене.

Предмет на изследването са взаимовръзките между механичните, кинематичните, динамичните и технологичните параметри на машината. Това означава, че вниманието не е насочено само към конструкцията само по себе си, а към това как промяната на режима и геометрията се отразява върху крайния технологичен резултат.

Като основни връзки се разглеждат зависимостите между честотата на въртене на ротора, широчината на разтоварния отвор, броя работни камери, масовата производителност, качеството на раздробения продукт, вибрационното поведение и относителния енергоразход.

По този начин предметът обхваща както машината като механична система, така и процеса на трошене като, технологичен резултат.

3. Цел на дисертационния труд.

Главната цел на дисертационния труд е да се изследват връзките между основните параметри на роторната трошачка-ексцентриков тип и нейната енергийна ефективност, производителност и качество на раздробения продукт.

В целта е заложен комбиниран подход, който включва теоретично моделиране, 3D CAD моделиране, FEM/CAE симулации, експериментални изследвания и статистическа обработка на резултатите.

Целта е формулирана така, че да не се ограничава до описване на конструкцията или до еднократно измерване на отделни показатели. Тя предполага изследване на цялата система от фактори, чрез които може да се оцени работният процес.

Това позволява да се премине от качествени наблюдения към количествени зависимости и рационален избор на работни режими.

4. Задачи на изследването.

- Да се анализира съвременното състояние на машините за трошене и да се изясни мястото на РТЕТ в класификационните схеми.
- Да се обоснове конструктивното и технологичното значение на роторната трошачкаексцентриков тип като машина с междинни характеристики между познати трошачни решения.
- Да се разработи теоретична постановка за определяне на основни кинематични, механични и технологични параметри на машината.

- Да се създаде 3D CAD модел на РТЕТ и да се използва като база за геометрични, якостни и симулационни изследвания.
- Да се извърши FEM/CAE оценка на напрегнато-деформираното състояние на основните елементи при зададени експлоатационни натоварвания.
- Да се разработи експериментална постановка и методика за изследване на работния процес при контролирани стойности на основните фактори.
- Да се проведат експериментални изследвания с варовик и диабаз при различни стойности на честота, разтоварен отвор и брой камери.
- Да се извърши зърнометричен анализ на готовия продукт и да се определи влиянието на режима върху средния размер на частиците и дела на фините фракции.
- Да се обработят резултатите статистически и да се оценят регресионните модели по R^2 , коригиран R^2 , P-Value и F-критерий.
- Да се приложи многоцелева оптимизация за определяне на рационални компромисни режими на работа на РТЕТ.

5. Управляващи фактори и целеви функции.

Изследването е структурирано около три основни управляващи фактора. Те са избрани, защото могат да се изменят контролирано в лабораторни условия и имат пряко влияние върху процеса на трошене. Тяхната роля е да осигурят ясна връзка между настройките на машината и измеримите резултатни показатели.

Таблица 1

Управляващ фактор	Означение	Нива/значение	Роля в процеса
Реална честота на въртене на ротора	n	15; 20; 25 Hz	Определя интензивността на въздействието, броя контакти и динамичното натоварване.
Широчина на разтоварния отвор / работния просвет	bmin	3; 4; 5 mm	Определя пропускателната способност и едрината на готовия продукт.
Брой работни камери	z	1; 2	Влияе върху равномерността на натоварване и интензивността на процеса.
Вид материал	M	варовик; диабаз	Разглежда се като експериментално условие, а не като основен управляващ фактор.

Таблица 1. Управляващи фактори.

Целевите функции са определени така, че процесът да бъде оценен едновременно по количество, качество и енергийна ефективност. Това е важно, защото производителността сама по себе си не е достатъчна за оценка на трошачната машина. Необходимо е да се знае какъв продукт се получава и какъв е разходът на енергия за неговото получаване.

Таблица 2

Целева функция / показател	Означение	Критерий	Смисъл
Масова производителност	Q_m	Максимизация	Количество обработен материал за единица време.
Зърнометричен състав / среден диаметър / D80	$y^0, D_{cp}, D80$	Минимизация за $D_{cp}/D80$ при търсене на по-фин продукт	Качествена оценка на готовия продукт.
Относителен енергоразход	$W = P_{cp} / Q_m$	Минимизация	Разход на енергия, отнесен към произведеното количество материал.

Таблица 2. Целеви функции.

Тази система от фактори и функции позволява да се избегне едностранното оценяване. При по-висока честота може да се получи по-фин продукт, но с по-висок енергиен разход.

При по-голям разтоварен отвор може да се увеличи производителността, но да се влоши качеството на продукта. Именно поради това в дисертационния труд се преминава към многоцелева оценка и рационален компромисен режим.

6. Методика на изследването.

Методиката на дисертационния труд е изградена като последователна инженерна схема. Тя започва с литературен и класификационен анализ, преминава през теоретично определяне на параметрите, 3D CAD и FEM/CAE изследване, продължава с експериментална проверка и завършва със статистическа обработка и многоцелева оптимизация.

Таблица 3

Етап	Съдържание	Резултат
Литературен анализ	Преглед на трошачни машини, енергийни хипотези, класификация и приложение на РТЕТ.	Определяне на научната празнина и класификационното място на РТЕТ.
Теоретичен анализ	Кинематика, производителност, мощност, инерционни и периферни сили.	Формиране на аналитична основа за оценка на процеса.
3D CAD и FEM/CAE	Геометрично моделиране, статичен и модален анализ.	Оценка на конструктивната работоспособност и динамичната устойчивост.

Експеримент	40 основни опита с варовик и диабаз при контролирани фактори.	Експериментална база данни за Q_m , D_{sp}/D_{80} , W и вибрации.
Зърнометричен анализ	Ситов анализ и определяне на среден размер и дял на фракции.	Оценка на качеството на готовия продукт.
Статистика и оптимизация	Регресионни модели, ANOVA, R^2 , P-Value, F-критерий, функция на полезност.	Рационална област на работа и интегрирана оценка на ефективността.

Таблица 3. Методика на изследването.

7. Научна новост и практическа приложимост.

Научната новост на дисертационния труд се състои в системното разглеждане на РТЕТ като самостоятелен обект на изследване. Машината е поставена в класификационен контекст, дефинирани са основните управляващи фактори и са избрани целеви функции, чрез които може да се оцени реалната ефективност на процеса.

Особено важно е, че качеството на продукта се разглежда чрез зърнометрични показатели, а енергийната оценка се формулира чрез относителен енергоразход, а не чрез несвързано смесване на мощност и енергия.

Практическата приложимост се изразява в създаването на методика, която може да подпомага избора на работен режим.

Получените експериментални данни, зърнометричните зависимости, статистическите модели и многоцелевата оценка могат да бъдат използвани при настройване на лабораторната машина, при бъдещо усъвършенстване на конструкцията и при предварителна оценка на сходни трошачни системи.

Съществено предимство на подхода е, че не се твърди абсолютен универсален оптимум. Вместо това се формулира рационална област на работа, валидна в рамките на експерименталния план и при ясно зададени ограничения.

Това прави изводите практически приложими, тъй като отчита реалното противоречие между производителност, енергоразход и качество на крайния продукт.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД ПО ГЛАВИ.

1. Глава I. Обзор на литературата и класификационно място на РТЕТ.

В първа глава е направен литературен обзор на съвременното състояние на машините и процесите за трошене. Разгледани са класическите теоретични постановки за разрушаване на материалите, основни типове трошачни машини и особености на тяхното приложение.

Обзорът поставя РТЕТ в контекста на развитието на трошачната техника и показва защо този тип машина заслужава самостоятелно изследване.

Процесът на трошене е сложен механичен процес, при който разрушаването на материала зависи от физико-механичните свойства на частиците, начина на натоварване, геометрията на работната камера, скоростта на въздействие и условията за извеждане на готовия продукт.

В литературата са разработени различни хипотези и емпирични зависимости, но те често дават обща основа и не могат директно да опишат специфичното поведение на конкретна машина без експериментална проверка.

В обзора са разгледани челюстни, валцови, роторни и конусни решения. Челюстните трошачки са широко разпространени при първично раздробяване и се отличават със здрава конструкция, но работният им процес е свързан с неравномерно натоварване, цикличен характер на действие и високи пикови сили.

Валцовите трошачки осигуряват по-равномерно действие и контрол върху едрина на продукта, но изискват синхронизирано движение на два работни органа и прецизна настройка на междината.

Роторните и конусните машини предлагат висока производителност, но техните режими и работни камери се различават съществено от разглежданата конструкция.

РТЕТ се отличава с ексцентрично движение на ротора и с периодично изменение на работния просвет. Това ѝ позволява да съчетава качества на различни машинни групи. От една страна се реализира компресионно въздействие, характерно за челюстните решения; от друга страна се получава по-равномерно търкаляне и притискане, близко до логиката на валцовите машини.

Тази междинна конструктивно-технологична позиция е основна причина РТЕТ да бъде разгледана като машина със собствено място в класификацията.

Литературният обзор показва, че решения от този тип са свързани с разработки на "Weserhütte" и с по-късни конструкции, известни под различни търговски и инженерни наименования.

В международен план интересът към ексцентричните роторни трошачки се поддържа и от съвременни индустриални разработки, насочени към компактност, енергийна ефективност и приложение в ограничени пространства.

Българската школа има голям принос за развитието на подобни решения, което допълнително обосновава актуалността на изследването.

Особено важно в първа глава е класификационното уточняване на РТЕТ. В съществуващите схеми машината често може да бъде разглеждана като междинна или хибридна конструкция.

Това обаче не е достатъчно за инженерна оценка. Необходимо е тя да бъде обособена според конструктивното изпълнение, технологичното предназначение, мащаба на приложение и особеностите на работния процес. По този начин се създава основа за по-ясно формулиране на обекта на изследване.

Сравнителният анализ в главата показва, че РТЕТ притежава потенциални конструктивни и технологични предимства: компактност, равномерно натоварване, възможност за регулиране на работния просвет, стабилизиране на процеса и перспективи за по-нисък относителен енергоразход. Тези предимства обаче не могат да бъдат приети само по конструктивна логика. Те трябва да бъдат проверени чрез теоретични изчисления, симулации и експериментални данни.

На тази основа литературният обзор извежда съществената научна празнина: липсва достатъчно пълно изследване на количествените връзки между управляващите фактори на РТЕТ и резултатните показатели на процеса.

Няма достатъчно данни как честотата, разтоварният отвор и броят камери влияят едновременно върху производителност, зърнометричен резултат и енергоразход. Именно тази празнина определя посоката на следващите глави.

Изводът от първа глава е, че РТЕТ следва да се разглежда не като случайна конструктивна разновидност, а като перспективен, но недостатъчно изследван клас трошачна машина. Тя има обособено място между традиционните решения и изисква собствена методика за изследване.

Тази методика трябва да отчита едновременно механичната работа на ротора, геометрията на работната камера, експерименталните условия и крайния технологичен резултат.

2. Глава II. Цел и задачи на дисертационния труд.

Втора глава формулира целта и задачите на дисертационния труд. Тя изпълнява преходна роля между литературния обзор и собственото изследване. След като, в първа глава

е установена необходимостта от самостоятелно изследване на РТЕТ, във втора глава се дефинира какво точно трябва да бъде изследвано и чрез каква последователност от действия може да се постигне поставената цел.

Целта е насочена към установяване на връзките между конструктивните, кинематичните, динамичните и технологичните параметри на машината. Тя не се свежда до описание на машината, а до търсене на количествени зависимости, които могат да служат за оценка и рационален избор на режим.

Това е съществено, защото при трошачните машини едно изменение на параметър често води до противоположни ефекти върху различните показатели. Задачите са подредени така, че да следват естествената логика на изследването.

Първо се анализира съществуващата информация и се формулира класификационното място на машината. След това се разработват теоретични зависимости за производителност, мощност и натоварване.

На следващ етап се създава CAD модел и се извършва симулационна оценка. След това се преминава към експериментална постановка, измерване, зърнометричен анализ, статистическа обработка и оптимизация.

Такова подреждане е важно за труда. Ако се започне само с експеримента, без теоретична и конструктивна основа, резултатите биха били трудни за обобщаване.

Ако се остане само на ниво теория и симулация, няма да бъде доказано реалното поведение на машината. Комбинираният подход осигурява връзка между модел и практика.

Във втора глава се очертава и методичният алгоритъм на изследването. Той може да бъде представен като последователност: **литературен анализ → постановка на проблема → теоретични зависимости → 3D CAD модел → FEM анализ → експериментален план → измерване на технологични и динамични показатели → зърнометрична оценка → регресионни модели → многоцелева оптимизация → изводи и приноси.**

По този начин целта и задачите задават рамката на дисертационния труд и позволяват резултатите да бъдат оценени спрямо ясно дефинирани критерии. Това е особено важно при автореферата, защото читателят трябва да види, че всяка следваща глава има функция в общата доказателствена линия.

3. Глава III. Теоретично определяне на основни механични и технологични параметри

Трета глава представя теоретичната основа на изследването. В нея са разгледани конструктивното устройство и принципът на действие на РТЕТ, както и основните зависимости, необходими за предварителна оценка на производителност, мощност и натоварване. Главата има ключово значение, защото създава преход от класификационното обосноваване към реалното инженерно изследване на машината.

Конструктивно РТЕТ включва ротор, ексцентриков механизъм, корпус, контраповърхност, разтоварен отвор и една или две работни камери. Работният процес се характеризира с периодично изменение на разстоянието между ротора и контраповърхността.

Теоретичните зависимости за процеса на трошене включват оценка на производителността, мощността и силовите въздействия. При определяне на производителността се отчита работният обем на камерата, честотата на въртене и условията за преминаване на материала през разтоварния отвор. Така се показва защо широчината на отвора b_{\min} е едновременно фактор за пропускателна способност и за едрина на готовия продукт.

При определяне на мощността и енергийното натоварване е направено разграничение между моментната електрическа мощност, изразходваната енергия и относителния енергоразход.

Това разграничение е важно, защото в анализа не трябва да се смесват физически различни величини. Мощността характеризира натоварването във времето, енергията е интегрална величина, а относителният енергоразход дава технологично сравним показател, отнесен към произведената маса.

Особено внимание е отделено на силовото натоварване. В труда се разграничават инерционни, периферни и контактни сили. Инерционните сили се свързват с масата и ускорението и могат да се оценяват чрез измерени виброускорения.

Периферната или тангенциалната сила се определя чрез въртящия момент и радиуса на приложение. Реалната контактна сила на трошене обаче е свързана с непосредствения контакт между материал, ротор и броня и не трябва да се отъждествява механично с първите две величини.

Това терминологично и физично разграничение повишава научната прецизност на труда. То показва, че изследването не използва опростено една сила за всички явления, а разглежда отделните натоварвания според техния произход и роля.

По този начин резултатите от вибрационните измервания, въртящия момент и симулационния анализ могат да се използват коректно, без да се надценява тяхното значение.

В трета глава е разработен 3D CAD модел на РТЕТ. Моделът служи като основа за геометричен анализ, определяне на обеми на трошачните камери и подготовка на симулационните изследвания. Чрез него се визуализират основните възли и се създава връзка между конструкцията и параметрите, които по-късно се използват в експеримента. CAD моделът има не само илюстративна, но и изчислителна функция.

FEM/CAE анализът е използван за оценка на напрегнато-деформираното състояние на ротора и свързаните с него конструктивни елементи. При зададени гранични условия и натоварвания се определят напрежения, деформации и запас на безопасност. Резултатите показват дали конструкцията работи в допустими граници и дали има риск от неблагоприятни напрегнати зони при разглежданите режими.

Модалният анализ има значение за оценка на динамичната устойчивост. В дисертационния труд е отчетено, че собствените честоти на ротора са значително по-високи от работните честоти. Това е важен резултат, защото намалява вероятността от резонансни явления в разглеждания работен диапазон. Така теоретичната и симулационната част създават предпоставка за безопасно провеждане на експериментите.

Изводите от трета глава могат да се обобщят така: ексцентричното движение на ротора създава условия за интензивно, но контролируемо въздействие върху материала; геометрията на камерата и широчината на разтоварния отвор са определящи за производителността и едрината на продукта; силовите величини трябва да се разглеждат отделно; CAD и FEM анализът потвърждават конструктивната работоспособност на машината в зададените граници.

Тази глава е особено важна за автореферата, защото доказва, че дисертацията не се основава само на експериментални наблюдения. Преди реалните опити е изградена инженерна основа, която позволява да се разбере как и защо отделните фактори влияят върху процеса. Следователно експерименталната част не е изолирана, а е логично продължение на теоретичната постановка.

Таблица 4

Показател	Обобщена зависимост / идея	Интерпретация
Производителност	$Q_m = f(n, b_{min}, z)$	Зависи от честотата, работния обем и условията за разтоварване.

Относителен енергоразход	$W = P_{cp} / Q_m$	Показва енергийната цена на единица произведен материал.
Инерционно натоварване	$F_{ин} = m \cdot a$	Оценява динамичното въздействие по измерени виброускорения.
Периферна сила	$F_t = M / r$	Характеризира натоварването на ротора от въртящия момент.
Контактна сила на трошене	Свързана с контакт материал–ротор–броня	Не се отъждествява директно с $F_{ин}$ или F_t .

Таблица 4. Теоретичната постановка.

4. Глава IV. Експериментална постановка, резултати и зърнометричен анализ.

Четвърта глава е една от най-съществените части на дисертационния труд, защото в нея теоретичните и симулационните положения се проверяват чрез реални експериментални данни.

Изследванията са проведени при контролирани лабораторни условия, като са използвани два материала - варовик и диабаз. Това позволява да се проследи влиянието на режима не само върху един конкретен материал, а при различни физико-механични характеристики.

Експерименталната програма е изградена като смесен факторен план. Основните управляващи фактори са реалната честота на въртене n , широчината на разтоварния отвор b_{min} и броят работни камери z . Честотата е разглеждана чрез реално измерена стойност, а не само чрез задаването от честотния инвертор. Това е важно уточнение, защото при статистическата обработка трябва да се използва действителният режим на машината.

Основният план включва 36 опита и 4 повторяеми опита в централната област на плана, т.е. общо 40 опита. Повторяемите опити са необходими за оценка на възпроизводимостта и стабилността на измервателната система.

Допълнителните проверовъчни изпитвания се разглеждат отделно и не променят структурата на основния факторен план.

За всеки опит са контролирани масата на пробата, влажността на материала, времето за обработка, настройките на разтоварния отвор, броят камери и честотата на въртене.

Материалите са предварително подготвени чрез подсушаване и пресяване. Този контрол е необходим, защото при зърнометричния анализ дори малки разлики във входния материал могат да доведат до изменения в крайния резултат.

Измервателната система включва средства за регистриране на електрически, вибрационни и кинематични параметри. Чрез акселерометър се проследява вибрационното

поведение, чрез тахогенератор се определя реалната честота на въртене, а чрез електрически измервания се оценява мощността и енергийното натоварване.

Данните са записвани и обработвани чрез специализиран софтуер, което позволява последваща статистическа и спектрална обработка.

Основните резултати от експеримента са групирани около целевите функции. Масовата производителност Q_m показва колко материал преминава през машината при конкретен режим. Зърнометричните показатели $D_{ср}$ и D_{80} показват какъв продукт се получава. Относителният енергоразход W показва каква е енергийната цена на произведената маса. Така всеки режим може да бъде оценен едновременно по трите направления.

Зърнометричният анализ е особено важен, защото доказва как режимът на машината влияе върху крайния продукт. Не е достатъчно да се покаже, че машината пропуска повече материал. Необходимо е да се установи дали полученият продукт е по-фин, по-равномерен и технологично подходящ. Затова ситовият анализ и изчисляването на средния размер са ключова част от експерименталната оценка.

Увеличаването на честотата от 15 до 25 Hz води до намаляване на средния диаметър $D_{ср}$ и до увеличаване на фините фракции. При по-ниски честоти преобладават по-едри и средни фракции, докато при по-високи честоти се увеличава делът на частиците под 2 mm. Това доказва, че честотата е силен кинематичен фактор, който влияе върху интензивността на раздробяване.

Влиянието на разтоварния отвор е противоположно по своя технологичен смисъл. При по-малък отвор се получава по-фин продукт, но се увеличава натоварването и може да се повиши относителният енергоразход.

При по-голям отвор се улеснява преминаването на материала и се повишава пропускателната способност, но готовият продукт става по-едър. Това показва защо b_{min} не може да се избира едностранно, а трябва да се разглежда като компромисен параметър.

Броят на работните камери влияе върху равномерността на процеса. Работата с две камери създава възможност за по-равномерно разпределяне на натоварването и за стабилизиране на процеса. Този резултат има практическо значение, защото показва, че конструктивната конфигурация на машината може да бъде използвана като средство за подобряване на технологичното поведение.

Сравнението между варовик и диабаз показва, че видът на материала е съществено експериментално условие. По-твърдите и по-устойчиви материали променят както

производителността, така и зърнометричния резултат и енергийния разход. Затова материалът не трябва да се третира като формален фон на експеримента, а като фактор за интерпретация на резултатите, макар и не основен управляващ фактор в избраната схема.

Вибрационните резултати са използвани за оценка на динамичното състояние на машината. Те дават информация за стабилността на режима, за възможни изменения при различни честоти и за поведението на конструкцията при реална работа. В същото време е направено важното уточнение, че вибрациите не се използват като пряко доказателство за реалната контактна сила на трошене, а като диагностичен показател.

Съпоставянето на изчислителните оценки и експерименталните резултати показва, че теоретичните зависимости дават полезна инженерна основа, но окончателната оценка на процеса трябва да се прави чрез реални измервания..

Изводите от четвърта глава са основен доказателствен елемент на труда. Те показват, че РТЕТ работи стабилно в разглеждания диапазон, че n , b_{min} и z оказват ясно влияние върху резултатите, че зърнометричният анализ разкрива качеството на продукта и че експерименталните данни могат да служат за статистическо моделиране и многоцелева оценка.

За автореферата тази глава трябва да бъде представена сравнително подробно. Причината е, че именно тук се вижда реалната работа на машината и връзката между режим и продукт. Зърнометричните криви и средните диаметри са силен аргумент, защото показват не само теория, а конкретен технологичен резултат.

Таблица 5

Елемент на експеримента	Приета стойност / описание
Материали	варовик и диабаз
Честота на въртене n	15; 20; 25 Hz
Разтоварен отвор b_{min}	3; 4; 5 mm
Брой работни камери z	1; 2
Основен план	36 основни опита + 4 повторяеми опита = 40 опита
Маса на единична проба	3 kg
Време за обработка	45 s
Основни измервания	мощност, честота, вибрации, маса, време, зърнометричен състав
Основни резултатни показатели	Q_m , $D_{cp}/D80$, W

Таблица 5. Основни условия на експерименталната програма.

Зърнометричен анализ.

Зърнометричният анализ в дисертационния труд има самостоятелна доказателствена стойност. Чрез него се оценява не само наличието на процес на трошене, а качеството на

крайния продукт. Това е важно, защото ефективната трошачка трябва да осигурява технологично полезен продукт, а не само преминаване на материал през машината.

При ситовия анализ готовият продукт се разделя на фракции, определя се масовият дял на всяка фракция и се изчисляват обобщаващи показатели. Средният диаметър D_{50} се използва като количествена оценка на средната едрина, а D_{80} показва характерния размер, под който преминава 80% от материала. Така гранулометричната картина може да бъде превърната в сравними числови показатели.

Получените зависимости показват, че повишаването на честотата измества зърнометричните криви към по-фини фракции. Това е логично, тъй като при по-висока честота материалът е подложен на по-интензивно и по-често въздействие. В същото време повишаването на честотата не може да бъде безусловна препоръка, защото води и до повисоко енергийно натоварване.

Точно тук се проявява необходимостта от многоцелева оценка. Ако се търси само минимален D_{50} , би се избрал режим с най-интензивно раздробяване. Ако се търси само максимална Q_m , може да се избере по-голям разтоварен отвор и по-висока пропускателна способност. Ако се търси само минимален W , изборът може да бъде различен. Затова зърнометрията е неразделна част от общата оптимизационна логика.

5. Глава V. Статистически анализ и многоцелева оптимизация.

Пета глава обработва експерименталните резултати чрез статистически методи и поставя основата на многоцелевата оптимизация. Тя е логичният завършек на дисертационния труд, защото превръща отделните измервания в модели, зависимости и критерии за избор на режим. Без тази глава експериментът би останал набор от данни; чрез статистическата обработка той се превръща в инструмент за инженерно решение.

Статистическият анализ е насочен към оценка на влиянието на n , b_{min} и z върху Q_m , D_{50}/D_{80} и W . За целта се използват регресионни зависимости и критерии за оценка на адекватността на моделите. Основните показатели са коефициентът на детерминация R^2 , коригираният R^2 , P-Value и F-критерият.

Тези показатели позволяват да се прецени дали моделът описва достатъчно добре експерименталните данни и дали факторите са статистически значими.

Особено важно е, че дисертационният труд не приема автоматично всеки получен модел като надеждна прогнозна основа. Ако даден модел или фактор не удовлетворява

статистическите критерии, той не се използва за окончателна оптимизация, а само за ориентировъчна оценка на тенденции.

Това повишава научната коректност на анализа и предпазва от надценяване на резултатите.

Регресионните модели имат две основни функции. Първата е аналитична - те показват посоката и силата на влияние на отделните фактори. Втората е прогнозна - когато моделът е статистически приемлив, той може да се използва за изчисляване на стойности в рамките на разглежданата експериментална област. Така се създава връзка между конкретните опити и по-общата инженерна оценка.

Многоцелевата оптимизация е необходима, защото основните цели на процеса са частично противоречиви. Не може безусловно едновременно да се максимизира производителността, да се минимизира енергоразходът и да се получи най-фина фракция.

В реалния технологичен процес се търси рационален компромис. Затова в дисертацията е въведена обобщена функция на полезност, която обединява нормализираните целеви функции.

При многоцелевата постановка векторът на управляващите фактори се записва като $X = (n, b_{\min}, z)$. Частните целеви функции са $f_1 = D_{cp}(n, b_{\min}, z)$, $f_2 = Q_m(n, b_{\min}, z)$ и $f_3 = W(n, b_{\min}, z)$. Тъй като тези величини имат различни размерности и различна посока на оптимизация, те се нормализират в безразмерен вид.

За функции, които се минимизират, по-ниската стойност е по-благоприятна; за производителността, която се максимизира, нормализацията се обръща така, че всички показатели да следват една и съща логика.

Обобщената функция на полезност U служи като интегрален критерий за сравнение на режимите. При безтегловния подход всички цели се приемат с еднаква значимост. При тегловния подход се въвеждат коефициенти, чрез които могат да се отчетат различни технологични приоритети.

Например приоритет може да се даде на по-фин продукт, на по-нисък енергоразход или на по-висока производителност в зависимост от конкретната производствена задача.

Важен резултат е, че оптимизацията се формулира като търсене на рационална област на работа, а не като абсолютен универсален оптимум. Това е правилен подход, защото лабораторният модел, видът на материала, границите на факторите и статистическата

надеждност на моделите ограничават валидността на получените резултати. Следователно оптимумът е валиден в рамките на зададения експериментален план.

Сравнението между безтегловния и тегловния подход има методическо значение. То показва, че изборът на режим може да се промени, когато технологичните приоритети се променят. Ако всички цели са равнопоставени, рационалният режим може да бъде в една област.

Ако качеството на продукта и енергоразходът имат по-голяма тежест, предпочитаната област може да се измести. Това е практически полезно, защото различните производства имат различни изисквания.

Изводите от пета глава показват, че статистическата обработка и многоцелевата оптимизация са приложими за РТЕТ, но само при ясно дефинирани фактори, целеви функции и граници на валидност.

Те осигуряват инструмент за съвместно оценяване на технологични, производствени и енергийни показатели и позволяват да се формулират рационални препоръки за работа на машината.

Таблица 7

Елемент на статистическия анализ	Съдържание	Значение
R ² и коригиран R ²	Оценка на обяснената дисперсия от модела.	Показват доколко моделът описва данните.
P-Value	Оценка на статистическата значимост.	При $P \leq 0.05$ моделът/факторът се приема за статистически значим.
F-критерий / F-Ratio	Проверка на значимостта на регресионната зависимост.	Показва дали моделът има статистически смисъл.
Нормализация	Свеждане на различните показатели до безразмерен вид.	Позволява сравняване на D _{ср} , Q _m и W в една функция.
Обобщена функция U	Интегрален критерий за полезност.	Служи за избор на рационален компромисен режим.

Таблица 7. Елементи на статистическия анализ.

Логика на многоцелевата оптимизация.

Многоцелевата оптимизация в труда не е само математическа операция, а инженерна логика за избор на режим. Всяка трошачна машина може да бъде настроена по различен начин, но изборът на настройка трябва да бъде обоснован.

При РТЕТ това означава да се отговори на въпроса при каква честота, разтоварен отвор и брой камери се постига най-добро съчетание между количество, качество и енергийна икономичност.

Обобщената функция U позволява различните режими да бъдат подредени по комплексна ефективност. Режимът с по-ниска стойност на U се приема за по-благоприятен, когато са ясно зададени критериите за нормализация и теглата.

Това не означава, че той е универсално най-добър във всички условия, а че е найдобър в рамките на конкретната задача и конкретните данни.

Този подход е силен елемент на дисертационния труд, защото показва, че авторът не търси едностранен максимум или минимум. В реалната практика компромисът е неизбежен.

Добрият режим не е този, който максимизира само една величина, а този, който, осигурява приемливо и технологично полезно съчетание между основните показатели.

Разширено обобщение на методичната схема.

Методичната схема на дисертационния труд има значение не само като последователност от изследователски действия, а като начин за свързване на различни нива на анализ.

Първото ниво е конструктивно - то отговаря на въпроса как е устроена машината и какви геометрични параметри определят работната камера. Второто ниво е кинематично, което разглежда как се движи роторът и как се изменя работният просвет във времето.

Третото ниво е динамично, то отчита вибрационното поведение, инерционните въздействия и натоварването на основните елементи. Четвъртото ниво е технологично, което оценява крайния резултат чрез производителност, зърнометричен състав и енергоразход.

Тази многослойна структура е необходима, защото процесът на трошене не може да бъде обяснен само с един показател. Например високата честота на въртене увеличава броя на въздействията върху материала, но едновременно променя динамичното натоварване и енергийните показатели.

По-малкият разтоварен отвор подобрява фиността на продукта, но може да ограничи пропускателната способност и да повиши натоварването. Поради това всяка оценка трябва да бъде комплексна.

Методичната схема започва с литературния анализ, защото чрез него се обосновава защо РТЕТ трябва да бъде изследвана самостоятелно. Ако машината бъде разглеждана само

като разновидност на челюстна или валцова трошачка, част от специфичните ѝ свойства остават скрити.

Затова литературният обзор има не само информационна, но и постановъчна функция - той формулира научната празнина и дава основание за избора на обект и предмет.

Следващият етап е теоретичният анализ. Той осигурява първична инженерна картина на процеса. В него се разглеждат зависимости за производителността, мощността, инерционните и периферните натоварвания. Тези зависимости не се използват като окончателно описание на реалния процес, а като основа за формулиране на очаквани тенденции, които след това се проверяват експериментално.

CAD и FEM/CAE етапът изпълнява свързваща роля между теорията и експеримента. От една страна, чрез CAD модела се определят реални геометрични параметри, които участват в изчисленията. От друга страна, FEM анализът проверява дали конструкцията може да понесе разглежданите натоварвания. Така се избягва ситуация, при която експериментът се провежда без предварителна конструктивна оценка.

Експерименталната част осигурява реалните данни, необходими за доказване на влиянието на факторите. Тя е организирана така, че да се получат съпоставими резултати при различни комбинации на n , b_{min} и z . Важна особеност е, че се използва реална измерена честота, а не само зададен параметър на инвертора. Това повишава надеждността на последващата статистическа обработка.

Зърнометричният анализ представлява технологичната проверка на работния резултат. Той превръща получената маса материал в измерими фракции и обобщени показатели.

Така качеството на продукта се оценява количествено, а не описателно. Това е важно при защита на труда, защото показва конкретния ефект от режима върху крайния продукт.

Статистическата обработка и многоцелевата оптимизация завършват методиката. Чрез тях отделните резултати се превръщат в зависимости, а зависимостите, в основа за избор на режим. При това се подчертава, че рационалният режим е валиден в рамките на разглежданата експериментална област и при доказана статистическа надеждност на моделите.

Разширена интерпретация на управляващите фактори.

Честотата на въртене n е най-активният кинематичен фактор в изследването. При нейното повишаване се увеличава броят на взаимодействията между ротора, материала и контраповърхността за единица време.

Това води до по-интензивно раздробяване и до намаляване на средния размер на частиците. В същото време по-високата честота увеличава динамичното натоварване и може да доведе до по-висок енергиен разход. Затова n не трябва да се разглежда само като средство за по-fino трошене, а като параметър, който влияе едновременно върху качество, производителност, вибрации и енергия.

Широчината на разтоварния отвор b_{min} е геометричният фактор с най-пряко технологично значение. Когато b_{min} се намалява, материалът се задържа по-интензивно в зоната на раздробяване и получава по-голяма степен на редукция.

Това подобрява зърнометричния резултат, но може да повиши съпротивлението на преминаване и натоварването на машината. Когато b_{min} се увеличава, материалът се извежда по-лесно, производителността може да нарасне, но готовият продукт става по-едър. Поради това b_{min} е типичен компромисен фактор.

Броят работни камери z е конструктивно-режимен фактор, който влияе върху разпределението на натоварването и равномерността на процеса. При еднокамерна конфигурация въздействието е концентрирано в една зона, докато при двукамерна конфигурация процесът може да се разпредели по-равномерно.

Това има значение за стабилността, вибрациите, производителността и качеството на продукта. В труда z се разглежда като управляем параметър, защото конфигурацията на камерите може да бъде зададена при експерименталната постановка.

Видът на материала не е включен като основен управляващ фактор в смисъла на настройка на машината, но има съществено значение за интерпретацията. Варовикът и диабазът имат различни физико-механични свойства, което се отразява върху разрушаването, производителността и енергоразхода. Затова резултатите трябва да се тълкуват с оглед на материала, а не да се пренасят механично от един материал към друг.

Съвместното влияние на n , b_{min} и z е по-важно от самостоятелното влияние на всеки фактор. Например високата честота при малък разтоварен отвор може да даде много фин продукт, но с по-голямо натоварване. По-големият отвор при по-висока честота може да увеличи производителността, но да промени фракционния състав. Двукамерната работа може да стабилизира процеса, но ефектът ѝ трябва да се оценява съвместно с останалите настройки. Именно затова е необходим факторен експеримент и статистическа обработка.

При защитата на труда е важно ясно да се подчертае, че управляващите фактори са избрани според две условия: те могат да бъдат контролирани и имат физически смисъл за

процеса. Това отличава n , b_{\min} и z от производни величини, които се изчисляват или измерват, но не са директни настройки на машината. Така факторната схема остава ясна и защитима.

Разширена интерпретация на целевите функции.

Масовата производителност Q_m е основен количествен показател. Тя показва каква маса материал се обработва за единица време. В промишлени условия производителността е критична, защото определя капацитета на цялата технологична линия.

Въпреки това Q_m не може да бъде единствен критерий за ефективност. Възможно е режим с висока производителност да дава твърде едър продукт или да бъде енергийно неблагоприятен.

Зърнометричният показател D_{cp}/D_{80} е качественият център на изследването. Той показва какъв е реалният резултат от раздробяването. По-нисък среден диаметър или понисък D_{80} означава по-фин продукт, но това трябва да се оценява спрямо необходимата технология. Не винаги най-финият продукт е най-икономичният, но в изследването той е важен показател за степента на въздействие на машината върху материала.

Относителният енергоразход W е енергийният критерий. Той е по-информативен от моментната мощност, защото свързва разхода на енергия с произведената маса. Ако мощността е висока, но производителността също е висока, относителният енергоразход може да остане приемлив.

Обратно, режим с ниска мощност, но много малка производителност може да бъде технологично неизгоден. Затова W е правилният показател за енергийна оценка.

Трите целеви функции са частично противоречиви. Това е същността на инженерната задача. Ако се оптимизира само Q_m , може да се пренебрегне качеството. Ако се оптимизира само D_{cp} , може да се получи висока енергоемкост. Ако се оптимизира само W , може да се получи недостатъчна производителност или неподходящ продукт.

Обобщената функция на полезност не заменя отделните целеви функции, а ги обединява за сравнение. Всяка от тях първо се нормализира, за да бъде съпоставима с останалите. След това може да се използва безтегловен или тегловен подход. Безтегловният подход е подходящ за първоначално сравнение, а тегловният за случаи, когато технологичните приоритети са ясно зададени.

Приносният момент тук е, че целевите функции са формулирани инженерно и измеримо. Вместо общи твърдения за ефективност, дисертацията използва конкретни показатели.

Това позволява резултатите да бъдат проверявани, сравнявани и използвани при бъдещи експерименти.

Подробна роля на зърнометричния анализ.

Зърнометричният анализ заема централно място в доказването на технологичната ефективност на РТЕТ.

При машините за трошене крайният продукт се оценява не само по общата маса, а по разпределението на частиците по размер. Това разпределение определя дали продуктът е подходящ за последваща употреба, класификация, обогатяване или строително приложение. Затова зърнометрията е пряка връзка между механичното действие на машината и технологичната стойност на получения материал.

В дисертационния труд зърнометричният анализ е основан на ситово разделяне на продукта по фракции. За всяка фракция се определя масов дял, след което се изчисляват обобщени показатели. Това позволява да се сравняват различни режими чрез числени резултати, а не само чрез визуално наблюдение. Така се избягва субективната оценка и се създава възможност за статистическа обработка.

Увеличаването на честотата води до изместване на зърнометричната характеристика към по-малки размери. Това е логично следствие от по-интензивното въздействие, но то има и практическо значение. Ако целта е получаване на по-фин продукт, повишаването на честотата е ефективно средство. Ако обаче целта е максимална производителност с ограничен енергоразход, трябва да се провери дали повишаването на честотата е оправдано.

Разтоварният отвор влияе върху зърнометрията чрез времето и условията на престой на материала в зоната на раздробяване. Малък отвор означава по-строг контрол върху максималния размер на изходящите частици, но създава по-голямо съпротивление.

По-голям отвор позволява по-бързо преминаване, но намалява степента на раздробяване. Следователно зърнометричният анализ е пряк начин да се оцени действителният ефект от промяната на b_{min} .

Броят камери също се отразява на фракционния състав, защото променя организацията на работния процес. При две камери материалът може да бъде подложен на по-равномерно и

разпределено въздействие, което влияе върху едрина и стабилност на продукта. Този резултат има значение при бъдещо конструктивно усъвършенстване на машината.

В автореферата зърнометричният анализ трябва да бъде представен като доказателство за качеството на продукта. Той отговаря на въпроса: какво се случва с материала след преминаване през машината. Този въпрос е особено важен, защото производителността без информация за качеството е непълна оценка на трошачния процес.

Зърнометричните резултати имат и оптимизационна функция. Те участват като качествена целева функция и определят дали даден режим е технологично приемлив. В комбинация с Q_m и W те позволяват да се намери режим, който не само произвежда достатъчно материал, но и осигурява желаната едрина при разумен разход на енергия.

Подробна роля на статистическата проверка.

Статистическата проверка е необходима, защото експерименталните данни при трошачни процеси съдържат естествена вариация. Различията в зърната, в подаването, в локалното натоварване и в динамичното поведение могат да доведат до разсейване на резултатите. Затова не е достатъчно да се построят графики; необходимо е да се провери дали получените зависимости са статистически значими.

Коефициентът R^2 показва каква част от изменението на резултатния показател се обяснява от модела. Висок R^2 е полезен, но сам по себе си не е достатъчен. Ако моделът има много членове или ако данните са ограничени, може да се получи висока стойност без реална прогнозна надеждност. Затова се използва и коригиран R^2 , който отчита структурата на модела.

P-Value е особено важен за оценка на статистическата значимост. При общоприет праг $P \leq 0.05$ може да се приеме, че вероятността наблюдаваният ефект да е случаен е достатъчно малка. Ако P-Value е незадоволителен, моделът не трябва да се използва като окончателна основа за оптимизация. Това правило е важно за коректността на труда.

F-критерият или F-Ratio служи за оценка на общата значимост на регресионната зависимост. Той допълва информацията от P-Value и позволява да се провери дали моделът има статистически смисъл. В комбинация тези критерии определят кои зависимости могат да бъдат използвани за прогнозиране и кои трябва да останат само като ориентировъчни тенденции.

Статистическата обработка позволява да се отделят надеждните зависимости от несигурните. Това е особено важно при многоцелевата оптимизация. Ако в обобщената функция на полезност се включат неадекватни модели, крайният оптимизационен резултат може да бъде подвеждащ.

Затова дисертацията правилно подчертава, че многоцелевата оценка трябва да се основава само на статистически приемливи зависимости или на реални експериментални стойности.

Практическият смисъл на статистиката е да превърне експеримента в инженерно решение. Една таблица с резултати показва какво е измерено. Един статистически проверен модел показва как факторите влияят върху процеса и как може да се прогнозира поведението в рамките на изследваната област. Това е разликата между експериментално описание и научно-приложен резултат.

Формулировка на многоцелевата оптимизация.

Многоцелевата оптимизация трябва да бъде формулирана внимателно. В дисертационния труд тя не означава, че е намерена абсолютна универсална настройка на машината за всички материали и всички условия.

Тя означава, че в рамките на проведените опити и зададените факторни нива може да се определи рационална област на работа, в която трите основни критерия са балансирани.

Тази предпазлива формулировка е научно правилна. Лабораторният модел работи в определени граници на честота, разтоварен отвор и брой камери. Материалите са конкретни - варовик и диабаз.

Обобщената функция на полезност U служи като инструмент за сравнение. Когато всички частни функции са нормализирани, режимите могат да бъдат подредени според комплексната им ефективност.

Ако се използват тегловни коефициенти, те трябва да бъдат обосновани с технологични приоритети. Например при производство, където качеството на продукта е водещо, теглото на D_{cp}/D_{80} може да бъде по-голямо. При производство, където капацитетът е критичен, по-голяма тежест може да има Q_m .

Важно е да се подчертае, че U не отменя физическия смисъл на отделните показатели. Тя не казва защо даден режим е добър, а помага да се сравнят режимите. Обяснението остава

в механичната и технологичната интерпретация: честотата увеличава интензивността, отворът регулира едрина и пропускателност, броят камери влияе върху равномерността, а материалът определя съпротивлението на разрушаване.

Така многоцелевата оптимизация е завършващ, но не самостоятелен елемент. Тя е силна само защото преди нея има теория, CAD/FEM, експеримент, зърнометрия и статистика.

Това трябва да бъде ясно представено в автореферата, за да се избегне впечатление, че оптимизацията е формална математическа операция без достатъчна експериментална основа.

Връзка между резултатите и практическото приложение.

Практическото приложение на дисертационния труд е свързано с възможността резултатите да се използват при настройка и развитие на роторни трошачки от ексцентриков тип. Най-пряката приложимост е при лабораторната машина, за която са получени конкретните данни.

За нея могат да се препоръчват диапазони на честота, разтоварен отвор и конфигурация на камерите според желаната комбинация от производителност, качество и енергоразход.

Практически полезен е и подходът към зърнометрията. Производствените машини често се оценяват по капацитет, но качеството на продукта е също толкова важно. Чрез включване на D_{sp}/D_{80} в целевите функции се създава по-пълна оценка.

Енергийната оценка чрез $W = P_{sp}/Q_m$ има пряко приложение при сравнение на режими. Тя позволява да се установи дали увеличаването на производителността оправдава по-високата мощност или дали по-финият продукт се получава с прекомерен енергоразход. Това е особено важно при условия на високи разходи за електроенергия.

Накрая, интегрираната оценка чрез U може да бъде използвана като помощен инструмент при избор на режим. Тя не заменя инженерното решение, но го прави пообосновано. Вместо да се избира режим по интуиция или по един показател, могат да се сравнят няколко режима по комплексен критерий.

6. Глава VI. Заключение.

В шеста глава на дисертационния труд са обобщени основните резултати от проведеното теоретично, симулационно, експериментално и статистическо изследване на роторната трошачка-ексцентриков тип. Заключениеето има обобщаващ характер и свързва резултатите от предходните глави в единна инженерна оценка на изследваната машина.

Основната роля на тази глава е да покаже, че разработката не завършва само с отделни изчисления, експерименти или статистически модели, а достига до цялостна методика за оценяване на работния процес на РТЕТ. В нея са обединени конструктивните, кинематичните, технологичните, енергийните и статистическите аспекти на изследването.

В заключението е посочено, че в дисертационния труд е приложен комплексен подход за изследване на роторна трошачка-ексцентриков тип, който включва конструктивен и кинематичен анализ, 3D CAD моделиране, FEM оценка на натоварването, експериментални измервания, зърнометричен анализ и статистическа обработка на резултатите.

По този начин е изградена последователна връзка между теоретичните постановки, реалните експериментални данни и получените математически модели.

Съществен извод от главата е, че изследването е структурирано около ясно определени управляващи фактори: честота на въртене на ротора n , широчина на разтоварния отвор/работния просвет b / b_{min} и брой работни камери z . Тези фактори са разгледани като основни входни параметри, чрез които може да се влияе върху работния процес на машината.

От друга страна, ефективността на процеса е оценена чрез целеви функции, свързани с масовата производителност Q_m , зърнометричния състав и средния диаметър на готовия продукт D_{cp} / D_{80} , както и относителния енергоразход W . Така процесът на трошене е разгледан едновременно по три направления: количество на произведения материал, качество на раздробения продукт и енергийна ефективност.

В заключението е подчертано, че роторната трошачка-ексцентриков тип притежава специфично конструктивно и технологично място сред машините за трошене. Тя не трябва да се разглежда само като разновидност на валцова, челюстна или роторна трошачка, а като машина със собствен принцип на действие, собствена кинематична схема и специфично взаимодействие между работния орган и раздробявания материал.

На основата на литературния анализ е направен извод, че РТЕТ заема междинно, но самостоятелно място между класическите трошачни решения. Именно това обосновава необходимостта от нейното отделно изследване и от въвеждането ѝ в класификационните схеми на машините за трошене като самостоятелен конструктивно-технологичен клас.

В теоретичната част са обобщени резултатите от определянето на основните механични и технологични параметри на машината. Разгледани са кинематичните зависимости, производителността, мощността, силовото натоварване и влиянието на геометричните параметри върху работния процес.

Чрез 3D CAD моделиране и FEM анализ е направена оценка на напрегнатото и деформационното състояние на работните елементи, което позволява да се оцени конструктивната надеждност на машината.

От експерименталните изследвания е направен извод, че промяната на честотата на въртене, разтоварния отвор и броя на камерите оказва пряко влияние върху производителността, зърнометричния състав и енергоразхода. Получените резултати потвърждават, че работният режим на РТЕТ трябва да се избира не по един-единствен показател, а чрез едновременно отчитане на няколко взаимосвързани критерия.

Особено значение в заключението има зърнометричният анализ. Чрез него се доказва, че режимът на работа на машината влияе пряко върху качеството на крайния продукт. Установено е, че при повишаване на честотата на въртене се увеличава интензивността на раздробяване, което води до намаляване на средния размер на частиците и до нарастване на дела на по-фините фракции. Това показва, че зърнометричният състав е основен технологичен показател за оценка на ефективността на РТЕТ.

В заключението са обобщени и резултатите от статистическия анализ. Чрез регресионните модели е описано влиянието на управляващите фактори върху основните

резултатни показатели. Получените зависимости дават възможност да се прогнозира поведението на машината при различни работни режими и да се определят рационални настройки според поставената технологична цел.

Многоцелевата оптимизация е представена като логически завършек на изследването. Тя показва, че не е възможно едновременно безусловно да се постигнат максимална производителност, минимален енергоразход и най-фин зърнометричен състав. Поради това е необходимо да се търси рационален компромисен режим, при който машината работи ефективно както от гледна точка на производителността, така и от гледна точка на качеството на продукта и енергийния разход.

В глава VI са посочени и бъдещи насоки за развитие на изследването. Те са свързани с разширяване на експерименталната база, изпитване на други материали, усъвършенстване на конструкцията, прецизиране на математическите модели и приложение на получените зависимости при проектиране и управление на роторно-трошачни машини от ексцентрик тип.

В обобщение, в заключението се доказва, че дисертационният труд изпълнява поставената цел. Създадена е методика за комплексно изследване на РТЕТ, установени са количествени зависимости между управляващите фактори и целевите функции, изградени са регресионни модели и е приложена многоцелева оптимизация за избор на рационални режими на работа.

Глава VI завършва логиката на дисертационния труд и подготвя прехода към формулирането на приносите.

7. Глава VII. Приноси на дисертационния труд.

В седма глава са формулирани приносите на дисертационния труд. Те обобщават резултатите от проведените теоретични, конструктивно-симулационни, експериментални, зърнометрични и статистически изследвания на роторната трошачка-ексцентрик тип.

Приносите са формулирани не като обща теория на трошенето, а като научноприложни и приложни резултати, отнасящи се до конкретната изследвана машина РТЕТ. Нейната конструкция, работни режими, управляващи фактори, целеви функции и методика за оценка.

В дисертацията изрично е посочено, че приносите се отнасят до конкретната машина, нейната конструкция, работни режими и методика за оценка, а не се представят като универсална теория на трошенето.

Основният принос на дисертационния труд е, че роторната трошачка-ексцентрик тип е разгледана като самостоятелен обект на научно и инженерно изследване. Обосновано е нейното място в класификацията на машините за трошене, като е показано, че тя съчетава конструктивни и кинематични особености на различни групи трошачни машини, но не е достатъчно ясно обособена в съществуващите класификационни схеми.

Това е важен научно-приложен принос, защото внася яснота в мястото на РТЕТ сред челюстните, валцовите, конусните и роторните решения.

В главата е подчертано, че е разработен комплексен подход за изследване на РТЕТ. Този подход включва конструктивно моделиране, кинематичен анализ, 3D CAD моделиране, FEM оценка на работния орган, експериментално измерване на работните режими, зърнометричен анализ, енергийна оценка и статистическа обработка на резултатите.

По този начин приносът не е само в отделен експеримент или отделна формула, а в изграждането на цялостна методика за инженерна оценка на машината.

Съществен принос е формулирането и използването на ясно определени управляващи фактори: реална честота на въртене на ротора n , широчина на разтоварния отвор/работния просвет b_{min} и брой работни камери z . Тези фактори са разгледани като основни входни параметри, чрез които може да се управлява процесът на трошене.

В дисертацията е посочено, че именно тези параметри реално регулират работата на машината, а видът на материала се отчита като контролен/групиращ фактор при анализа.

Към научно-приложните приноси се отнася и дефинирането на целевите функции, чрез които се оценява ефективността на процеса. Основните показатели са масова производителност Q_m , качествени зърнометрични показатели D_{cp} / D_{80} / y и относителен енергоразход W .

Тези показатели позволяват процесът да се оценява едновременно по количество, качество и енергийна ефективност. В дисертацията е уточнено, че зърнометричният състав се представя чрез конкретни числови показатели от ситовия анализ, а не само като общо разпределение.

Особено важен принос е експерименталното установяване на влиянието на управляващите фактори върху технологичните показатели на процеса.

Чрез проведените опити е показано как промяната на честотата на въртене, разтоварния отвор и броя на камерите влияе върху производителността. А оттам на средния размер на продукта, степента на раздробяване и относителния енергоразход. Това превръща изследването от описателно в количествено обосновано.

Като отделен принос трябва да се изведе зърнометричният анализ на готовия продукт. Той доказва как работният режим на машината влияе върху качеството на крайния продукт.

Чрез ситовия анализ и изчисляването на показатели като D_{cp} и D_{80} е създадена база за реална технологична оценка на РТЕТ. Това е много силна част от труда, защото показва не само колко материал обработва машината, а какъв продукт се получава след трошенето.

В седма глава се подчертава и приносът на статистическата обработка. Чрез регресионните модели са описани количествените връзки между управляващите фактори и резултатните показатели. Тези модели дават възможност да се прогнозира поведението на машината при различни режими и да се направи инженерно обоснован избор на работни настройки.

Към приносите се отнася и приложението на многоцелева оптимизация. Тя позволява едновременно да се отчетат производителността, качеството на продукта и енергийният разход. Така се избягва едностранната оценка само по един показател и се достига до рационален компромисен режим на работа.

Това е важно, защото при реална експлоатация не е достатъчно машината само да има висока производителност тя трябва да осигурява подходящ зърнометричен състав при приемлив енергоразход.

Приложните приноси са свързани с разработването и използването на експериментална постановка за изследване на РТЕТ. Тя включва контрол на честотата на въртене, разтоварния отвор, броя работни камери, масата и влажността на пробите, времето за обработка, енергийните показатели, вибрационното състояние и зърнометричния състав на готовия продукт.

Друг приложен принос е създаването на експериментална база данни за работата на РТЕТ при трошене на варовик и диабаз. Тази база може да се използва за сравняване на режими, настройване на лабораторната машина, бъдещо усъвършенстване на конструкцията и разширяване на изследванията към други материали.

Практическата стойност на приносите се изразява в това, че резултатите могат да бъдат използвани при проектиране, настройване, изпитване и оптимизиране на роторни трошачки-

ексцентриков тип и на сходни трошачни системи. При това трябва да се отчита мащабът на машината, видът на материала и границите на проведените лабораторни изпитвания.

В глава VII са включени и публикациите по дисертационния труд. Те показват, че основните резултати са представени пред научната общност и са свързани с устройството, принципа на действие, изследването и оценката на роторната трошачка-ексцентриков тип.

8. Глава VIII. Приложения.

В осма глава на дисертационния труд са представени приложенията, които допълват и доказателствено подкрепят проведените теоретични, експериментални и статистически изследвания.

Тази част няма характер на самостоятелна теоретична глава, но има съществено значение за проследимостта на резултатите, защото съдържа първични и обработени данни, графични материали, снимки, схеми и допълнителни зърнометрични анализи.

Основната роля на приложенията е да покажат, че изводите в дисертационния труд не са направени само въз основа на обобщени резултати, а се опират на реална експериментална база. В тях са включени данни от ситовия анализ, визуална документация на материала, технически схеми на измервателната система и допълнителни сравнителни графики, чрез които се проследява влиянието на работните режими върху крайния продукт.

В подраздел 8.1 са представени таблици със зърнометричните характеристики. Те съдържат данните от ситовия анализ на готовия продукт и служат като основа за определяне на средния диаметър $D_{ср}$, характерния размер D_{80} , сумарния добив по фракции и качеството на раздробяване.

Тези таблици са особено важни, защото чрез тях се преминава от експериментално измерена маса по фракции към количествена оценка на качеството на готовия продукт.

В подраздел 8.2 са включени снимки на материала от избрания диапазон. Тези изображения имат допълваща доказателствена стойност, защото визуално показват състоянието на продукта след трошене при различни режими. Чрез тях се подкрепя зърнометричният анализ и се дава по-ясна представа за реалния вид на раздробения материал.

В подраздел 8.3 е представена електрическата схема на свързване. Тя документира техническото изпълнение на експерименталната постановка и показва начина на свързване на използваните елементи за управление, измерване и регистриране на работните параметри. Това е важно, защото доказва, че експериментите са проведени при контролирани и възпроизводими условия.

В подраздел 8.4 е описана измервателната система. В приложенията са дадени технически параметри на триосния акселерометър **ADXL330**, както и информация за използвания аналогово-цифров преобразувател **NI-USB 6001**, чрез който аналоговите сигнали се преобразуват в цифров вид за последваща обработка и запис.

Тази част е важна, защото свързва експерименталните резултати с реалната измервателна апаратура. Така се показва, че вибрационните и работните показатели не са оценени приблизително, а са регистрирани чрез конкретна измервателна система.

В подраздел 8.5 са представени сравнителни анализи на зърнометричните характеристики по основни групи. В тях се съпоставят резултатите при различни честоти на въртене, различни разтоварни отвори, различен брой трошачни камери и различен материал.

Такива сравнителни графики позволяват по-ясно да се проследи влиянието на управляващите фактори върху качеството на готовия продукт. В приложенията са дадени

графики за работа на РТЕТ при зададени честоти **15, 20 и 25 Hz**, различни стойности на разтоварния отвор и материали като варовик и диабаз.

В подраздел 8.6 са представени зърнометрични характеристики на готовия продукт. Това е една от най-важните части на приложенията, защото тя разширява анализа от глава IV и дава допълнителни графики за отделни проби.

Например в приложенията е посочена зърнометрична характеристика при минимален работен просвет **$b = 3 \text{ mm}$** и изчислен среден диаметър **$D_{cp} = 3.75 \text{ mm}$** , както и отделни характеристики за проби при честота **$n = 25 \text{ Hz}$** , минимален работен просвет **$b_{min} = 3 \text{ mm}$** , една или две работни камери и материал варовик.

Чрез тези допълнителни графики се доказва, че зърнометричният състав на готовия продукт е пряко зависим от режима на работа на машината. Приложенията потвърждават, че промяната на честотата, работния просвет и броя на камерите води до изменение на разпределението по фракции, средния размер на частиците и качеството на раздробяване.

В обобщение, Глава VIII изпълнява ролята на експериментална и доказателствена база към дисертационния труд. Тя съдържа данните и материалите, чрез които се проверяват и подкрепят основните изводи от експерименталната част, статистическия анализ и многоцелевата оптимизация.

Приложенията показват, че резултатите са проследими, измерими и основани на реални експериментални данни. Затова в автореферата Глава VIII трябва да бъде представена не като отделна научна теза, а като **подкрепяща част**, която доказва надеждността на проведените експерименти и обосноваването на направените изводи.

III. ОБЩИ ИЗВОДИ

1. В дисертационния труд е приложена комплексна методика за изследване на роторна трошачка-ексцентриков тип, която обединява литературен анализ, теоретични зависимости, 3D CAD моделиране, FEM/CAE оценка, експериментални измервания, зърнометричен анализ, статистическа обработка и многоцелева оптимизация.
2. Литературният обзор показва, че РТЕТ има междинно място между познати трошачни решения, но не е достатъчно ясно обособена като самостоятелен клас в класификационните схеми. Това обосновава необходимостта от самостоятелно изследване на нейните конструктивни и технологични особености.
3. Установено е, че основните управляващи фактори на процеса са реалната честота на въртене n , широчината на разтоварния отвор b_{min} и броят работни камери z . Видът на материала е разгледан като важно експериментално условие, което влияе върху интерпретацията на резултатите.
4. Технологичната ефективност на РТЕТ е оценена чрез масова производителност Q_m , зърнометрични показатели D_{cp}/D_{80} и относителен енергоразход W . Така процесът се разглежда едновременно по количество, качество и енергийна ефективност.

5. Теоретичният анализ показва, че ексцентричното движение на ротора създава условия за периодично изменение на работната междина и за интензивно въздействие върху материала. Геометрията на камерата и широчината на разтоварния отвор имат пряко значение за производителността и едрина на готовия продукт.
6. Създаденият 3D CAD модел осигурява геометрична основа за определяне на конструктивните параметри, обема на трошачните камери и изходните предпоставки за симулационни и експериментални изследвания.
7. FEM/CAE анализът потвърждава, че при разгледаните натоварвания напреженията и деформациите в основните елементи остават в допустими граници. Модалният анализ показва, че собствените честоти са значително по-високи от работните, което намалява риска от резонанс в изследвания диапазон.
8. В труда е направено важно разграничение между инерционни сили, периферни/тангенциални сили и реални контактни сили на трошене. Това разграничение осигурява по-прецизна механична интерпретация и предотвратява смесването на различни физични величини.
9. Експерименталните изследвания доказват работоспособността на лабораторната РТЕТ и показват, че промяната на n , b_{min} и z оказва съществено влияние върху производителността, зърнометричния резултат и енергийното натоварване на процеса.
10. Повишаването на честотата от 15 до 25 Hz води до интензифициране на раздробяването, намаляване на средния диаметър $D_{ср}$ и увеличаване на дела на фините фракции. Това потвърждава водещата роля на честотата като кинематичен фактор.
11. Намаляването на разтоварния отвор способства за получаване на по-фин продукт, но повишава натоварването и може да влоши енергийната ефективност. Увеличаването на отвора повишава пропускателната способност, но води до по-едър продукт. Следователно b_{min} трябва да се избира компромисно.
12. Зърнометричният анализ е ключов доказателствен елемент на труда, защото показва как режимът на машината влияе върху крайния продукт. Чрез $D_{ср}$, D_{80} и фракционния състав се доказва технологичният ефект от промяната на работните параметри.
13. Вибрационните измервания дават информация за динамичното поведение и стабилността на режима, но не се използват като самостоятелна основа за директно определяне на реалната контактна сила на трошене.

14. Статистическата обработка позволява да се оценят влиянието на факторите и адекватността на регресионните модели. Модели или фактори с незадоволителни статистически показатели не се използват като окончателна прогнозна основа за оптимизация.

15. Многоцелевата оптимизация чрез обобщена функция на полезност позволява комплексна оценка на режимите. Тя не доказва универсален абсолютен оптимум, а определя рационална компромисна област на работа в рамките на експерименталния план.

16. Получените резултати показват, че РТЕТ може да бъде оценявана чрез интегрирана система от показатели, която съчетава производителност, зърнометричен състав, енергоразход и динамично поведение. Това създава основа за по-обоснован избор на работни режими и за бъдещо усъвършенстване на конструкцията.

Обобщение на изводите по научната логика на труда.

Най-важният общ извод е, че дисертационният труд изгражда последователна връзка между промишления проблем и инженерното решение. Проблемът е енергоемкостта и необходимостта от по-ефективни трошачни машини.

Научната празнина е недостатъчното изследване и класификационно обособяване на РТЕТ. Методиката включва теория, CAD/FEM, експеримент, зърнометрия, статистика и оптимизация. Резултатът е система от количествени зависимости и рационални режими, чрез които машината може да бъде оценена по производителност, качество и енергийна ефективност.

Всяка част има ясна функция. Литературният обзор обосновава защо машината трябва да се изследва. Теоретичната част показва какви параметри управляват процеса. CAD/FEM анализът проверява конструктивната работоспособност. Експериментът доказва реалното поведение. Зърнометрията показва качеството на продукта. Статистиката оценява надеждността на зависимостите. Многоцелевата оптимизация дава инженерно приложим завършек.

IV. НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Научно-приложни приноси.

- Обосновано е мястото на роторната трошачка-ексцентриков тип в класификацията на машините за трошене, като е показано, че РТЕТ съчетава конструктивни и кинематични особености на няколко групи трошачни машини, но се нуждае от самостоятелно класификационно разглеждане.
- Дефинирана е система от управляващи фактори за изследване на РТЕТ: реална честота на въртене n , широчина на разтоварния отвор b_{min} и брой работни камери z . С това е създадена ясна основа за експериментално и статистическо моделиране.
- Определени са основните целеви функции за оценка на процеса: масова производителност Q_m , зърнометрични показатели D_{cp}/D_{80} и относителен енергоразход W . Така процесът е оценен едновременно по количество, качество и енергийна ефективност.
- Разработена и приложена е комплексна теоретико-експериментална методика за изследване на РТЕТ, която включва конструктивен анализ, кинематични зависимости, САД/FEM моделиране, експериментални измервания, зърнометричен анализ и статистическа обработка.
- Зърнометричният състав на готовия продукт е приведен към количествено измерими показатели, което позволява сравнение на режимите при различни честоти, отвори, брой камери и материали.
- Прецизирана е механичната интерпретация на натоварването чрез разграничаване на инерционни, периферни и контактни сили, което повишава коректността на анализа на работния процес.
- Създадени са предпоставки за регресионно моделиране на влиянието на n , b_{min} и z върху технологичните показатели, като са използвани статистически критерии за оценка на адекватността на моделите.
- Приложена е многоцелева оптимизация чрез обобщена функция на полезност, която позволява определяне на рационална област на работа при противоречиви цели - фино раздробяване, висока производителност и нисък енергоразход.
- Предложен е интегриран подход за оценка на ефективността на РТЕТ, обединяващ технологични, енергийни, зърнометрични и динамични показатели.

2. Приложни приноси.

- Създаден е пространствен 3D CAD модел на лабораторната РТЕТ, използван за определяне на геометрични параметри, обеми на трошачните камери и изходни предпоставки за симулационни изследвания.
- Извършена е FEM оценка на напрегнато-деформираното състояние на ротора и свързаните елементи при зададени експлоатационни натоварвания, което служи за оценка на конструктивната устойчивост.
- Разработена и приложена е експериментална постановка за изследване на РТЕТ, включваща контрол на честота, разтоварен отвор, брой камери, маса и влажност на пробите, време за обработка, енергийни показатели, вибрации и зърнометричен състав.
- Получена е експериментална база данни за трошене на варовик и диабаз, която може да се използва при сравнение на режимите и при бъдещо усъвършенстване на лабораторната машина.
- Формулирани са практически насоки за избор на работни режими чрез едновременно отчитане на n , b_{min} , z , Q_m , D_{cp}/D_{80} и W .
- Резултатите могат да бъдат използвани при проектиране, настройване и експериментално изследване на роторни трошачки от ексцентрик тип и сходни трошачни системи, при отчитане на мащаба на машината и вида на материала.

3. Подреждане на приносите около основната теза.

Приносите на дисертационния труд не трябва да се възприемат като отделни несвързани резултати. Те се подреждат около една основна теза: РТЕТ може да бъде изследвана, оценена и оптимизирана като самостоятелен конструктивно-технологичен клас машина чрез система от управляващи фактори, целеви функции, експериментални данни, регресионни модели и многоцелева оценка.

Най-силният принос е класификационното и методическо обособяване на машината. След него се подреждат количествените зависимости, зърнометричният анализ, регресионните модели, рационалните режими и интегрираната оценка на ефективността. Така приносите образуват цялостна научно-приложна линия, а не само списък от технически действия.

V. ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Основни резултати от дисертационния труд са представени в следните публикации:

1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ НА РОТОРНА ТРОШАЧКА-ЕКСЦЕНТРИКОВ ТИП „РТЕТ“ / DESIGN AND OPERATING PRINCIPLE OF THE ROTARY CRUSHER - ECCENTRIC TYPE "RTET", Минно дело и геология, 2025 г., ISSN 0861-5713, ISSN 2603-4549 (Online).
2. СТАТИЧЕН И МОДАЛЕН АНАЛИЗ НА ЕКСЦЕНТРИЧЕН РОТОР НА РОТОРНА ТРОШАЧКА-ЕКСЦЕНТРИКОВ ТИП РТЕТ / STATIC AND MODAL ANALYSIS OF AN ECCENTRIC ROTOR OF AN ECCENTRIC ROTOR CRUSHER ERC, Минно дело и геология, 2026 г., ISSN 0861-5713, ISSN 2603-4549.

Публикациите представят конструктивно-функционалната основа на машината и симулационната оценка на ексцентричния ротор. Те са пряко свързани с основните части на дисертационния труд и подкрепят научно-приложната насоченост на изследването.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисертационният труд разглежда роторната трошачка-ексцентрик тип като перспективна, но недостатъчно изследвана машина за раздробяване. Изследването е мотивирано от промишления проблем за повишаване на ефективността на трошачните процеси и от необходимостта да се изяснят количествено връзките между параметрите на машината и резултатите от процеса.

В труда е приложена методика за теоретично, симулационно, експериментално и статистическо изследване на РТЕТ. Тя обединява механични, кинематични, динамични и технологични параметри и позволява процесът да бъде оценен чрез производителност, качество на раздробения продукт и относителен енергоразход.

Проведените експерименти с варовик и диабаз показват влиянието на реалната честота на въртене, разтоварния отвор и броя работни камери върху производителността, зърнометричния състав и енергийните показатели.

Зърнометричният анализ доказва, че повишаването на честотата води до намаляване на средния размер на частиците и увеличаване на фините фракции, но изборът на режим трябва да отчита и енергийната цена на раздробяването.

Статистическата обработка и многоцелевата оптимизация дават възможност да се формулират рационални области на работа, при които се търси баланс между количество,

качество и енергийна ефективност. Това е съществен практически резултат, защото реалната експлоатация изисква компромис, а не едностранно оптимизиране на един показател.

Получените резултати имат научно-приложна стойност, тъй като обособяват РТЕТ като самостоятелен обект на изследване и предлагат система за оценка на нейната ефективност.

Практическата стойност се изразява във възможността методиката и зависимостите да се използват при проектиране, настройване, експериментално изследване и бъдещо усъвършенстване на сходни трошачни машини.

В заключение може да се приеме, че дисертационният труд допринася за развитието на теорията и практиката в областта на роторните трошачни машини, като предлага последователен подход за анализ, експериментална проверка и рационален избор на работни режими на роторна трошачка-ексцентриков тип. *Таблица 8*

Основна теза	Съдържание
Промислен проблем	Трошенето е енергоемък процес и изисква машини с по-добра производителност, качество и енергийна ефективност.
Научна празнина	РТЕТ не е достатъчно ясно обособена и количествено изследвана като самостоятелен клас машина.
Методика	Теория + 3D CAD + FEM + експеримент + зърнометрия + статистика + многоцелева оптимизация.
Резултат	Определени са зависимости и рационални режими чрез n , b , z , Q_m , D_{cp}/D_{80} и W .
Принос	Интегрирана оценка на ефективността на РТЕТ и методика за бъдещо приложение.

Таблица 7. Основни тези.

Настоящият автореферат представя основните резултати, изводи и приноси от дисертационния труд, посветен на изследване на механични и технологични параметри на роторна трошачка-ексцентриков тип.

Разработката е насочена към актуален промишлен проблем, необходимостта от повишаване на ефективността на процесите на трошене чрез машини, които осигуряват подобро съчетание между производителност, качество на раздробения продукт и относителен енергоразход.

В дисертационния труд роторната трошачка-ексцентриков тип е разгледана не само като конструктивна разновидност на известни трошачни решения, а като самостоятелен обект на инженерно и научно-приложно изследване.

Обосновано е нейното междинно, но специфично място между челюстните, валцовите, роторните и конусните трошачни машини. Това дава основание РТЕТ да бъде разглеждана като отделен конструктивно-технологичен клас, който изисква собствена методика за анализ, експериментална проверка и оптимизация.

В труда е приложен комплексен подход, който обединява литературен и класификационен анализ, теоретично определяне на механични и технологични параметри, 3D CAD моделиране, FEM/CAE оценка на натоварването, експериментални изследвания, зърнометричен анализ, статистическа обработка и многоцелева оптимизация.

Така отделните части на изследването са свързани в единна методична последователност, а резултатите не се разглеждат изолирано, а като взаимно допълващи се доказателства.

Теоретичната част създава инженерна основа за оценка на процеса чрез разграничаване на производителност, мощност, енергия, относителен енергоразход, инерционни, периферни и контактни натоварвания. CAD и FEM анализът допълват тази основа чрез оценка на конструктивната работоспособност и динамичното поведение на основните елементи. По този начин е направена връзка между геометрията на машината, режима на работа и очакваното натоварване.

Експерименталната част доказва реалното поведение на РТЕТ при контролирани условия. Чрез изпитвания с варовик и диабаз е установено влиянието на честотата, работния просвет и броя камери върху производителността, зърнометричния състав, енергийните показатели и вибрационното състояние.

Особено значение има зърнометричният анализ, тъй като той показва не само количеството обработен материал, а качеството на получения продукт. Установено е, че увеличаването на честотата на въртене води до по-интензивно раздробяване, намаляване на средния размер на частиците и увеличаване на дела на фините фракции.

Статистическият анализ превръща експерименталните резултати в количествени зависимости. Чрез регресионни модели е описано влиянието на управляващите фактори върху основните резултатни показатели, а адекватността на моделите е оценена чрез R^2 , коригиран R^2 , P-Value и F-критерий. Това позволява резултатите да бъдат използвани не само за описание на проведените опити, но и като основа за инженерно обоснован избор на работни режими.

Многоцелевата оптимизация представлява логически завършек на изследването. Тя отчита, че в реалния процес не може едновременно безусловно да се постигнат максимална производителност, минимален енергоразход и най-фин продукт.

Поради това е търсен рационален компромисен режим, при който се съчетават количественият, качественият и енергийният показател. Така РТЕТ е оценена чрез

интегрирана система от критерии, а не чрез едностранна оценка само по един резултатен показател.

Формулираните приноси показват, че дисертационният труд има научно-приложна и практическа стойност. Научно-приложната стойност се изразява в обособяване на РТЕТ като самостоятелен обект на изследване. В дефиниране на система от управляващи фактори и целеви функции, в изграждане на методика за теоретично, експериментално и статистическо изследване и в получаване на количествени зависимости за оценка на процеса. Практическата стойност е свързана с възможността резултатите да се използват при проектиране, настройване, изпитване и усъвършенстване на роторни трошачкиексцентриков тип и сходни трошачни системи.

В заключение може да се приеме, че поставената цел на дисертационния труд е изпълнена. Разработена и приложена е цялостна методика за изследване на роторна трошачка-ексцентриков тип, чрез която са установени връзки между конструктивните, кинематичните, динамичните и технологичните параметри на машината.

Получените резултати доказват, че ефективността на РТЕТ трябва да се оценява комплексно — чрез производителност, зърнометричен състав, относителен енергоразход и стабилност на работния процес.

По този начин дисертационният труд допринася за развитието на инженерната методика за анализ и оценка на трошачни машини, като поставя роторната трошачкаексцентриков тип в ясна научно-приложна рамка.

Изследването създава основа за бъдещо усъвършенстване на конструкцията, разширяване на експерименталната база, изследване на други материали и приложение на получените зависимости при разработване и настройване на по-ефективни трошачни системи.