



МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ”,
СОФИЯ
МИННО-ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „МЕХАНИЗАЦИЯ НА МИНИТЕ”

Маг. инж. Симеон Йорданов Сезонов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТЕМА:
„ОПТИМИЗИРАНЕ НА КОНСТРУКТИВНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА
ЦЕНТРОБЕЖНО-РОЛКОВА МЕЛНИЦА”

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за присъждане на
образователна и научна степен "ДОКТОР"

Научна област: **5. Технически науки**

Професионално направление: **5.8. „Проучване, добив и обработка на полезните
изкопаеми”**

Докторска програма: „**Механизация на мините**”

Научни консултанти:

1. Проф. д-р Михаил Василев Вълков
2. Доц. д-р Христо Константинов Шейретов

СОФИЯ, 2021 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Механизация на мините“ към Минно-електромеханичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“, София, на 01.07.2021 г., съгласно Ректорска заповед № Р- 443 от 04.06.2021 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № Р- 582 от 08.07.2021 г. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на 20.09.2021г. от 11.00 часа в зала 204Б на Минно-електромеханичен факултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересувалите 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 инж. Димитър Стоянов Анастасов – МГУ - председател
2. Проф. д-р инж. Вяра Георгиева Пожидаева - МГУ
3. Проф. д-р инж. Светлана Велкова Лилкова-Маркова - УАСГ - София
4. Проф. д.н. инж. Ненчо Станев Делийски - ЛТУ - София
5. Проф. д-р инж. Красимир Тодоров Кръстанов - ВТУ- София

Резервни членове:

1. Проф. д-р инж. Мара Крумова Кандева - ТУ – София
2. Доц. д-р Елена Димитрова Власева - МГУ

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1. Проф. д-р инж. Вяра Пожидаева - МГУ
2. Проф. д-р инж. Светлана Лилкова-Маркова - УАСГ - София

Дисертантът е на самостоятелна подготовка към катедра „Механизация на мините“ на Минно-електромеханичен факултет.

Автор: маг. инж. Симеон Сезонов

Заглавие: Оптимизиране на конструктивните параметри на центробежно-ролкова мелница

Тираж: 20 броя

Отпечатано в Издателска къща „Св. Иван Рилски“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

СЪДЪРЖАНИЕ

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване	4 стр.
Публикации	5 стр.
Благодарности	5 стр.
Структура и обем на дисертационния труд	5 стр.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА I. ЛИТЕРАТУРЕН И ПАТЕНТЕН ОБЗОР

I.1. Области на приложение на мелниците	6 стр.
I.2. Особенности на центробежните ролкови мелници	6 стр.
I.3. Литературен обзор	7 стр.
I.4. Патентна справка	7 стр.
I.5. Класификация на центробежно-ролковите мелници. Основни типове конструкции	7 стр.
Изводи	7 стр.

ГЛАВА II. НАПРАВЛЕНИЯ ЗА УСЪВЪРШЕНСТВАНЕ НА ЦЕНТРОБЕЖНО-РОЛКОВА МЕЛНИЦА. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО.

II.1. Направления за усъвършенстване на центробежно-ролкова мелница	9 стр.
II.3. Предложение за нова конструкция на центробежна ролкова мелница	9 стр.

ГЛАВА III. МЕХАНИКА НА РАЗРУШАВАНЕ НА МАТЕРИАЛИТЕ – ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ

III.1. Нива на процеса разрушаване	10 стр.
III.2. Основи на теорията на разрушаване на твърди тела	11 стр.
III.3. Разрушаване при смилане. Основни понятия	11 стр.
III.4. Енергетични основи на теорията на разрушаване при смилане	12 стр.
Изводи	12 стр.

ГЛАВА IV. ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕХАНИЧНИТЕ ПРОЦЕСИ В ЦЕНТРОБЕЖНО-РОЛКОВИ МЕЛНИЦИ. АНАЛИТИЧНИ ПРЕСМЯТАНИЯ

IV.1. Нова конструкция на центробежно-ролкова мелница	14 стр.
IV.2. Устройство за предварително натрошаване на рудата	14 стр.
IV.3. Изследване на движението на частиците руда в работното пространство	16 стр.
IV.4. Определяне на центробежните сили при екстремален режим на работа на центробежно-ролковите мелници	26 стр.
IV.5. Оптимизиране формата на ролките на центробежно-ролкова мелница	28 стр.
Изводи	30 стр.

ГЛАВА V. ОПИСАНИЕ НА ЦЕНТРОБЕЖНО-РОЛКОВА МЕЛНИЦА И ДИНАМИЧНО НАТОВАРВАНЕ ВЪВ ВЪЗЛИТЕ

V.1. Описание на проектираната мелница за смилане на медна руда	32 стр.
V.2. Симулации и динамично натоварване на възлите на центробежно-ролковата мелница ..	34 стр.
Изводи	34 стр.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ	35 стр.
СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	37 стр.
Summary	38 стр.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Във връзка с повишените изисквания към машините за трошене и смилане се явява необходимост от разработване на достатъчно пълни теоретични основи за конструиране на центробежно-ролковни мелници. В тях раздробяването на частиците се реализира чрез центробежни сили. Голямо предизвикателство е, че тези сили се създават изкуствено и могат да се подбират от технолозите в съответствие с характеристиките на смилаемия материал.

Обект на разглеждането в предлагания труд са изследвания за оптимизиране и усъвършенстване на центробежно-ролковни мелници от механична гледна точка.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Въз основа на направените разглеждания на основните типове центробежни ролкови мелници и механичните процеси, реализиращи се в тях, като **цел на настоящата разработка** се формулира:

„Детайлно изучаване на механиката на процеса на смилане в центробежно-ролковни мелници с цел оптимизиране на техните конструктивни параметри.“

Задачи на дисертацията:

1. Провеждане на критичен анализ на съществуващите конструкции и очертаване на насоките за тяхното оптимизиране;

2. На базата на реализирането на първата задача, да се предложи принципно нова конструкция на центробежно-ролкова мелница.

В нея ще се търсят:

- Удължен път на смиланата частица в активната зона на мелницата;
- Изучаване на механичното поведение на частица от смиланата среда в работното пространство на мелницата;
- Усъвършенствана форма на мелещите тела (ролките);
- Включването на устройства за предварително натрошаване и подготовка на късовете руда за смилане;
- Понижен разход на енергия за смилането;
- Подобрен коефициент на полезно действие.

3. Създаване на механо-математически модел на предлаганата мелница за оптимизиране на нейните технологични параметри.

4. Създаване на виртуален модел на предлаганата конструкция с цел провеждане на компютърни симулации и подготовка за реализиране на прототип.

Предлага се оптимизиране на конструктивните параметри на центробежно-ролковата мелница, която има следните особености:

1. Мелницата е снабдена с конично устройство за предварително натрошаване на рудата. Перките на устройството са с оригинална геометрия, която осигурява централен удар на късовете руда в кожуха на мелницата.

2. Мелницата е многоетажна, като отделните секции са снабдени с еднакви или различни по геометрия и маса ролки в съответствие с едрината на смиланите късове, попадащи в секцията.

3. Конструкцията на мелницата и на нейните възли ще се основава на детайлен кинематичен и динамичен анализ на машината, както и на съвременните представи за механика на разрушението, приложени към процеса на смилане.

Предложената конструкция на центробежно ролковата мелница е дадена в IV.1.1

Намерените числени решения на нелинейните диференциални уравнения за движение са новост в изследването на този тип машини.

В резултат на успешното постигане на поставената цел и задачи са получени аналитични изрази и алгоритми, които се използват при подбора на ролките в центробежно–ролковите мелници.

Получени са диаграмите на сили и моменти, действащи върху машинните елементи, изграждащи ротора на мелницата. Те определят вида на материала, от който тези елементи се изграждат.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в общо четири публикации на научни сесии и конференции. Две от публикациите са самостоятелни, а в другите две докторантът е първи автор.

Благодарности

Бих искал да благодаря на всички преподаватели, които пряко или косвено допринесоха за реализирането на този дисертационен труд. Особена благодарност дължа на проф. д-р Михаил Вълков и доц. д-р Христо Шейретов за постановката на задачата, предоставените материали, препоръките и подкрепата, оказани ми през целия период на работа върху дисертационния труд.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **149** страници, като включва увод, **5** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **16** литературни източници, и **26** патента, като **34** са на латиница и **63** на кирилица. Работата включва общо **80** фигури и **10** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

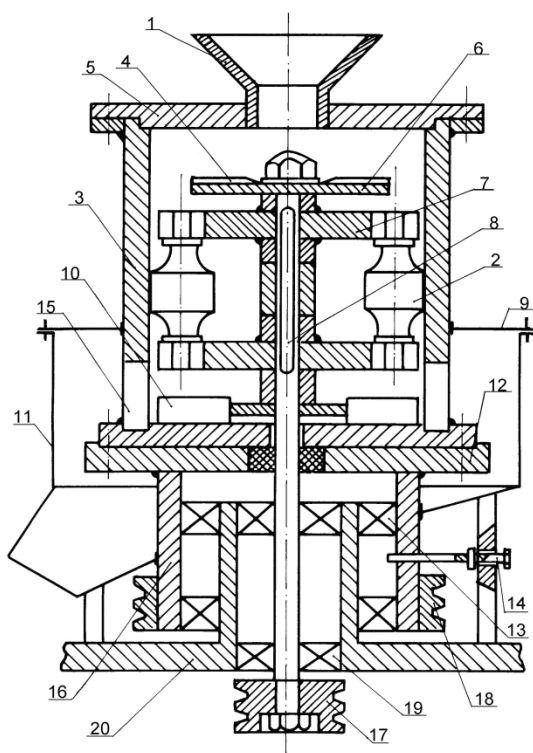
ГЛАВА I. ЛИТЕРАТУРЕН И ПАТЕНТЕН ОБЗОР

I.1. Области на приложение на мелниците

Някои от областите, в които смилането на материалите играе ключова роля, са: минно-добивната промишленост, обогатяването и рециклирането на суровини, металургията – при подготовката на суровините, агломерати и флюси; смилане на вторични суровини; химическата индустрия – при подготовка на суровини, крайни продукти, минерални пълнители; строителството – смилане на креда, мрамор, инертни материали, гипс и др. п.; циментовата индустрия – при смилането на кварц, фелдшпати, перлит, талк, бентонит, доломити, мергели и много други нерудни материали; хранително-вкусовата промишленост, мелничното и фуражно производство, както и в бита [2], центробежните ролкови мелници могат да се използват за раздробяване и смилане на зърнени хранителни продукти и подправки; фармацевтичната промишленост – при подготовката на компоненти за лекарствени препарати; селското стопанство – при производството на минерални торове и опудрящи вещества, фуражи и др. п.

I.2. Особенности на центробежните ролкови мелници

I.2.1. Принцип на работа на центробежните ролкови мелници



Фиг. 1. 2. Едноетажна центробежна ролкова мелница

Смилането в центробежно-ролковите мелници става на два етапа. Първият етап е предварителното донатрошаване на материала. Това се осъществява чрез въртящата се перка, която се намира непосредствено под бункера. Тя изстрелва частиците под действието на центробежната сила към стените на барабана. Там те се удрят в подходящо изработена облицовка и намаляват габаритите си, като се разтрошават под действието на ударни сили. Те, както е известно, многократно превишават обикновените сили.

Вторият етап е същинското им смилане. То се реализира чрез въртящите се ролки. Под действието на центробежната сила ролките прилепват към стените на кожуха. Освен около оста на вала на мелницата, ролките се въртят и около собствената си ос. Също, под действието на центробежната сила, смиланият материал полепва по стените на барабана. Така той попада под въздействието на въртящите се ролки.

Силата, с която се притискат ролките, е достатъчна да разрушава частиците. Габаритите на смлените частици зависят от броя на взаимодействията с ролките, така че, колкото повече са взаимодействията, толкова по-фин ще бъде готовият продукт [25].

След това смеленият материал пада под действие на собственото си тегло и се разтоварва през изходните отвори под действие на центробежните сили и на помощни лопатки, прикрепени към ротора.

1.2.3. Анализ на предимствата и недостатъците на центробежна ролкова мелница

В резултат на направените сравнения като предимства на центробежните ролкови мелници могат да се посочат: по-висока производителност на мелниците по даден клас; по-малък разход на електроенергия за един тон смлян продукт; по-голям коефициент на полезно действие; разходът на метал е по-малък; възможност за автоматично сменяне на ролките; ротиращата система действа като стабилизиращ жироскоп; подаването на материала за смилане към мелницата може да се регулира автоматично; възможност за комбиниране на сушенето, смилането и класирането на крайния продукт и въвеждане на магнитна и пневматична сепарация; отделената топлина се отвежда лесно; центробежните ролкови мелници могат да смилат фино жилаво-пластичните полезни изкопаеми.

По-характерните недостатъци на центробежните ролкови мелници са: мелещите тела (ролките) се износват много бързо; замяната на мелещите тела става много по-често; голям шум се получава при тяхната работа; увеличена запрашеност в работното помещение; трудности, свързани с нагряване на ротора; необходимост от механизъм, компенсиращ натисковата сила на ролката, която намалява с увеличаване износването им.

1.3. Литературен обзор

Описани са постиженията на българските учени. Проучена е фирмена литература на водещи компании. Проследени са специализирани периодични издания.

1.4. Патентна справка

На базата на патентното проучване е проследено развитието и усъвършенстването на центробежно-ролковите мелници. Обърнато е внимание на приноса на българските учени и конструктори.

1.5. Класификация на центробежно-ролковите мелници. Основни типове конструкции

Центробежно-ролковите мелници могат да бъдат класифицирани по редица признаци.

Предложената класификация е онагледена на фиг. 1.7.

Преглед на основните видове конструкции на центробежно-ролковите мелници и съществуващите варианти, разработени за конкретни суровини и технологични условия, са представени в приложение № 1 в дисертацията.

ИЗВОДИ

От проведените литературен обзор и патентно проучване може да се направи изводът, че е налице достатъчно информация за центробежните ролкови мелници.

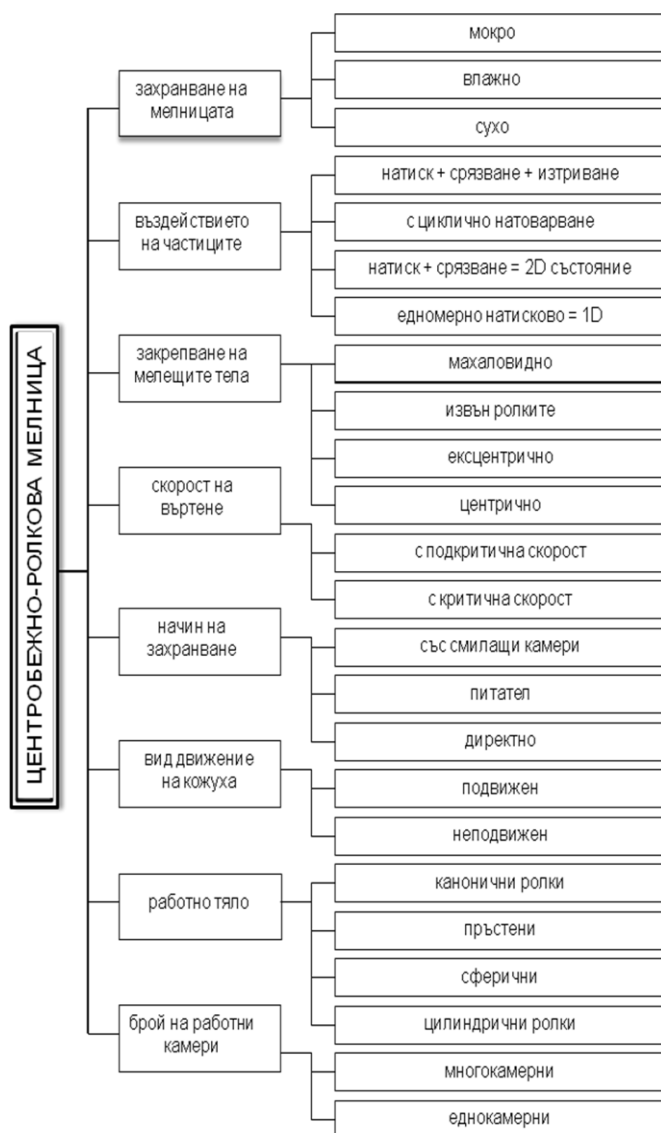
В световен мащаб се провеждат интензивни изследвания, свързани с разработването на нови конструкции и с усъвършенстването на съществуващите такива.

От литературното и патентно проучване може да се установи, че изследванията в избраното направление са актуални, а получените в тях резултати могат да бъдат използвани в практиката.

Налага се изводът, че центробежните ролкови мелници са един динамично развиващ се клон на рудоподготвителните машини, чието развитие е в съответствие със стратегиите на нашата страна и на Европейския съюз за развитие на енерго- и ресурсоспестяващи технологии.

В заключение може да се отбележи, че богатата литературна и патентна основа е сериозна предпоставка за успешното провеждане на изследването и за завършването му с конкретни положителни резултати.

От изучаването на смилачите агрегати и запознаването със съществуващите конструкции възниква задачата за създаването и внедряването на принципно нови машини и технологически процеси, превишаващи по своите технико-икономически показатели най-добрите съществуващи образци. Тази необходимост с особена сила се появява за най-трудоемките и енергоемки производства.



Фиг.1.7. Класификация на центробежно-ролковите мелници

Във връзка с повишените изисквания към машините за трошене и смилане-повишена производителност, намалена относителна енергоемкост, повишено качество на готовия продукт и други - се явява необходимостта от разработване на достатъчно пълни теоретични основи за конструирането на такава машина, и в частност на центробежно-ролковите мелници, явяващи се ново, прогресивно направление. В този тип мелници раздробяването на частиците се реализира чрез центробежните сили.

Голямото технологично предимство е, че тези сили се създават изкуствено, чрез управление на ъгловата скорост на ротора, т.е те могат да се подбират от технолога в съответствие с характеристиките на смилания материал и целите на смилането в процеса на рудоподготовка и обогатяването.

Освен това центробежните сили, използвани за налягането и разтрошаването на частиците, могат да бъдат многократно по-големи от гравитационните сили, използвани в класическите барабанни мелници, тъй като те са създадени от управляеми ускорения, много по-големи от земното. Така в тези машини се постига многократно интензификация на процеса смилане.

ГЛАВА II. НАПРАВЛЕНИЯ ЗА УСЪВЪРШЕНСТВАНЕ НА ЦЕНТРОБЕЖНО-РОЛКОВА МЕЛНИЦА. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО.

II.1. Направления за усъвършенстване на центробежно-ролкова мелница

Основни направления за усъвършенстването на центробежно-ролковите мелници са създаването на конструкции:

- увеличаващи интензивността на смилането;
- намаляващи потреблението на енергия;
- осигуряващи работа в различни режими на смилане (сухо, влажно, мокро);
- с намалени габарити на машината;
- осигуряващи възможност за автоматично (улеснено) сменяне на работните ролки след тяхното износване;
- реализиращи работни режими, които гарантират разнообразни натоварвания на смиланите частици (опъново, натисково, на срязване, ударно, огъващо, вибрационно и т. н.);
- ползващи ролки с оптимална форма (променяща се по оста на ролката);
- осигуряващи многостъпково смилане на рудата;
- разполагащи с рационално конструирани помощни агрегати-питатели, устройства за предварително натрошаване, разтоварващи устройства, устройства за автоматична смяна на износените работни тела и т. н.

Задачи на дисертацията:

Създаване на виртуален модел на предлаганата конструкция с цел провеждане на компютърни симулации.

II.3. Предложение за нова конструкция на центробежна ролкова мелница

Предлага се оригинална центробежно-ролкова мелница, която има следните особености:

1. Мелницата е снабдена с конично устройство за предварително натрошаване на рудата. Перките на устройството са с оригинална геометрия, която осигурява централен удар на късовете руда в кожата на мелницата.

2. Мелницата е многоетажна, като отделните секции са снабдени с различни по геометрия и маса ролки в съответствие с едрината на смиланите късове, попадащи в секцията.

3. Мелницата е снабдена с ролки с профилни повърхнини, които позволяват да се компенсира износването им и да се осигури проектираната зърнометрия през целия срок на работа на ролката.

4. Мелницата е снабдена с корпус с профилирана вътрешна повърхност.

5. Кожухът на мелницата извършва сложно движение. Първото движение, в което той участва, е управляема ротация около собствената му ос. По този начин частиците на смилания материал се движат по траектория, която представлява винтова линия. Второто движение, в което участва кожухът на мелницата, е управляема вибрация с много малка амплитуда, успоредна на оста на мелницата. Малката вибрация се предава на частиците и допълнително удължава многократно техния контакт с работното тяло. Получава се засилен ефект на смилане чрез стриване.

6. Конструкцията на мелницата и на нейните възли ще се основава на детайлен кинематичен и динамичен анализ на машината, както и на съвременните представи за механика на разрушението, приложени към процеса на смилане.

7. Ще бъдат разработени оригинални конструкции на задвижване и окачване на кожуха, които да позволяват реализирането на предвидените движения.

Така върху смиланите частици да бъде упражнявано разнообразно и променливо натоварване, което ще улеснява разтрошаването им.

За теоретично описание на поведението на контактната система ролки, частици, кожух се използват средствата на механика на системи със скрити движения.

Възможностите да се избират параметрите на движение на корпуса (ротация и вибрация) дават допълнителна свобода на технологичен избор измежду множество режими на работа на мелницата.

ГЛАВА III. МЕХАНИКА НА РАЗРУШАВАНЕ НА МАТЕРИАЛИТЕ – ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ

III.1. Нива на процеса разрушаване

Разрушаването е процес на зараждане и натрупване на дефекти в материалите, чиято крайна фаза се предхожда от период на структурни промени в различните структурни нива на материята – микро, мезо и макро.

III.1.1. Разрушаване на микро ниво

Разрушаването на микро ниво се реализира чрез разкъсване на връзка между два съседни атома. Последното е свързано с промяната на разстоянията между тях.

Вследствие на разкъсването на междуатомните връзки на микро ниво възникват: микропукнатини на отцепване; микропукнатини на срез; микро пори. Първите възникват чрез разкъсване на междуатомните връзки, дължащо се на опънови напрежения. Вторите се формират чрез приплъзване, предизвикано от срязващи напрежения. Третите се образуват чрез дифузия на атоми при определени температурни условия.

III.1.2. Зараждане на микропукнатини

За зараждането на микропукнатини, обусловени от дислокационни процеси, са създадени множество хипотези [4]. По-разпространените от тях са: Хипотеза на Кортел и Хипотеза на Стро – Мот.

III.1.3. Разпространение на микропукнатини

Разпространението на микропукнатините може да се обясни с теорията на граничното състояние.

Веднъж зародили се, микропукнатините започват да нарастват, ако: нормалното напрежение нарастне над дадената гранична стойност σ_{sp} ; дължината на пукнатината надхвърли определена гранична стойност l_{sp} .

III.1.4. Разрушаване на макро ниво

Разрушаването на конструктивните елементи на макро ниво е сложен, комплексен процес, обусловен от мащабен фактор - температурата на околната среда; наличието или отсъствието на геометрични концентратори на напрежение; развитието на корозионни (ерозионни) процеси; видът на напрегнатото състояние в изследвания елемент; фактори, свързани с технологията на производство.

III. 1.4.1. Крехко разрушаване

Крехкото разрушаване на елементите на макро ниво протича без наличието на забележими предхождащи явления.

Разрушаването се разпространява по сечението на елемента със скорост близка до скоростта на разпространение на звука в материала на епруветката. Разрушаването се разпростира напречно на равнината на максималните нормални напрежения σ_1 .

III.1.4.2. Пластично разрушаване

При изпитване на метални образци най-често се наблюдава пластичното разрушаване.

Това разрушаване се реализира по механизъм, близък до този на крехкото разрушаване [4].

III. 2. Основи на теорията на разрушаване на твърди тела

III. 2.1. Теория на Грифит

Грифит (1893-1963) е основоположник на теорията за разпространението на пукнатините в крехки материали. Той изследва пластина с пукнатина. Неговата теория важи за крехки материали.

III.3. Разрушаване при смилане. Основни понятия.

III.3.1. Раздробяване:

Процесите на раздробяване играят важна роля в много клонове на индустрията – химическа, керамична, хранителна и др., но особено важна е тя при подготовката на минерални суровини, предхождаща процеса на обогатяване на полезни изкопаеми.

Технологичното раздробяване зависи от изискванията на следващите процеси и това определя неговите цели: оптимална зърнометрия; оптимизиране на новосъздадена площ, разкриване на ценните компоненти, структурни промени и механично активиране.

III.3.2. Микропроцеси на раздробяване при смилане:

Микропроцесите на раздробяване при смилане протичат в рамките на единичните зърна на обработваната скала, по механизмите, описани в параграф III.1.2.

III.3.3. Типове натоварване

Между две твърди повърхнини частиците се натоварват на натиск, на срязване и удар.

Към тази група се отнасят и натоварванията, създавани от инерционните сили, и от силите, породени от собствени вибрации на зърната.

Такива процеси имат малко практическо значение при смилане на материали в рудоподготовката.

III.3.4. Типове раздробяване:

Резултатите от дезинтеграцията на частиците могат да се класифицират по: разтрошаване; обкантиране; изтриване.

III.3.5. Раздробяване на системи от частици

В рудоподготвителните машини за трошене и смилане на материали едновременно се преработват множество от частици, които взаимодействат помежду си и образуват системи. Поведението на такива системи частици значително се различава от поведението на отделна частица.

Разходът на енергия за раздробяване на колективи от частици е значително по-голям от разхода за разтрошаване на една частица, умножен по техния брой.

По-съществените загуби на енергията могат да се припишат на: нееластични деформации; кинетичната енергия на раздробяването на парчета; триене между отделните зърна и триене в работната повърхност и свързаната с това трансформация на механична енергия в топлинна; износване на работните повърхности; вътрешно триене на напрегнатите зърна в следствие на термо-еластичните ефекти; разпространение на звукови вълни или еластични осцилации на деформираните парчета от раздробяването.

III.3.6. Условия на смилане:

При ситното и фино смилане средата на процеса на раздробяване може да бъде ефективно регулирана. Производствени процеси на раздробяване се реализират или в суха (въздушна), или в мокра среда (предимно водна).

III.4. Енергетични основи на теорията на разрушаване при смилане:

III.4.1. Основни понятия.

В теориите за смилане основните понятия са: вложена работа W , общата вложена работа W_t , вложена полезна работа W_u , размер на захванването F , размерът на продукта от раздробяването P , степен на раздробяване $i_r = \frac{F}{P}$, индекс на работата W_i и механична ефективност.

Изводи

От прегледа на съществуващите теории за смилането може да се направи извод, че е налице достатъчно информация за движенията на смиланите се частици в рудоподготвителните машини.

От подробното разглеждане на процесите, протичащи на микро, мезо и макро ниво, може да се установи, че различната структура на материалите определя кой вид

смилане е най-подходящ за раздробяването на конкретния в работното пространство на мелницата.

Подробно е разгледано крехкото разрушаване, което се реализира при множеството от материалите за смилане. С помощта на получените знания може да се избере по-ефективен метод за смилане в работното пространство на машината, която е обект на изследване в този труд.

Проучени са и основните теории за разрушаване. Например Теорията на Грифит, в която подробно се разглеждат напреженията, възникващи върху смиланата частица. Основното предимство при изучаването на тези теории е, че може да се прецени какви сили ще са най-подходящи в работното пространство на мелницата при разрушаването на материала.

Обърнато е внимание и на разрушаването при процеса на смилане. Тук най-голямо значение се отдава на оптималната зърнометрия, което позволява на автора на труда да направи един основен извод, подпомагащ по-нататъчната работа в този труд.

Авторът подробно е изучил теоретичните основи на механиката на разрушаване в работното пространство на мелницата и възникващите сили, действащи върху смиланите частици руда.

Изучаването на видовете мелници и поведението на материала в тяхното работно пространство, както и принципът на работа на машините, заедно с теориите за смилане в трета глава, спомага за подобряване на разбирането за ефекта на смилане в рудоподготовката и обогатителните машини изобщо.

В заключение може да се констатира, че подробното изучаване на механиката на разрушаване в работното пространство на машината и конструктивните особености на съществуващите агрегати, разгледани в първа глава на дисертацията, са в основата на предложенията за преодоляване на някои от недостатъците на съществуващите центробежно-ролковидни мелници и за оптимизиране на тяхната работа.

По тази причина основният акцент на този труд е насочен към определяне на кинематичните параметри на частиците в работното пространство на центробежно-ролкова мелница и използването на новополучените знания за оптимизация на смилането.

ГЛАВА IV. ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕХАНИЧНИТЕ ПРОЦЕСИ В ЦЕНТРОБЕЖНО-РОЛКОВИ МЕЛНИЦИ. АНАЛИТИЧНИ ПРЕСМЯТАНИЯ

Центробежно–ролковите мелници са перспективни рудоподготвителни машини, които намират широко приложение при преработката на минерални суровини и при рециклирането на вторични такива. На базата на направения технологичен анализ [53] са очертани основните направления за усъвършенстване на конструкцията на такива машини.

Предвиждат се следните конструктивни решения за усъвършенстване на прототипа:

1. Мелницата е многоетажна, като отделните секции са снабдени с различни по геометрия и маса ролки в съответствие с едрината на смиланите късове, попадащи в секцията.

2. Мелницата е снабдена с ролки с профилни повърхнини, които позволяват да се компенсира износването им и да се осигури проектната зърнометрия през целия срок на работа на ролката.

3. Възможностите да се избират параметрите на движение на корпуса (ротация и вибрация) дават допълнителна свобода за технологичен избор измежду множеството режими на работа на мелницата.

4. Машината е снабдена с оригинални устройства за автоматична подмяна на износените ролки в съответствие с [62] и с оригинално захранващо устройство (питател).

5. Ще бъдат разработени специални конструкции на задвижване и окачване на кожуха, които да позволяват реализирането на предвидените движения.

6. Кожухът на мелницата се предвижда да бъде изработен със специфично напречно сечение.

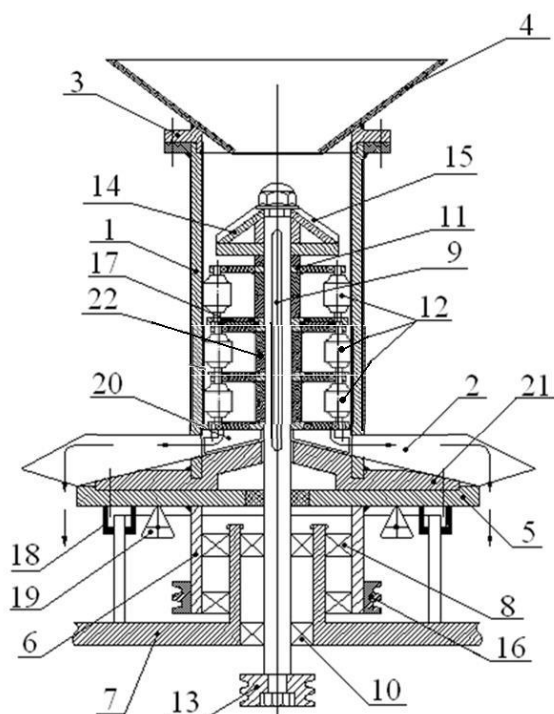
7. Пружинното лагеруване помага за по-добро притискане на работните тела към корпуса на машината при постепенното им изтриване. Чрез него също се осигурява променлива натискава сила върху смиланите частици.

8. Мелницата е снабдена с устройство за предварително натрошаване на рудата. То е прикрепено към ротора на машината.

IV.1. Нова конструкция на центробежно-ролкова мелница

IV.1.1 Принципна схема на предлаганата центробежно-ролкова мелница

Мелницата представена на фигура IV.1 се състои от корпус 1, разтоварващи отвори 2, капак 3, конична захранваща фуния 4, дънна плоча 5, вертикален цилиндър 6, цилиндрична конзола на фундамента 7, лагери 8, вал 9, лагери 10, задвижващите звезди 11, мелещите ролки 12, пружинни съединения 17, ремъчна шайба 13, устройство за предварително натрошаване на късовете руда 14, профилирани перки 15, ремъчна шайба 16, гумени пръстени 18, гърбични механизми 19 лопатки 20.



Фиг. IV. 1. Схема на предлаганата центробежно-ролкова мелница [2]

IV.2. Устройство за предварително натрошаване на рудата

Мелница е снабдена със захранващо устройство, което има за цел не само да разпредели равномерно постъпващия за смилане материал, но и да осигури предварителното му разтрошаване преди той да попадне в работното пространство на мелницата. Това нововъведение [62] позволява мелницата да се захранва с по-едро натрошен материал (като например се пропусне етапът на дребно трошене).

Тук се предлага нова конструкция на захранващото устройство, както и математическо описание на движението на късовете руда в него.

IV.2.1. Механика на частиците в хранващото устройство

IV.2.1.1. Движение на материала до попадането му в устройството за предварително натрошаване

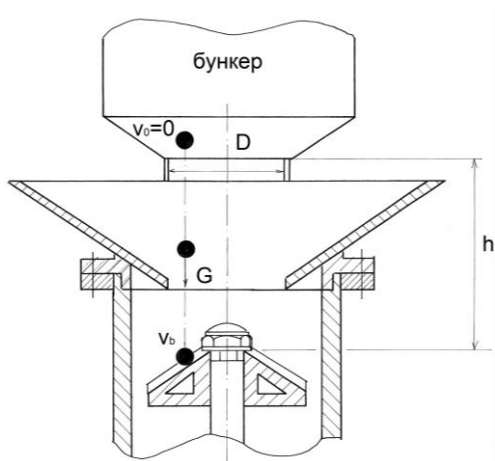
От хранващия отвор на бункера частицата руда започва своето движение с нулева начална скорост. Скоростта, с която тя пада върху конуса на устройството за предварително натрошаване, се определя по формулата на Галилей

$$v_b = \sqrt{2gh}, \quad (IV.2)$$

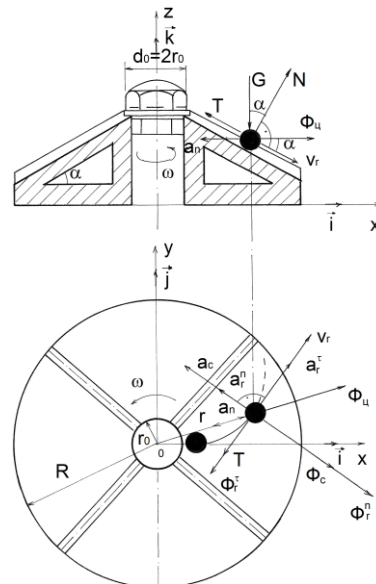
където h е височината, на която се намира изпускателният отвор на бункера над устройството за предварително натрошаване (фиг.IV.2).

IV.2.1.2. Движение на материала по ротора на устройството за предварително натрошаване

Роторът на предлаганото устройство за предварително натрошаване има за основа прав кръгов конус, който е снабден с прави лопатки (фиг.IV.2).



Фиг. IV.2. Движение на къса руда в приемния отвор [52]



Фиг. IV.3. Движение на къса руда по конуса на устройството за предварително натрошаване [52]

Движението на частицата руда се разглежда като движение на материална точка по въртяща се ротационна повърхнина от втори ред [52].

Прилага се принципът на Ж. Даламбер (1717 ÷ 1783), който в разглеждания случай има вида:

$$\vec{G} + \vec{N} + \vec{T} + \vec{\Phi}_e^n + \vec{\Phi}_r^r + \vec{\Phi}_r^n + \vec{\Phi}_c = 0, \quad (IV.3)$$

където: $\Phi_e^n = ma_e^n = m \frac{v_e^2}{r}$ е преносната нормална инерционна (центробежна) сила;

$\Phi_r^r = ma_r^r$ е релативната тангенциална инерционна сила; $\Phi_r^n = ma_r^n$ е релативната

нормална инерционна сила; $\vec{\Phi}_c = -2m[\vec{\omega}_e \times \vec{v}_r]$ е кориолисовата инерционна сила; $N = G \cdot \cos \alpha$ е нормална реакция на повърхнината на конуса; $T = \mu \cdot N = \mu mg \cos \alpha$ е кулоновата сила на триене; μ – коефициент на триене при плъзгане на рудата по конуса.

Равенство (IV.3) се проектира върху осите на координатната система Oxyz (фиг. IV.3) и се получава:

$$\begin{aligned} \sum X_i = 0 & \quad 0 - N_x - T_x - (\Phi_r^r)_x - (\Phi_r^n)_x + (\Phi_e^n)_x - (\Phi_c)_x = 0; \\ \sum Y_i = 0 & \quad 0 - N_y - T_y - (\Phi_r^r)_y - (\Phi_r^n)_y + (\Phi_e^n)_y + (\Phi_c)_y = 0; \\ \sum Z_i = 0 & \quad -G + N_z - T_z - (\Phi_r^r)_z - (\Phi_r^n)_z + 0 + 0 = 0. \end{aligned} \quad (IV.4)$$

След намиране проекциите на силите и заместването им в (IV.4), в съответствие с [57] се получава нелинейна система от диференциални уравнения от втори ред. За да се интегрира тази система, е необходимо да се отчете видът на диска, като се зададе допълнително зависимостта, характеризираща неговия профил. Уравненията се решават съвместно с уравнението на коничната повърхност. След несложни преобразувания се стига до системата:

$$\begin{aligned} (\ddot{z} + g) \left[x\dot{z}v_r + \mu\dot{x}\sqrt{(x^2 + y^2)\dot{z}^2 + (x\dot{x} + y\dot{y})^2} \right] + \left(\ddot{x} - \omega^2 x + 2\omega\dot{y} \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2}}{\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}} \right) \cdot \\ \cdot \left[(x\dot{x} + y\dot{y})v_r - \mu\dot{z}\sqrt{(x^2 + y^2)\dot{z}^2 + (x\dot{x} + y\dot{y})^2} \right] = 0; \\ (\ddot{z} + g) \left[y\dot{z}v_r + \mu\dot{y}\sqrt{(x^2 + y^2)\dot{z}^2 + (x\dot{x} + y\dot{y})^2} \right] + \left(\ddot{y} - \omega^2 y + 2\omega\dot{x} \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2}}{\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}} \right) \cdot \\ \cdot \left[(x\dot{x} + y\dot{y})v_r - \mu\dot{z}\sqrt{(x^2 + y^2)\dot{z}^2 + (x\dot{x} + y\dot{y})^2} \right] = 0, \end{aligned} \quad (IV.13)$$

където $v_r = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$ е релативната скорост на точката.

Решаването на получената система е сложен проблем. За целта се използват числени методи.

IV.3. Изследване на движението на частиците руда в работното пространство.

IV.3.1. Работни режими на предлаганата мелница

В [50,28] е описано поведението на материала за смилане от отделянето му от захранващия бункер на мелницата до напускането на устройството за предварително натрошаване.

Цел на настоящото изследване е да се определи движението на частиците руда в работното пространство (фиг.IV.4).

IV.3.2. Движение на частица по цилиндричен кожух

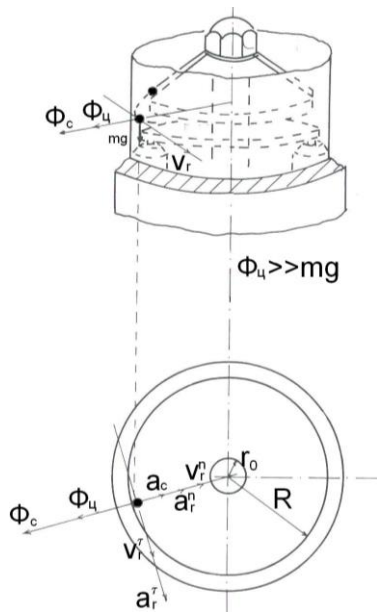
IV.3.2.1. Изследване на движението на частица в декартова координатна система

IV.3.2.1а. Аналитични зависимости

Тук се разглежда режимът с въртящ се кожух без наличие на вибрации. При гладка вътрешна облицовка на кожуха уравнението на цилиндричната му повърхност се диференцира два пъти по времето и зависимостите се заместват в получените от Фролов [57] уравнения за движение на материална точка по повърхнината от втори ред:

$$\ddot{x} + \frac{\omega^2 R \mu \sqrt{R^2 - x^2} \cdot \dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 R^2 + \dot{z}^2 (R^2 - x^2)}} + \frac{2\omega R^2 \mu (\dot{x})^3}{\dot{x}^2 R^2 + \dot{z}^2 (R^2 - x^2)} = 0; \quad (\text{IV.19-a})$$

$$(\ddot{z} + g)\dot{x} - \ddot{x}\dot{z} = 0. \quad (\text{IV.19-b})$$



Фиг. IV.4. Схема за движение на частицата в работната зона [50]

Система (IV.19) се решава по метода на последователните приближения.

Едно възможно решение се получава, ако точката се движи така, че линейната скорост по z е постоянна ($\dot{z} = c$).

След преобразуване се получава уравнение от четвърта степен (биквадратно уравнение) за компонентата на относителна скорост по ос x [50]:

$$A_1 (\dot{x})^4 + A_2 (\dot{x})^2 + A_3 = 0, \quad (\text{IV.21})$$

където $A_1 = \left(\frac{g}{c} + 2\omega\mu\right)^2 R^4$; $A_2 = A_2^* \cdot (R^2 - x^2)$; $A_3 = A_3^* \cdot (R^2 - x^2)^2$;

$$A_2^* = 2\left(\frac{g}{c} + 2\omega\mu\right)gc - \omega^2 R^4 \mu^2; \quad A_3^* = (g^2 - \omega^2 R^4 \mu^2)c^2.$$

Коефициентите A_1 , A_2^* и A_3^* са константи, които не зависят от времето t .

Реалният положителен корен на уравнение (IV.21) има вида:

$$\dot{x}(t) = A_4 \sqrt{R^2 - x^2(t)}, \quad (IV.23)$$

$$\text{където} \quad A_4 = \sqrt{\frac{-A_2 + A_{123}}{2A_1}}; \quad A_{123} = \sqrt{(A_2^*)^2 - 4A_1A_3^*}.$$

IV.3.2.16. Приблизителен метод за определяне на кинематичните зависимости

Прилага се методът на Рунге – Кута за уравнение (IV.23) и за началните стойности на преместването по ос x , в момент t_{k+1} , [28,50] се получава изразът:

$$x_{k+1}^0 = x_k^0 + \frac{\Delta t}{6} (k_1^k + 2k_2^k + 2k_3^k + k_4^k), \quad (IV.24)$$

където:

$$x_{k_1} = x_k + 0,5k_1^k \Delta t; \quad x_{k_2} = x_k + 0,5k_2^k \Delta t; \quad x_{k_3} = x_k + k_3^k; \quad A_{2,0}^k = A_2^* [R^2 - (x_k)^2]; \quad \tau = 0,1,2,3;$$

$$A_{2,1}^k = A_2^* [R^2 - (x_{k_1})^2]; \quad A_{2,2}^k = A_2^* [R^2 - (x_{k_2})^2]; \quad A_{2,3}^k = A_2^* [R^2 - (x_{k_3})^2]; \quad A_{4,j}^k = \sqrt{\frac{-A_{2,j}^k + A_{123}}{2A_1}};$$

$$k_1^k = A_{4,0}^k \sqrt{R^2 - (x_k^0)^2}; \quad k_2^k = A_{4,1}^k \sqrt{R^2 - (x_{k_1}^0)^2}; \quad k_3^k = A_{4,2}^k \sqrt{R^2 - (x_{k_2}^0)^2}; \quad k_4^k = A_{4,3}^k \sqrt{R^2 - (x_{k_3}^0)^2}.$$

Преместванията по ос y и z са:

$$y_{k+1}^0 = \sqrt{R^2 - (x_{k+1}^0)^2}, \quad z_{k+1}^0 = z_k^0 + c \Delta t. \quad (IV.25)$$

От уравнения (IV.24) се записват изразите за компоненти на относителната скорост и ускорение за момент t_{k+1} :

$$\dot{x}_{k+1}^0 = \frac{x_{k+1}^0 - x_k^0}{\Delta t}; \quad \dot{y}_{k+1}^0 = -\frac{x_{k+1}^0}{y_{k+1}^0} \dot{x}_{k+1}^0; \quad \dot{z}_{k+1}^0 = c; \quad (IV.26)$$

$$\ddot{x}_{k+1}^0 = \frac{g}{c} \dot{x}_{k+1}^0; \quad \ddot{y}_{k+1}^0 = \frac{1}{y_{k+1}^0} \left[-(\dot{x}_{k+1}^0)^2 - (\dot{y}_{k+1}^0)^2 - x_{k+1}^0 \ddot{x}_{k+1}^0 \right]; \quad \ddot{z}_{k+1}^0 = 0.$$

Уравнения (IV.25), (IV.26) задават началните итерационни стойности на проекциите на преместването, относителната скорост и ускорение.

Втората част на итерационния метод включва следващите итерации с горен индекс j . Тогава диференциалното уравнение (IV.19–а), което е от втора степен спрямо x , се интегрира числено. За целта се въвеждат следните означения:

$$t_k = t_0 + k \Delta t, \quad x^j(t_k) = x^j(t_0 + k \Delta t) = x_k^j,$$

$$\dot{x}^j(t_k) = \dot{x}^j(t_0 + k \Delta t) = \dot{x}_k^j, \quad (k = 0, 1, 2, \dots;), \quad (j = 1, 2, 3, \dots;).$$

Видът на уравнението (IV.19–а), описващо движението на частицата, според метода на Рунге - Кута е [28]:

$$x_{k+1}^j = x_k^j + \frac{\Delta t}{6} (k_1^j + k_2^j + k_3^j + k_4^j); \quad \dot{x}_{k+1}^j = \dot{x}_k^j + \frac{\Delta t}{6} (k_1^j + 2k_2^j + 2k_3^j + k_4^j). \quad (IV.27)$$

Коефициентите в тези уравнения имат вида:

$$k_1 = -\frac{k_{61}}{\sqrt{k_{51}}} \sqrt{R^2 - (x_k^j)^2} \cdot \dot{x}_k^j - \frac{k_{62}}{k_{51}} (\dot{x}_k^j)^3; \quad k_2 = -\frac{k_{61}}{\sqrt{k_{52}}} \sqrt{R^2 - (x_{k_1}^j)^2} \cdot \dot{x}_{k_1}^j - \frac{k_{62}}{k_{52}} (\dot{x}_{k_1}^j)^3;$$

$$k_3 = -\frac{k_{61}}{\sqrt{k_{53}}} \sqrt{R^2 - (x_{k_2}^j)^2} \cdot \dot{x}_{k_2}^j - \frac{k_{62}}{k_{53}} (\dot{x}_{k_2}^j)^3; k_4 = -\frac{k_{61}}{\sqrt{k_{54}}} \sqrt{R^2 - (x_{k_3}^j)^2} \cdot \dot{x}_{k_3}^j - \frac{k_{62}}{k_{54}} (\dot{x}_{k_3}^j)^3, \quad (IV.28)$$

където $k_{61} = \omega^2 R \mu; \quad k_{62} = 2\omega R^2 \mu; \quad k_{51} = (\dot{x}_k^j)^2 \cdot R^2 + (\dot{z}_k^j)^2 [R^2 - (x_k^j)^2];$

$$k_{52} = (\dot{x}_{k_1}^j)^2 \cdot R^2 + (\dot{z}_k^j)^2 [R^2 - (x_{k_1}^j)^2]; \quad k_{53} = (\dot{x}_{k_2}^j)^2 \cdot R^2 + (\dot{z}_k^j)^2 [R^2 - (x_{k_2}^j)^2];$$

$$k_{54} = (\dot{x}_{k_3}^j)^2 \cdot R^2 + (\dot{z}_k^j)^2 [R^2 - (x_{k_3}^j)^2]; \quad x_{k_1}^j = x_k^j + 0,5\Delta t \cdot \dot{x}_k^j;$$

$$x_{k_2}^j = x_k^j + 0,5\Delta t \dot{x}_k^j + 0,25\Delta t^2 k_1; \quad x_{k_3}^j = x_k^j + \Delta t \dot{x}_k^j + 0,5\Delta t^2 k_2;$$

$$\dot{x}_{k_1}^j = \dot{x}_k^j + 0,5k_1 \Delta t; \quad \dot{x}_{k_2}^j = \dot{x}_k^j + 0,5k_2 \Delta t; \quad \dot{x}_{k_3}^j = \dot{x}_k^j + 0,5k_3 \Delta t.$$

От уравнения (IV.15), (IV.27) и (IV.19–б) се определят компонентите на ускорението:

$$\ddot{x}_{k+1}^j = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4); \quad \ddot{z}_{k+1}^j = \frac{\ddot{x}_{k+1}^j}{\dot{x}_{k+1}^j} \cdot \dot{z}_{k+1}^{j-1} - g; \quad (IV.29)$$

$$\ddot{y}_{k+1}^j = \frac{1}{y_{k+1}^{j-1}} \cdot [-(\dot{x}_{k+1}^j)^2 - (\dot{y}_{k+1}^{j-1})^2 - x_{k+1}^j \cdot \ddot{x}_{k+1}^j].$$

Второто уравнение на (IV.27) определя проекцията на скоростта по x . Компонентите на скоростта по оси y и z са:

$$\dot{y}_{k+1}^j = -\frac{x_{k+1}^j}{y_{k+1}^{j-1}} \cdot \dot{x}_{k+1}^j; \quad \dot{z}_{k+1}^j = \dot{z}_k^j + \Delta t \cdot \ddot{z}_{k+1}^j. \quad (IV.30)$$

Първото уравнение на (IV.27) задава преместването по x , а останалите компоненти на преместването имат вид, аналогичен на уравнения (IV.25):

$$y_{k+1}^j = \sqrt{R^2 - (x_{k+1}^j)^2}; \quad z_{k+1}^j = z_k^j + \Delta t \cdot \dot{z}_{k+1}^j. \quad (IV.31)$$

Итерациите продължават, докато се изпълни неравенството:

$$\left| \frac{\ddot{x}_{k+1}^j - \ddot{x}_{k+1}^{j-1}}{\max\{\ddot{x}_{k+1}^j; \ddot{x}_{k+1}^{j-1}\}} \right| < \varepsilon, \quad (IV.32)$$

където $\varepsilon \approx 0,005$ е много малко число.

IV.3.2.1в. Алгоритъм за решаване

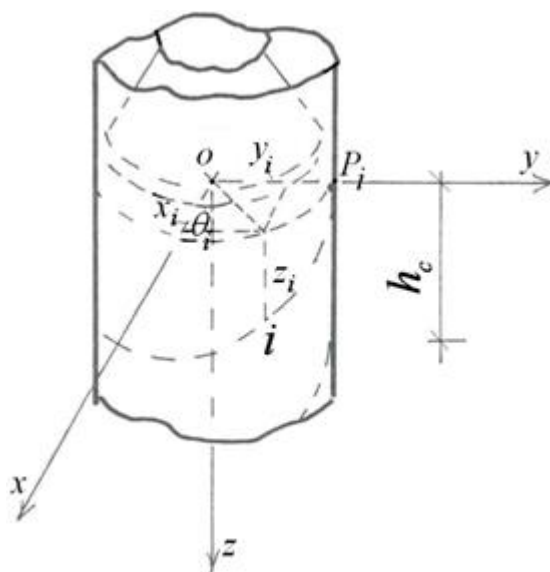
Изразите (IV.25 - IV.32) участват в алгоритъма на метода. Той се състои от две части. В първата част се получават кинематичните зависимости, при условие че компонентата на скоростта по вертикалната ос z е постоянна. Тя обхваща уравнения (IV.25 - IV.26) и се състои от осем стъпки. Втората част на алгоритъма определя окончателните кинематични зависимости и се състои от единадесет стъпки.

IV.3.2.2. Изследване на движението на частица в цилиндрична координатна система

IV.3.2.2а. Аналитични зависимости

Разглежда се движението на материална частица от смилания материал, като се допуска, че няма лъкатушене.

На фиг.IV.6 е дадена частица в произволен момент от движение по вертикален цилиндричен кожух. Движението на частицата руда по кожата е по винтова линия. Въвежда се координатна система $Oxyz$ с начало $O \equiv C$ (C – център на напречното сечение на кожата)[51]. Вертикалната ос на цилиндъра съвпада с ос Oz . Приема се, че положението на точка P_i в произволен момент от време има координати x, y, z . При определяне на проекциите на относителните скорост и ускорение по оста y се получават изрази, в които трябва да се дели на стойността на координатата y . За да се избегне това неудобство в точка, за която $y = 0$, се препоръчва да се трансформират изразите (IV.21 - IV.23) в полярни координати.



Фиг. IV.6 Траектория на точка върху цилиндричен кожух [51]

Тогава системата (IV.19-а и IV.19-б) се трансформира в:

$$\left(\frac{g}{c} - 2\mu\omega \sin^2 \theta\right)^2 \dot{\theta}^4 + R^2(2g^2 - 4g\omega\mu c \sin^2 \theta - \omega^4 R^2 \mu^2) \dot{\theta}^2 + c^2(g^2 - \omega^2 R^2 \mu^2) = 0. \quad (IV.40)$$

За числено решаване на (IV.40) се прилага отново методът на Рунге-Кута.

IV.3.2.2б. Приблизителен метод за определяне на кинематичните зависимости

Изразите пред производната на ъгловата координата от четвърта степен, втора степен и свободния член на горното уравнение се полагат на:

$$A_1 = (A_4 - A_5 \sin^2 \theta)^2; \quad A_2 = R^2(A_6 - A_7 \sin^2 \theta); \quad A_3 = A_3^* = c^2(g^2 - \omega^2 R^2 \mu^2), \quad (IV.41)$$

където

$$A_4 = \frac{g}{c}; \quad A_5 = 2\omega\mu; \quad A_6 = 2g^2 - \omega^4 R^2 \mu^2; \quad A_7 = 4g\omega\mu c.$$

Тогава уравнение (IV.40) приема вида:

$$A_1 \dot{\theta}^4 + A_2 \dot{\theta}^2 + A_3 = 0. \quad (IV.42)$$

Решението на уравнение (IV.42) има вида:

$$\dot{\theta}_i = A_{8,j}^i; \quad \rightarrow i = 1, \dots, n; \quad j = 0, 1, 2, 3. \quad (IV.44)$$

Решението на това уравнение се дава с израза:

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \frac{\Delta t}{6} (k_1^i + 2k_2^i + 2k_3^i + k_4^i), \quad (IV.45)$$

където $k_{j+1}^i = A_{8,j}^i$; $A_{8,j}^i = \sqrt{\frac{-A_{2,j}^i + A_{9,j}^i}{2A_{1,j}^i}}$;

$$A_{1,0}^i = A_4 - A_5 \sin^2 \theta_i; \quad A_{1,1}^i = A_4 - A_5 \sin^2 \theta_{k_1}^i; \quad A_{1,2}^i = A_4 - A_5 \sin^2 \theta_{k_2}^i;$$

$$A_{1,3}^i = A_4 - A_5 \sin^2 \theta_{k_3}^i; \quad \theta_{k_1}^i = \theta_i + 0,5k_1^i; \quad \theta_{k_2}^i = \theta_i + 0,5k_2^i; \quad \theta_{k_3}^i = \theta_i + k_3^i;$$

$$A_{2,0}^i = R^2 [A_6 - A_7 \sin^2 \theta_i]; \quad A_{2,1}^i = R^2 [A_6 - A_7 \sin^2 \theta_{k_1}^i];$$

$$A_{2,2}^i = R^2 [A_6 - A_7 \sin^2 \theta_{k_2}^i]; \quad A_{2,3}^i = R^2 [A_6 - A_7 \sin^2 \theta_{k_3}^i]; \quad A_{9,j}^i = \sqrt{(A_{2,j}^i)^2 - 4A_{1,j}^i A_3^*}.$$

Големините на векторите на относителните скорост и ускорение в цилиндрична координатна система се пресмятат по:

$$v_r = \sqrt{\dot{\theta}^2 R^2 + \dot{z}^2}; \quad a_r = \sqrt{R^4 (\dot{\theta}^4 + \ddot{\theta}^2) + \dot{z}^2}, \quad (IV.47)$$

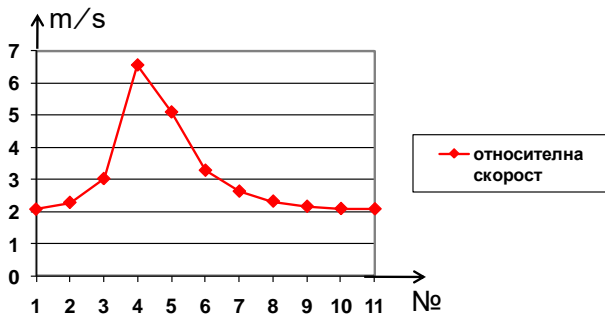
където $\dot{\theta}_i = A_{8,j}^i$; $\dot{z}_{i+1} = c$; $\ddot{\theta}_{i+1} = \frac{\dot{\theta}_{i+1} - \dot{\theta}_i}{\Delta t}$.

IV.3.3. Числен пример за определяне движението на частица по цилиндричен кожух (цилиндрична координатна система)

Дадени са ъгловата скорост на въртене на кожуха $\omega = 7,48 [s^{-1}]$, вертикалната компонента на относителната скорост $\dot{z}_i = -1 [m/s]$ за всяка точка i , коефициентът на триене $\mu = 0,51$ между рудната частица и смилачната ролка, радиусът на кожуха $R_o = 0,7m$, нарастването на времето $\Delta t = 0,1 s$.

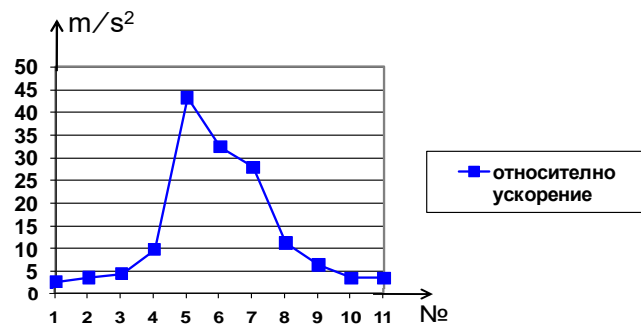
След въвеждане на входните данни, се получават постоянните и променливите коефициенти от (IV.41). Координатите на точки от траекторията са дадени в приложение IV.1. в дисертацията (таблица П. IV.1.1, таблица П. IV.1.2., таблица П. IV.1.3.). Получени са компонентите на относителната скорост и ускорение.

Изменението на тези кинематични зависимости са онагледени за първите единадесет точки от траекторията, които са нанесени по хоризонталната ос на фигури IV.9а и IV.9б. По вертикалната ос на фигурите са стойностите на кинематичните величини в m/s и m/s^2 .



Фиг. IV.9.а

Изменение на относителната скорост на частицата



Фиг. IV.9.б

Изменение на относителното ускорение на частицата

Ускорението нараства рязко от точка 4 до точка 5 и намалява, което показва, че ускорението е закъснително, защото има голямо триене.

За да се построи проекцията на ходографа на проектираната относителна скорост е необходимо да се изчисли големината на проектираната скорост, както и проектирания ъгъл, който сключва проектираната относителна скорост с оста Ox :

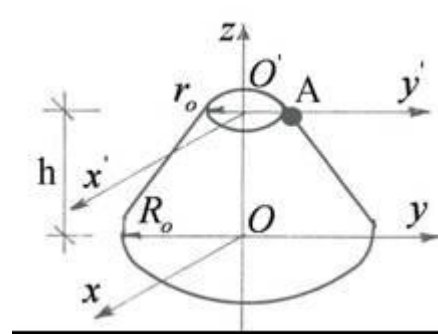
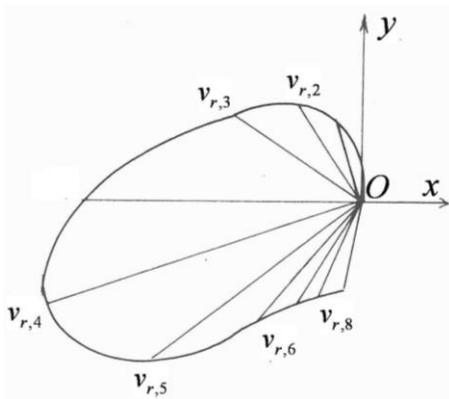
$$v_{r,np,i} = \dot{\theta}_i R_o; \quad \theta_i = \theta_i + 90^\circ. \quad (IV.49)$$

Стойностите на ъглите θ_i са получени чрез първата производна на ъгъла и дадени във втората колона на таблица П. IV.1.3.

Според уравнение (IV.49) е построена проекцията на ходографа на скоростта от фигура IV.11.

Получените по метода на последователните приближения кинематични величини са в основата на управлението на работния процес на машината при избрания режим на работа.

Резултатите от това изследване могат да са полезни при пресмятане на якостните параметри на машината и симулиране на работата на центробежно-ролковата мелница в оптимизационни задачи.



Фиг. IV.11 Проекция на ходографа на скоростта върху Ox

IV.3.4. Движение на частица по конусна равнина в устройството за предварително натрошаване

Приема се, че началният момент на частицата от смилания материал се намира в състояние на покой.

IV.3.4a. Диференциално уравнение

Приема се, че конусът (фиг. IV .12) се състои от цилиндрични слоеве с малка височина. Точките от конусната повърхнина принадлежат на съответната цилиндрична повърхнина с радиус r . Тогава уравнението за движение се записва, както следва:

$$\ddot{x} + \frac{\omega^2 r \mu \sqrt{r^2 - x^2} \dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 r^2 + \dot{z}^2 (r^2 - x^2)}} + \frac{2\omega r^2 \mu \dot{x}^3}{\dot{x}^2 r^2 + \dot{z}^2 (r^2 - x^2)} = 0. \quad (IV.50)$$

Приема се, че проекцията на скоростта по оста z е постоянна. Тогава уравнение (IV.49) приема вида (IV.21) с коефициенти:

$$A_1 = \left(\frac{g}{c} + r_o \omega \mu \right)^2 r_o^2; \quad A_2^* = r_o^2 \left[-\omega^4 r_o^2 \mu^2 + 2g^2 + 4g\omega \mu c \right]; \quad (IV.51)$$

$$A_3^* = c^2 (g^2 - \omega^4 r_o^2 \mu^2).$$

Решение на уравнение (IV.21) е

$$\dot{x}(t) = A_4 \sqrt{r_i^2 - x^2}, \quad (IV.52)$$

където

$$A_4 = \sqrt{\frac{-A_2 + A_{123}}{2A_1}}; \quad A_{123} = \sqrt{(A_2^*)^2 - 4A_1A_3^*}.$$

IV.3.4б. Приблизителен метод за определяне на кинематичните зависимости

Диференциалното уравнение от четвърта степен за релативната скорост (IV.21) за точка i има вида:

$$A_1 \dot{x}_i^4 + A_{2,l}^i \dot{x}_i^2 + A_{3,l}^i = 0, \quad (IV.53)$$

където

$$A_{2,l}^i = A_2^* [(r_i^0)^2 - (x_i^j)^2]; \quad A_{4,l}^i = \sqrt{\frac{-A_{2,l}^i + A_{123}}{2A_1}}; \quad A_{3,l}^i = A_3^* [(r_i^0)^2 - (x_i^j)^2];$$

$$\rightarrow j = 0, I, II, III; \quad l = 1, 2, 3, 4; \quad \rightarrow i = 1, 2, \dots, 20.$$

От решаването на (IV.53) е получена релативната скорост по оста x

$$\dot{x}_i^j(t) = A_{4,l}^i \sqrt{(r_i^0)^2 - (x_i^j)^2}. \quad (IV.54)$$

Това диференциално уравнение се решава по числения метод на Рунге-Кута [50, 78, 82] според зависимостта

$$x_i^0 = x_{i-1}^0 + \frac{\Delta t}{6} (k_1^i + 2k_2^i + 2k_3^i + k_4^i), \quad (IV.55)$$

където

$$k_1^i = A_{4,0}^i \sqrt{r_i^2 - (x_i^0)^2}; \quad k_2^i = A_{4,1}^i \sqrt{r_i^2 - (x_i^0 + 0,5k_1^i)^2};$$

$$k_3^i = A_{4,2}^i \sqrt{r_i^2 - (x_i^0 + 0,5k_2^i)^2}; \quad k_4^i = A_{4,3}^i \sqrt{r_i^2 - (x_i^0 + k_3^i)^2}.$$

Компонентите на преместването по оста x се определят според (IV.55), а останалите компоненти са:

$$y_i^0 = \sqrt{r_i^2 - (x_i^0)^2}; \quad z_i^0 = z_{i-1}^0 + c\Delta t. \quad (IV.56)$$

Компонентите на скоростта по оста x се определят от (IV.54), а останалите компоненти се определят от (IV.57).

$$\dot{y}_{i+1} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta t}; \quad \dot{z}_{i+1} = c. \quad (IV.57)$$

Големините на векторите на скоростта и ускорението в декартова координатна система се намират от:

$$v_r^i = \sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2}; \quad a_r^i = \sqrt{\ddot{x}_i^2 + \ddot{y}_i^2 + \ddot{z}_i^2}. \quad (IV.58)$$

Проекциите на ускорението са съответно:

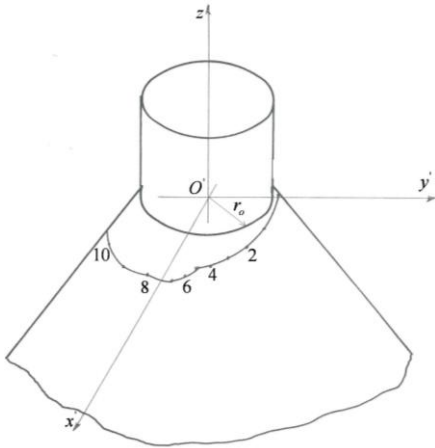
$$\ddot{y}_i = \frac{\dot{y}_i - \dot{y}_{i-1}}{\Delta t}; \quad \ddot{x}_i = \frac{\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}}{\Delta t}; \quad \ddot{z}_i = 0. \quad (IV.59)$$

IV.3.4в. Числен пример

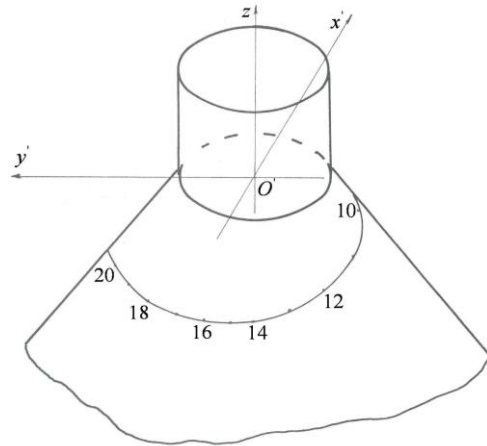
Дадени са: $\omega = 66,55 \text{ s}^{-1}$, $h = 0,6 \text{ m}$, $r_o = 0,2 \text{ m}$, $R_o = 0,7 \text{ m}$, и $\mu = 0,51$. Координатите на точка A в началния момент спрямо координатната система $Oxyz$ са $x_A = 0$, $y_A = 0,2 \text{ m}$, $z_A = 0,6 \text{ m}$ (фиг.IV.12). Компонентите на началната скорост и ускорение на

точката са: $\dot{x}_A = 0$, $\dot{y}_A = 0$, $\dot{z}_A = c = -1 \text{ m/s}$, $\ddot{x}_A = 0$, $\ddot{y}_A = 0$, $\ddot{z}_A = 0$.

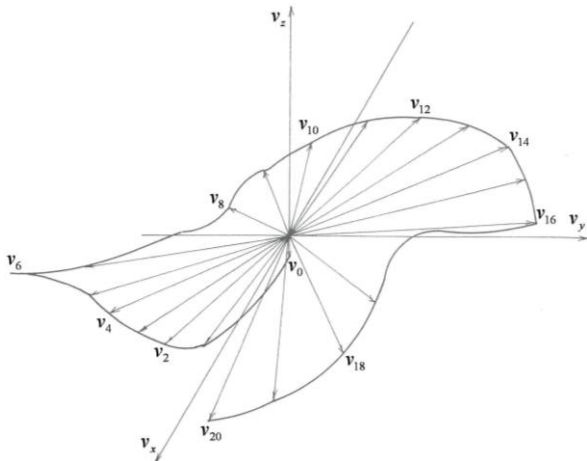
Изчислени са постоянните коефициенти на координатите на точките от 1 до 20, дадени на фигури IV.13а и IV.13б. Прието е нарастване на времето t със стъпка $\Delta t = 0,01 \text{ s}$.



Фиг. IV.13а. Пространствена траектория на точката в първи и четвърти квадранти $m_L \Rightarrow 1 \text{ cm} \hat{=} 0,1 \text{ m}$



Фиг. IV.13б. Пространствена траектория на точката в трети и втори квадранти $m_L \Rightarrow 1 \text{ cm} \hat{=} 0,1 \text{ m}$



Фиг. IV.14. Ходограф на скоростта $m_v \Rightarrow 1 \text{ cm} \hat{=} 2 \text{ m/s}$

Получени са още и компонентите на ускорението и е построен ходографът на ускорението, даден в дисертацията.

IV.3.4г. Числен пример

Разглежда движението на материала по устройството за предварително натрошаване по време на експлоатация на мелницата. Частица руда пада в точка А с начална скорост v_A и ускорение a_A . Техните компоненти са: $\dot{x}_A = 0$, $\dot{y}_A = 0$, $\dot{z}_A = \sqrt{2gh} \text{ [m/s]}$, $\ddot{x}_A = 0$, $\ddot{y}_A = 0$ и $\ddot{z}_A = g$. Координатите на точката спрямо координатната система $Oxyz$ са $x_A = 0$, $y_A = 0,2 \text{ m}$, $z_A = 0,6 \text{ m}$ (фиг. IV.12).

IV.3.5. Инерционни сили при движение по конусна повърхност

IV.3.5.1. Аналитични зависимости

Ако материалната точка може да се моделира със сфера, имаща радиус R и плътност ρ , то обемът, масата и теглото се изчисляват по формулите:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3, \quad m = V\rho, \quad G = mg. \quad (\text{IV.60})$$

Общата фиктивна относителна сила се изчислява от:

$$\Phi_r = \sqrt{(\Phi_r^n)^2 + (\Phi_r^\tau)^2} N. \quad (\text{IV.61})$$

IV.3.5.2. Аналитични зависимости за инерционните сили за точка i :

Проекцията на траекторията на частицата в равнината Oxy е изобразена на фигурата IV.15. От нея се определя текущият радиус за i -тата точка:

$$x_i^2 + y_i^2 = [r_o + (z_o - z_i)tg\alpha] = r_{o,i}^2. \quad (\text{IV.62})$$

Относителните скорост и ускорение се определят според зависимостите

$$v_{r,i} = \sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2}, \quad \frac{dv_{r,i}}{dt} = \dot{v}_{r,i} = \frac{\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y} + \dot{z}\ddot{z}}{v_{r,i}}. \quad (\text{IV.63})$$

Радиусът на кривината се пресмята от:

$$\rho_i = \frac{v_{r,i}^2}{r_{o,i}\omega^2}. \quad (\text{IV.64})$$

Кориолисовата сила се намира по формулата (IV.3) за точка i :

$$\vec{\Phi}_{C,i} = 2m\vec{\omega} \times \vec{v}_r; \quad \Phi_{C,i} = 2m\omega v_r \sin \gamma_i. \quad (\text{IV.65})$$

Ъгълът между векторите \vec{v}_r и $\vec{\omega}$ е $\gamma_i = \arccos\left(\frac{\dot{z}_i}{v_{r,i}}\right)$.

Тогава за синуса на този ъгъл се намира

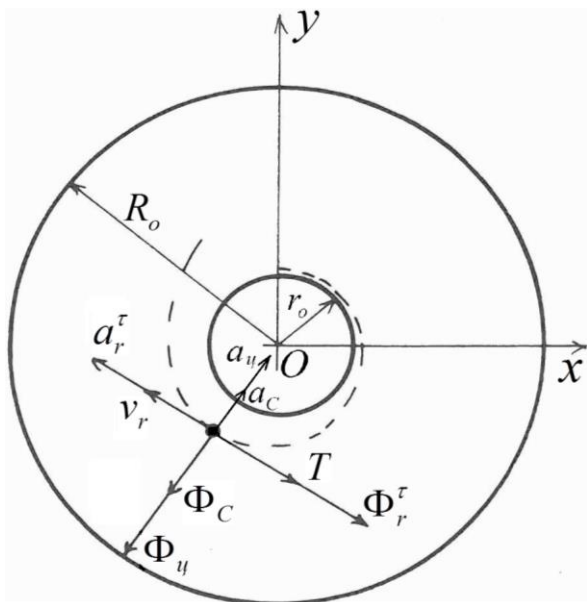
$$\sin \gamma_i = \sqrt{1 - \cos^2 \gamma_i} = \sqrt{1 - \left(\frac{\dot{z}_i}{v_{r,i}}\right)^2}. \quad (\text{IV.66})$$

Компонентите на фиктивната относителна тангенциална и нормална сила се определят от (IV.3) чрез относителната скорост за точка i :

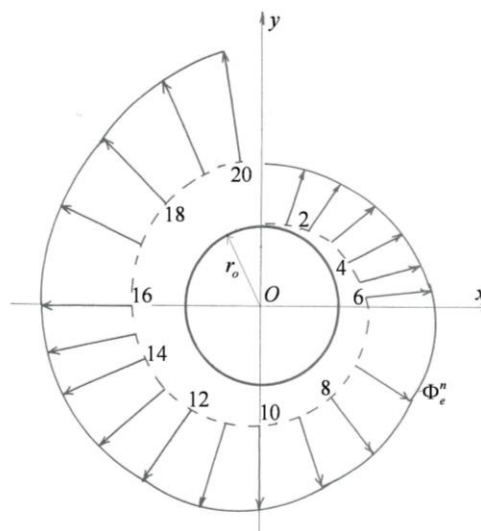
$$\Phi_{r,i}^\tau = m \frac{dv_{r,i}}{dt}; \quad \Phi_{r,i}^n = m \frac{v_r^2}{\rho_i}. \quad (\text{IV.67})$$

Преносната нормална инерционна сила за точка i се определя от (IV.3):

$$\Phi_{e,i}^n = m \frac{v_e^2}{r_{o,i}} = m\omega^2 r_{o,i}. \quad (\text{IV.68})$$



Фиг. IV.15 Инерционни сили в хоризонтална равнина



Фиг. IV.16. Центробежна сила за един оборот

$$m_L \Rightarrow 1cm \hat{=} 0,1m \quad m_\Phi \Rightarrow 1cm \hat{=} 5N$$

IV.3.5.3. Числени примери

Пример 1

Зададени са радиусът $R = 8,5 \cdot 10^{-3} m$ на частицата и плътността $\rho = 3050 kg/m^3$ на рудата. За избрания геометричен размер се намират обемът, масата и теглото $V = 2,572 \cdot 10^{-6} m^3$, $m = 0,784 \cdot 10^{-2} kg$, $G = 0,077 N$.

Конкретните стойности за относителните скорости и ускорения са взети от таблица П.IV.1, дадена в приложение на дисертацията. Определени са радиусът на кривината, ъгълът между векторите на относителната скорост и ъгловата скорост, кориолисовата сила, компонентите на фиктивната относителна тангенциална и нормална сила, общата фиктивна относителна сила и преносната нормална инерционна сила, за точка i . Резултатите са дадени в таблица П.IV.3 за 20 точки, дадена в дисертацията.

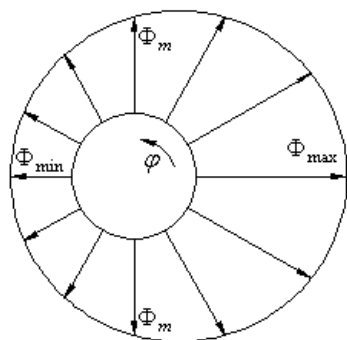
На фиг. IV.16 е представена диаграмата на центробежната сила Φ_e^n , проектирана в равнината Oxy . Тя е нанесена с плътна линия. Проектираната траектория на точката в равнината е означена с пунктир.

От чертежа се вижда, че центробежната сила нараства. От формула (IV.68) се уточнява, че нарастването е по линеен закон по отношение на променливата $r_{o,i}$.

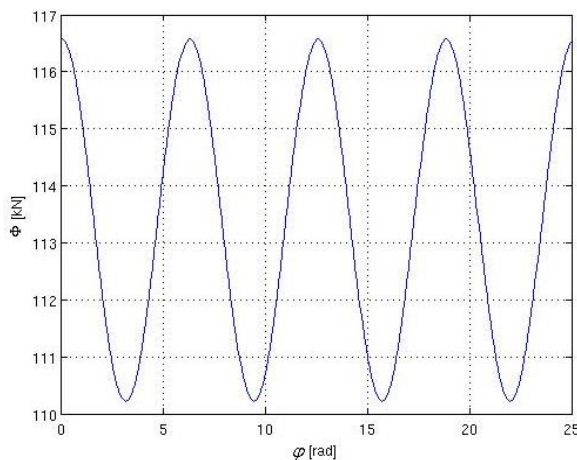
IV.4. Определяне на центробежните сили при екстремн режим на работа на центробежно-ролковите мелници

Целта на това изследване е да се определи изменението на центробежната сила в един екстремн случай, когато се наблюдава ексцентрицитет между осите на ротора и на корпуса в центробежно-ролковата мелница. Тогава траекторията на центъра на ролката е окръжност, концентрична на бронята на корпуса. Такава правилна траектория представя, с достатъчна за практиката точност, кинематиката на ролките.

На фиг. IV.18 е представено изменението на центробежната сила за един оборот на ротора и е показано разположението на максималната, минималната и средните стойности. Положението на осите на ротора и корпуса е същото като на фигура IV.17.



Фиг. IV.18. Изменение на центробежната сила за един оборот на ротора



Фиг. IV.19. Изменение на центробежната сила

За илюстрация на получените зависимости се разглежда следният числен пример.

С помощта на изведената формула (IV.86) ще бъде илюстрирано изменението на центробежната сила при стационарна ъглова скорост на ротора на мелницата и следните стойности на параметрите, участващи в зависимостта:

$$R = 0,5 \text{ m}, r = 0,15 \text{ m}, e = 0,005 \text{ m}, m = 90 \text{ kg}, \dot{\varphi} = 60 \text{ s}^{-1}, \lambda = 0,014.$$

От направеното изследване следва, че оптимално смилане на частиците ще е налице, когато ъгловата скорост на ротора се избере така, че минималната центробежна сила да е по-голяма от якостта на натиск на смиланата руда. Това ще гарантира смилане при еднократен контакт на частицата с ролка на мелницата.

Максималната центробежна сила може да послужи за определяне на натоварването и избора на подходящи търкалящи лагери за закрепване на ротора.

IV.5. Оптимизиране формата на ролките на центробежно-ролкова мелница

Обект на изследване в този труд е центробежно-ролковата мелница, която работи на инерционен принцип. Тя гарантира по-висока производителност. Това е съпроводено с бързо износване на ролките. Степента на смилане е пропорционална на броя въздействия. За да се повиши тяхната честота се препоръчва увеличаване на работния участък по височината на ролката. Във връзка с това се изследва задачата по формоизменението на надлъжния профил на ролката. Едно нейно решение е описано в [37, 42]. В него се прилага теорията на смилането. Подробно са изведени аналитичните зависимости, с които се определя пределната височина на износване на ролки.

IV.5. 1. Описание на задачата за формоизменението.

Изучена е литература по този въпрос и е предпочетена теорията на Ребиндер [48] за смилането. Според нея работата на смилаемия материал се определя от производителността на работата на разрушаващата деформация по броя на циклите на

деформацията. Работата на разрушаващата деформация се определя от произведението на коефициента на пропорционалност по пресичащата се сила на ролката. За да се поддържа постоянен зърнометричен състав е необходимо произведението на броя цикли на деформацията на ролката по пресичащата сила на ролката да е постоянно.

За да се поддържа зърнометричния състав, според теорията на Ребиндер за смилането [42], трябва да се изпълни условието:

$$[\pi r^2 H + 2\pi\varphi(0)]RH = [\pi y^2(x)(H + 2x) + 2\pi\varphi(x)](r_o - y)(H + 2x), \quad (IV.91)$$

където $\varphi(x) = \int_x^h y^2(x)dx$; $\varphi(0) = \int_0^h y^2(x)dx$; $r_o = R + r$.

R - начален радиус на масовия център;

H - начална височина на цилиндричния участък на ролката;

r - текущ радиус на износващата ролка;

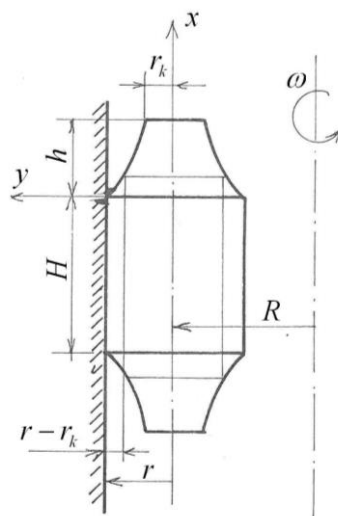
h - пределна височина на износващата се ролка;

$y(x)$ - функция на описващата крива на износената част (фиг. IV.22);

r_k - минимално допустим радиус (фиг. IV.22:).

Началните условия са: $y(0) = r$ и $y(h) = r_k$.

Уравнение (IV.91) е резултат на непроменяемост на произведение от три величини в началния и произволен момент от време. Те са обема на ролката, радиуса на масовия център и радиуса на цилиндричната част. В (IV.91) са приети следните означения, които са означени и на фигура IV.22:



Фиг. IV.22. Ролка на мелница

В (IV.91) се заместват $x = h$ и $y = r_k$ и след преработване се достига до уравнение от Бернулиев тип [15, 42].

Прави се замяна $\bar{t} = t^{-2}$ и се получава линейно уравнение от първи порядък:

$$\bar{t} + 2f_1(y)\bar{t} = -2f_2(y), \quad (IV.94)$$

Решението на (IV.94) се приравнява на $(H + 2x)^{-2}$ и се получава:

$$x = -\frac{H}{2} + \frac{B_4}{2(r_o - y)}, \quad (IV.95)$$

където

$$B_4 = \frac{1}{\sqrt{B_2 + \frac{4}{D} \left[r - y + (r_o - y) \ln \left(\frac{R}{r_o - y} \right) \right]}}; \quad B_2 = H^{-2} R^{-2}.$$

В това уравнение се замества $x = h$ и $y = r_k$ и след преработка се получава израза:

$$(H + 2h)^2 = \frac{1}{B_2} \left(\frac{1}{B_1^2} - B_3 \right), \quad (IV.96)$$

където

$$B_3 = \frac{4}{r_k^2 B_1} \left[r - r_k + B_1 \ln \left(\frac{R}{B_1} \right) \right].$$

IV.5. 2. Алгоритъм за определяне на пределната височина на износване на ролката

Получените изрази служат за определяне на височината на износената част на ролката и на координатите на точки от тази част при различни височини. За целта е необходимо уравнения (IV.95) и (IV.96) да се преработят. От второто уравнение се определя текущата височина на износената част h_i :

$$h_i = -\frac{H_i}{2} + \sqrt{\Delta B_i}, \quad (IV.97)$$

където

$$\Delta B_i = B_5 B_{2,i}^{-1}; \quad B_5 = B_1^{-2}; \quad B_{2,i} = H_i^{-2} R^{-2}.$$

В уравнение (IV.97) индекса i е цяло число и приема начална стойност 0 и нараства до стойност n .

За конкретни стойности на h_i и H_i от уравнение (IV.95) се определят координатите на точки j , чиито общ брой е m . За целта се заместват x със x_i^j , H с H_i и y с y_j . След преработка се получава израза:

$$x_i^j = -\frac{H_i}{2} + \frac{B_{5,i}}{2B_{2,i}B_{6,i}^j}, \quad (IV.98)$$

където

$$B_{2,i} = H_i^{-2} R^{-2}; \quad B_{5,i} = H_i + 2h_i; \quad B_{6,i}^j = \sqrt{B_{2,i} (B_{5,i})^2 + B_{3,i}^j};$$

$$B_{3,i}^j = \frac{4}{r_k^2 B_1^j} \left[r - r_k + B_1^j \ln \left(\frac{R}{B_1^j} \right) \right]; \quad B_1^j = r_o - y_j.$$

В уравнение (IV.98) участва координатата y_j , която се определя от

$$y_j = r - \Delta z_1 (r - r_k) j, \quad (IV.99)$$

където

$$\Delta z_1 = (m + 1)^{-1}.$$

Уравнение (IV.97) е основно в алгоритъма за получаване на пределната стойност на износената част h_i . В него е зададена начална височина на цилиндъра H_o и нарастване на височината ΔH . Алгоритъмът се описва с осем стъпки. Той е тестван за конкретен вал.

ИЗВОДИ

В главата са разгледани и решени четири теоретични въпроса, свързани с изучаването на движението на частицата от смилания материал по:

- конуса на устройството за предварително натрошаване;
- цилиндричния кожух на мелницата;
- и с определяне на центробежните сили в екстремн режим на работа на мелницата;

- оптимизиране формата на ролките с цел поддържане на производителността на машината и необходимия зърнометричен състав на изходния материал от смилането.

Разгледано е движението на частица от смилаемия материал по конусна повърхнина на устройството за предварително натрошаване в декартова координатна система. Получени са диференциалните уравнения за движение на частицата за установен режим на работа на мелницата.

Разгледан е случаят, когато вертикалният цилиндричен кожух на центробежно-ролковата мелница се върти с постоянна ъглова скорост. Диференциалните уравнения за движение на частица по кожуха са нелинейни и за решаването им се използва методът на Рунге-Кута. Диференциални уравнения са приложени при решаването на две задачи, според вида на използваната координатна система (декартова или цилиндрична). Записани са системите от диференциални уравнения в двете координатни системи. Предложени са алгоритми за реализиране на числения метод. Представени са диференциалните уравнения, чрез които е заместена изходната система.

Намерените числени решения на нелинейните диференциални уравнения за движение са новост в изследването на този тип машини.

Разгледан е числен пример за движение на частица по вертикалният кожух, когато компонентата на относителната скорост е постоянна величина. Траекторията ѝ в този случай е спираловидна. Определени са и ходографите на скоростта и ускорението и са представени техните графики.

Въз основа на третото изследване са направени следните изводи:

При експлоатацията на центробежно-ролковите мелници възниква екстремн режим на работа, при който е налице ексцентрицитет между осите на ротора и корпуса. Наблюдава се неравномерно движение на ролките. В рамките на един оборот се изменят ъгловата скорост и скоростта на центъра им. Това води и до неравномерност на центробежните сили.

Аналитично са изведени зависимостите за изменението на кинематичните параметри на ролките и приложените върху тях центробежни сили. Направена е оптимизация на формата на ролките, ползвани в машината.

Резултатите от това изследване могат да са полезни при избора на подходящ режим за работа на центробежно-ролковите мелници, като например избор на ъглова скорост на ротора, едрина на зърната, интензивност на подаването на материала за смилане и др.

За намиране на оптималната височина на износената част на ролката е формулирана задача за изменение на ролката. За нея е разработен алгоритъм, състоящ се от осем етапа. По него е съставена програма на Excel, с която са получени числени стойности. Даден е и алгоритъм за определяне на кривата на износване. Той важи за зададена височина и е описан в шест стъпки.

Предложените аналитични изрази и алгоритми могат да се използват при подбор на ролките в центробежно-ролковите мелници от конструкторите.

ГЛАВА V. ОПИСАНИЕ НА ЦЕНТРОБЕЖНО-РОЛКОВА МЕЛНИЦА И ДИНАМИЧНО НАТОВАРВАНЕ ВЪВ ВЪЗЛИТЕ

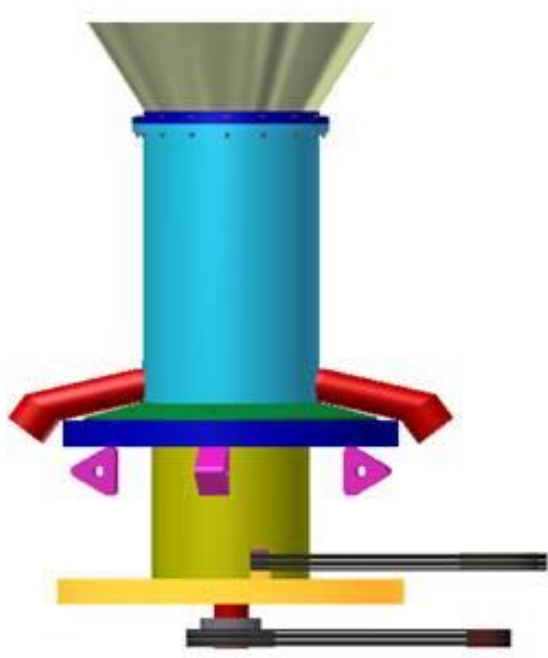
Дигиталният прототип на изследваната центробежно-ролкова мелница е създаден с помощта на софтуерния продукт Autodesk Inventor.

Якостни анализи на детайли се получават по метода на крайните елементи с ANSYS. Резултатите се получават без да се излиза от средата на Inventor и, ако е необходимо, се внасят корекции до постигане на оптимални стойности.

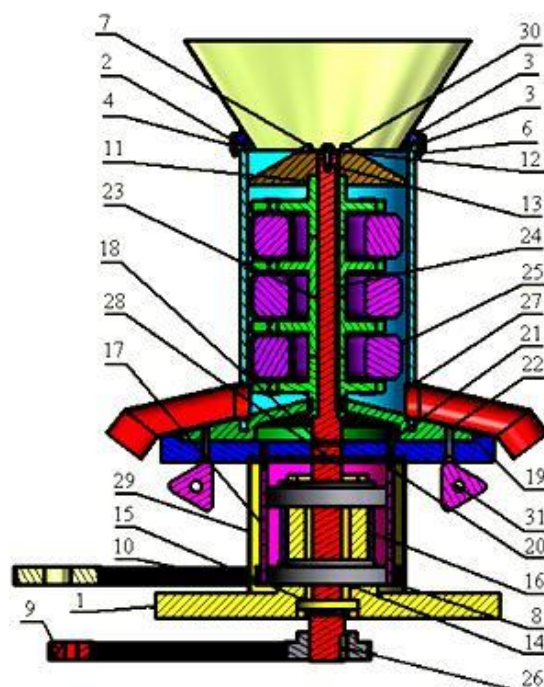
Платформата Autodesk Inventor се интегрира отлично в САМ среда.

V.1. ОПИСАНИЕ НА ПРОЕКТИРАНАТА МЕЛНИЦА ЗА СМИЛАНЕ НА МЕДНА РУДА

В средата на софтуерната CAD система Autodesk Inventor е проектирана центробежно-ролкова мелница за фино смилане на медна руда. Конструктивното устройство на мелницата е показано на фигура V. 1. Съставните елементи са дадени в спецификацията (фиг. V. 2) и таблица, дадена в дисертацията.



Фиг. V.1. Конструкция (устройство) на проектирана центробежно-ролкова мелница за смилане на медна руда



Фиг. V.2. Съставни елементи на проектираната мелница

Предназначението на мелницата е да смилва медна руда с големина на постъпващите на входа частици до 7 мм на фин прах с едрина на изходящите частици до 0,071 мм при постигане на определена производителност и минимален разход на енергия.

Проектирането на мелницата е осъществено на няколко етапа:

- геометрично моделиране в САМ средата на съставните компоненти, сглобените единици, стандартните елементи и сглобяването им в цялостен механо-математичен модел;

- софтуерно якостно и кинематично изчисляване и геометрично оразмеряване на механичните предавки и съединения;

- анимиране на кинематичните движения на подвижните звена;

- симулиране на възникващите динамични процеси;

- анализиране и оптимизиране на геометрията на центробежно-ролковата мелница;

- автоматизирано изготвяне на актуална конструкторска документация.

За целта е използвана специализираната CAD система Autodesk Inventor.

Самата мелница (фиг. V.1) се характеризира с няколко зони: входяща зона; централна зона (зона на смилане); изходяща зона; зона на задвижване.

Основни възли от устройството са:

- входяща зона, която се състои от захранващ конусен бункер (поз. 3), ротиращ конус (поз. 11) и насочващи гребла (поз. 30);

- моделирана корпусна част на мелницата, която се състои от цилиндричен корпус (поз. 4), свързващ фланец (поз. 2), скрепителни елементи (поз. – 2, 3, 4, 5, 6);

- рудоразпръскващ възел, който се състои от разпределяща конусна част;

- ротационна смилача система с основни елементи: носеща звезда (поз. 23), и смилача ролка (поз. 25);

- натиско-регулираща система, която се състои от еластичен регулатор, плъзгащ лагер и цилиндрична винтова натискова пружина;

- централен задвижващ вал (поз. 7);

- шпонково съединение между вала и носещите звезди, състоящо се от съставни части на сглобката и свързващ елемент – шпонка (поз. 24);

- конусно дъно на центробежно-ролкова мелница (поз. 21);

- изходящи улеи за отвеждане на фино смляната руда (поз. 27);

- основна ротационна плоча на мелницата (поз. 19);

- фундамент на центробежната ролкова мелница (поз. 1);

- зона на задвижване;

- лагерен цилиндър (поз. 17);

- задвижващи ремъчни предавки, състоящи се от клиноремъчна предавка, задвижваща корпусната част на мелницата (поз. 9) и клиноремъчна предавка, задвижваща централния вал (поз. 10);

- предпазен кожух (поз. 29).

Пружините са проектирани в CAD средата на използваната софтуерна програма. Тяхната геометрия, натоварването им, материала от които са изработени, работните характеристики и всички необходими данни за тях, включително и разпечатка на пълните конструктивни изчисления са дадени в дисертацията.

ПРОВЕРОЧНО ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ВАЛА НА СТАТИЧНА ЯКОСТ

Огъващият момент $M_{ог.} = M_y = 185 [kN.m]$ в едно сечение е равен на геометричната сума от огъващите моменти M_y и M_z , чиито големини отчитаме от моментните диаграми. Всяко сечение на вала има своя равнина на действие на огъващия момент, перпендикулярна на вектора му. При центробежно-ролковата мелница едната геометрична равнина няма огъващ момент $M_z = 0$. Резултатите няма

да се изменят, ако за простота и прегледност съвместим двете диаграми в една равнина и построим диаграмата на огъващия момент, даден в дисертацията.

V.2. Симулации и динамично натоварване на възлите на центробежно-ролковата мелница

Направена е компютърна симулация на работата на отделни ключови възли на мелницата чрез програмата Inventor. Тя показва действащите въртящи моменти и сили на възлите на мелницата. Симулацията представя главно механичната смилаща част на машината.

На изготвения клип корпусът и валът на мелницата се завъртат противоположно по синусов закон. Корпусът 4 на машината се върти по часовниковата стрелка, а валът 7 в обратна посока. Конструкционните елементи имат ос на симетрия. Силите са натоварени ососиметрично спрямо оста. Задават се параметрите за задвижване на мелницата при празен ход. Получените диаграми са разделени в двумерни крайни елементи. Силите и моментите на основните възли лежат в равнината, която минава през оста на симетрия.

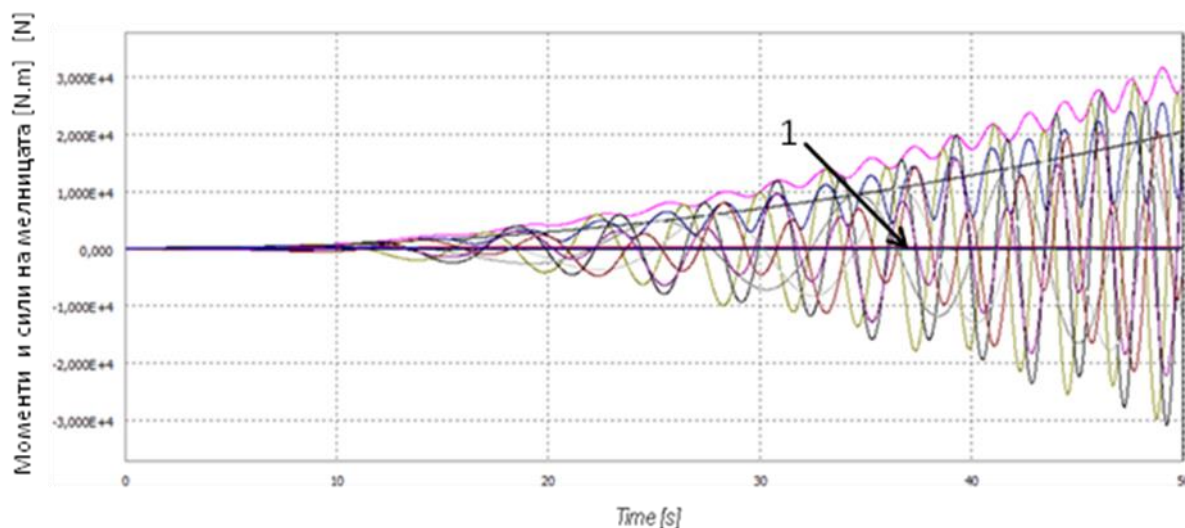
Въртящият двигателен момент M_D се задава 509 N.m , след което се завъртат валът и кожухът около ос Oz с един оборот. Получават се силите и въртящите моменти около ос Ox и Oy от декартовата координатна система, както и общият въртящ момент, и големината на действащите сили на възлите. Силите и моментите на натоварването на машината са представени графично. Диаграмите на: натоварването на вала и кожуха; на общите съсредоточени моменти на лагерната връзка между кожуха и фундамента; на действащите сили в лагерната връзка между кожуха и фундамента; на общите въртящи моменти, действащи върху вала; на действащите сили върху вала; на противоположно въртене на кожуха и вала на въртящите моменти; на общия въртящ момент на една ролка; на действащите сили върху една ролка; на действащите сили на една пружина в свито положение са дадени в дисертацията.

На диаграмата на фиг. V. 32 е дадено общото натоварване на мелницата. Това са силите и моментите, действащи на машината. С линия 1 е показано взаимодействието между вала, конусното дъно и основната ротационна плоча.

ИЗВОДИ

Познаването на натоварването върху машинните елементи, изграждащи ротора на мелницата, има важно значение за оразмеряване на детайлите и е свързано с възможностите за подбиране на оптимален режим на работа на машината.

От получените диаграми може да се направи изводът, че действащите сили и моменти имат периодичен характер и съответните машинни елементи следва да бъдат изчислени на умора, като бъдат отчетени знакопроменливите натоварвания върху тях.



Фиг. V. 32. Обща диаграма на моментите и силите, действащи на машината

От диаграмите може да се установи видът и продължителността на циклите и техните количествени характеристики (амплитуда, периоди, асиметричност и др. п.).

Анализът на натоварването върху разглежданите елементи определя и видът на материалите, от които те да бъдат изработени, с оглед получаване на най-добри експлоатационни резултати на центробежно-ролковата мелница.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси

1. Изведени са диференциалните уравнения за движение на частица от предназначения за смилане материал по конусната повърхност на устройство за предварително натрошаване. Получени са диференциалните уравнения за движение в цилиндрична и в декартова координатна система.
2. Съставени са диференциалните уравнения за движение на материална частица по вертикалния кожух на машината в етапа на смилане. Изследването е проведено в цилиндрична координатна система.
3. Предложен е метод за многовариантен избор на оптимален режим на работа на центробежно-ролкова мелница в размити условия. Създаден е алгоритъм за неговото реализиране.
4. Аналитично са изведени зависимостите за изменението на кинематичните параметри на работните органи в центробежно-ролкова мелница, при наличие на ексцентрицитет между осите на ротора и кожуха. Аналитично е определена зависимостта за изменение на центробежните сили на ротора на мелницата, породени от наличието на ексцентрицитет. Изведените зависимости са приложими при избор на ъглова скорост на ротора, едрина на подавания за смилане материал, интензивност на подаване на смилания материал, избор на търкалящи лагери и др. п.

5. Създаден е модел на устройство за предварително натрошаване с форма на пресечен конус, който осигурява допълнително раздробяване на подавания за смилане материал преди попадането му в работното пространство.

6. Реализирано е числено решение на системата нелинейни диференциални уравнения за движението на частица от смиланата среда по вертикалния цилиндричен кожух на мелницата, въртящ се с постоянна ъглова скорост. За решаването е приложен методът на Рунге–Кута. Съставени са съответните системи от диференчни уравнения. Предложен е алгоритъм за реализирането на численото решение.

Приложни приноси

1. Получени са числените стойности на координатите на точка, при движението ѝ по цилиндрична и конусна повърхност, както и компонентите на относителната скорост и относителното ускорение. Тези изследвания могат да се използват от технолозите при избор на оптимален режим за работа на мелницата. Числените стойности на координатите на точките са използвани за графично пространствено изобразяване на траекторията. За целта е съставен алгоритъм, който е даден в глава IV. Числено получените компоненти на относителната скорост и ускорение са онагледени със съответните им ходографи.

2. Намерени са аналитични зависимости за определяне на кориолисовата, относителната и преносната (центробежната) инерционни сили, действащи на частицата във всяка точка от нейната траектория, в рамките на един оборот на ротора. Получените стойности на инерционните сили за всяка точка, при движение на частицата по конусна повърхност, са представени и графично. Изчертана е проекцията на траекторията и диаграмата на центробежната сила в хоризонталната равнина. Познаването на силите, действащи върху частицата, дава възможности на конструкторите да изследват и да оптимизират динамиката на машините, а на технолозите да управляват силовите въздействия, а по този начин и процеса на предварително натрошаване.

3. Създадени са 3D – цифрови модели на предложената конструкция на центробежно-ролкова мелница. Проведени са компютърни симулации за работата на мелницата. Моделът позволява механичното оразмеряване и изготвянето на пълен набор от конструктивна документация за изработването на мелницата, която позволява изработването на нейния прототип. Изследвани са динамичните натоварвания на възлите на мелницата и са получени силите, действащи във възлите.

В заключение изследването на динамичното поведение на центробежно-ролкова мелница в софтуерната среда на Inventor показва, че при предложени конструктивен вариант, тя ще издържи на експлоатационните натоварвания в реални условия и ще изпълнява успешно своето предназначение.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

50.Сезонов С., „Изследване на процесите в нова конструкция на центробежно-ролкова мелница”, *Доклади XIII Международна научна конференция ВСУ 6-7 юни 2013г., С., Том I*, стр. I-106 ÷ I-111.

51.Сезонов С., “Движение на частица по вертикален цилиндричен кожух на центробежно–ролкова мелница в цилиндрична координатна система”, *Годишник на МГУ „Св. Ив. Рилски“*, 2014, том 57, свитък II, 85-88.

52.Сезонов С., Вълков. М., “Механика на частиците в захранващото устройство на нова конструкция на центробежно–ролкова мелница”, *Доклади XIII Международна научна конференция ВСУ 6-7 юни 2013г., С., Том I*, стр. I-100 ÷ I-105.

53.Сезонов С., Мочев Д., "Възможности за усъвършенстване на технологичните показатели на центробежно–ролковите мелници", *Годишник на МГУ “Св. Ив. Рилски“*, 2011, том 54, свитък II, 150-155.

SUMMARY

Optimization of the structural and technological parameters of a centrifugal roller mill

Simeon Yordanov Sezonov

The dissertation uses theoretical and numerical methods for studying the mechanical processes in centrifugal roller mills.

The movement of a particle on a conical surface in the device for preliminary crushing in an orthogonal coordinate system is considered.

The vertical casing of the centrifugal roller mill rotates at a constant angular velocity. The differential equations for the movement of the particle along the casing in orthogonal and cylindrical coordinate systems are obtained. They are solved by the Runge-Kuta method. Algorithms for determining the kinematic parameters of the particle are described.

The centrifugal forces in the extreme mode of operation of the mill are determined. There is an eccentricity between the axes of the rotor and the housing. The movement is uneven.

Analytical expressions for the change of the kinematic parameters of the rollers in the centrifugal-roller mill and the centrifugal forces applied on them are derived.

An algorithm has been developed to find the optimal height of the worn part of the roll.

Analytical expressions and algorithms are used in the selection of rollers in centrifugal roller mills.

The diagrams of forces and moments acting on the machine elements that make up the rotor of the mill are obtained. They are periodic in nature, which is why machine elements are calculated for fatigue. Load analysis determines the type of materials from which these elements are made.

In conclusion the study of dynamic behavior of the centrifugal-roller mill in the software environment of Inventor indicates that, in the proposed constructive option, it will withstand the operating loads in real conditions and will successfully fulfill its purpose.