

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

Институт по Информационни и Комуникационни Технологии

Секция „Вградени Интелигентни Технологии“

# ДИСЕРТАЦИЯ

За получаване на образователна и научна степен „ДОКТОР“

на маг.инж. **Николай Иванов Стоименов**

ТЕМА:

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДВИЖЕНИЕТО И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕТО  
ПРИ ТЕЛА С ПРОМЕНЛИВА ФОРМА**

Научна област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. „Електротехника, електроника  
и автоматика

Научна специалност: 02.21.07. “Автоматизирани системи за  
обработка на информация и управление“

Научен ръководител: **проф. д-р Димитър Карастоянов**

София, 2016 г.

## СЪДЪРЖАНИЕ

<b>УВОД</b> .....	<b>4</b>
<b>Глава 1</b>	
<b>ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР</b> .....	<b>6</b>
1.1. Типове трошачки .....	6
1.2. Типове мелници .....	8
1.3. Вътрешна облицовка на мелници (Лифтери).....	9
1.4. Работен процес.....	12
1.5. Мелеща среда .....	13
1.6. Режими на работа на топкови мелници.....	16
1.7. Товар и зареждане на мелницата .....	20
1.8. Особености на мелещата среда .....	21
1.8.1. <i>Размери на металните топки</i> .....	21
1.8.2. <i>Износване на мелещата среда</i> .....	24
1.8.3. <i>Плътност на мелещата среда</i> .....	25
1.9. Динамика на движението на товара в мелницата.....	26
1.9.1. <i>Скорост на въртене на барабана на мелницата</i> .....	26
1.9.2. <i>Линия и ъгъл на откоса</i> .....	29
1.9.3. <i>Траектория на мелещи тела</i> .....	29
1.9.4. <i>Движение на товара в мелницата</i> .....	32
1.9.5. <i>Влияние на формата на мелещите тела</i> .....	32
1.10. Производствен капацитет на мелницата .....	35
1.11. Зависимост на производствения капацитет от размера на мелницата.....	36
1.12. Моделиране на работния процес.....	37
1.13. Заключение.....	39
1.14. Основна цел и задачи на дисертационния труд.....	40
<b>Глава 2</b>	
<b>ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОБОРУДВАНЕ</b> .....	<b>41</b>
2.1. Метод на лазерната дифракция .....	41
2.2. Термография .....	47
2.3. Софтуер за симулиране на процеси при мелници и минна индустрия .....	51
2.3.1. <i>Платформа на EDEM Software</i> .....	51
2.3.2. <i>Графичен интерфейс</i> .....	52
2.3.3. <i>Теория на контактните модели, използвани в софтуера</i> .....	55

2.4.	3D мобилен скенер .....	59
2.5.	Заключение.....	60

### **Глава 3**

#### **СЪСТАВЯНЕ МЕТОДИКИ ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНИЯ.. 61**

3.1.	Съставяне на методика за изследване едрината на цименти.....	61
3.2.	Съставяне на методика за изследване на температура при ротационна пещ ....	64
3.3.	Съставяне на методика за симулиране на смилателни процеси .....	65
3.4.	Съставяне на методика за анализиране и изследване на мелещи тела с получени данни от симулационно моделиране.....	66
3.5.	Реинженеринг на мелещи тела .....	67
3.6.	Заключение.....	70

### **Глава 4**

#### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И РЕЗУЛТАТИ..... 71**

4.1.	Осъществяване на изследване за едрина на изходен продукт от производствена топкова мелница.....	71
4.2.	Изследване на температура при ротационна пещ .....	79
4.3.	Изследване движението и взаимодействието на тела с променлива форма.....	82
4.3.1.	Конструктивните характеристики на барабанна топкова мелница .....	84
4.3.2.	Задаване на входни данни за симулирането на сферични мелещи тела ....	87
4.3.3.	Анализиране данните от симулацията на сферични мелещи тела.....	88
4.3.4.	Задаване на входни данни за симулирането на сферичен тетраедър .....	90
4.3.5.	Анализиране данните от симулацията на сферични тетраедри.....	93
4.3.6.	Сравнителен анализ между различни форми мелещи тела .....	94
4.4.	Лифтер тип сфероиден тетраедър на Рело .....	101
4.5.	Заключение.....	103

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 104**

#### **НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ..... 105**

#### **ЛИТЕРАТУРА..... 106**

#### **ДЕКЛАРАЦИЯ ЗА ОРИГИНАЛНОСТ..... 112**

#### **Публикации по дисертационната тема..... 113**

#### **ПРИЛОЖЕНИЕ 1..... 116**

#### **ПРИЛОЖЕНИЕ 2..... 122**

#### **ПРИЛОЖЕНИЕ 3..... 126**

#### **ПРИЛОЖЕНИЕ 4..... 131**

#### **ПРИЛОЖЕНИЕ 5..... 137**

## БЛАГОДАРНОСТИ

Имах честта да работя под ръководството на проф. д-р Димитър Карастоянов, който ме подкрепяше и помагаше през годините - сърдечно благодаря за помощта и за неустоймото чувство за хумор.

Също така искам да благодаря на проф. д-мн Галя Ангелова за възможността да работя с уникална и модерна научно-изследователска апаратура в рамките на голям Европейски проект.

Разбира се, бих искал да изкажа благодарности и на доц. д-р Тодор Пенчев за методическите указания и насоките, които ми даде.

Благодаря също на проф. д-р Тодор Нешков и на доц. д-р Любен Клочков от катедра АДП към МФ на ТУ-София за подкрепата през всички тези години.

Сърдечно Благодаря на всички !!!

## УВОД

Един пример за изследване движението и взаимодействието на тела с променлива формула може да се бъде разгледан при топкови мелници. При топковите мелници се наблюдават промени на формата и размера както на мелещите тела, така и на материала за смилане. Телата и материала за смилане оказват влияние и на вътрешните модули на топковите мелници.

В съвременните производствени условия топковите мелници представляват един широк клас от машини, предназначени за раздробяване, смилане и/или смесване на материали, като за целта се използват метални или друг вид сферични тела в качеството на работна (мелеща) среда. За разлика от сложния характер на работния процес в топковата мелница, в конструктивно отношение тя представлява относително просто устройство с проста конструкция. Обикновено, това е цилиндричен съд, монтиран върху подходящ фундамент, който позволява осъществяването на въртливо движение на съда посредством задвижване от електрически двигател със съответна трансмисия. След зареждане с материала, предназначен за смилане и въртене с определена скорост, процесът на смилане се осъществява благодарение на кинетичната енергия на движещата се в мелницата мелеща среда.

Топковите мелници намират приложение при разнообразните технологични непрекъснати процеси в ТЕЦ (работещи с твърдо гориво), металургичната, минната, циментовата и други промишлености.

Обикновено тези мелници работят със сферични мелещи тела. В някои случаи се ползва цилпекс. Мелещите тела се произвеждат от материали, отговарящи на изисквания на стандартите по БДС, EN, ISO и др., като стомани, сплави от стомани, порцелани, керамика и др.

Най-стария тип мелещи тела, които се срещат и днес в някои типове мелници са кремъчните или речни камъчета с овална форма. Те се отличават с висока твърдост и голяма износоустойчивост. Могат да бъдат използвани за дълъг период от време. В процеса на работа тези тела променят формата и големината си. Този тип мелещи тела е най-разпространен в мелници за керамична и глинена промишленост, а също така и в производството на анилинови бои и съставки на латексовите бои.

Металните топки представляват най-широко разпространената мелеща среда. Използват се следните видове материали: високо карбонова или високо магнезиева стомана; лята никелова сплав; неръждаема стомана; закалена стомана, хром-никелова стомана и други.

При мелниците влияние оказват някои ключови фактори, които подобряват производителността и качеството на изходния продукт. Ключови фактори като: зареждане с определен процент материал за смилане; процент за запълване; размер на използваните мелещи тела (по възможност да бъдат с най-малки размери, с което се

постига максимална контактна площ между средата и материала за смилане); време за смилане; не се допуска повишаване температурата на мелницата и други.

В съвременните условия на експлоатация освен технологични, конструктивни и икономически изисквания, също така се отделя внимание на екология, енергийна ефективност, експлоатационна надеждност, както и на човешкия фактор.

Съвременните топкови мелници трябва да бъдат с повишена производствена (експлоатационна) надеждност, висока производителност, с минимален разход на енергия. В това число електроенергия, разходи за топлоенергия, но не само в това, вътре влизат и разходи за мелещите тела. Изискване на качеството – изходния продукт трябва да бъде във функция от изискванията по БДС и ISO.

Настоящата дисертационна работа е структурирана както следва:

В ГЛАВА 1 са анализирани типовете мелници, вътрешната им облицовка, работния процес. Разгледани са режимите на работа на топкови мелници, зареждането и особеностите на мелещата среда.

В ГЛАВА 2 е разгледано експериментално оборудване, което детайлно познаване допринася за правилната му експлоатация. Обърнато е внимание на уред за измерване едрината на частиците, разгледана е термографията като цяло. Подробно е разгледан софтуер, работещ по метода на дискретните елементи, както и моделите, по които работи.

В ГЛАВА 3 са съставени методики, по които да се използват необходимите уреди, обрнато е внимание на основни функции, влияещи на измерванията. Съставена е методика на база на която са осъществени изследванията на движението, взаимодействието и формата на тела с променлива форма.

В ГЛАВА 4 са изложени резултатите, постигнати от научни изследвания и изследвания в производството. Направен е анализ на разпределението на частиците във видове цименти. Отчетени са температурите на ротационна пещ за топкова мелница. Осъществени са симулации със софтуер, работещ по метода на дискретните елементи за движението на мелещи тела в лабораторна топкова мелница.

## Глава 1

# ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Добитото полезно изкопаемо с достатъчно съдържание на полезни минерали се обработва и се получава т.нар. изходен продукт. Осъществяването на ефективен обогатителен процес изисква изходния продукт да претърпи технологична преработка за осредняване на минералния и химичния състав на продукта [1].

Смилането на различни материали представлява важен индустриален процес, при който материала се натрошава и смилва до определен предварително желан размер. Топковите мелници намират широко приложение в различни производствени области, като главно това са металургията, минната индустрия и обработката на минерали, производството на цимент, химическата промишленост, фармацевтиката и козметиката, керамиката, лабораторни изследвания и други. В зависимост от конкретната област на приложение, обработваните материали се различават по твърдост, размери, химичен състав и структура, като примери в това отношение представляват различните видове руди, минерали, варовици и други.

### 1.1. Типове трошачки

Материалите, получени при добив от земната кора, представляват късове с размери от 0,1 до 1500mm. За да бъдат използвани, късовете трябва да се раздробят до определени размери. Трошенето е процес, при който е необходимо да се намали размера на рудните късове, чрез прилагане на външни сили, предизвикващи механичното им разтрошаване [2].

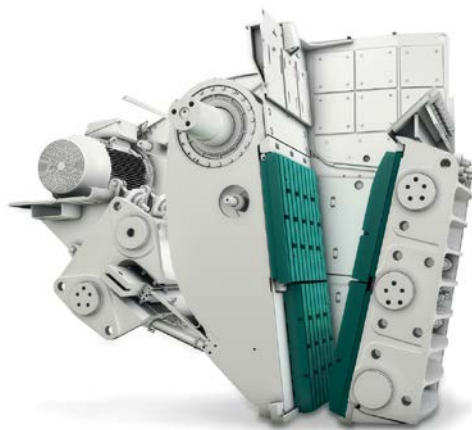
В [2] е предложена класификация на трошенето в зависимост от размерите на материала, показан на **таблица 1.1**.

Някои руди се срещат в природата като смес от дискретни минерални частици. Тези смеси изискват малко или никакво трошене. Повечето руди се състоят от твърди и здрави скални маси, които е необходимо да бъдат натрошени, улесняващо изваждането на полезните изкопаеми. На трошене се подлагат по-едри частици от материала, а на

**Таблица 1.1.** Класификация на трошенето [2]

Наименование	Среден размер на постъпващия материал [mm]	Среден размер на готовия материал[mm]
Едро трошене	1500-300	350-100
Средно трошене	350-100	100-40
Дребно трошене	100-40	30-5
Смилане	30-5	1-0,07

смилање по-дребните. За да се получи натрошен материал, подходящ за използване в мелниците е необходимо 100% от парчетата да бъдат по-малко от 10 до 14 mm в диаметър. Раздробяването се извършва на етапи. В началния етап, използваните устройствата са най-вече челюстни трошачки. Те натрошават рудата до по-малко от 150mm. Разтрошаването на рудата се извършва между двете челюсти, от които едната е подвижна, а другата неподвижна. Материала се придвижва по челюстите вследствие на собственото си тегло. Неподвижната челюст е част от корпуса на машината, а подвижната част е закрепена на ос, около която извършва възвратно постъпателно движение, което се приближава и отдалечава от неподвижната челюст. Челюстни трошачки на [3] са показани на **фиг. 1.1** [1, 3].



**Фиг. 1.1.** Челюстна трошачка [3]

Следващият етап е вторичното трошане, което се извършва в конусни трошачки. Рудата се натрошава на 10 до 15mm в диаметър и постъпва в мелница. За разлика от челюстните трошачки, при конусните натрошаването е постоянно. По време на процесът има зона, в която материалът се троши и зона, в която се разтоварва. Примерен вид на конусна трошачка е показана на **фиг. 1.2** от [3]. Друг вид са валцовите трошачки. При тях материалът се разтрошава между два противоположно въртящи се вала. Трошачките с ударно действие се прилагат за трошане на слаби и средно твърди скали като варовик, креда, гипс, азбест, въглища и др. [1, 3].

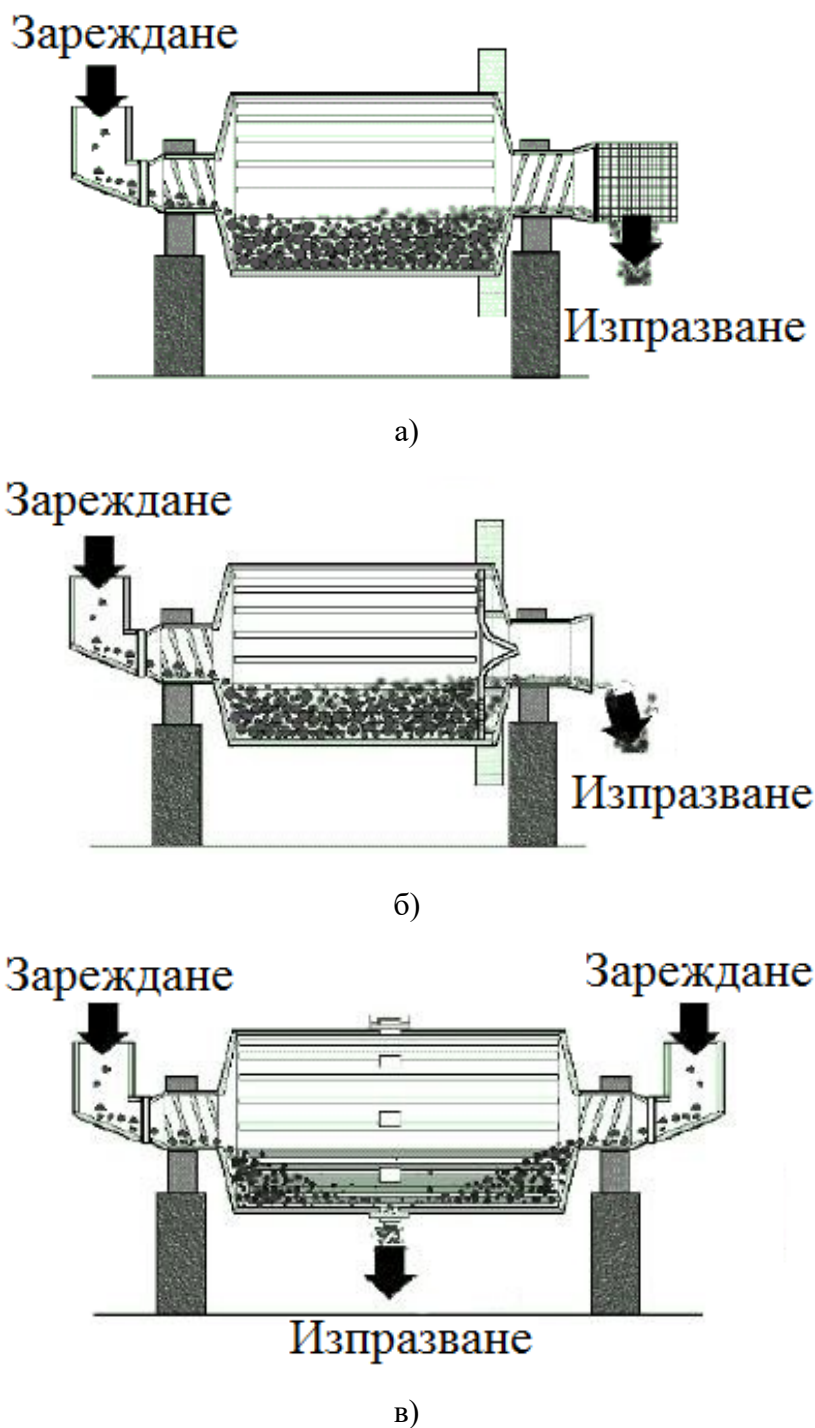


**Фиг. 1.2.** Конусна трошачка [3]



## 1.2. Типове мелници

В зависимост от сферата на приложение и своето предназначение, топковите мелници могат да се различават както по габарити и конструктивни особености, така и по отношение на параметрите на протичащия работен процес. В [4] са представени най-общо три типа мелници с хоризонтално разположен цилиндричен барабан, които са показани съответно на **фиг. 1.3.**



**Фиг. 1.3.** Типове мелници – зареждане и изпразване

На **фиг. 1.3 а)** е показана мелница от преливен тип, при която изпразването на съдържанието се осъществява чрез преливане на смления материал. Обикновено този тип мелници са подходящи за смилане до размери 75-106 микрона на смлените частици.

Мелницата, показана на **фиг. 1.3 б)** се отличава с наличието на диафрагма (решетка) на изхода, така че частиците с размери по-големи от отворите на диафрагмата не се пропускат и остават в мелницата за последващо смилане. Мелниците от този тип са предназначени за по-грубо смилане, като размера на смлените частици е в диапазона 150-250 микрона.

Конструктивна особеност на мелницата, показана на **фиг. 1.3 в)** е наличието на отвор за изтичане на смления материал, който е разположен в средата на цилиндричното тяло, докато зареждането със суровина се извършва през отвори в двата края на мелницата. Характерно за мелниците от преливен и диафрагмен тип (**фиг.1.3-а** и **фиг.1.3-б**) е, че диаметърът на отвора за зареждане е малко по-малък от диаметъра на отвора за изпразване, с което се улеснява изтичането на суспензията на смления материал.

В конструктивно отношение основни параметри, характеризиращи мелницата са нейните габарити, определящи се от дължината и диаметъра (или тяхното отношение) на цилиндричното тяло, типа на хранващия механизъм (фийдър) и системата за изпразване на смления материал. Отношението дължина/диаметър практически може да варира в широки граници, определящо барабанната или тръбообразна форма на мелницата. Най-често това отношение е в границите от 0,5 до 3,5. Хранващият механизъм обикновено включва спиралообразна или двойна спиралообразна линия, която при въртенето на мелницата зарежда суровината. Системата за изпразване на мелницата може да е от преливен или диафрагмен тип, като отвора за изтичане може да има цилиндрична или конична форма.

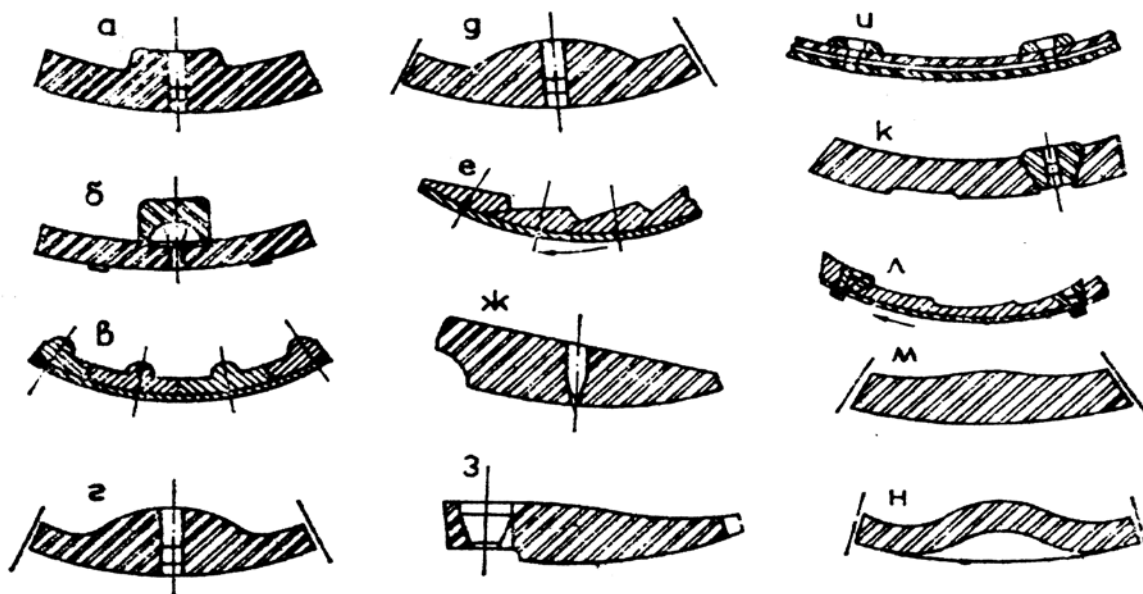
Налични са мелници, при които цилиндричното тяло на мелницата е сепарирано посредством решетки на отделения, които пропускат частиците с размер по-малък от отворите на решетката и не позволяват на по-големите частици да преминат в следващото отделение [4, 6]. Това позволява в различните отделения на мелницата да се осъществява смилане на различен по размери материал със съответно различен размер на мелещите сферични тела в различните отдели на мелницата. Този тип мелници позволяват отделянето на по-грубия материал за мелене от по-финия, като при тях отворът за изпразване на смляното съдържание на мелницата обикновено е коничен. Мелниците от този тип са с по-малък тонаж и габарити.

### **1.3. Вътрешна облицовка на мелници (Лифтери)**

Конструктивна особеност на някои топкови мелници е наличието на така наречените повдигачи (лифтери), представляващи греди, разположени надлъжно по вътрешната обшивка на тялото на мелницата [5, 6]. Самата обшивка може да има различни профили и служи да предпазва от износване вътрешната стена на мелницата.

При въртеливото движение лифтерите имат за цел да повдигат на по-високо ниво съдържанието на мелницата преди то да падне обратно на дъното, като по този начин се осигурява по-добро раздробяване на материала. В някои случаи лифтерите могат да бъдат спираловидно разположени по дължината на мелницата, с което се постига по-плавно движение на смилаемия материал. Броят на разположените лифтери зависи пропорционално от диаметъра на цилиндричното тяло на мелницата.

От особено значение е бързото ремонтване, отстраняване на повредени или износени лифтери. За да осигурява висока надеждност, конструкцията на лифтерите трябва да осигурява лесен монтаж, демонтаж и подмяна. На **фиг. 1.4** са показани различни профили. Освен мелещите тела е важен и видът на облицовката. Тя влияе на работата на мелницата. Профилите, представени от [2], показани на **фиг. 1.4 - а, б, в, е, ж** са формирани от отделни плочи, които се закрепват към барабана посредством болтове. При останалите профили от **фиг. 1.4 - г, д, и, к, л, м, н** закрепването се осъществява със стоманени греди. Те са закрепени с болтове към барабата на мелницата.



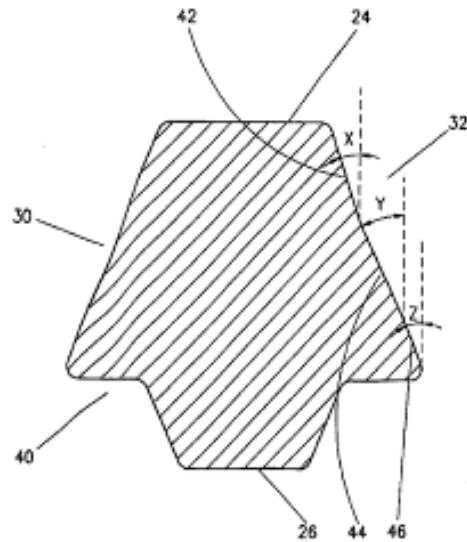
**Фиг. 1.4.** Различни профили за облицовка [2]

За фино смилане на материала, [7] предлага използването на гладка облицовка – **фиг. 1.5**, имаща за цел да осигурява стриващо действие.



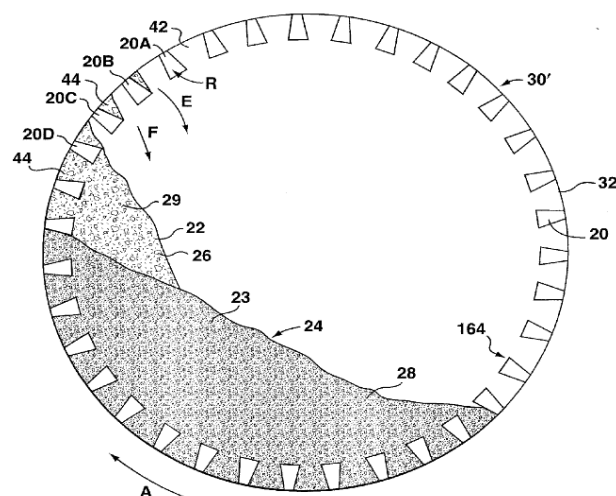
**Фиг. 1.5.** Гладка облицовка [7]

Литературата предлага и други видове облицовъчни плочи и лифтери [8] с форма, съдържаща глава, ръбове и лице. Този тип е разположен във вътрешната повърхнина на цилиндричния корпус на мелница. Лифтерът, показан на **фиг. 1.6** се състои се от три линейни части: горна част, долна част и средна част.



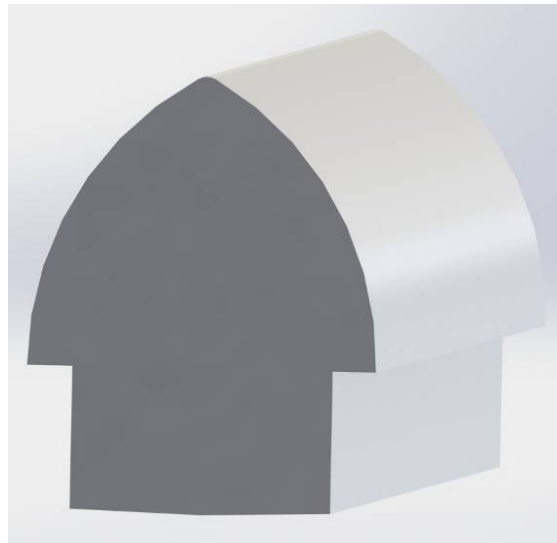
**Фиг. 1.6.** Лифтер [8]

Известен е и друг тип лифтер, показан на **фиг. 1.7** [9] – обърнат трапец. Той е стеснен от страната, контактуваща с вътрешността на мелницата (барабана), а в горната си част е разширен. По този начин формата позволява издигане на материала до по-високо ниво на отделяне на материала от стената на мелницата. За по-високото издигане спомагат и джобове по страните на трапеца. Джобовете са от двете страни, като това позволява мелницата да се върти в двете посоки (по часовниковата и обратно на часовниковата стрелка). При този тип материалът за смилане и мелещите тела се издигат до по-висок ъгъл. Следствие на това материалът пада в централната част на мелницата и попада върху пълнежа от материал и мелещи тела.



**Фиг. 1.7.** Лифтер [9]

Формата и профилите на облицовките, използвани за предпазни плочи и лифтери оказват съществено влияние върху производителността и ефективното смилане на изходния продукт. Различните профили на облицовките и лифтерите имат различен точков и повърхностен контакт, който те осъществяват с материала за смилане и мелещите тела. На **фиг. 1.8** е показана нова форма на лифтер, заявена за патент от Димитър Карастоянов и Николай Стоименов от ИИКТ-БАН, ЛИФТЕР, Рег. № 112174, приоритет от 14.12.2015 [10]. Лифтерът се състои от тяло, глава и основа. Главата представлява триъгълник със сфероидални страни и заострен връх, с което ще се постига по-ефективно смилане, осигурявано от новата форма.



**Фиг. 1.8.** Лифтер нов тип

#### **1.4. Работен процес**

Работния процес има следните основни параметри, характеризиращи топковите мелници. Това са коефициентът на редукция, производствения капацитет и консумираната мощност на мелницата. Коефициентът на редукция представлява отношението на размера на частиците на входящия материал към размера на частиците на смления продукт на изхода на мелницата. В различните приложения той варира в широки граници, като те могат да са от 20:1 до 200:1, [4, 6]. Производственият капацитет се измерва в тона произведена продукция за час, а консумираната мощност се отчита в киловати. Важни параметри са също така скоростта на въртене, теглото на мелещата топкова среда и теглото на мелницата като цяло.

В **таблица 1.2** са представени данни, от компания Henan Bailing Machinery Co. Ltd, представляваща един от големите китайски производители на топкови и прътови мелници за циментената, силикатната и др. промишлености [11]. Някои специфични приложения и възможности на промишлените мелници са описани в публикациите [12-21].

Таблица 1.2. Данни от производител [11]

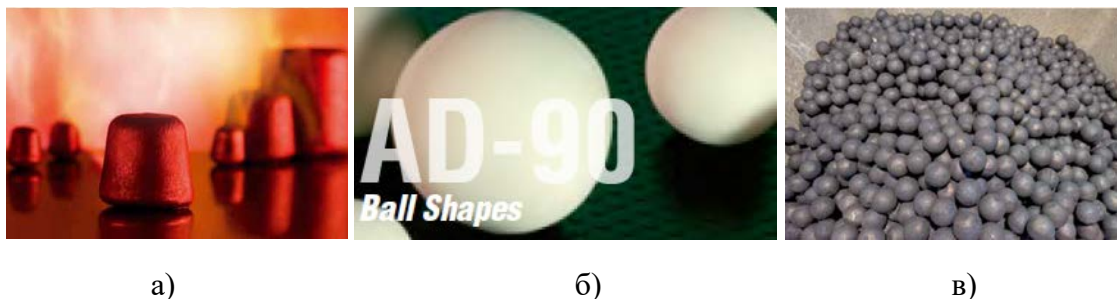
Размери	Скорост на барабана [rpm]	Тегло на топков пълнеж [t]	Производителност [t/h]	Мощност [kW]	Тегло [t]
Ф1200×4500	35	5,2	1,4-2	45	12
Ф1500×5700	29	12,25	3,5-4,5	115	23
Ф1830×6400	24,23	18,5	5,5-6,4	155	34,6
Ф1830×7000	23,91	21	6-7	185	36,5
Ф2200×6500	21,4	31	14-15	380	50
Ф2200×7500	19	32,5	16-18	380	63
Ф2400×7000	17	38	26-30	475	70,5
Ф3000×9000	15	65	42-50	1000	156,5

### 1.5. Мелеща среда

В качеството на мелеща среда или мелещи тела в съвременните топковите мелници най-често описаните за използване в литературите [4, 6, 23, 24] са:

- Метални цилиндрични тела със заоблени краища – цилпекс (cylpebs);
- Керамични топки с нормална или висока плътност;
- Стоманени или друг вид метални топки.

Гореизброените мелещи тела са показани на **фиг. 1.9**. Разгледаните фирмени каталози [23-26] предоставят и допълнителна информация за различни параметри на мелещите тела.



**Фиг. 1.9.** Видове мелещи тела: а) цилпекс [23], б) керамични топки [25], в) стоманени топки [26]

Към разгледаните видове мелещи тела, може да се добави, че най-стария тип използвано мелещо тяло, което се среща дори и днес в някои типове мелници представляват кремъчните или речни камъчета с овална форма. Те се отличават с висока твърдост, добра износоустойчивост, дълготрайност. Този тип мелещи тела се е използвал при мелниците в глинена и керамичната промишленост, а също така и при производството на анилинови бои и съставки за латексови бои.

В съвременните условия най-голямо приложение в практиката намират цилиндрични мелещи тела, представляващи метални цилиндри със заоблени ръбове и равни стойности на дължината и диаметъра на цилиндъра (*фиг. 1.9. Видове мелещи тела а – цилпебс*). Максималните посочени в литературата размери за този тип тела са 45x45 mm, а минималните са 12x12 mm. В [23] са представени данни за процеса на изработката и свойствата на произвежданите от фирмата DOERING International цилиндрични мелещи тела. На **фиг. 1.10** е показано и износването им, като телата запазват първоначалната си формата.



**Фиг. 1.10.** Износване на цилпебс [23]

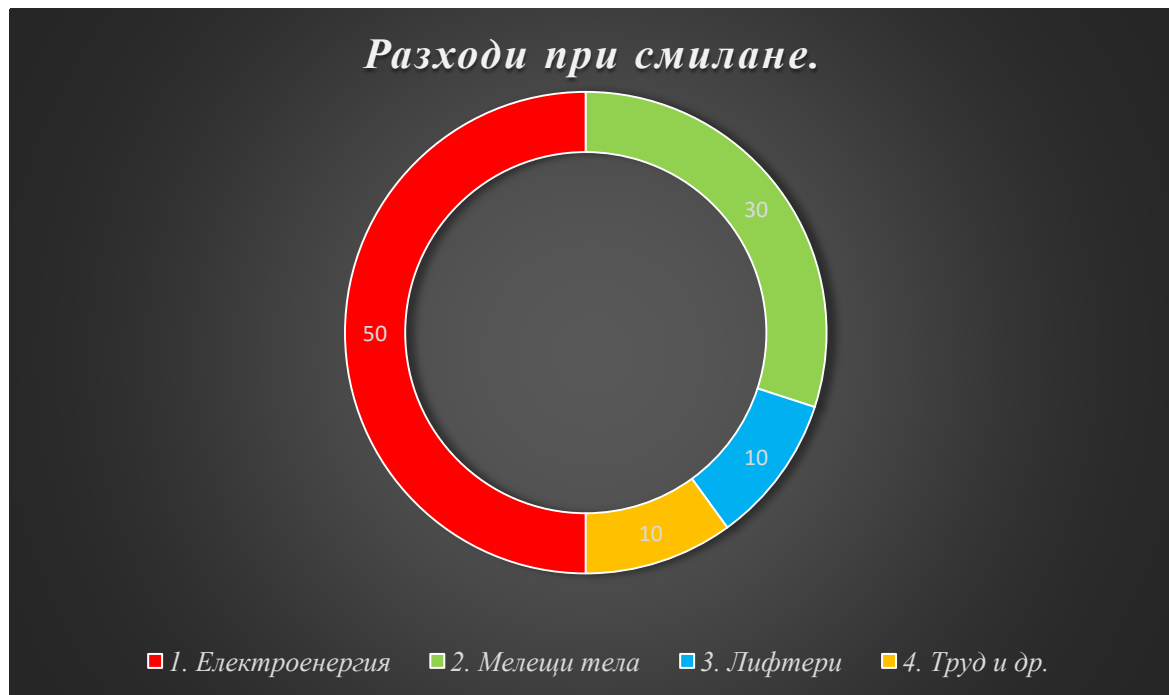
Керамичните мелещи тела (*фиг. 1.9. Видове мелещи тела, б – керамични топки*) са изработени от бял керамичен материал, обработен така, че да не се нащърбва и чупи по време на експлоатация. При керамичната мелеща среда с висока плътност, мелещите тела са изработени с високо съдържание на алуминиев оксид ( $Al_2O_3$ ) и имат плътност с 40-50% по-висока от плътността на обикновените керамични мелещи тела. Те са обработени при висока температура, с което се постига по-висока износоустойчивост и твърдост. Характерно за тази мелеща среда е, че керамичните тела могат да бъдат изработени с различни форми, включително сферична, цилиндрична или овална форма, наподобяваща естествената форма на речните камъчета. Производителите CoorsTek предлагат добри решения и точно описване на мелещите тела от гледна точка на форма, размери, тегло и скорост. Мелещите тела със сферична форма се използват най-вече за смилане на материал с големи входни размери до редуциране на размера им до фини размери. Предлаганите от тях продукти са с различни размери. Размерите на сферичните мелещи тела са от  $2^{1/2}$  inch до  $7/32$  inch като за тази цел също са споменати рекомендации за размера. Според тях най-големите тела в мелещата среда трябва да бъдат с размер поне 5 пъти по-голям от най-големия съществуващ размер от входния материал за смилане. Относно скоростта на въртене на топковата мелница, те също препоръчват скорости от 50 до 70% от критичните обороти [25].

Металните мелещи тела (*фиг. 1.9. Видове мелещи тела, в – стоманени топки*) са най-широко разпространената мелеща среда, предвид факта, че процесът на смилане в този случай протича значително по-бързо. Използват се следните типове материали: [24]

- Високо карбонова - високо магнезиева стомана с възможни примеси в определен процент от молибден, хром или никел. Материалът е с висока твърдост, като този тип мелеща среда като правило е с най-високо качество;
- Лята никелова сплав, при което металните топки са бели и причиняват най-малко метално замърсяване на смления изходен материал в сравнение с другите типове метална мелеща среда;
- Неръждаема стомана, която е относително скъпа и се използва когато се изисква устойчивост на работната среда по отношение на киселинни или друг вид взаимодействия;
- Закалена посредством охлаждане стомана или кована ниско карбонова стомана, като и двата материала представляват най-евтината метална мелеща среда, използвана най-често за грубо смилане с нестроги изисквания по отношение на металното замърсяване;
- По-специални типове материали, които в някои случаи също могат да се използват в топковите мелници са бронз, месинг, алуминий и пр.

В повечето от промишлените приложения на топковите мелници, диаметърът на използваните метални сфери не надвишава 130 mm [21]. По данни от [4], плътността на металната мелеща среда при средно твърди руди е  $4650 \text{ kg/m}^3$ , а при по меки рудни или други материали могат да се използват керамични топки (90%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), при което тяхната плътност е приблизително  $2200 \text{ kg/m}^3$ . Трябва да се има предвид, че в процеса на работа, мелещата среда се износва, което се изразява основно в загуба на тегло и нарушаване на повърхността и формата на мелещите тела. Това се отразява както на производителността на мелницата, така и на качеството на изходния продукт. В [26] са дадени примерни разходи за процеса на смилане (обогатяване) на медна руда. За електроенергия са отделени 50%, за мелещи тела около 30%, около 10% за облицовка (лифтери) на мелниците и 10% за труд и други разходи, показани на **фиг. 1.11**.





**Фигура 1.11.** Разходи при процес смилане [26]

Независимо от типа на използвания материал, съществуват няколко важни общи правила, които следва да се контролират във всички случаи.

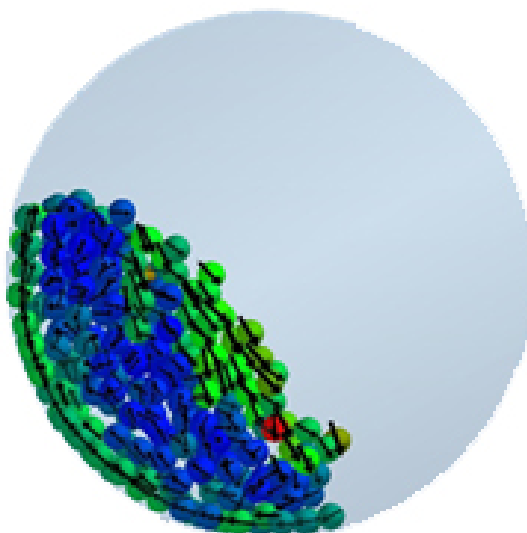
- Мелницата трябва да бъде заредена с достатъчно количество материал, предназначен за смилане, който да покрива мелещата среда [25].
- По отношение на размера на мелещите тела следва винаги да се използва възможно най-малкия размер. Причините за това са на няколко, като на първо място е, че по този начин се постига максимална контактна площ между мелещата средата и смилаемия материал и на второ място, не се създава излишна енергия на смилане, която не само, че не може да се оползотвори, но води до нежелано прегряване на мелницата и износване на мелещата среда. Като недостатък на използването на мелещи тела с по-малък размер може да се посочи по-бавното изпразване на смления материал от мелницата.
- Времето на работния процес трябва да се следи внимателно, за да се избегне нежелано прекомерно смилане. Също така и излишен разход на електроенергия.
- Не трябва да се допуска повишаване на температурата и загряване на мелницата над допустимото. Прегряването може да се избегне чрез намаляване на скоростта на мелницата, което обаче удължава времето и намалява ефективността на процеса. Поради тази причина в конструкцията на някои мелници е предвидена система за охлаждане.

### **1.6. Режи ми на работа на топкови мелници**

Процесът на смилане в топковите мелници може да се разглежда като процес на повишаване на сумарната площ на частиците на смилаемия материал. Това се

осъществява чрез намаляване размера на частиците вследствие на сблъсъка с мелещите тела и последващото раздробяване и стриване на материала. Кинетичната енергия на мелещата среда зависи от скоростта на въртене на мелницата и масата на мелещите тела, като по отношение на скоростта на въртене са възможни три основни режима на работа: каскаден, водопаден, центрофугиране.

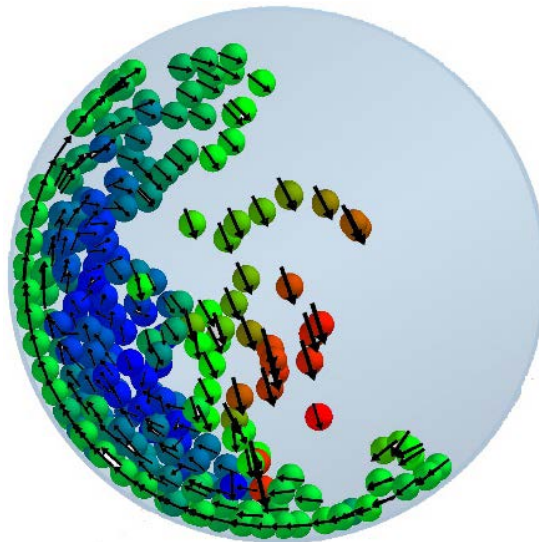
При малка ъглова скорост на барабана на топковата мелница, наличният пълнеж от мелещи тела се премества по посока на въртенето на барабана на мелницата. Мелещите тела не се издигат високо, при тях се извършва приплъзване и стриване и не се отделят от стената на мелницата. Потенциалната и кинетична енергия на мелещата среда имат ниски стойности. Този режим се нарича каскаден режим, показан е на **фиг. 1.12**. Прилага се основно при прътови мелници, също така и в някои топкови мелници при втори и следващи стадии на смилане. Производителността е малка при работата на този каскаден режим. Затова този режим не се използва често [1, 2, 4, 7].



**Фиг. 1.12.** Каскаден режим на работа при топкови мелници

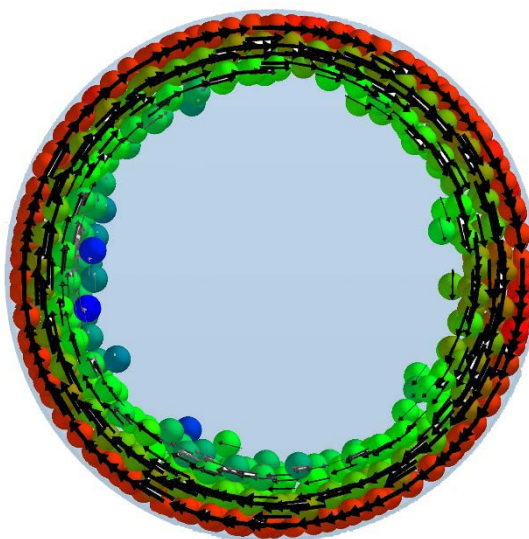
С повишаване на ъгловата скорост на барабана на мелницата, част от мелещите тела, разположени в най-външните слоеве се отделят от барабана и започват да се движат по параболични траектории. Останалите топки работят в каскаден режим. Този режим на движение на смилачата среда се нарича смесен режим [1, 2, 7].

Водопаден режим на смилане е този, при който мелещите тела от всички слоеве (външни и вътрешни), издигайки се заедно с барабана до по-високо, изгубват контакт с барабана. Следствие на това се откъсват и преминават в състояние на „свободен полет“, след което отново се приземяват на дъното. Потенциалната и кинетична енергия на мелещата среда са с по-високи стойности в сравнение с каскадното мелене. Смилането на материала при този режим, известен още като катарактен режим, става главно чрез удар и отчасти чрез смилане. Това е най-разпространеният режим в практиката, показан е на **фиг. 1.13** [1, 2, 4, 7].



**Фиг. 1.13.** Катарактен режими на работа при топкови мелници

Когато ъгловата скорост на мелницата стане толкова голяма, че надмине критичната, центробежната сила действаща на мелещите тела достигне по-голяма стойност от гравитационната сила и за най-вътрешният слой от топки, целият топков пълнеж се разпределя равномерно по периферията на барабана и започва да се движи с него. Този режим, показан на **фиг. 1.14** се нарича режим на махово колело (центрофугиране) [1, 2, 4, 7].



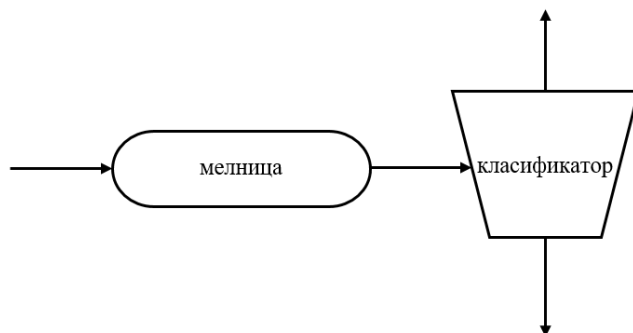
**Фиг. 1.14.** Режим на работа – центрофугиране при топкови мелници

Когато ъгловата скорост на мелницата стане равна или по-голяма от критичната, топките започват да се движат заедно с барабана. Мелницата се намира в режим с над критични обороти. Този режим се характеризира с повишено износване на облицовката на барабана, вследствие на което тя трябва да бъде подменена [1, 2, 7].

Средата на смилане се разделя на два вида, в зависимост от това дали процеса се осъществява при: сухо или мокро смилане. При мокро смилане към материала се

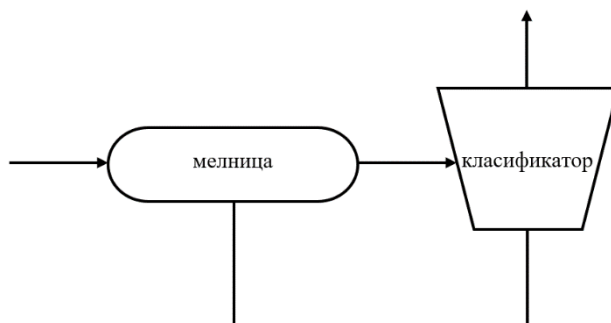
добавят различни течни примеси и добавки, спомагащи процеса, като при това особено важно значение за процеса има вискозитета на цялостното съдържание на мелницата. Известни са също така методи и тестове, целящи установяването зависимостта между повърхностните свойства и мокримостта на частиците на материала [27]. В случаите, когато за смилането на материала е възможно да се използва както сухо, така и мокро смилане, като правило се отдава предпочитание на мокрото [24]. В други случаи обаче, естеството на материала и особеностите на процеса могат да не позволяват смилане в мокра среда. Влиянието на сухата и мокра среда на смилане върху формата и размера на частиците на смления материал е изследвано в [28]. При избора на средата на смилане освен материала, трябва да се обърне внимание и на водопоглъщаемостта на мелещите тела.

За достигане до желаната едрина на изходният продукт, производственият цикъл може да се състои от няколко участъка разделени с т.нар. класификатори, представляващи устройства за сортиране на продукцията. Възможни са различни конфигурации между мелници и класификатори, като най-общо работният процес може да протича в отворен или затворен цикъл на смилане. Процесът в мелницата не се влияе директно от класификатора при работа в отворен цикъл, което схематично е показано на **фиг. 1.15**.



**Фиг. 1.15.** Работа при отворен цикъл

Работата в затворен цикъл се използва с цел постигане на по-висока ефективност на процеса, като в този случай класификаторът сортира материала на изхода на мелницата и връща по-грубия материал за повторно смилане, показан е на **фиг. 1.16**.



**Фиг. 1.16.** Работа при затворен цикъл

Предимство на смилането в затворен цикъл, освен повишената производствена ефективност, е също така и по-високата точност на размера на частиците и тяхното равномерно разпределение в крайния продукт.

Доколкото главната крайна цел на процеса на смилане е редуциране на размера на частиците на смилаемия материал, то това редуциране зависи от следните фактори [4].

- Характеристики на материала, като маса, обем, твърдост, плътност, разпределение на размера на частиците.
- Характеристики на мелещата среда, като маса, плътност, брой и разпределение на мелещите тела.
- Скорост на въртене на мелницата.
- Плътност или вискозитет на суспензията в мелницата при мокро мелене.

### 1.7. Товар и зареждане на мелницата

Съдържанието в мелницата, състоящо се от материала, предназначен за смилане заедно с мелещата среда определя пълнежа или товара на мелницата. Известно е, че както претоварването, така и недозареждането на мелницата водят до намаляване на скоростта на раздробяване на материала, което в крайна сметка намалява производствения капацитет и влошава енергийната ефективност на процеса. Поради тази причина от съществено значение са въпросите, свързани с измерването и контролирането на товара на мелницата по време на процеса [29-31].

Съществуват прости зависимости, изразяващи обемите заемани от материала за мелене и мелещата среда в проценти съответно от обема на мелницата. Следвайки [4], ако с  $V_R$  се означава процента от обема на мелницата, заеман от смилаемия материал, то

$$V_R = \frac{M_R / \rho_R}{V_M} \times 100, \quad (1.1)$$

където  $M_R$  и  $\rho_R$  са съответно масата и плътността материала, а  $V_M$  е обема на мелницата. Аналогично, обемът  $V_B$ , заеман от мелещата среда в проценти от обема на мелницата е

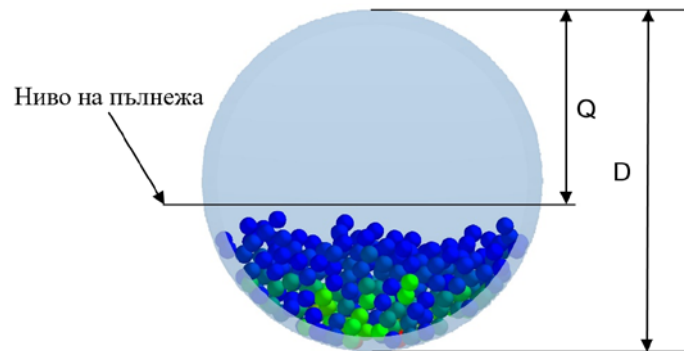
$$V_B = \frac{M_B / \rho_B}{V_M} \times 100, \quad (1.2)$$

където  $M_B$  и  $\rho_B$  са съответно масата и плътността на мелещите тела. Общият обем, заеман от товара може да варира в известни граници в зависимост от типа на мелницата. Като правило, при топковите мелници от преливен тип (**фиг. 1.3 а** – преливен тип) товарът не бива да надвишава 45% от обема на мелницата, а при мелници от диафрагмен тип (**фиг. 1.3 б**) товарът заема около 50% от обема на мелницата.

Известен е един удобен начин за определяне на процента на общия обем  $V$  на товара в зависимост от диаметъра на мелницата и височината на пълнежа. В [32] за множество видове материали е определена статистическата зависимост:

$$V = (1,13 - 1,26Q/D) \times 100, \quad (1.3)$$

където  $D$  е вътрешния диаметър на мелницата, а  $Q$  е разстоянието по вертикала от нивото на пълнежа до вътрешната връхна точка на мелницата, **фиг. 1.17**.



**Фиг. 1.17.** Ниво на пълнеж на топкова мелница

Уравнение (1.3) е удобно за практически цели, но доколкото то представлява една осреднена зависимост, негово използване за определяне на обема на товара в определени случаи може да води до неточни резултати. За преодоляване на този недостатък са предложени по-точни, но същевременно и по-трудни за реализация методи за определяне на обема на товара. При известни размери на мелницата и металните топки съществуват също така и графични методи за определяне на обема на мелещата среда като процент от общия обем на мелницата.

## 1.8. Особенности на мелещата среда

### 1.8.1. Размери на металните топки

Размерът на мелещите тела е важен параметър на работния процес в мелницата, поради което са правени различни изследвания за избор на оптималния размер на металните топки в топковите мелници [33-38]. Като цяло, броят и размерът на топките както и общата маса на мелещата среда зависят от твърдостта и размера на частиците на материала, предназначен за смилане. От значение е също така дали мелещата среда се използва в началото на процеса или се зарежда в мелницата на определен етап от процеса с цел да се подменят износените мелещи тела.

Размера на металните топки при зареждане на мелещата среда в началото на процеса зависи най-вече от максималния размер на частиците на материала, като емпирично е установена следната зависимост [4].

$$d_B = 0,4K\sqrt{F}, \quad (1.4)$$

където  $d_B$  е диаметъра на металната топка в сантиметри,  $K$  е коефициент на смиланост и  $F$  е размера в сантиметри на частиците на смиланеия материал.

Стойността на  $K$  зависи от материала, като обикновено  $K = 37,4$  за твърди руди и  $K = 29,8$  за меки руди, но за конкретните случаи са възможни и други стойности, например  $K = 55$  за различни видове кварц и  $K = 35$  за доломит. Коефициентът на смиланост обединява важни параметри както на материала, предназначен за смилане, така и параметри на мелницата. По отношение на материала тези параметри са:

- Работен индекс;
- Максимален размер на частиците;
- Специфично тегло на материала и плътност на суспензията при мокро мелене.

По отношение на мелницата това са:

- Вътрешен диаметър;
- Скорост на въртене, отнесена към критичната скорост на мелницата.

С отчитането на горните параметри в [4, 32, 38] е посочена следната зависимост за определяне на диаметъра на металните топки:

$$d_B = 25,4 \left( \frac{F_{80}}{k} \right)^{0,5} \left( \frac{SG \times W_i}{100 \times S_c \times (3,281D)^{0,5}} \right)^{0,33}, \quad (1.5)$$

където:

$d_B$  – диаметър на топката в милиметри,

$F_{80}$  – 80% преходен размер на частиците на входния материал в микрони,

$k$  – емпирична константа,

$SG$  – специфично тегло на материала,

$W_i$  – работен индекс на материала в киловатчаса на тон,

$S_c$  – скорост на въртене, отнесена към критичната скорост,

$D$  – вътрешен диаметър на мелницата.

Работният индекс  $W_i$  е важен параметър на смилаемия материал, като в [32, 39] е разработен тест и съответни аналитични зависимости за точно определяне на неговата стойност. Изпълнението на цялостната процедура на теста е трудоемко, изисква допълнително оборудване и квалифициран персонал. Известни са също така и методи за компютърна симулация на теста с цел по-лесно определяне на стойността на работния индекс [40, 41]. Осреднените стойности на  $W_i$  за най-широко разпространените руди и минерали са показани в **таблица 1.3**.

По отношение на константата  $k$ , нейната стойност зависи от типа на мелницата и производствения цикъл на смилане. В **таблица 1.4** са представени данни за стойностите на  $k$ , взети от [31].

Формула, аналогична на (1.5) съществува и за определяне на диаметъра на цилиндричните мелещи тела (сулреби). В случаите, когато при използването на тези

формули се получава диаметър на топката по-малък от 25mm, или диаметър на цилиндричното тяло по-малък от 22mm се допуска увеличаването на получената стойност с около 20%, [23].

**Таблица 1.3.** Стойности на руди и минерали

СРЕДЕН РАБОТЕН ИНДЕКС НА ИЗБРАНИ МИНЕРАЛИ					
(Източник Chem.Eng. Handbook, R.O. Perry & C.H. Chilton, Int Student's ed, McGraw Hill, p 8-11, and SME Mineral Processing Handbook, Weiss (ed), 1985 p 3A-27					
МИНЕРАЛ	Sp.Gr	Bond Work Index	МИНЕРАЛ	Sp.Gr	Bond Work Index
Барит	4,28	6,24	Желязна руда (tachnonite)	3,52	14,87
Базалт	2,89	20,41	Кианит	3,23	18,87
Бауксит	2,38	9,45	Оловна руда	3,44	11,40
Циментов Клинкер	3,09	13,49	Оловно-цинкова руда	3,37	11,35
Хром руда	4,06	9,6	Варовик	2,69	11,61
Въглища	1,63	11,37	Манганова руда	3,74	12,46
Медна руда	3,02	13,13	Никелова руда	3,32	11,88
Диорит	2,78	19,4	Фосфорит	2,66	10,13
Доломит	2,82	11,31	Пиритни руди	3,48	8,9
Фелдспар	2,59	11,67	Пиротин	4,04	9,57
Кремък	2,65	26,16	Кварцит	2,71	12,18
Флуорит	2,98	9,76	Рутил	2,84	12,12
Галенит	5,39	10,19	Сребърна руда	2,72	17,30
Гранат	3,30	12,37	Калаена руда	3,94	10,81
Златна руда	2,86	14,83	Титан	4,23	11,88
Гранит	2,68	14,39	Уран	2,70	17,93
Графит	1,75	45,03	Цинкова руда	3,68	12,42
Желязна руда (hematite)	3,76	12,68	Гипс	2,69	8,16
Желязна руда (specular hematite)	3,29	15,4	Илменит	4,27	13,11
Желязна руда (magnetite)	3,88	10,21			



**Таблица 1.4.** Данни за константа  $k$ 

Тип на мелницата	Сухо/мокро смилане	Цикъл на смилане	$k$
преливен	мокро	отворен	350
преливен	мокро	затворен	350
диафрагмен	мокро	отворен	330
диафрагмен	мокро	затворен	330
диафрагмен	сухо	отворен	335
диафрагмен	сухо	затворен	335

### 1.8.2. Износване на мелещата среда

По време на работния процес в мелницата мелещите тела се износват и намаляват размера си, което се отразява на характеристиките на процеса като цяло. Износването зависи от много фактори, като скорост на въртене и диаметър на мелницата, специфично тегло и работен индекс на смиланемия материал, вътрешната обшивка на мелницата, твърдостта на металните топки, рН-фактора при мокро смилане и пр. Износването на мелещата среда и неговият ефект върху процеса на мелене са изучавани в редица изследвания [42-46]. Обикновено, износването се определя в зависимост от два фактора:

- промяна в размера (диаметъра) на металните топки,
- промяна в масата на металните топки.

Обикновено, износването се измерва в загубата на маса за единица енергия, подадена към мелницата. Така например, износването в килограми за киловат час при мокро и сухо мелене е посочено в [31] съответно като:

$$\text{Мокро мелене} \quad \text{Износване} \quad [kg / kWh] = 0,16(A_i - 0,015)^{0,33},$$

$$\text{Сухо мелене} \quad \text{Износване} \quad [kg / kWh] = 0,023A_i^{0,5},$$

където  $A_i$  е индекс на абразивност на материала, преназначен за смилане. Стойностите на индекса на абразивност за някои материали са показани в **таблица 1.5**.

За поддържане на желаните параметри на процеса на смилане е необходимо износената мелеща среда да бъде подменена. При анализа на различните фактори, допринасящи за износването, в [32, 39] се препоръчва диаметърът на металните топки при подмяна на износената мелеща среда да се определя по формула (1.5). Използват се и опростени варианти на тази формула, които практически дават сходни резултати.

Таблица 1.5. Абразивен индекс на материали

АБРАЗИВЕН ИНДЕКС НА ИЗБРАНИ МИНЕРАЛИ (Източник: Marshal, V.C. (1975) Comminution, Institute of Chemical Engineers)*	
МАТЕРИАЛ	АБРАЗИВЕН ИНДЕКС
Медна руда	0,147
Хром руда	0,120*
Доломит	0,016
Диорит	0,230*
Златна руда	0,200*
Хематит	0,165 (0,0952)*
Варовик	0,032 (0,026)*
Оловно-цинкова руда	0,152*
Магнезит	0,075
Магнетит	0,165 (0,252)*
Манганова руда	0,113*
Никелова руда	0,122*
Кварц	0,183*
Кварцит	0,775 (0,691)*
Таконит	0,624 (0,683)*

### 1.8.3. Плътност на мелещата среда

Ефективността на процеса на мелене зависи от разликите между плътността и твърдостта на мелещата среда и тези на материала, предназначен за смилане, като колкото по-големи са разликите, толкова по-ефективен е процесът. Оттук е ясно, че за даден конкретен материал следва да се използва мелеща среда с необходимата плътност и твърдост. Известна е следната зависимост за определяне на плътността на топковата мелещата среда, която е дадена в [4]:

$$\rho_B = (0,016\rho_M^2 + 20\rho_M)^{0,5} - 0,4\rho_M, \quad (1.6)$$

Където  $\rho_B$  е плътността на мелещите топки, а  $\rho_M$  е плътността на смилаемия материал, измервани в тонове на кубичен метър. По данни от същия източник, в минната индустрия при обработката на относително твърди руди и минерали обикновено се използват топки от лят чугун или кована стомана, като плътността на летия чугун е в границите 4,3-4,8 t/m<sup>3</sup>, а тази на кованата стомана е 4,6-4,8 t/m<sup>3</sup>. За много твърди материали се използват специални сплави с определено съдържание на волфрам и карбид, при което плътността на мелещата среда може да достигне 14,9 t/m<sup>3</sup>. За смилането на по-меки материали подходящо е използването на керамични топки с плътност до 3,6 t/m<sup>3</sup>.

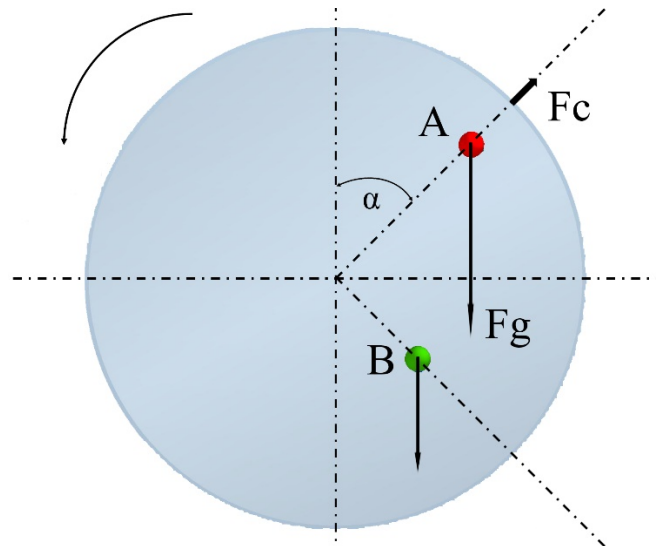
## 1.9. Динамика на движението на товара в мелницата

Движението на мелничното съдържание по време на работния процес има сложен характер, от който пряко зависи както производствения капацитет, така и енергийната ефективност на мелницата. Изследванията, насочени към описанието и характеризирането на динамиката на това движение започват в началото на миналия век, като за целта се използва главно апарата на класическата механика. Първоначално разработените модели на динамиката на процесите в мелницата са опростени, като обикновено не се отчитат силите на триене между частиците на материала помежду им и със стената на мелницата, а така също и ефекта от взаимодействието между различните траектории на отделните компоненти на материала и мелещата среда [47]. В съвременните условия съществуват множество изследвания [48-54], базиращи се както на теоретичните методи за моделиране на движението на мелничното съдържание, така и на постиженията на изчислителната техника и численото симулиране на процеса. Важно място в тази област заемат и експерименталните изследвания, за провеждането на които се използват специално конструирани изпитателни мелници (2D-мелница, мелница с прозрачен корпус и пр.), както и допълнителна специализирана апаратура (фото-детектори, рентгенови лъчи, електронни датчици), позволяващи да се наблюдават и по-точно да се опишат процесите на взаимодействие на мелещата среда и смилаемия материал [30, 55-60].

### 1.9.1. Скорост на въртене на барабана на мелницата

При покачване на оборотите на топковата мелница се увеличава и интензивността на процеса на мелене (смилаене) и съответно производителността на мелницата. Скоростта трябва да бъде пресметната, защото при скорости над определена стойност, съдържанието на мелницата прилепва към стената на мелницата и започва да центрофугира, при което ефекта на смилаене се намалява, консумираната от мелницата електроенергия се повишава. Поради тази причина скоростта, при която мелницата работи с максимална мощност и над която товарът започва да центрофугира се определя като критична скорост [1, 2, 4, 7]. Топковите мелници на практика работят при скорост на въртене под критичната.

Критичната скорост на въртене зависи от диаметъра на мелницата и диаметъра на мелещите тела. На **фиг. 1.18** в позиция **A** е показана изолирана метална топка в процеса на въртене, върху която действат сила на тежестта  $F_g$  и центробежна сила  $F_c$ . Позиция **B** означава центъра на тежестта на целия товар на мелницата, където действието на физическите сили е аналогично на това в позиция **A**, като обаче тук влияние оказват и неизвестните сили на триене между частиците на материала и мелещата среда.



**Фиг. 1.18.** Сили, действащи на мелещите тела.

Стойностите на  $F_g$  и  $F_c$  са съответно:

$$F_g = mg, \quad (1.7)$$

където  $m$  е масата на топката, а  $g$  е земното ускорение,

$$F_c = \frac{mv^2}{(R-r)}, \quad (1.8)$$

където  $R$  е вътрешния радиус на мелницата,  $r$  съответно радиуса на топката, а  $v$  е линейната скорост на въртене по вътрешния диаметър на мелницата.

Радиалната компонента на силата на тежестта е:

$$F_r = F_g \cos \alpha, \quad (1.9)$$

а стойността на  $v$  в m/s може да бъде изразена като:

$$v = 2\pi(R-r)\frac{n}{60}, \quad (1.10)$$

където  $n$  е честотата на въртене в rpm (обороти за минута). При условие, че стойността на центробежната сила е по-голяма от максималната стойност на радиалната компонента на силата на тежестта, то топката от позиция А ще центрофугира по вътрешната повърхност на мелницата. Тъй като  $F_r$  достига максималната си стойност при  $F_r = F_g$ , т.е. при  $\alpha = 0$  и съответно  $\cos \alpha = 1$ , то от равенството на двете сили:

$$F_g = F_c, \quad (1.11)$$

се определя критичната скорост на въртене:

$$v_c = \sqrt{(R-r)g}. \quad (1.12)$$

От (1.10) и (1.12) се определя съответната критична честота на въртене:

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{(D-d)}}, \quad (1.13)$$

където  $D$  е вътрешния диаметър на мелницата и  $d$  – диаметъра на топката.

В процеса на работа между мелещата среда и вътрешната обшивка на мелницата действат сили на триене, които освен от естеството на материалите зависят и от работната и критична скорост на въртене. Коефициентът на триене се определя като:

$$\mu = \left( \frac{n_c}{n} \right)^2, \quad (1.14)$$

където  $n$  е работната честота на въртене.

Изведените зависимости за скоростта и честотата на въртене е насочена към съдържанието на мелницата, която е в непосредствена близост до вътрешната стена на мелницата. В [1, 4] е разгледано движението на частиците от вътрешните слоеве на товара, което е показано схематично на **фиг. 1.19**. За този случай честотата на въртене на частица, която се намира на разстояние  $R_p$  от центъра е определена със зависимостта:

$$n_p = \frac{v_N R(R_p - \zeta R_i)}{R_p (R - \zeta R_i)}, \quad (1.15)$$

където:

$R_p$  е разстоянието от центъра до частица от активния пласт на товара,  $R_i$  е разстоянието от центъра до активния пласт;

$v_N = v_R/v_T$  е нормализираната тангенциална скорост, при която  $v_R$  и  $v_T$  са съответно тангенциалните скорости на частицата и на вътрешната стена на мелницата;

$\zeta = 0,4532 \log(1 - J_B)$  е параметър, зависещ от относителното обемно запълване на мелницата  $J_B < 1$ .



**Фиг. 1.19.** Движение на частиците от вътрешните слоеве на товара в мелница

Графически, зависимостта на  $\zeta$  от  $J_B$  е показана в [4], откъдето се вижда, че с нарастването на  $J_B$  стойността на  $\zeta$  става пренебрежимо малка и честотата на въртене на частицата се доближава до тази на мелницата.

### 1.9.2. Линия и ъгъл на откоса

В процеса на въртене, най-високата и най-ниска пресечни точки на товара с вътрешната страна на мелницата се означават съответно като рамо и пета на товара (фиг.1.19), а линията, която ги съединява се нарича линия на откоса. Ъгълът на линията на откоса може да се определи като се използват силата на тежестта и центробежната сила, действащи на металната топка в рамото на товара. От фиг. 1.18 се вижда, че при равновесно състояние на топката в позиция А центробежната сила е равна на радиалната компонента на силата на тежестта, т.е.:

$$F_c = F_g \cos \alpha. \quad (1.16)$$

Като се използват изразите (1.7) и (1.8) за  $F_g$  и  $F_c$ , от (1.16) се получава:

$$\cos \alpha = \frac{v^2}{(R-r)g}, \quad (1.17)$$

където  $v$  е линейната скорост на въртене в  $m/s$ . Ако се използва честотата на въртене  $n$  в обороти за минута ( $rpm$ ), от (1.10) и (1.17) се получава:

$$\cos \alpha = \frac{4\pi^2 (R-r)n^2}{g60^2}. \quad (1.18)$$

От (1.18) непосредствено се вижда, че наклонът на линията на откоса расте с увеличаване на радиуса на мелницата и честотата на въртене.

Описаният подход за определяне на ъгъла на откоса се използва от редица автори [4, 49, 61] като в [5] се отбелязва обаче, че такъв подход е реалистичен при пониски скорости на въртене на мелницата. При скорости над 80% от критичната скорост правата линия, съединяваща рамото и петата на товара фактически не описва точно повърхността на движещото се мелнично съдържание, поради което определянето на ъгъла на откоса по този начин не дава точни резултати.

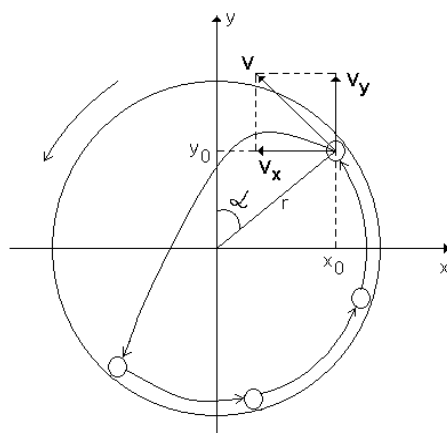
### 1.9.3. Траектория на мелещи тела

Анализа на движението на мелещите тела, както и на товара в мелницата като цяло е от съществено значение за оценката на важни параметри на производствения процес като:

- Капацитет на мелницата и размер на частиците на смления материал;
- Разпределение на честотата на ударите между мелещите тела и материала и енергийната ефективност;
- Износване на мелещите тела и вътрешната обшивка на мелницата.

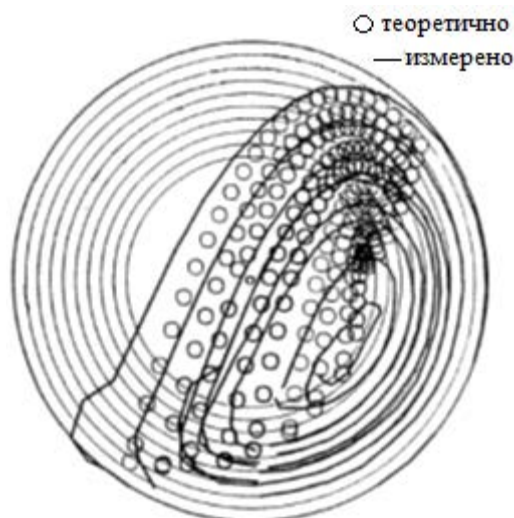
Методите, съществуващи за изследване на движението на съдържанието на мелниците, най-общо може да се раздели на: теоретични [49, 51, 54], експериментални [36, 37, 52, 56, 57] и симулационни [62-64]. Като правило се използват методи и подходи от всяка една от тези групи, а получените резултати взаимно се сравняват и анализират [31, 43, 53, 55, 57]. Разработени са модели, описващи движението както на отделно сферично мелещо тяло [61], така и на движението на целият товар от сферични мелещи тела [65].

Траекторията на движение на сферично метално тяло в най-външния слой на товара при въртеливото движение на мелницата е показано схематично на **фиг. 1.20**, а аналитично тя се описва със стойностите на координатите на топката  $x(t)$  и  $y(t)$  във всеки момент от времето  $t$  [61].



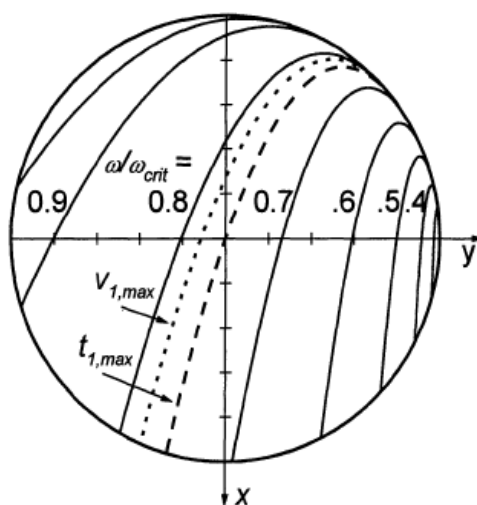
**Фиг. 1.20.** Траектория на движение на сферично метално тяло

По време на работа на мелницата металните топки от вътрешните слоеве на товара изминават подобна траектория, но практически не достигат до стената на мелницата, а се движат във вътрешното пространство. При това техните траектории се разполагат под траекторията на топките от най-външния слой, доколкото линейната скорост в най-външния слой е най-висока. Теоретически определените траектории на мелещите тела в топковите мелници като цяло се потвърждават от провежданите практически експерименти и симулационни резултати. Експерименталните изследвания позволяват също така да се наблюдават и установят и нови явления във формата и движението на товара в мелницата. Диаграмата на **фиг. 1.21** е взета от [71], където са сравнени резултатите от теоретически и експериментални изследвания на движението на топките в различните слоеве на товара в мелницата. Теоретично моделираните траектории са показани с окръжности, а измерените са описани с плътна линия. Разликите в траекториите са най-силно изразени в петата на товара, като тези разлики се обясняват с направените допускания и опростявания при теоретичното описание. За провеждането на експеримента е използвана специална лабораторна мелница, изработена от акрилна смола, а експерименталните траектории са заснети с помощта на специално оборудване с рентгеново лъчение.



**Фиг. 1.21.** Сравнителни резултати от теоретични и експериментални изследвания [71]

В съществуващата литература са изследвани и описани също и зависимостите на траекториите на движение от скоростта на въртене на мелницата и консумираната мощност, обема на товара, сух или мокър режим на смилане и др. [47, 54, 65, 66]. На **фиг. 1.22** са показани резултатите от [54], описващи траекториите на движение на мелещите тела за различни стойности на относителната честота на въртене на мелницата, означена като  $w/w_{crit}$ .



**Фиг. 1.22.** Траектории на движение на мелещи тела при различни стойности на относителната честота на въртене на мелницата

Двете траектории, отличаващи се с максимално време на полета и максимална скорост при достигане на стената на мелницата са означени съответно с  $t_{1,max}$  и  $v_{1,max}$ . Тъй като кинетичната енергия на мелещото тяло при удара със смилаемия материал е  $E = mv^2/2$ , то максимална стойност на енергията при удара се достига при максималната скорост  $v_{1,max}$ . По такъв начин, от графиката на фиг. 1.21 следва, че най-добър ефект на раздробяване и смилане на по-твърди материали се постига при въртене на мелницата със скорост 75-80% от критичната скорост.



#### *1.9.4. Движение на товара в мелницата*

От значение за ефективността на процеса на мелене са позицията, формата и динамиката на движение на товара като цяло и в частност на отделни негови области по време на въртеливото движение на мелницата.

За целите на моделирането и изследването на движението на мелничното съдържание са разработени множество симулационни методи [43, 62-64, 71-75], които в основата си използват известния метод на дискретните елементи [76]. Методът се използва за числено моделиране на различни физически системи, в които множество твърди тела динамично загубват контакт или формират нови контакти помежду си. Приложението на метода на дискретните елементи конкретно в областта на топковите мелници се среща в два варианта – двуизмерен или 2D методи [31, 64, 65] и триизмерен или 3D методи [64, 72].

Експерименталните изследвания с промишлени или лабораторни топкови мелници също представляват важен елемент в цялостния анализ на движението на мелничното съдържание. Доколкото процесите във вътрешността на мелницата са недостъпни за пряко измерване и наблюдение, те от една страна спомагат за установяването на нови факти и явления, а от друга, дават възможност резултатите, получени по теоретичен път или чрез числено моделиране да бъдат допълнени, уточнени или коригирани. Редица публикации описват специализирано експериментално оборудване и резултатите от проведените тестове [29, 55-59].

#### *1.9.5. Влияние на формата на мелещите тела*

Влиянието на формата на мелещите тела върху производствения капацитет и ефективността на процеса на мелене са значително по-слабо изследвани в сравнение с влиянието на другите параметри на мелещата среда (тегло, размер, плътност) и параметри на работния процес (мощност на мелницата, скорост на въртене, сухо или мокро смилане и др.). В публикуваните изследвания по тези въпроси [67-71] се сравняват основно три типа мелещи тела по отношение на тяхната форма: сферични топки, цилиндрични тела със заоблени краища (цилпелс) и износени сферични тела. В [6, 23] са представени данни за свойствата и размерите на най-често използваните в практиката цилиндрични мелещи тела, при които дължината и диаметърът имат равни стойности. По отношение на скоростта на раздробяване в [67] се посочва, че цилиндричните тела дават по добър резултат при еднакви условия на сравнение със сферични топки. В [68, 69] са изследвани зависимостите на позицията на рамото и петата на товара, а също така и на мощността на мелницата за всеки от трите типа мелещи тела. Установено е, че максималната мощност на мелницата се достига при различни скорости за трите изследвани форми. В резултат от лабораторни тестове в [70] е направен извода, че в етапа на по-грубото смилане цилиндричните тела дават малко по-добри резултати по отношение на размерите на смлените частици, докато в етапа на финото смилане сферичните топки и цилиндричните тела дават практически еднакви резултати.

В **таблица 1.6** и **таблица 1.7** са показани данни съответно на цилиндрични и сферични мелещи тела, представени от [23].

**Таблица 1.6.** Данни за цилпебс

<b>Цилпебс (плътност: 7,65 kg/dm<sup>3</sup>)</b>				
<b>размери mm</b>	<b>тегло g</b>	<b>площ cm<sup>2</sup></b>	<b>повърхностна площ cm<sup>2</sup>/g</b>	<b>обемна плътност t/m<sup>3</sup></b>
54 x 54	880.0	137.4	0.15	4.9
45 x 45	560.0	95.4	0.17	4.9
40 x 40	379.0	75.4	0.20	4.9
35 x 35	245.0	57.7	0.24	4.9
32 x 32	190.0	48.3	0.25	4.9
28 x 28	128.0	37.0	0.28	4.9
24 x 24	82.5	27.0	0.33	4.9
22 x 22	62.0	22.8	0.37	4.9
20 x 20	45.0	19.0	0.40	4.9
16 x 16	23.5	12.0	0.51	4.9
12 x 12	11.1	6.8	0.55	4.9
10 x 10	6.3	4.7	0.75	4.9
8 x 8	3.0	3.0	1.00	4.9

**Таблица 1.7.** Данни за сферични мелещи тела

<b>Сферични мелещи тела (плътност: 7,85 kg/dm<sup>3</sup>)</b>				
<b>размери mm Ø</b>	<b>тегло g</b>	<b>площ cm<sup>2</sup></b>	<b>повърхностна площ cm<sup>2</sup>/g</b>	<b>обемна плътност t/m<sup>3</sup></b>
50	510.0	79.0	0.15	4.5
45	372.0	63.6	0.17	4.5
40	264.0	50.0	0.19	4.5
35	175.0	38.5	0.22	4.5
30	112.0	28.0	0.25	4.5
25	65.0	20.0	0.31	4.5
20	33.0	12.5	0.38	4.5
15	13.0	7.0	0.54	4.5
10	4.5	3.1	0.69	4.5

От сравнението на данните за всички показани размери може непосредствено да се направи извода, че сферичните тела, които са с по-голяма плътност от цилиндричните образуват мелеща среда, която като цяло има с 9% по-малка плътност от тази на цилиндричните, измерена в тонове на кубичен метър.

Най-общо по отношение на формата на мелещите тела може да се отбележи, че различната форма определя различния повърхностен, линеен и точков контакт, който те осъществяват помежду си и със смилаемия материал. Също така различната форма води до различни съотношения между повърхност, обем и тегло на мелещите тела. Тези различия в една или друга степен оказват своето влияние върху процеса на смилане като цяло.

В [21] са посочени два патента от световната практика, издадени за мелещи тела със съществено по-различна форма. Единият патент е издаден през 1927 г. в Германия и се отнася за мелещо тяло с форма на правилен тетраедър с плоски стени и слабо заоблени ръбове. Това тяло се счита за по-добро от сферата, тъй като позволява по-добро запълване на работното пространство в мелницата. Недостатък е трудното му производство поради което не е получило разпространение и не са известни данни за промишленото му приложение. Вторият патент е издаден в Русия през 1985 г. и се отнася за мелещо тяло с форма на тетраедър със заоблени ръбове и върхове (tetrahedron of Reuleaux). Този тип тяло позволява по-висока плътност на мелещата среда, но отново не е получило разпространение поради технологични трудности по отношение на неговото производство.

Авторите на [21] предлагат нова форма на мелещото тяло, определена като “сферичен тетраедър”, **фиг. 1.23**. За разлика от посочените два патента, тази форма отговаря на технологичните изисквания за масово производство посредством горещо щанцоване. За изследователски цели са произведени около 1000 kg. мелещи тела с такава форма, като са проведени експерименти при мелене на медна руда с максимален размер на частиците на материала до 16 mm. За сравнение, при равни технологични и конструктивни условия, са проведени и експерименти със сферични мелещи тела с диаметър 80 mm. Резултатите от експериментите показват, че мелещите тела с форма на сферичен тетраедър позволяват по-добро смилане до размер 0,08 mm на частиците в смления материал и повишават производствената ефективност на мелницата.



**Фиг.1.23.** Мелещо тяло с форма на сферичен тетраедър

Актуалността на проблемите, свързани с определянето на оптимална форма на мелещите тела произтича от потенциалните възможности за постигане на по-добри параметри на смления продукт, повишаване на производствения капацитет и енергийната ефективност на мелницата. Доколкото работата на топковите мелници в промишлени условия се отличава с висока консумация на енергия, то повишаването на производствената и енергийна ефективност дори и с малък процент води до съществено подобряване на икономическите показатели на процеса като цяло.

### 1.10. Производствен капацитет на мелницата

В промишлени условия производственият капацитет на топковите мелници се определя в тонове произведена продукция за час. Той се определя от следните параметри [32, 39].

- Размери на мелницата – дължина и диаметър;
- Тип на мелницата – преливен или диафрагмен;
- Скорост на въртене;
- Обем на товара;
- Размери на частиците на входния материал и на изходния продукт;
- Работен индекс на материала;
- Мощност на вала на мелницата;
- Плътност на мелещите тела.

В цитираните публикации е разгледано влиянието на всеки един от тези параметри, като производственият капацитет  $Q$  в тона за час се определя като:

$$Q = \frac{P_M}{E} [t/h], \quad (1.19)$$

където  $P_M$  е мощността на вала на мелницата в киловати, а  $E$  е енергията в киловатчаса за тон. Стойностите на  $P_M$  при сухо и мокро смилане съответно са определени в [32, 39] както следва:

- В режим на сухо смилане мощността на мелницата се дава с израза:

$$P_M = 7,33V_B S_C (1 - 0,937V_B) \rho_b L D^{2,3} \left( 1 - \frac{0,1}{2^{9-10S_C}} \right), \quad (1.20)$$

където:

$V_B$  – обем на мелещата среда, отнесен към обема на мелницата;

$S_C$  – скорост на въртене, отнесена към критичната скорост;

$\rho_b$  – плътност на мелещите тела;

$L$  – дължина на мелницата в метри;

$D$  – диаметър на мелницата в метри.

- В режим на мокро смилане, мощността на мелницата, отнесена към общата маса на мелещата среда се определя в киловати за тон като:

$$\frac{P_M}{M_B} = 15,6D^{0,3} S_C (1 - 0,937V_B) \left( 1 - \frac{0,1}{2^{9-10S_C}} \right). \quad (1.21)$$

В (1.21) общата маса  $M_B$  на мелещата среда е:

$$M_B = \frac{\pi D^2}{4} V_B L \rho_b (1 - \varphi), \quad (1.22)$$

където  $\varphi$  е шупливостта на субстанцията в дъното на мелницата. Стойността на  $\varphi$  обикновено е в границите 0,35–0,4. Изразите (1.20) и (1.21) са получени в резултат от емпирични изследвания, като са известни и техни модификации в зависимост от размерите на мелницата.

Изразът за енергията в (1.19) се определя като:

$$E = W_i \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right), \quad (1.23)$$

където:

$W_i$  – работен индекс на материала;

$P_{80}$  – 80 % преходен размер на частиците на смления продукт;

$F_{80}$  – 80% преходен размер на частиците на входния материал.

Осреднени стойности на работния индекс  $W_i$  за някои видове материали бяха показани в **таблица 1.3**. В зависимост от режима на работа на мелницата мощността  $P_M$  се определя от (1.20) или (1.21) съответно, а енергията  $E$  се изчислява от (1.23). С така намерените стойности, производственият капацитет на мелницата може да бъде определен от отношението (1.19).

### 1.11. Зависимост на производствения капацитет от размера на мелницата

С цел по-точно изчисляване на производствения капацитет на топковите мелници, в [31] са разгледани два случая в зависимост от размера на мелницата.

1. За мелници с диаметър по-малък от 3,81 m, производственият капацитет се определя от израза:

$$Q = \frac{6,13D^{3,5} \left( \frac{L}{D} \right) \rho_b (V_B - 0,937V_B^2) \left( S_C - \frac{0,1S_C}{2^{9-10S_C}} \right)}{C_F W_{i,TEST} 10 \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)} [t/h]. \quad (1.24)$$

2. За мелници с диаметър по-голям от 3,81 метра, производственият капацитет се определя от израза

$$Q = \frac{8,01D^{3,3} \left( \frac{L}{D} \right) \rho_b (V_B - 0,937V_B^2) \left( S_C - \frac{0,1S_C}{2^{9-10S_C}} \right)}{C_F W_{i,TEST} 10 \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)} [t/h]. \quad (1.25)$$

Смисълът на означенията в горните два израза е същият, както и в уравнение 1.19, като тук допълнително се явява коефициентът  $C_F$ , представляващ комбиниран корегиращ фактор. Той включва всички корекции, които са необходими за определянето на  $W_i$ , като тук се отчитат:

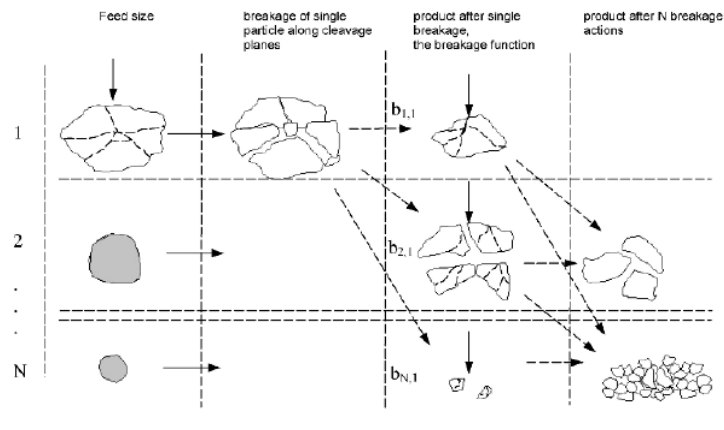
- Мокро или сухо смилане;
- Мокро смилане в отворен контур и мокро смилане в затворен контур;
- Отклонение в размера на частиците на материала;

Според [4] някои автори препоръчват корегиращ фактор 1,3 при всички случаи на определяне на производствения капацитет;

## 1.12. Моделиране на работния процес

Както беше отбелязано, производствения процес в топковите мелници може да се осъществява в един или няколко работни цикъла, които могат да са от отворен или затворен тип, като всеки от тях е възможно да включва няколко различни устройства, като мелници, класификатори, транспортни линии и др. Поради тази причина моделирането на цялостния процес обхваща съставянето на съответни модели на отделните производствени участъци и тяхното обединяване в общ модел на процеса. При всички случаи от най-важно значение е моделирането на процесите в мелницата и тези в различните видове класификатори.

Процесът на раздробяване се състои от циклично прилагане на механични сили на удар и триене върху частиците на материала, в резултат от което на всеки цикъл те намаляват своите размери. Моделирането и оптимизирането на този процес са от съществено значение за производителността и ефективността на мелницата [4, 6, 77-81]. Схематична илюстрация на процеса е направена в [4], която е показана на **фиг.1.24**.



**Фиг.1.24.** Модел на процеса раздробяване

В най-лявата колона от фигурата е показано разпределението на размерите и съответно частиците на входящия материал, попадащи в различните размерни интервали. За всяка частица прилагането на механична сила е показано с плътни стрелки, а с пунктирани стрелки е посочено преминаването на раздробените части в същия или следващите интервални размери. Четвъртата колона съдържа продуктите, които се получават във всеки размерен интервал след  $n$  на брой намалявания на размера. При раздробяването, масата на материала от размерен интервал 1 се разпределя в следващите размерни интервали. В определен момент от процеса, размерен интервал 1 ще изчезне, тъй като размерите на частиците са намалени и те вече се отнасят към по-малките размерни интервали. При този процес обаче общата маса на материала се запазва.

За идентифициране на частиците от различните размерни интервали се използват параметри на разпределение на раздробяването  $b_{ij}$  или т.н. функция на раздробяването. Параметърът  $b_{ij}$  представлява тегловната част от материала в размерен интервал  $i$ , която се е получила в резултат от раздробяването в размерен интервал  $j$ , като  $N \geq i \geq j \geq 1$ . Функцията на раздробяването е показана в третата колона на схемата от **фиг. 1.24**.

Установено е, че раздробяването на материала не се осъществява равномерно както по отношение на частиците в даден размерен интервал, така и по отношение на различните размерни интервали. При това вероятностите, с които се извършва процеса на раздробяване в различните размерни интервали са различни. Тези вероятности се оценяват с т.н. функция на избора [31] или специфична скорост на раздробяване  $S_i$  за всеки размерен интервал [82].

Параметрите на разпределение на раздробяването и специфичните скорости на раздробяване представляват основните фактори при съставянето на различните математически модели на процеса.

Съгласно [31] съществуват най-общо три подхода и съответно три типа модели, които са получили широко разпространение при моделирането на процесите на раздробяване на материалите:

1. Матричен модел;
2. Кинетичен модел;
3. Енергиен модел.

Общият принцип при разработването на даден модел е установяването на материален или енергиен баланс на компонентите, участващи в процеса. В общ вид уравненията на материалния и енергийния баланс в мелницата имат следния вид.

Уравнение на материалния баланс:

$$\begin{bmatrix} \text{Зареден} \text{ _} \text{нераздробен} \\ \text{материал} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Смлян} \\ \text{материал} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Общо} \text{ _} \text{количество} \\ \text{изходен} \text{ _} \text{продукт} \end{bmatrix}$$

Уравнение на енергийния баланс:

$$\begin{bmatrix} \text{Консумирана} \\ \text{енергия} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Енергия} \text{ _} \text{за} \\ \text{раздробяване} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Енергийни} \text{ _} \text{загуби} : \\ \text{загряване, шум} \text{ _} \text{и} \text{ _} \text{др.} \end{bmatrix}$$

Основните допускания и предположения при моделирането на процеса са:

1. Предполага се, че съдържанието на мелницата е идеално размесено в радиално направление, т.н. модел с идеално размесен товар;
2. Счита се, че едновременно с процесите на раздробяване и смилане не се осъществява процес на агломерация на частиците на материала.

От изброените три типа модели, матричният модел се използва в случаите, когато процесът на редуциране на размерите на частиците се разглежда преимуществено като дискретен процес. Всяка стъпка от един такъв процес включва цикъла “селекция-раздробяване-класификация”. В множество разработки, като [82] и цитираната там литература, намаляването на размера на частиците се третира като непрекъснат във времето процес, като разработените в този случай модели включват времевите характеристики на процеса. От този тип са кинетичните и енергийни модели.

### 1.13. Заключение

От направения литературен обзор може да се заключи, че са разгледани изследвания в областта на топковите мелници, засягащи факторите, влияещи на процесите надробяване и смилане на различни видове материали. Обърнато е внимание на първичните и вторични процеси, като са разгледани машини за надробяване. Представени са основните видове мелници, както и техният метод на зареждане и изпразване. Обърнато е внимание разтоварването им. Описана е вътрешността на топковите мелници, като са коментирани съществуващи патенти на различни форми лифтери и ползата от тяхната форма, видовете режими на работа на топкови мелници, скоростта на въртене и др.



## 1.14. Основна цел и задачи на дисертационния труд

В предоставения дисертационен труд се разглеждат проблеми, свързани с движение и взаимодействие между тела при смилателни процеси, където формата и размерите на телата се променят. Поставената цел в този труд е да се изследват възможностите за реализация на качествени и енергийно ефективни смилателни процеси посредством модерни изследователски методи и иновативни производствени средства.

Отчитайки извършения анализ и поставената цел са формулирани следните задачи:

1. Да се анализират различните методи и средства за раздробяване, смилане и обогатяване на природни материали.
2. Да се предложат подходи за теоретично изследване на различни методи и средства за реализация на смилателни процеси.
3. Да се обоснове ползването на специализиран софтуер за моделиране на движението и взаимодействието на множество тела в лабораторна среда.
4. Да се проведат експерименти за формата, размерите и движението на мелещи тела и мелещи среди.
5. Да се определят методики за изследване на състава на продуктите, получени чрез смилане, както и параметрите на производствените средства.
6. Да се предложат модули с иновативна форма за повишаване качеството и енергийната ефективност на разглежданите процеси.

## Глава 2

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОБОРУДВАНЕ

Смилането на рудни и нерудни изкопаеми е скъп и сложен процес. За изследвания в практиката е необходимо да се прекъсне производственият цикъл на предприятията, работещи по план и стриктно спазващи график и договори с други фирми.

Поради тази причина е нецелесъобразно да се прекъсва производствения процес и да се правят изследвания със съществуващото оборудване в практиката.

Това налага използването на експериментално оборудване, методи и средства за изследване на работния процес на мелниците, предвиждания и контрол на изходния продукт в едно производство.

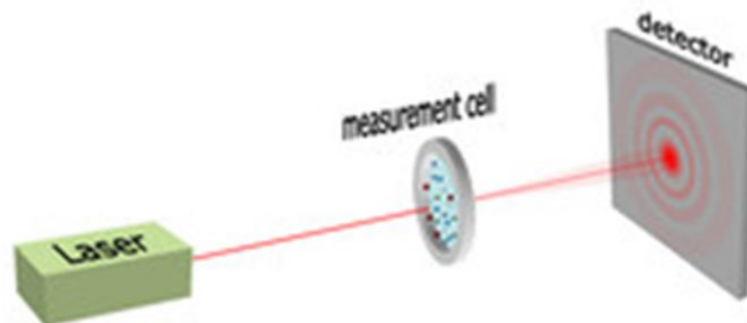
За тази цел е разгледано оборудване и софтуер, които имат за цел да подпомогнат качеството, енергийната ефективност, оптимизацията и нежелани ремонти при процеса като цяло.

Разгледаните уреди са:

- Лазерен нано грануломер на фирма Fritsch, модел Analysette 22 NanoTec plus;
- Термална инфрачервена камера на фирма FLIR модел P640;
- 3D скенер за дигитализиране на обекти на Creaform, модел HandyScan VIU Scan;
- Софтуер, работещ по метода на дискретните елементи – EDEM Software.

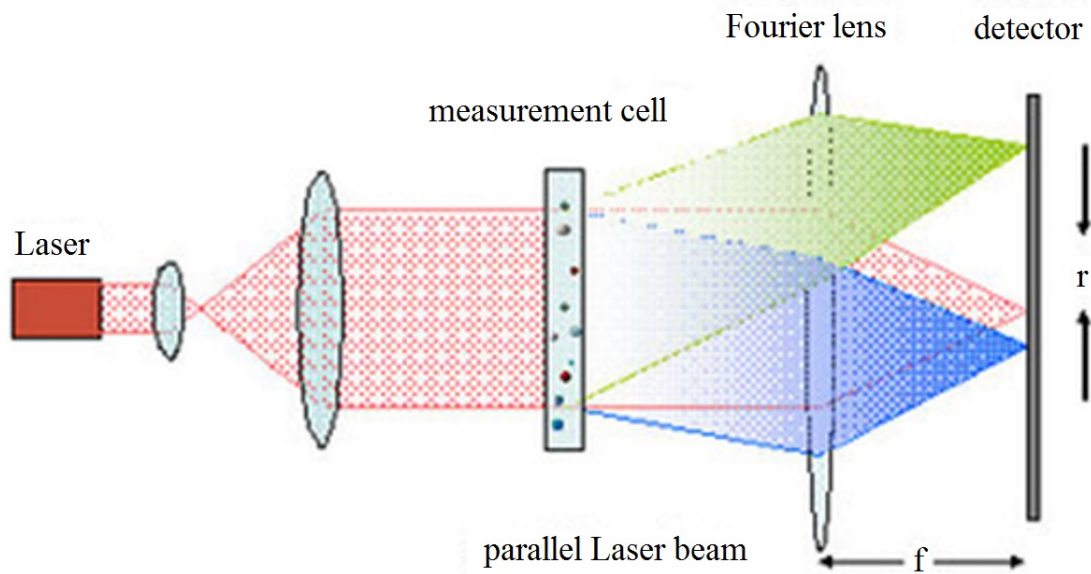
### 2.1. Метод на лазерната дифракция

Метода на лазерната дифракция се основава на сравнително прост принцип [81, 82]. Когато изследваната частица е изложена на лазерния лъч се появява светлинна дифракция, в резултат на което се появява пръстеновидна форма зад частицата. Пръстеновидната форма се улавя от специален детектор (Фиг.2.1). Измерването на разпределението на интензитета се използва, за да се изчисли размера на частиците, показан като система от множество концентрични кръгове.



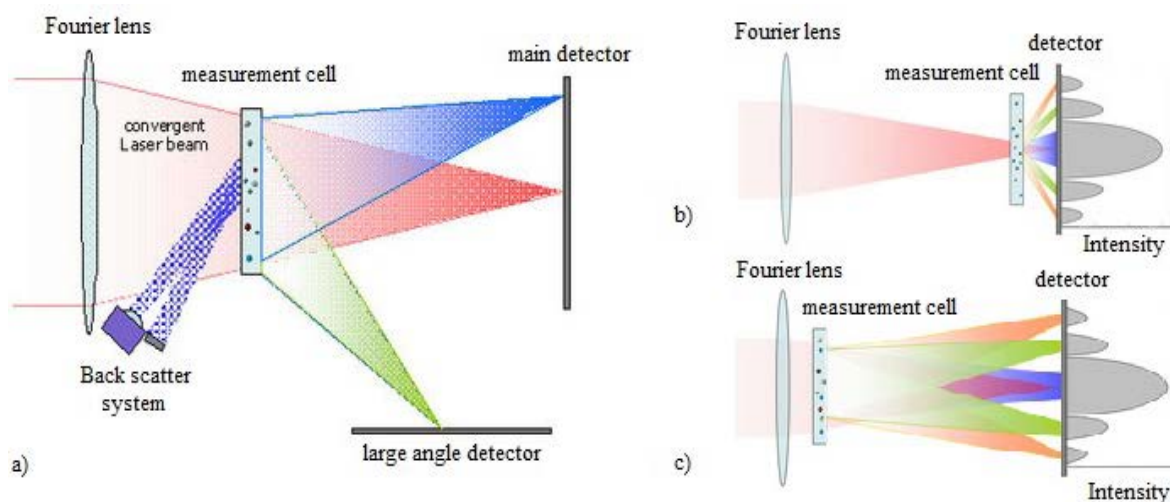
Фиг.2.1. Схема на лазерно измерващо устройство [82]

Конвенционална конструкция генерира достатъчно широк лазерен лъч, който преминава през измервателна клетка с частици за измерване, като в края се намират лещи на Фурие и детектор. (Фиг. 2.2). С тази позиция фокусното разстояние на лещите е в състояние да измерва големи и малки частици. Това регулиране трябва да се осъществява изключително точно, защото по време на измерването на по-големите частици, ъглите са много малки и въздействието на лещите на Фурие става много високо. Недостатъкът на този вид измерване е голямото светлинно разсейване при големи ъгли, необходими за измерване на много малки частици.



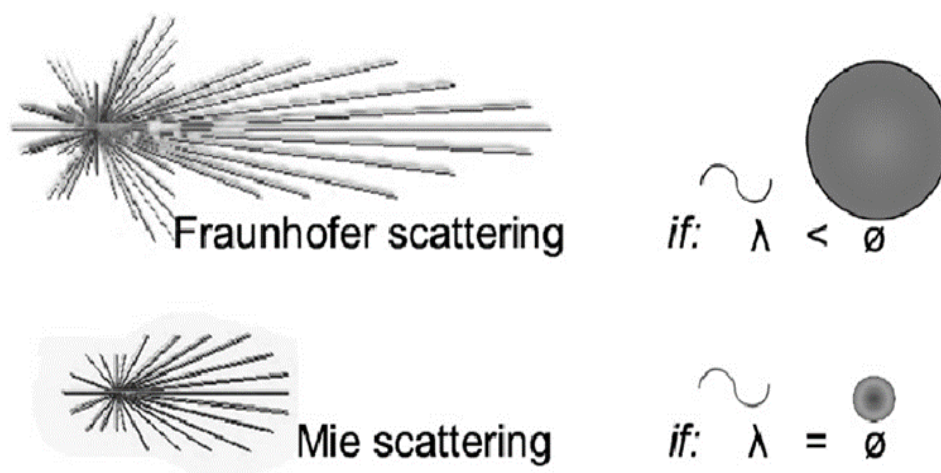
Фиг. 2.2. Схема на конвенционален конструкция на повечето лазерни грануломери [82]

От FRITSCHE GmbH преди повече от две десетилетия представят „обърната“ конструкция на лещите на Фурие, използвайки ги като алтернатива за нова конвенционална конструкция, подобрявайки определянето на диаметрите на частиците (фиг. 2.3). Според фирмата, те са първите използвали „обърнати“ лещи на Фурие за определяне размера на частиците, като първият модел е Analysette 22, показан на фиг. 2.3 – а. При този уред, лещите на Фурие се намират преди клетката за измерване и не се пресичат паралелно, а с конвергентен лазерен лъч, за разлика от другите използвани методи. По този начин светлината се излъчва без допълнителни оптични елементи и е насочена към детектора. Разстоянието на появилите се пръстени се използва за изчисление на размера на частиците: малките частици причиняват широко разположени пръстени (фиг. 2.3 – б), а големите частици произвеждат по-близо разположени пръстени (фиг. 2.3 – в). Постигането на по-малко разсейване на светлина под голям ъгъл (измерване на малките частици) води до по-висока точност на измерването. Основният недостатък на тази конструкция е, че всяко измерване се осъществява в целия обхват на измерване на машината, което увеличава разходите. оставянето на измервателния елемент близо до детектора, може да се използва за измерване на обратно разсеяна светлина. Това е важно за измерване на много малки частици, под  $0,1\mu\text{m}$ . [81, 82].



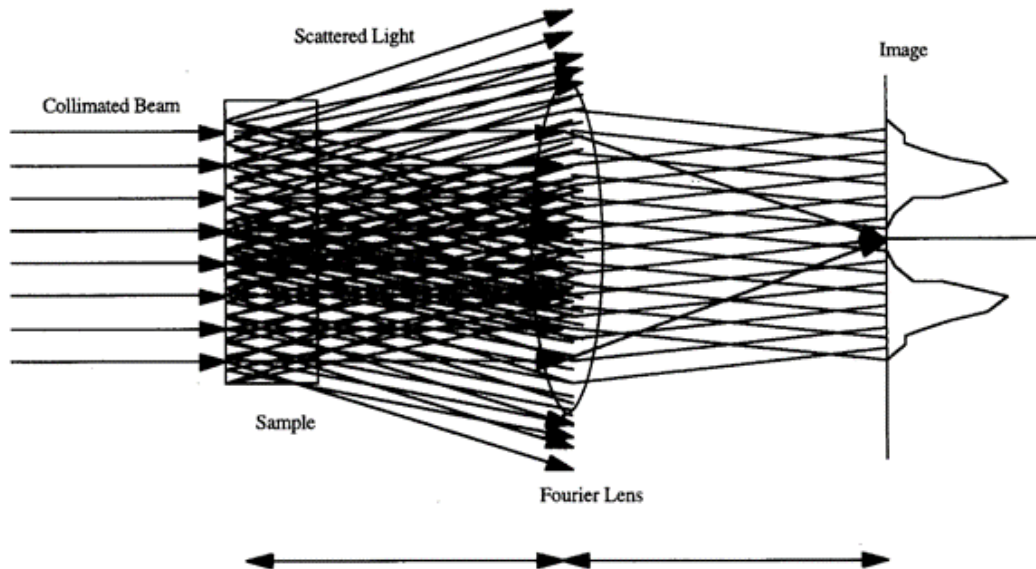
**Фиг. 2.3.** ANALYSETTE 22 с обърнати лещи на Фурие: а – основен вид, б – позиция на измервателната клетка за малки частици, в – позиция на клетката за големи частици [81, 82]

Най-използваните методи на лазерна дифракция са тези на Мие и Фраунхофер. Методът на Мие е формулиран още през 1908 г. и описва разсейване на плоска вълна от светлина, падаща върху сферична частица (фиг. 2.4) и може да се използва за прогнозиране на електромагнитното поле в пространството [81].



**Фиг. 2.4.** Мие и Фраунхофер за разсейване като функция на размера на съотношението на частиците към дължината на вълната [81]

Разсейването на Фраунхофер се характеризира със силна посока на разсейване и относително слабо обратно разсейване (фиг. 2.5). При Мие, съотношението разсейване на светлина към обратно разсеяна светлина е много по-малко в сравнение с това на Фраунхофер [81, 83].



Фиг. 2.5. Дифракция на Фраунхофер

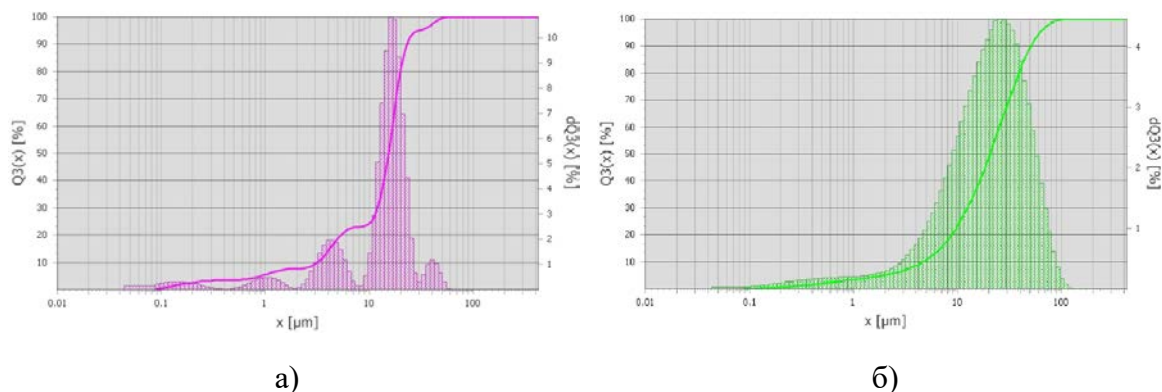
Различните типове материали изискват различна настройка на параметрите. Експериментален анализ показва, че надеждни и повтарящи се резултати може да се получат само, ако някои параметри са взети под внимание като например: химичен състав на пробите, физически и химически свойства на пробата, методология на измервания, количество проба, и т.н. [81, 84]. Например, очевидно е, че емулсии могат да бъдат анализирани само чрез мокро измерване но на сухи прахове трябва да бъде възможно да се прилагат и двата типа измервания.

Въпреки това, по отношение на сухи проби, се забелязват няколко ограничения като: ако прахове са разтворими във вода (или друга течна среда) може да се прилага само сух измерване, от друга страна, ако праховете имат способността да агломерират е желателно да се прилага мокро измерване, за да се постигнат не агломерирани частици. Въз основа на всички по-горе споменати факти, може да се заключи, че познаването на свойствата на материалите е от решаващо значение за избора на подходящо измерване на размера на частиците (мокро или сухо).

Разпределение на размера на частиците обикновено се представя като хистограма съчетана с кумулативна крива. В повечето случаи, разпределението на размера на частиците варира от моно модално на бимодално разпределение, но също така може да бъде мултимодално разпределение (с повече от 2 пикове при хистограма). Много е важно да се установи, че оптичните параметри са избрани правилно [8], тъй като може да се случи много често, че при грешно подбрани параметри грешен резултат (фиг. 2.6 и Таблица 2.1). Както може да се види на фиг. 2.6, измерване на една и същата проба дава различно разпределение при различно подбрани параметри. За да се получат надеждни резултати, всички измервания се повтаря 3 пъти с различна комбинация от параметри. Наличие на субмикронни частици се открива в двете измервания на фиг. 2.6 а и б. Също така, на бимодално разпределение е извършено повторно в 95% от измерванията, така че може да се направи заключението, че

мултимодалното разпределение частиците на цимент е недостоверно. Въз основа на получените резултати, е доказано, че относително точни и възпроизводими резултати абсолютно са възможни до размер на частиците от 83  $\mu\text{m}$ .

От друга страна, примерните резултатите, показани в **Таблица 2.1**, показват, че има голяма разлика между грешни и добри резултати. Според грешните измервания, 5% от частиците са от 1  $\mu\text{m}$ , добрите измервания показват, че 5% от частиците са 2  $\mu\text{m}$ . Сравнявайки само тези две стойности и анализ на други получени резултати, може да се отбележи, че във връзка с откриване на наночастици е много важно да се изберат подходящите параметри за измерване за получаване на валидни резултати. Въпреки това, за получаване на среден размер на частиците за измерване параметрите не са толкова важни.



**Фиг. 2.6.** Резултати от цимент: а – грешни резултати, б – добри резултати

Изследването и оптимизирането на параметрите на Analysette 22 NanoTec plus е от голямо значение за по-нататъшен анализ и характеризиране на различни частици, за да получи подобрен, бърз и надежден метод. Също така, получените резултати може да се използва за няколко изчислителни модели на основата на частици и симулация.

Техническите характеристики на използваният уред лазерен нано грануломер Analysette 22 NanoTec plus за получаването на данните на измерваният материал (цимент) са базирани на двата методи, описани по-горе – Мие и Фраунхофер, като за конкретните цели е използван методът на Мие.

Анализаторът съдържа диспергиращ модул (**фиг. 2.7 – а**) за „сухо“ измерване с диапазон 0.1 – 2000 микрона, измервателен модул (**фиг. 2.7 – б**), диспергиращ модул (**фиг. 2.7 – в**) за „мокро“ измерване с диапазон 0.01 – 2000 микрона, три полупроводникови лазера с живот средно 10000 часа и клас на защита EN 60825, компресор с регулиране, филтри и защиты, компютър със софтуер за управление, принтер, принадлежности.

**Таблица 2.1.** Стойности на лоши и добри резултати

Грешни резултати		Добри резултати	
Q3(x) [%]	x [ $\mu\text{m}$ ]	Q3(x) [%]	x [ $\mu\text{m}$ ]
5	1	5	2
10	3,2	10	4,7
20	5,3	20	8,8
50	15,3	50	20,5
80	20	75	38,8
90	23,2	90	50,8
99	46,2	99	83,2

ANALYSETTE 22 NanoTech plus е идеален и универсално приложим за определяне на разпределението на частици по едрина. С цел да се навлезе в нанометричния обхват, допълнителен трети лазерен лъч се използва за измерване на обратно разсеяната светлина. Този трети лазерен лъч облъчва пробата директно, като е разположен в предната част на детектора. Малкото разстояние между измервателна клетка и детектор създава много благоприятни условия за точното измерване на светлинни сигнали чрез ползване на преобразувания на Фурие.

Уредът за мокро измерване е затворена верига от течност, където пробата може да се добави или като сух прах или като суспензия, като се транспортира непрекъснато по време на измерването. Методът за измерване „мокра дисперсия“ е подходящ за почти всички материали, които не се разтварят в течност. Предимството пред сухата дисперсия е по-високата ефективност и по-голямата гъвкавост на процеса на дисперсия. Мощната радиална помпа в уреда позволява да се премести затворената верига повече от десет пъти в минута. Тази висока производителност позволява превоза и на по-големи частици дори и с по-висока плътност, което е ключово за по-бързо и по-равномерно разпределение на материала в цялата верига.

**Приложения:** измерване на големината и разпределението на частици в нано- и микро- диапазона за насипни материали, прахове, суспензии и разтвори, органични съединения и др.



а)

б)

в)

**Фиг. 2.7.** Fritsch Analysette 22 NanoTec plus: а – модул за сухо измерване, б – измервателен модул, в – модул за мокро измерване

## 2.2. Термография

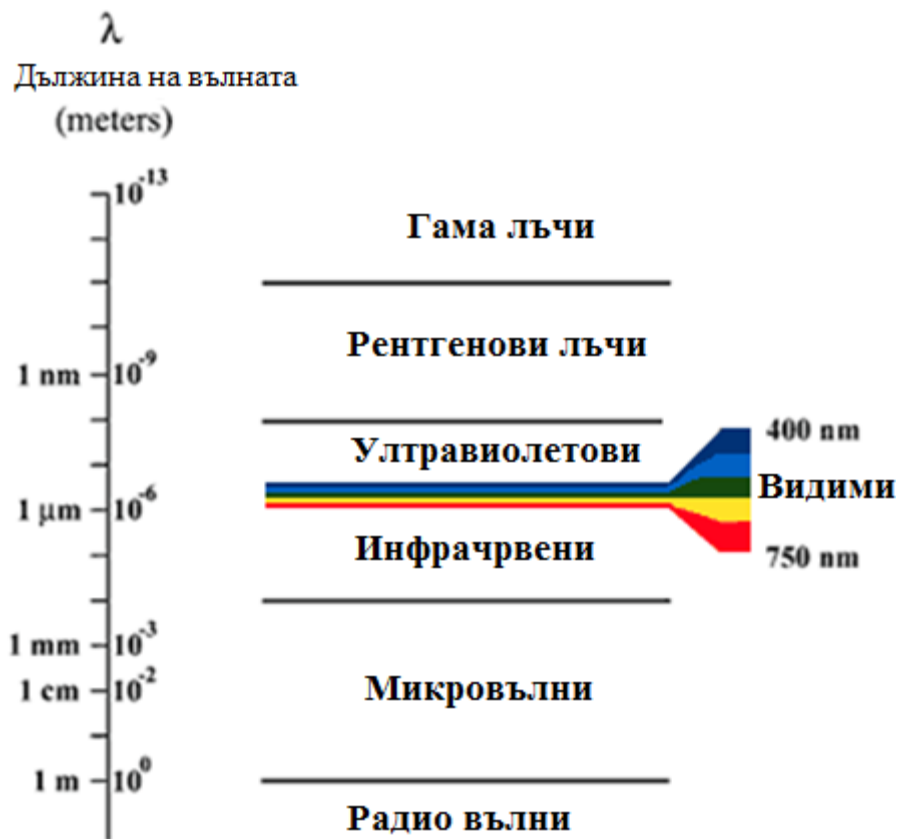
Инфрочервените лъчи, излъчвани от всички обекти в природата, биват улавяни и измервани от инфрочервените измервателни термални камери с цел установяване на температурата, излъчвана от обектите. Термичната или инфрочервена енергия е светлина която е невидима за човешкото око, поради факта, че дължината на вълната ѝ е много дълга. Други невидими за човешкото око вълни са ултравиолетови, рентгенови лъчи и гама лъчи и всички форми на електромагнитно излъчване с различна енергия. Тези вълни са част от електромагнитния спектър показан на **фиг. 2.8**. Специално инфрочервената вълна ние хората я усещаме като топлина. Противно на видимата светлина, в инфрочервения свят всичко с температура над абсолютната нула излъчва топлина. Дори изключително студените обекти, като ледници излъчват инфрочервена светлина [85].

Човешките очи са способни да виждат само една много малка област на електромагнитния спектър, поради тази причина имаме нужда от специални инструменти и средства, за да бъде разширена нашата визия извън ограниченията на невъоръженото око. Материали, които са непрозрачни при една дължина на вълната могат да бъдат прозрачни в друга. Познат пример за това явление е проникването на рентгеновите лъчи през различни обекти като човешко тяло, пластмаси, алуминий, желязо и др. [85].

Разширяването на човешкото зрение с цифрови изображения е една от най-мощните техники, които са на разположение на науката и промишлеността. Инфрочервено означава "под червеното", защото инфрочервена светлина има по-малко



енергия, отколкото червена светлина. Инфрачервената светлина, има по-малко енергия, отколкото видимата светлина, съответно голяма дължина на вълната. Инфрачервената част на спектъра варира в дължина на вълната от 1 до 15 микрона, или от около 2 до 30 пъти по-голяма дължина на вълната (и от 2 до 30 пъти по-малко енергия) от колкото видимата светлина [85].

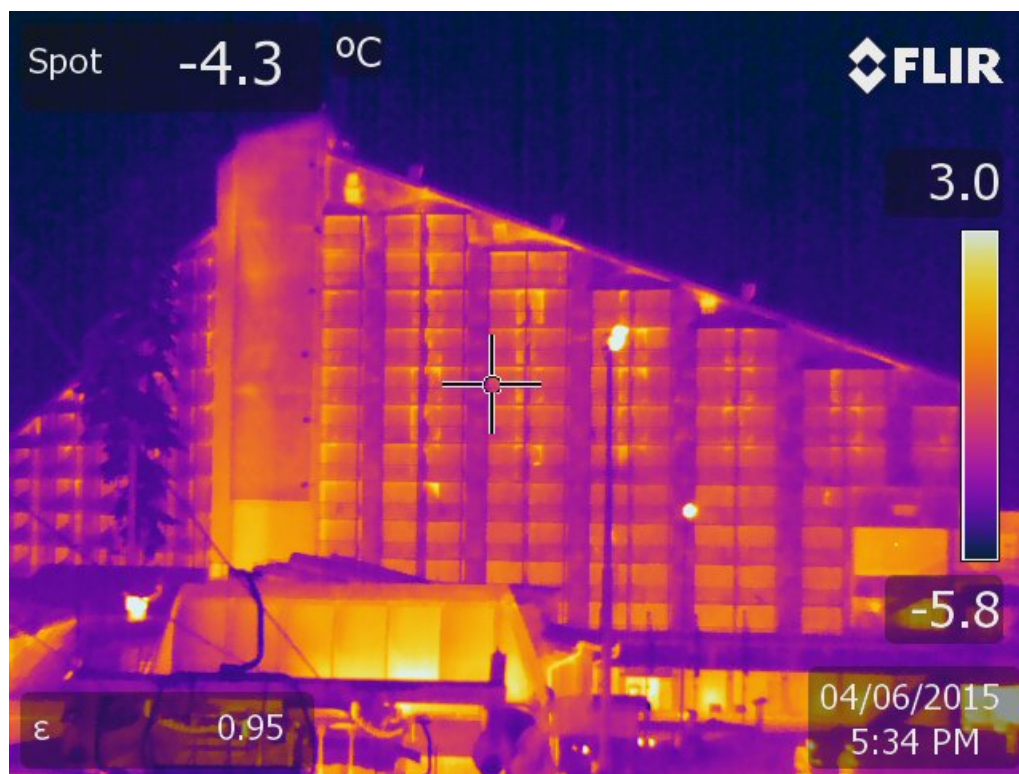


Фиг. 2.8. Електромагнитен спектър [85]

Топлите обекти, излъчващи инфрачервена светлина, като колкото по-горещ е обекта, толкова по-къса е дължината на вълната на инфрачервената светлина, която е излъчвана. Това IR "сияние" дава възможност на спасители, оборудвани с инфрачервени сензори и камери, да намерят изгубени хора, животни и т.н. в дълбока гора или пълна тъмнина. За разлика от очилата за нощно виждане (които имат нужда от поне малко излъчвана светлина), инфрачервени камери не се нуждаят от абсолютно никаква светлина, тъй като те са детектори и я улавят. Инфрачервената светлина може да проникне през дим и мъгла, по-добре от видимата светлина, разкривайки обекти, които обикновено се закриват (фиг. 2.9). Тя може да се използва за откриване присъствието на излишък от топлина или студ в части от машина например. Технологиите на инфрачервените камери напредва бързо, с по-голяма производителност в по-малки опаковки на по-ниска цена, която позволява използването на инфрачервени камери в много нови приложения. Не е чудно, че пазарът на инфрачервени сензори за изображения се разраства, като според сайта на производителя те са в челните редици на този растеж [85].



а) дигитално изображение



б) инфрачервено изображение

**Фиг. 2.9.** Улавяне на обект при наличие на мъгла: а – дигитално изображение, б – инфрачервено изображение.

Има три основни неща, които правят използването на термографията полезно:

- Безконтактно измерване;
- Двумерна е;
- Използва се в реално време.

*Безконтактното измерване* има редица предимства – държи хората в безопасно разстояние от изследваните обекти. Пример за това е изследването в електротехниката и електрониката – не е необходимо изследваните обекти да бъдат пипани с ръце, което би могло да доведе до токови удари и изгаряния. Друг недостатък, който се пренебрегва чрез термографията е дистанцията и възможността за измерване на въртящи се обекти. Друго предимство е, че термографията не влияе по никакъв начин на изследвания обект. Поради факта, че се наблюдава излъчваната радиация от изследвания обект и камерата може да се разглежда като детектор на тази излъчвана радиация. Това е изключително важно за много индустрии [86].

*Двумерните* изображения представят добра гледка към изследвания обект, като самата термографска снимка представлява хиляди точки на едно изображение, съдържащи информация за температурата във всяка една от тях. Анализирането на изображенията е ключово за определяне на различни проблеми и разлики в температурите [86].

Изображенията в *реално време* позволяват да се осъществяват бързи изследвания на обекти. По този начин могат да бъдат открити повреди и дефекти и да бъдат отстранени навреме, преди да причинят сериозни загуби, спиране на производство или по лоши случаи. Температурните измервания могат да бъдат сравнени с обичайните температури на подобни обекти, като значителна промяна в температурата може да означава проблем с надеждността на компонента или агрегата [86].

Термографията обхваща различни дисциплини и е разнообразна технология, която изисква знания и умения в различни области. Заснемането на термографското изображение е началото. Същественото идва при анализирането на заснетото изображение. За някои изследвания е необходимо съставяне на методики [86].

От изключително важно значение е определянето на коефициента на излъчване *emissivity coefficient*. Различните повърхности имат различна радиация. Основните фактори, влияещи на коефициента на излъчване са [86]:

- Материала;
- Повърхностна структура;
- Дължина на вълната;
- Геометрия;
- Ъгъл на виждане;

➤ Температура.

Принципът на действие на термалните инфрачервени камери е следният – камерата превръща невидимата инфрачервена радиация във видимо изображение. Инфрачервената радиация преминава през лещите и се фокусира върху детектора. Детектора от своя страна създава електрически сигнал, който варира в зависимост от интензивността на инфрачервената радиация. Електрическият сигнал се усилва и се дигитализира в електрониката на камерата. След това се превръща в изображение, от което могат да бъдат направени температурни изчисления [86].

**Приложения:** електроника, сгради, пещи, бойлери, механика, триене, флуиди, изследвания и разработки, минна индустрия, медицина, контрол на качеството, безразрушителен контрол и тестване [86].

Използваната инфрачервена камера за осъществяване на изследвания е FLIR P640 със следните характеристики: инфрачервен детектор – 640x480; топлинна чувствителност – 0,06°C; картина в картина (термално + нормално изображение); безжичен контрол чрез WLAN; лазер за по-прецизна ориентация; температурен обхват от -40 °C до 120 °C; 0 °C до 500 °C; от 300 °C до 2000 °C; обектив – STANDART IR LENS  $f = 8 \text{ mm}$ ; зрително поле (FOV) 24° x 18°; минимално фокусно разстояние от 0,3 m; пространствена разделителна способност (IFOV) 0,65 mrad.

### 2.3. Софтуер за симулиране на процеси при мелници и минна индустрия

Възможността за прилагане на метода на дискретните елементи при симулирането на движението и формата на мелещите тела, също и изследването на режимите на работа при процесите в топкови мелници позволява използването на EDEM Software. Софтуера позволява да се симулират повърхнини и материали с различни коефициенти и свойства, позволява изследването на частици с различни геометрични форми, взаимодействията между тях, както и потока им. При подходящи параметри и оптимизации позволява симулирането на движението на голям брой частици.

Методологията на дискретните елементи е разработена на високо ниво и позволява използването на свързани продукти се увеличава в широка гама от промишлени приложения през последните години [87, 88]. Методът на дискретните елементи е добре известен, защото спомага за разбирането на поведението на насипни материали в промишлени процеси, което води до много по-лесно проектиране на процесите. Това от своя страна помага за намаляване на разходите за производство и складиране на материали.

#### 2.3.1. Платформа на EDEM Software

Симулациите по методът на дискретните елементи променя дейността на проектиране и оптимизиране на необходимото оборудване за управлението и обработката на насипни материали. Когато една симулация се използва правилно, тя може да даде информация

за поведението на материалния поток от твърди вещества, което е много трудно да се получи като краен резултат. С помощта на моделирания и симулации могат да се анализира поведението на гранулирани твърди системи. EDEM осигурява нужната функционалност и производителност, необходима за осъществяване на максимална производителност от инженерна симулация, проектиране на продукти и производствени процеси. EDEM използва стандартните споделени памети и новите стандартни много-ядрени процесори. Работи под операционните системи Windows или Linux [89].

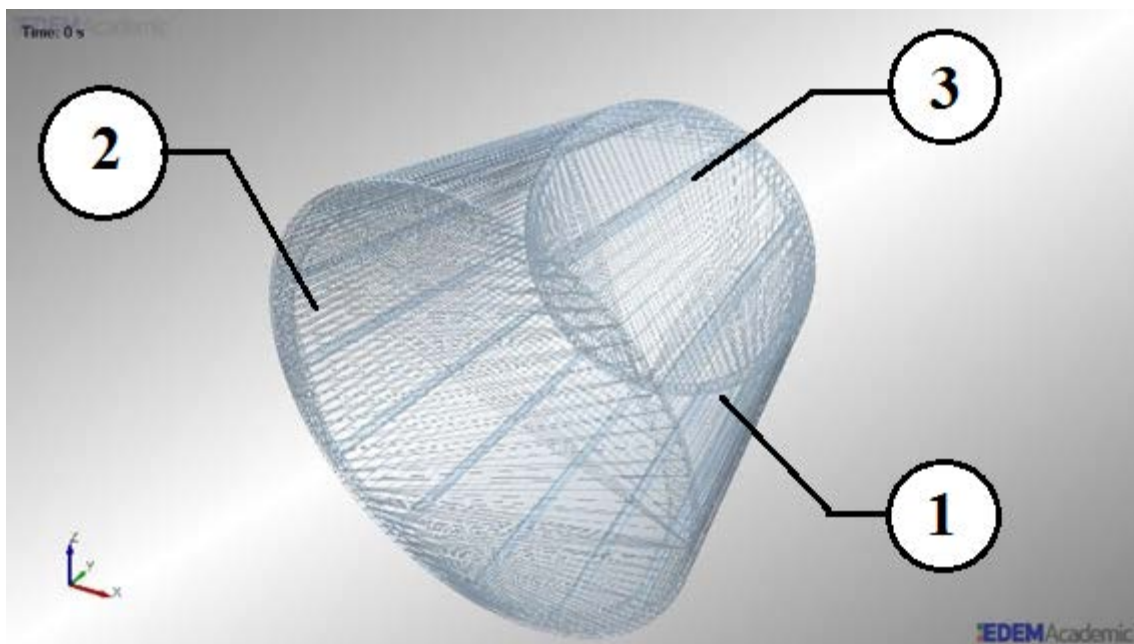
### 2.3.2. Графичен интерфейс

Софтуерната платформа се състои от три основни компонента: Creator, Simulator и Analyst. Графичният интерфейс, има способността да ускори времето и инструменти за бързо генериране на частици на насипни гранулирани твърди системи. Предварително създадени инструменти за обработка в Creator включват възможността за импортиране на готови CAD (компютърен софтуер, дизайн) модели, използвани за симулиране на оборудването, в които ще се осъществява движението и взаимодействието на частиците. Освен моделът, могат да бъдат импортирани и отделни негови компоненти, както и образци на формата на по-сложни частици. В този компонент се задават и свойствата на формата и размерите на частиците, заедно с материала, механични и други физични свойства. Всички тези параметри могат да бъдат записани в библиотека и да бъдат извиквани за други симулации. CAD модели на съществуващите реални частици могат също да бъдат импортирани за постигане на точното представяне на формата си. Използването на съвременни програмни интерфейси (API) и свързващи интерфейси (CM) прави EDEM лесно адаптивен [89].

EDEM Simulator се използва за решаване на изчисленията по отношение на частиците по размер, определящи динамиката на насипване на частиците. Частиците се генерират от сфери, от които могат да бъдат генерирани многоелементни частици и да представляват несферични частици. Тази функция позволява направата на бърз метод за симулиране на не-сферични частици.

Анализаторът се използва за последваща обработка с широк анализ на данни и инструменти за 3D визуализация. Също така позволява създаване на изображения и видео на симулацията, както и извличане на данни за и информация за износ за по-нататъшен анализ.

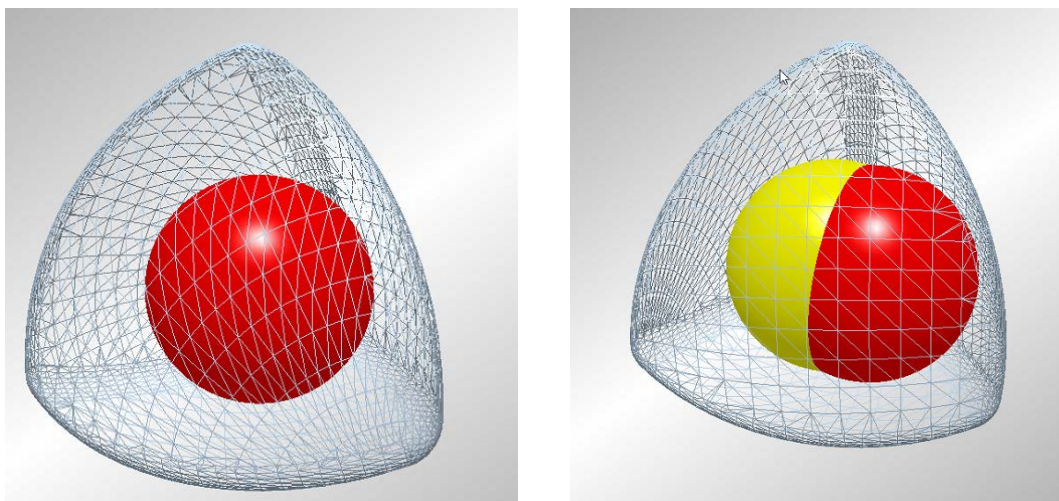
Модулът Creator в софтуера се използва за създаване на модел по метода на дискретните елементи на изследвания материал включвайки формата и параметрите му. За използването на реалното оборудване при симулациите, могат да се импортират различни CAD файлове (фиг.2.10) или могат да се създадат прости геометрии в самият софтуер[89].



**Фиг. 2.10.** CAD модел на лабораторна топкова мелница, съдържаща: барабан, капаци и лифтери

В Creator е поместена и още една функция, ключова за създаването на симулациите и за моделирането на гранулирани твърди частици, като се използва за избор на физически контакт на модели, гравитационни свойства, дефиниции и свойства на материалите и взаимодействия между различни материали. По подразбиране за всеки модел на контакт в EDEM софтуер се използва методът на Hertz-Mindlin (без приплъзване). Има и други модели като RVD Friction, JKR Cohesion, bonding and heat conduction. Към тези методи може да се добавят и linear cohesion, and hysteretic spring, които са алтернатива на модела на Hertz-Mindlin. Библиотеката от материали поддържа импортиране на нови материали, определяне на техните параметри, взаимодействия и т.н., като тази библиотека може да се използва не само за частици, но за свойствата, взаимодействията и параметрите на геометрични модели [89].

Друга съществено важна функция на Creator е за осигуряване на необходимите средства за създаване на формите на частиците, наподобявайки материала, който трябва да се симулира. Механични и други физични свойства могат да се добавят, за да се калибрират частиците. Също като материалите, частиците също могат да бъдат съхранявани в библиотека. На **фиг. 2.11** е показано множество сферични частици, които могат да се използват за моделиране на съществуващите материални форми [89].



**Фиг. 2.11.** Форми на частици

За представяне на не-сферични частици се използва методът за мулти-сфера. Съществуващите форми на частици могат да бъдат импортирани като шаблон, който да предостави реалистични визуализации и също може да се използва за изчисляване на параметрите на частиците като маса, инерционни моменти, независимо от модела на мулти-сферата или шаблона. Функцията за импортиране и експортиране на модели на частиците и форми позволява да се използват в различни симулации.

За импортиране на предварително моделирани CAD обекти се използват няколко вида формати, като основните са показани в **таблица 2.2**. За направата на обекти в самият софтуер може да бъдат използвани три основни фигури – цилиндър, куб и повърхност. На моделираните обекти и/или техните компоненти, могат да се задават линейни или синусоидални транскации и/или ротации [89].

**Таблица 2.2.** Поддържани формати за импортиране на модели.

Разширение	Източник
.msh	FLUENT Mesh
.igs, .iges	Initial Graphics Exchange Specification
.stl	Standard Tessellation Language
.dxf, .dwg, .dwt	AutoCAD
.stp, .step	ISO 10303-21
.CATPart, .CATProduct, .model, .exp, .dlv	Catia v4/v5
.prt, .asm, .g	Pro/E
.sat	ACIS
.vda	Various CAD

### 2.3.3. Теория на контактните модели, използвани в софтуера

За да бъде описано поведението на елементите, когато са в контакт едно с друго, са използвани няколко модела на контакт:

- Hertz-Mindlin (no slip)
- Hertz-Mindlin with JKR Cohesion
- Hertz-Mindlin (no slip) with RVD Rolling Friction
- Hertz-Mindlin with Bonding
- Hertz-Mindlin with Heat Conduction
- Linear Cohesion
- Linear Spring
- Hysteretic Spring
- Moving Plane (Conveyor)

Всеки модел има специфични функции и приложения, това налага по-задълбоченото им запознаване.

➤ Hertz-Mindlin (no slip) – основният модел, който е по подразбиране в EDEM Software. Нормалната компонента на силата в този модел се основава на теорията за контакт на Hertzian (1882) [89, 90]. Моделът Mindlin-Deresiewicz се основава на тангенциална сила [91,92]. Нормалните и тангенциални сили са затихващи компоненти, а коефициента на затихване е свързан с коефициента на възстановяване [93]. Тангенциалната сила на триене използва закона на Кулон за триене [89, 94].

Нормалната сила  $F_n$ , е функция на нормално препокриване  $\delta_n$ :

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \delta_n^3}$$

Еквивалентната модул на Юнг  $E^*$  и еквивалентния радиус  $R^*$  се определят като:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1 - \nu_j^2)}{E_j}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}$$

където  $E^i$ ,  $\nu^j$ ,  $R^i$  са модули на Юнг, радиус на всяка сфера в контакт и съотношението на Пуасон. Силата на затихване  $F_n^d$ :



$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^* v_n^{rel}}$$

където  $m^* = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_i}\right)^{-1}$  е еквивалентната маса,  $v_n^{rel}$  е нормална компонента на относителната скорост, като  $\beta$  и  $S_n$  са:

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 + e + \pi^2}}$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* + \delta_n}$$

където  $e$  е коефициент на възстановяване. Тангенциалната сила  $F_t$  зависи от  $S_t$  и  $\delta_t$ .

$$F_t = -S_t \delta_t$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n}$$

където  $G^*$  е еквивалентен модул на срязване. Тангенциалното затихване е:

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^* v_t^{rel}}$$

където  $v_t^{rel}$  е относителната тангенциалната скорост. Тангенциална сила е ограничена от триенето на Кулон  $\mu_s F_n$  където  $\mu_s$  е коефициентът на статично триене. Ако триене при търкаляне е важно за някои симулации, това се отчита чрез прилагане на въртящ момент на контактните повърхности [89].

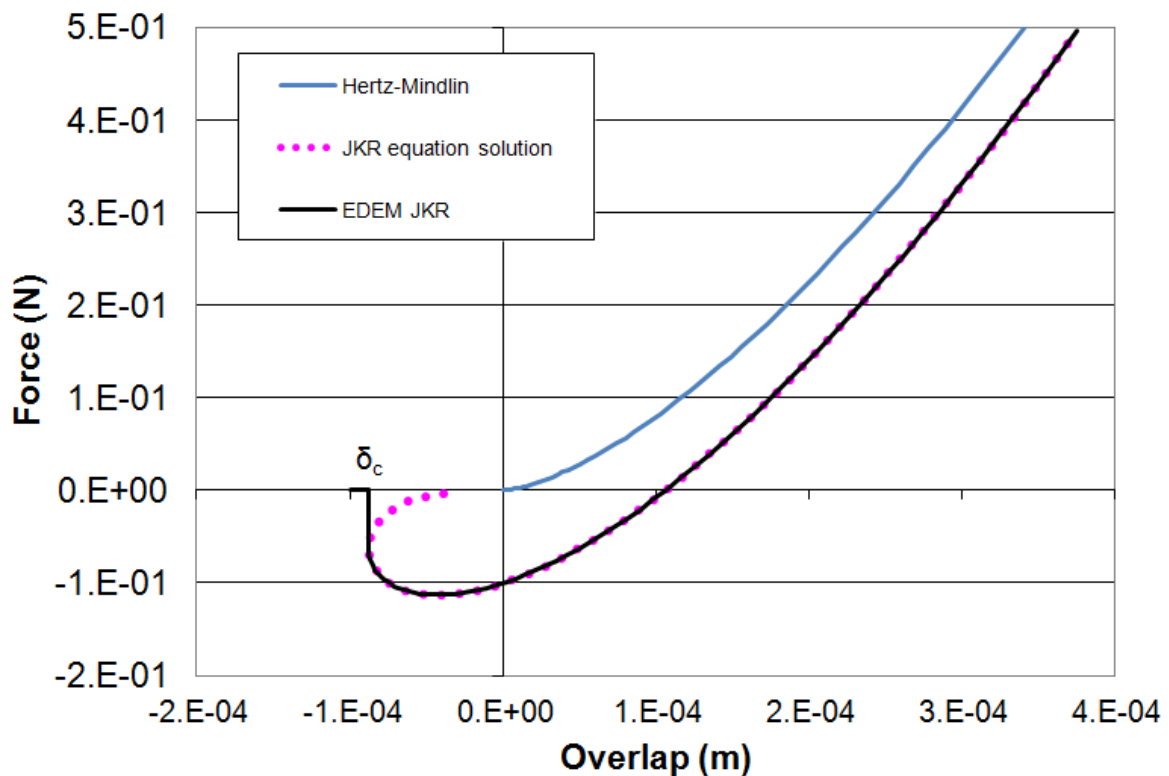
- Hertz-Mindlin with JKR (Johnson-Kendall-Roberts) Cohesion е контактен модел който взема предвид, влиянието на силите на Van der Waals в зоната на контакт и позволява да се моделира адхезивни системи, като мокър материал или сухи прахове. На теория на Johnson-Kendall-Roberts се основава на прилагането на нормална еластична контактна сила [89, 95]. За видовете сили: тангенциални еластични, нормално разсейване и тангенциално разсейване, в метода на JKR се използват същите изчисления като при метода на Hertz-Mindlin (No Slip). Нормалната сила на JKR Cohesion зависи от препокриването  $\delta$  и параметъра на взаимодействие, повърхностно напрежение  $\gamma$ :

$$F_{JKR} = -4\sqrt{\pi\gamma E^*} a^{3/2} + \frac{4E^*}{3R^*} a^3$$

$$\delta = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{4\pi\gamma a/E^*}$$

където  $E^*$  is еквивалентния модул на Юнг,  $R^*$  е еквивалентния радиус, дефиниран в контактния модел на Hertz-Mindlin (no slip).

Резултатите от JKR cohesion на Hertz-Mindlin са сравнени със стандартният метод на Hertz-Mindlin method. Отрицателното препокриване е разликата между две разделени частици. **Фигура 2.12** показва типичен участък на JKR сили като функция на нормално препокриване [96].



**Фиг. 2.12.** Нормална сила като функция на нормално препокриване [96].

Съгласно **фиг. 2.12**, когато  $\gamma = 0$ , силата се превръща в Hertz-Mindlin нормална сила:

$$F_{Hertz} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta^{\frac{3}{2}}$$

Следователно, този модел може да осигури кохезионни сили дори ако частиците не са във физически контакт. Максималната разлика между частици с ненулева сила е описано в уравнението:

$$\delta_c = -\sqrt{4\pi\gamma a_c/E^*} + \frac{a_c^2}{R^*}$$

$$a_c = \left[ \frac{9\pi\gamma R^{*2}}{2E^*} \left( \frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right]^{\frac{1}{3}}$$

За  $\delta < \delta_c$  моделът извежда нулева сила. Максималната стойност на кохезионната силата се образува, когато частици не са във физически контакт и с липсата на разделение е по-малко от  $\delta_c$ . Стойността на максималната сила на кохезия, наречена разтегателна сила, се изчислява по формулата:

$$F_{pullout} = -\frac{3}{2}\pi\gamma R^*$$

Изчисляването на силата на триене е различена в зависимост от контактния модел Hertz-Mindlin (No Slip). Разликата зависи от позитивната отблъскваща част от JR нормална сила. Тази разлика в EDEM JKR осигурява по-висока сила на триене, когато кохезионната компонента на контактната сила е по-висока [96-98].

Моделът е проектиран да бъде използван за фини сухи частици, но също така може да работи с влажни частици. Течните повърхностни напрежения  $\gamma_s$  и ъгълът на омокряне  $\theta$  са използвани за определяне на силата, необходима да се разделят две частици.

$$F_{pullot} = 2\pi\gamma_s \cos(\theta) \sqrt{R_i R_j}$$

Приравняването на JKR максимална сила  $F_{pullout} = -\frac{3}{2}\pi\gamma R^*$  позволява пресмятане параметрите на повърхностната енергия на JKR, ако частиците в софтуера не са мащабирани.

- При моделът Hertz-Mindlin (No Slip) with RVD Rolling Friction само триенето при търкаляне е различено, сравнение модела по подразбиране на Hertz-Mindlin. Триенето при търкаляне зависи от относителната скорост на въртене от двойка елементи в контакт [99]. Относителната скорост при модела с триене при търкаляне се предлага като обобщение на 3D “Type A: Directional Constant Torque” модел [100], с разлика в начина на изчисляване на относителната скорост на въртене на два елемента в контакт. Относителната ротационната скорост се определя от проследяване на точката на контакт [100]. При моделът на EDEM RVD Rolling Friction е различено в зависимост от относителната скорост на въртене, която се изчислява от стойностите на моментните ротационни скорости на два елемента в контакт. Предложеният метод в EDEM предлага необходимата функционалност в 3D без да се увеличава изчислителното време.

- Контактният модел на Hertz-Mindlin with Bonding може да се използва за свързване на частици с ограничен размер. Тъй като частиците реагират като твърди сфери, това „слепване“ помага в изследването на този етап при кои точки ще се счупи дадено слепване, чрез използване на тангенциално и нормално движение до максимума на нормално и тангенциално напрежение на срязване на връзката. Поради това, този модел е най-полезен при моделиране бетонни и скални структури, базирани на работата на Potyondy и Cundall [101]. Използването на този модел може да се прилага само между частици. Тези сили/въртящи моменти на слепване са в допълнение към стандартните модели на силите при Hertz-Mindlin. Радиусът на контакт трябва да бъде зададен при по-висока от действителната стойност на радиуса на сферата. Това позволява да бъдат включени връзки в този модел и да действат, когато частиците вече нямат физически контакт.
- Методът на Hertz-Mindlin with Heat Conduction за проводимост на топлината се използва при симулации, където има трансфер на конвекционна топлина. Проводимостта между стена или частиците може да се пренебрегва. Трябва да вземе предвид контакта между частици. Този модел се основава на работата на Chaudhuri [89, 102]. При този модел е необходимо използване заедно с модел за актуализация на силата на тялото, както и за температурата трябва да се използва актуализация на модела на тялото в комбинация с Hertz with Heat Conduction модел, за да се осигури функцията на алгоритъма на топлопроводност [102].
- Методът на линейната кохезия Linear Cohesion модифицира основният Hertz-Mindlin като се добавя нормална кохезионна сила:

$$F = kA$$

където  $k$  е кохезионната енергийна плътност със единици  $\text{Jm}^{-3}$ ,  $A$  е площта на контакт. Тази сила е добавена към нормалната сила на Hertz-Mindlin.

## 2.4. 3D мобилен скенер

Мобилният 3D Scanner на Creafom HandyScan (**фиг.2.13**), със следните характеристики: Тегло: 1.3 kg, размери: 172 x 260 x 216 mm, измервания: 18,000 измервания/s лазер клас: II (безопасен за очите), разделителна способност на получаваната геометрия: 0.1 mm, точност: до 50  $\mu\text{m}$ , ISO: 20  $\mu\text{m}$  + 0.2 L / 1000, резолюция на текстурата: от 50 до 250 DPI (пренастройваема), цвят на текстурата: 24 bits, sRGB-calibrated Depth of field: 30 cm, изходни формати: .ma, .dae, .obj, .x3dz, .x3d, .zpr, .wrl, .fbx, .ply, .stl, .txt.

Снабден е със специализиран софтуер VX Elements, който представлява 3D софтуерна платформа. Софтуерът разполага с основни елементи и инструменти, които улесняват използването му. Сканираните обекти се визуализират в реално време, което осигурява лесно ориентиране и коригиране по време на сканирането.

Софтуерът създава оптимизиран файл на сканираният обект, което допринася за съкращаване значително си част инспекция или в процеса на проектиране.

Приложения: анализ на готова продукция, измервания на съществуващи обекти за последващи промени, реинженеринг, прототипиране, интегриране в САД среди

Rapid prototyping, тестване по метода на крайните елементи, деформации, анализ на геометрия, контрол на качеството.



Фиг. 2.13. Мобилен 3D скенер

## 2.5. Заключение

От разглеждането на експерименталното оборудване може да се заключи, че използването му допринася за изследвания, оптимизация и контрол на качеството при мелещи процеси.

Изследванията на едрината на изходният продукт допринасят за контрол на качеството и предлаганата продукция.

При изследването на температури може да се следи за възникващи проблеми и навременното им отстраняване, преди да бъде спряно неочаквано производственият процес.

Софтуерът спомага за по-доброто разбиране на процесите при изменение не само на формата и размерите на мелещите тела и материала за смилане, но и при промяна на ключови фактори при работата на топкови мелници.

## Глава 3

# СЪСТАВЯНЕ МЕТОДИКИ ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНИЯ

Съставянето на методики е изключително важно за провеждане на изследвания. Необходимо е да бъде обърнато внимание на редица фактори за различните изследвания.

### 3.1. Съставяне на методика за изследване едрината на цименти

Методиката при определянето едрината на цимент чрез използване на уред FRITSCH ANALYSETTE 22 NanoTec Plus, описан в глава 2 е ключова за получаване на надеждни и бързи резултати. Необходимо е изследваният обект да отговаря на изискванията, определени от производителя за едрината на материала, постъпващ в уреда за измерване. Следващата стъпка е определянето на измервателният модул – сухо или мокро измерване. За тази цел е необходимо запознаване с основните свойства на материала. При циментите, мокрото измерване е за предпочитане, тъй като са неразтворими във вода. След избиране на модула, е необходимо уточняване на нужното количество проба за осъществяване на измерването. При сухите проби е необходимо по-голямо количество проба, докато при мокрите, количеството е значително по-малко. Трябва да бъдат подбрани правилните параметри на уреда и да бъдат съобразени с материала. На **фиг. 3.1** са показани параметрите, от които зависи правилното измерване.

Материалът за изследване е предоставен от производствено предприятие, като там едрината му е определена, чрез пресяване с различни сита и изготвяне на ситов анализ. Очакванията за едрина на частиците е за цимент 32,5 от 100 $\mu\text{m}$  и за цимент тип 52,5 от 80 $\mu\text{m}$  в зависимост от качеството на цимента, като 52,5 е с по-добро качество според производителя.

След определянето на нужните параметри, показаните на фигурата се създават SOP модели за изследване. За изследването са генерирани 3 SOP модела – за всеки от предоставените три типа материал. Веднъж създадени, могат да бъдат използвани при последващи измервания с такъв тип материали. **На първо място измервателната клетка трябва да бъде добре почистена**, в противен случай се получават неадекватни данни, показани на **фиг. 3.2**.

SOP: New

**SOP**

Close Save and Close Save Export SOP Delete SOP Release SOP Add SOM Script Add command Remove command Move command Up Move command Down

Main Page Procedures Revisions

Attribute Defaults Material Number Company Comment

Description Notes Name

Defaults Report UV. Perc Folder UV. Perc Meas UV. Size Folder UV. Size Meas

Pump and Ultrasonic Pump 6 Ultrasonic 0 Lights 10

Background full range

Laser and Cell Position Laser / Position Coarse ...

Get Sensor Values - Backgro Mode Wet Background Scans 100 Shots per Scan 2^n 4 Lower Limit 1 Upper Limit 15

Laser and Cell Position Laser / Position Fine Ra...

Get Sensor Values - Backgro Mode Wet Background Scans 100 Shots per Scan 2^n 4 Lower Limit 1 Upper Limit 15

End Block

sample dilution

Laser and Cell Position Laser / Position Fine Ra...

Sample Dilution Shots per Scan 2^n 6 Min. beam obscuration 10 Max. VCoef 3.00 Min. Time 30 Max. Time 60 Stable Time 10

End Block

Number of Measurements Count 1

Wait Seconds 10

measurement full range

Laser and Cell Position Laser / Position Fine Ra...

Get Sensor Values - Fine Rai Mode Wet Background Scans 100 Shots per Scan 2^n 4 Lower Limit 1 Upper Limit 15

Laser and Cell Position Laser / Position Coarse ...

Wait Seconds 10

measurement full range

Laser and Cell Position Laser / Position Fine Ra...

Get Sensor Values - Fine Rai Mode Wet Background Scans 100 Shots per Scan 2^n 4 Lower Limit 1 Upper Limit 15

Laser and Cell Position Laser / Position Coarse ...

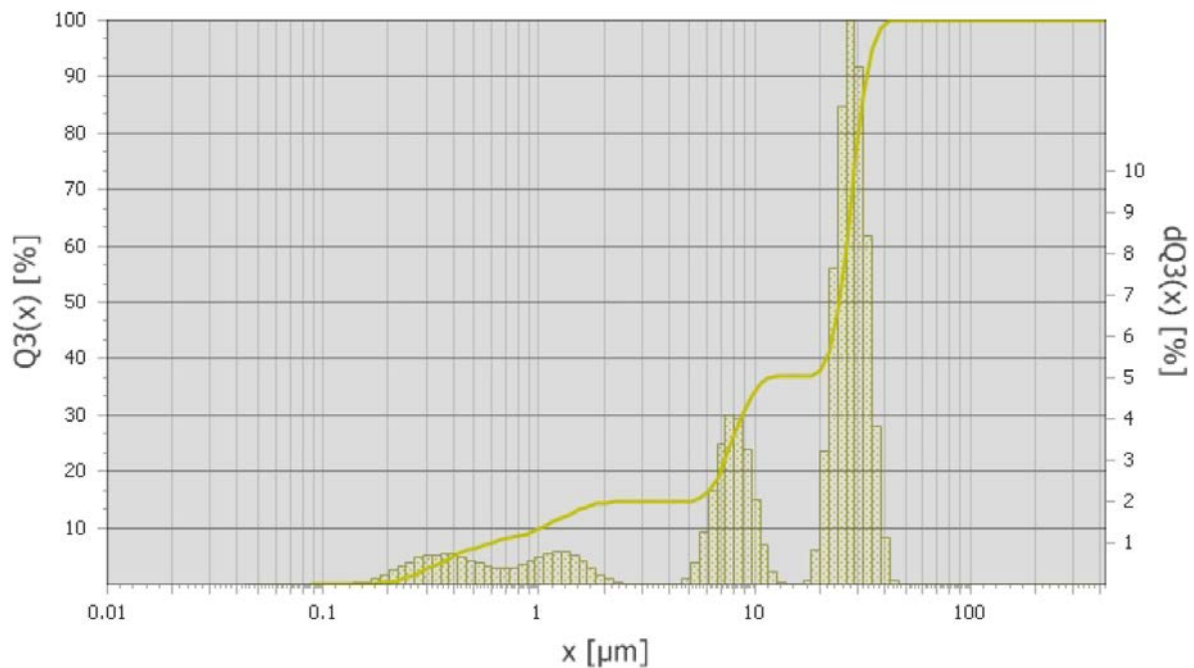
Get Sensor Values - Coarse Mode Wet Background Scans 100 Shots per Scan 2^n 4 Lower Limit 1 Upper Limit 15

End Block

Calculate Calc. Model broad Theory Fraunho... Liq Material Liq Refr. Idx 1.33 Meas. Range Full... Nano Upper Limit 2016... Sld Material Sld Abs Coef 0 Sld Refr. Idx 1.54

End Repeat

Фиг. 3.1. Параметри за осъществяване на правилно измерване



**Фиг. 3.2.** Резултат следствие на зацапана измервателна клетка

Основните параметри за настройка на уреда при тази методика са:

- Определяне метода на измерване – сухо;
- Настройване на SOP модела;
- Избиране на нужните доклади;
- Настройване работата на помпата (използва се за разбъркване на материала) – 6;
- Настройване работата на ултразвук (използва се за разделяне на частиците) – 10;
- Определяне позицията на лазерите и обхвата на уреда;
- Задаване на времена за изчакване между броят изследвания на пробата;
- Задаване на брой измервания на пробата ( препоръчва се да бъдат минимум 3);
- Определяне метода на калкулиране – избрана е теорията на Фраунхофер;
- Определяне количеството флуид, необходимо за измерването;
- Изчистване на клетката от пробата и подготовка за последващо изследване.

При настройването на работата на помпата и ултразвука, могат да се получат „балончета“ които да се увлекат заедно с материала за измерване и това да доведе до недостоверни резултати. След направени 3 предварителни опита са установени необходимите стойности на тези два параметъра.

При първоначалното измерване се избира целият обхват на уреда, за да се ориентира към коя едрина спада изследваният материал. Има случаи, когато материалът не отговаря на очакванията. След като е установено приблизително



едрината на частиците, на обхвата на уреда в този случай се поставя горен лимит от 422µm. По този начин се увеличава точността, спестява се време от работата на уреда. След поставянето на горна граница на едрината на материала се оптимизира работата на самото устройство, спестяват се работни часове на самата машина, като по този начин се щадят лазерите.

При определянето на начина за калкулиране, най често се използва методът на Фраунхофер. Методът МИЕ се използва при изследвания, които зависят от много странични фактори, като флуида, в който се измерва (вода, различни видове масла, различни видове алкохоли, зехтин и други), както и температурата на флуида.

За флуид тук е използвана вода, тъй като частиците цимент са неразтворими във вода. При определянето количеството на флуида се избират 3 варианта 1/3, 2/3, 3/3. За изследването на цимента е избрано 1/3.

### **3.2. Съставяне на методика за изследване на температура при ротационна пещ**

Следенето на температурата при топковите мелници е от изключително важно значение за крайният продукт. При този процес на работа на топкови мелници се подлагат на изследване освен самите мелници, също така и пещите, които в някои случаи са необходими за производството на изходният продукт (например циментопроизводството). Методиката и програмата за експерименталното изследване температура на ротационна пещ за топкова мелница се провежда в производствени условия в следната последователност:

- *Обект за изследване.* Ротационна пещ за топкова мелница.
- *Определяне на:* факторите, параметрите и зависимостите, определящи основните качества на ротационната пещ за топкова мелница.
- *Анализиране на получените резултати,* ако е необходимо да се направят някои препоръки при ежедневната експлоатация на ротационната пещ.
- *Цел на изследването:* Проверка на функционалността и параметрите, при които ще работи ротационната пещ, максимална производителност, минимални загуби на топлина, високо качество на извършената операция, висока надеждност и ниска себестойност, анализиране охладителната система. Един от важните елементи са лагерите. Изследване охладителната система около лагерите.

- *Запознаване с конструктивните особености на пещта.*
- *Условия и апаратура за провеждане на изследването.*

Изследванията са проведени в производствените условия на завод за цимент с. Бели Извор с апаратури при следните стойности на параметрите на отделните фактори:

- *Термална инфрачервена камера FLIR P640.*

Камерата има следните технически данни:

- инфрачервен детектор – 640x480;

- топлинна чувствителност – 0,06°C;
- картина в картина (термално + нормално изображение);
- безжичен контрол чрез WLAN;
- лазер за по-прецизна ориентация;
- температурен обхват от -40 °C до 120 °C; 0 °C до 500 °C;
- опция с над + 2000 °C;
- обектив – STANDART IR LENS  $f = 8$  mm; field of view (FOV) 24° x 18°; minimum focus distance 0,3 m; spatial resolution (IFOV) 0,65 mrad.

➤ *Да се представи принципна схема на изследвания обект.*

С помощта на гореспоменатата камера може да бъде определено състоянието на облицовката на пещта, състоянието на охладителната система по дължината на пещта, състоянието на лагерите, оптимизация на топологията на охладителната система в областта на лагерите. Препоръчва се да бъде направено изследване в реално време на температурата на всеки лагер, както и на всички охладители.

### **3.3. Съставяне на методика за симулиране на смилателни процеси**

За изследване движението и поведението на тела с променлива форма изследването чрез симулационно моделиране е необходимо да се извършат последователно следните задачи:

- Запознаване с необходимостта от симулация и очакваните резултати.
- Определяне и задаване на необходимият модел (Hertz-Mindlin (no slip), Hertz-Mindlin (no slip) with RVD Rolling Friction, Hertz-Mindlin with JKR, Hertz-Mindlin with bonding, Hertz-Mindlin with heat conduction, Hysteretic Spring, Linear Cohesion, Linear Spring), по който ще се осъществи симулацията.
- Определяне на необходимите връзки между частици или частици и геометрия.
- Задаване на гравитация.
- Задаване на материали.
- Задаване свойства на материалите.
- Задаване на връзки между различните материали.
- Определяне размерите на частиците, повърхнините им, материал, обем, моменти на инерции по оси X, Y, Z.
- Моделиране на 3D геометрични модели, необходими за симулацията и определяне на размерите им.

- Импортиране на 3D моделите, задаване на материала им, определяне на центъра на масата.
- Задаване на динамични характеристики (линейна трансляция, линейна ротация, синусоидална трансляция и синусоидална ротация). Задаване на продължителност на действието.
- Определяне посоката на действие по оси X, Y, Z.
- Определяне на необходимият брой частици, времето за което ще се осъществи генерирането им, маса, брой. Време от което ще започнат да се генерират.
- Задаване на параметри на частиците като тип, размер, позиция, скорости, ориентация, ъглова скорост и др.
- Задаване на време, необходимо за извършване на симулацията.
- Определяне нужната гъстота на клетките, които извършват пресмятанията.
- Задълбочено анализиране на осъществената симулацията.
- Експортиране на изходни данни от симулацията като скорости, ускорения, връзки, взаимодействия, сили и др.

Определянето и изпълнението на поставените задачи е строго индивидуално за всеки тип симулация. Горепосочените задачи са ключовите, от които следва разширяване на някои методи и създаване на нови.

### **3.4. Съставяне на методика за анализиране и изследване на мелещи тела с получени данни от симулационно моделиране**

Методиката за изследване на мелещи тела дава възможност за отчитане на основните фактори, от които зависи процеса на смилане като:

- Отчитане размерите на мелещи тела и материала им;
- Отчитане размерите на геометричните тела, материала им;
- Отчитане на скорости, влияещи на геометричните тела;
- Ъгъл на отделяне на мелещо тяло;
- Ъгъл на падане на мелещо тяло;
- Ъглова скорост на мелещо тяло;
- Сила на мелещо тяло;
- Ускорение на мелещо тяло;
- Скорост на мелещо тяло и др.

При спазването на методиката, могат да се отчитат и сравняват резултатите, получени от различни симулации с подобен характер, като се променят само някои основни ключови фактори като скорости, форми, размери и др. Това дава възможност за анализиране на ефекта от смятана на тези фактори върху процеса като цяло.

### 3.5. Реинженеринг на мелещи тела

Спецификата на този 3D мобилен скенер, е че работи с ретрорефлективни маркери, показани на **фиг. 3.3**. При работата си, за да се ориентира в пространството скенерът използва тези маркери. Необходимо е да „вижда“ поне четири маркера, за да се осъществява сканиране. Препоръчва се маркерите да бъдат на разстояния от 2 до 4 cm, като е желателно да се избягва поставянето им в една линия и позиционирането им до ръбове. При големи детайли, това е почти незабележимо изискване, но когато става дума за малки детайли, тази специфика изисква маркерите да бъдат добре подредени. Поради тази причина се налага изработване на методика при този тип изследвания.



**Фиг.3.3.** Ретрорефлективни маркери

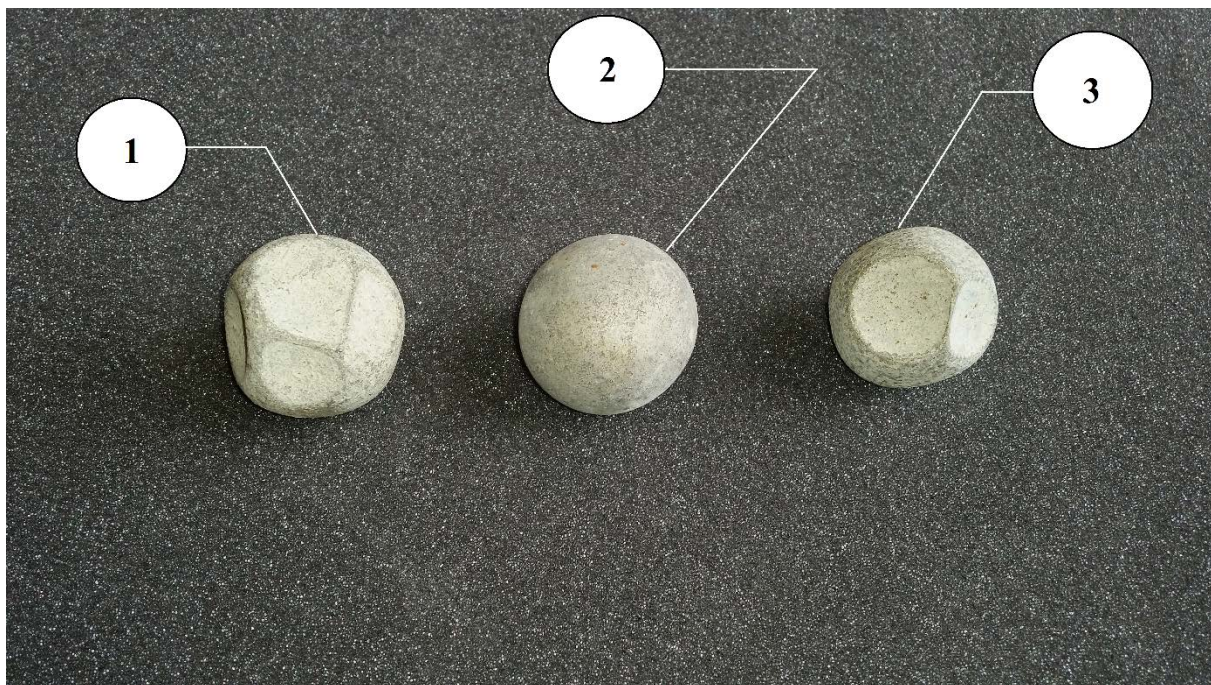
Методика при дигитализация на сферични мелещи тела:

- Калибриране на 3D лазерният скенер;
- Настройка силата на лазерните лъчи;
- Настройка на светлината;
- Запознаване с обекта за изследване;
- Изисквания към обекта за изследване;
- Позициониране на обекта за изследване;
- Разполагане на ретрорефлективните маркери;

- Осъществяване на сканирането;
- Обработка на сканираният обект чрез специализиран софтуер;
- Експортиране на изображението за последващи обработки, изследвания и др.

Калибрирането се осъществява със специално разположени маркери на лист, предоставени от производителя. Настройката на силата на лазерният лъч се осъществява от софтуера, като се препоръчва при по-тъмни тела да се използва по-голяма сила, това прави сканирането по-бързо. При настройването на светлината трябва да се вземе предвид обекта за изследване и заобикалящата го среда. Ако има отблясъци, светлината трябва да се намали. Друг специфичен момент при дигитализацията на обекти и тела при този тип скенери е отблясъците. При наличен на такива е необходимо търсенето на решения за елиминиране или свеждане до минимум на тези отблясъци. Противен случай се образуват артефакти, които пречат при самото сканиране. Друг момент е разположението на обекта. При обекти с по-големи размери, ретрорефлексивните маркери могат да се поставят директно на сканирания обект, което позволява преместването му. При тела, които не предоставят нужните размери за позициониране на маркери по тях, не се препоръчва преместване.

Изследваните обекти в конкретният случай са 3 метални сферични тела, използвани при производството на цимент, работили в топкови мелници. Телата, са показани на **фиг. 3.4**.



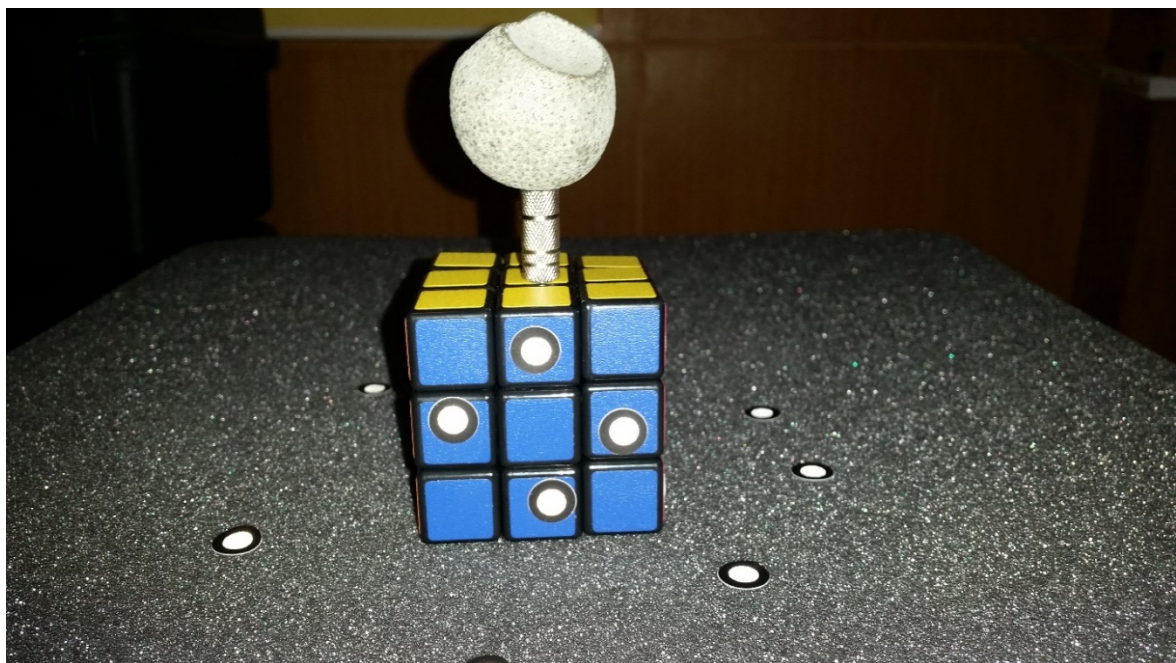
**Фиг. 3.4.** Мелещи тела: 1– силно износено, 2 – ново не работило тяло, 3 – износено тяло

Спецификата на тези тела налага по-задълбочена подготовка за сканиране. Необходимо е да бъдат поставени върху подходящ фундамент, от който да има

подходящ изглед към сканираният обект. Може да бъде поставена ротационна маса, която да върти обекта заедно с маркерите, поставени на фундамента. Когато по телата не са поставени маркери както е в този случай, не е желателно да се преместват. Преместването им би довело до грешка при измерванията и натрупване на грешни геометрични данни. Подготовката за поставяне на сканирането е показана на **фиг. 3.5**.



а)



б)

**Фиг. 3.5.** Подготовка за сканиране: а – изглед отгоре, б – изглед отпред



## Глава 4

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И РЕЗУЛТАТИ

Резултатите са получени следствие на спазените съставени методики за настройка, отчитане, оптимизиране и анализиране на нужните данни за провеждането на експерименталните изследвания, свързани с движението и взаимодействието на тела с променлива форма.

### **4.1. Осъществяване на изследване за едрина на изходен продукт от производствена топкова мелница.**

След съобразяването на параметрите и настройването на нужните стойности, описани в глава 3, т. 3.1 (Съставяне на методика за изследване едрината на цименти.), следва анализирането на резултатите.

В глава 2, т. 2.1 (Метод на лазерната дифракция), **фиг.2.6** (Резултати от цимент а) грешни резултати, б) добри резултати), е описано как се различават добри резултати от грешни резултати.

Едрината на изходния продукт е от изключително важно значение както за качеството, така и за енергийната ефективност на една топкова мелница. За постигането на фина изходна продукция е необходимо процесът на смилане да бъде продължителен. Едрината зависи не само от времето за смилане, но и от големината на мелещите тела.

В повечето заводи се използват сита за контролиране на изходната продукция. Ситата отсяват продукцията като не пропускат размери, по-големи от търсената едрина. Не може да се установи наличието на по-малки размери. [6, 23, 24, 103, 104]

Първият тип цимент 52,5. Компоненти: клинкер от 95 до 100% и допълнителни компоненти от 0 до 5%. За регулиране на времето на свързване се добавя калциев сулфат. Всички компоненти отговарят на БДС EN 197-1 т.5. [103, 104]

Предимства:

- Високоякостен цимент;
- Ниско обемно разширение;
- Бързо набиране на якост.

Гарантираната висока ранна якост на натиск позволява по-бързо декофриране и обръщаемост на формите при производство на бетонни и стоманобетонни изделия и по-бързо постигане на необходимите параметри при производство на сухи строителни смеси.

Употреба съгласно указанията на специалиста, проектирал бетона или разтвора: на производителите на транспортбетон се препоръчва използването на СЕМ I 52,5 през



зимните и студентите месеци на годината, поради гарантирана висока ранна якост на натиск – над 30 МРа на 2-дневна възраст.

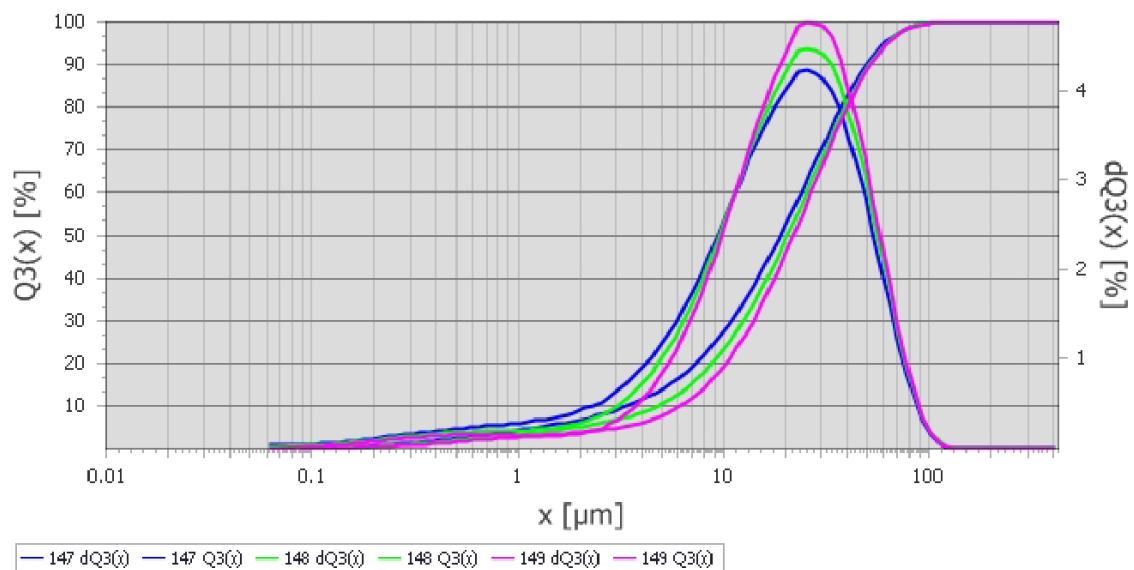
Области на приложение:

- строителство на мостове, виадукти, тунели и др.,
- фундаменти на сгради,
- железобетонни конструкции в сгради и предварително напрегнати конструкции,
- монолитни конструкции в гражданското и промишленото строителство,
- производство на сухи строителни смеси.

Резултатите от измерванията, направени с нано-грануломера FRITSCH Analysette 22 NanoTec plus (фиг.4.1) показват, че едрината на продукта варира 81,7  $\mu\text{m}$ , 83,6  $\mu\text{m}$ . Таблица 4.1, таблица 4.2 и таблица 4.3, получени от грануломера, показват едрината на частиците им в целия диапазон.

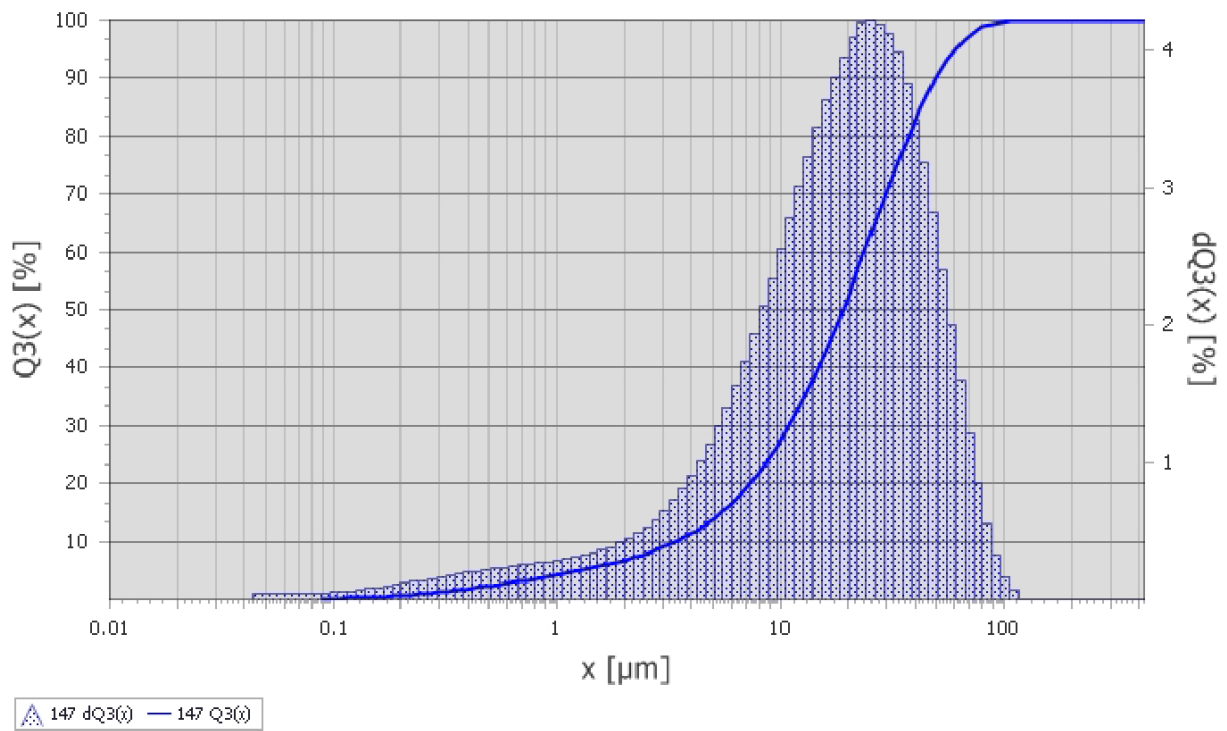
Измерванията на двата вида цимент са направени в мокрият диспергиращ модул.

### Overview of all Measurements

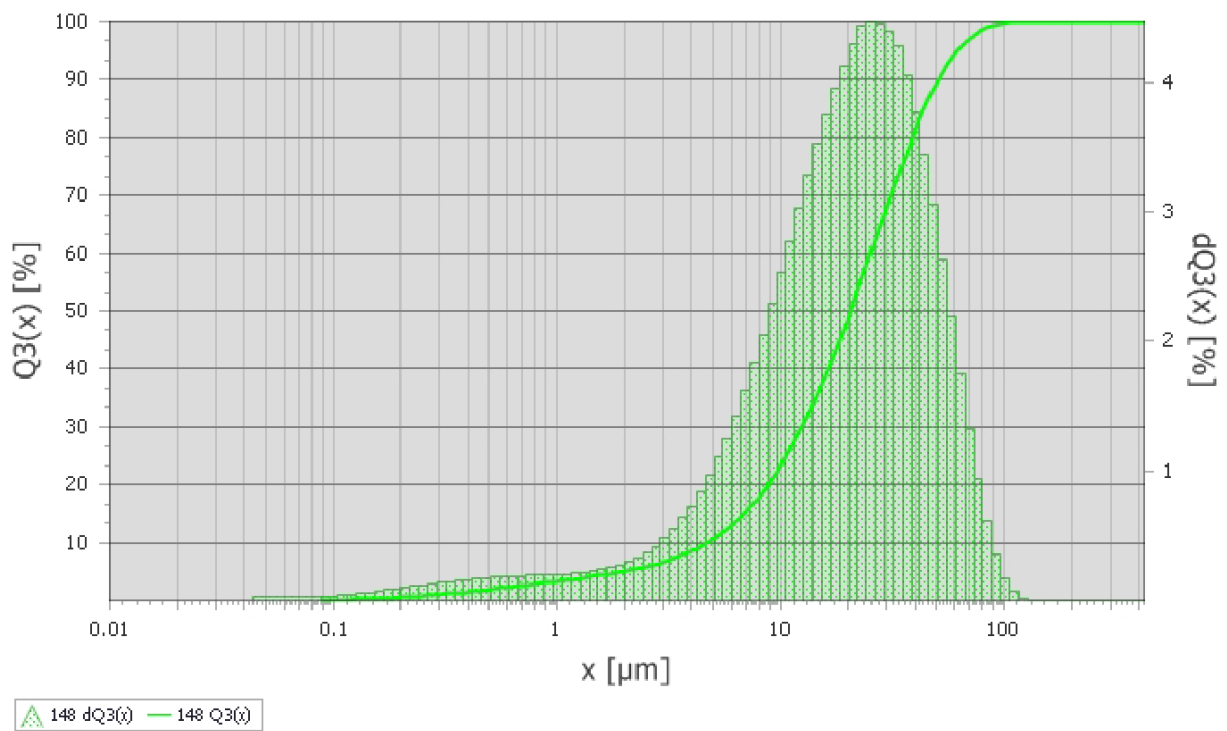


Q3(x) [%]	x [ $\mu\text{m}$ ]	CV [%]	M147	M148	M149
10	4.8	23.4	3.4	4.7	6.1
20	8.8	13.5	7.3	8.8	10.2
30	12.5	9.7	11	12.5	13.9
50	20.4	5.9	18.9	20.5	21.9
80	38.6	2.8	37.2	38.8	39.8
90	50.6	1.9	49.3	50.8	51.7
99	82.8	1	81.7	83.2	83.6

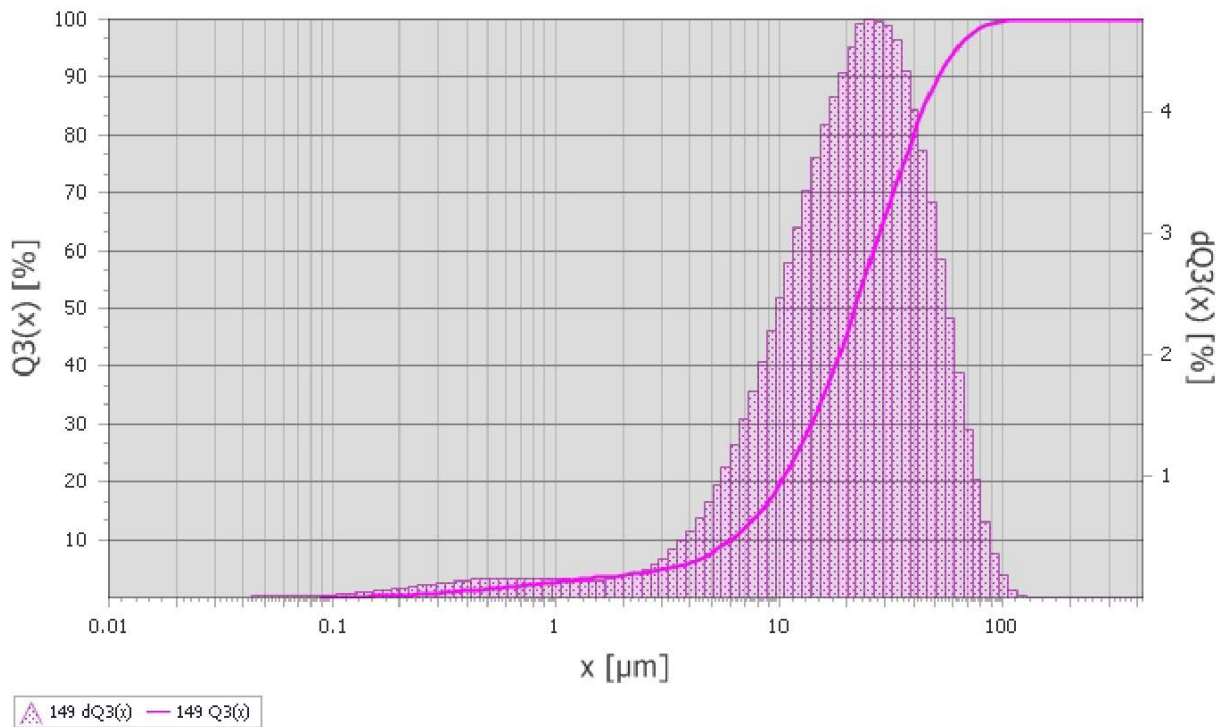
а – обща графика на трите измервания



б – измерване 1



в – измерване 2



г – измерване 3

**Фиг.4.1.** Изследване на цимент 52,5: а – обща графика на трите измервания, б – измерване 1, в – измерване 2, г – измерване 3

На **фиг.4.1 а** е представено прекриването на 3те измервания. В съответните цветове. Таблицата под графиката показва данните за трите измервания, от която става ясно, че проба М147 (служебно име от уреда, което означава М-measurement) – 81,7  $\mu\text{m}$ , измерване М148 – 83,2  $\mu\text{m}$  и измерване 3 М149– 83,6  $\mu\text{m}$ .

На **фиг. 4.1. б, в и г** е показана детайлна графика на измерванията с плавна крива, което говори за добри и достоверни резултати.

За по-голяма прегледност и детайлност са съставени три таблици с трите вида изследвания, а именно **таблица 4.1** измерване 1 (М147), **таблица 4.2** измерване 2 (М148) и съответно измерване 3 (М149) **таблица 4.3**.

**Таблица 4.1.** Измерване 1.

$Q3(x)$ [%]	$x$ [ $\mu\text{m}$ ]
10	3.4
20	7.3
30	11
50	18.9
80	37.2
90	49.3
99	81.7

**Таблица 4.2.** Измерване 2.

Q3(x) [%]	x [ $\mu\text{m}$ ]
10	4.7
20	8.8
30	12.5
50	20.5
80	38.8
90	50.8
99	83.2

**Таблица 4.3.** Измерване 3.

Q3(x) [%]	x [ $\mu\text{m}$ ]
10	6.1
20	10.2
30	13.9
50	21.9
80	39.8
90	51.7
99	83.6

При цимент тип 32.5. Компонентите на този вид цимент са клинкер от 65 до 79%, варовик от 21 до 35% и допълнителни компоненти от 0 до 5%. За регулиране на времето на свързване се добавя калциев сулфат. [103, 104]. Всички компоненти отговарят на БДС EN 197-1 т.5.

Предимства:

- Ниска водопотребност и повишена обработваемост,
- Понижена склонност към изпускане на циментово мляко на повърхността.

Употреба: Съгласно указанията на специалиста проектирал бетона или разтвора. Препоръчително е да се работи с цимент при температура от 5 до 30°C. По-ниските температури забавят, а по-високите ускоряват свързването на цимента.

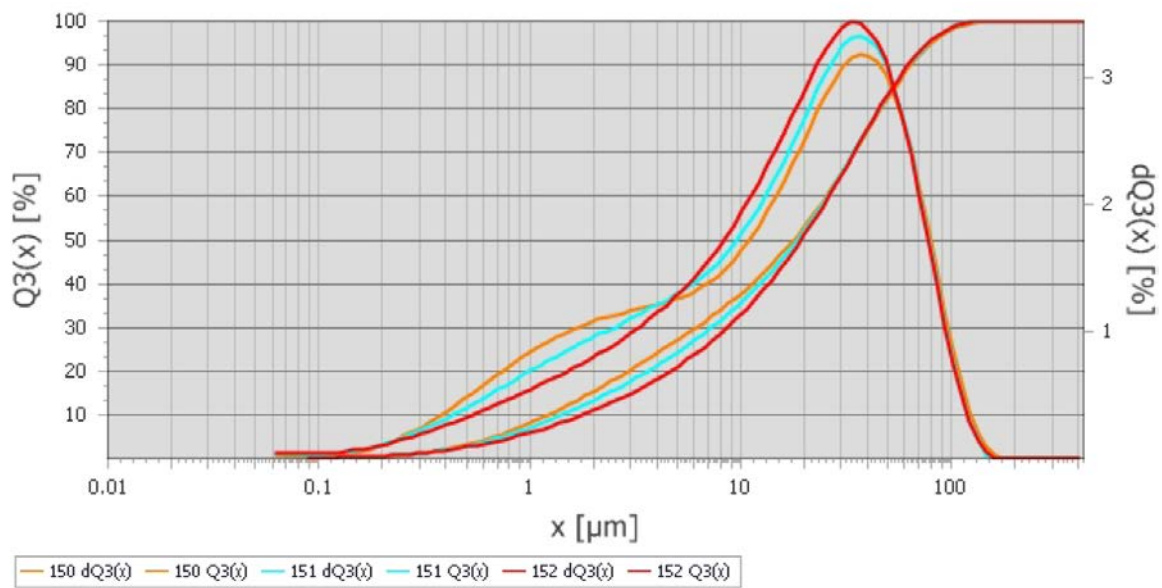
Области на приложение:

- армиран и неармиран бетон,
- съоръжения в промишленото строителство,
- малоразмерни бетонни изделия и елементи,
- готови бетон смеси, приготвени в бетонови центрове по БДС EN-206-1.

Резултатите от измерванията, направени с нано-грануломера FRITSCHE Analysette 22 NanoTec plus (**фиг.2.7**) показват, че едрината на продукта е 105,7  $\mu\text{m}$ .

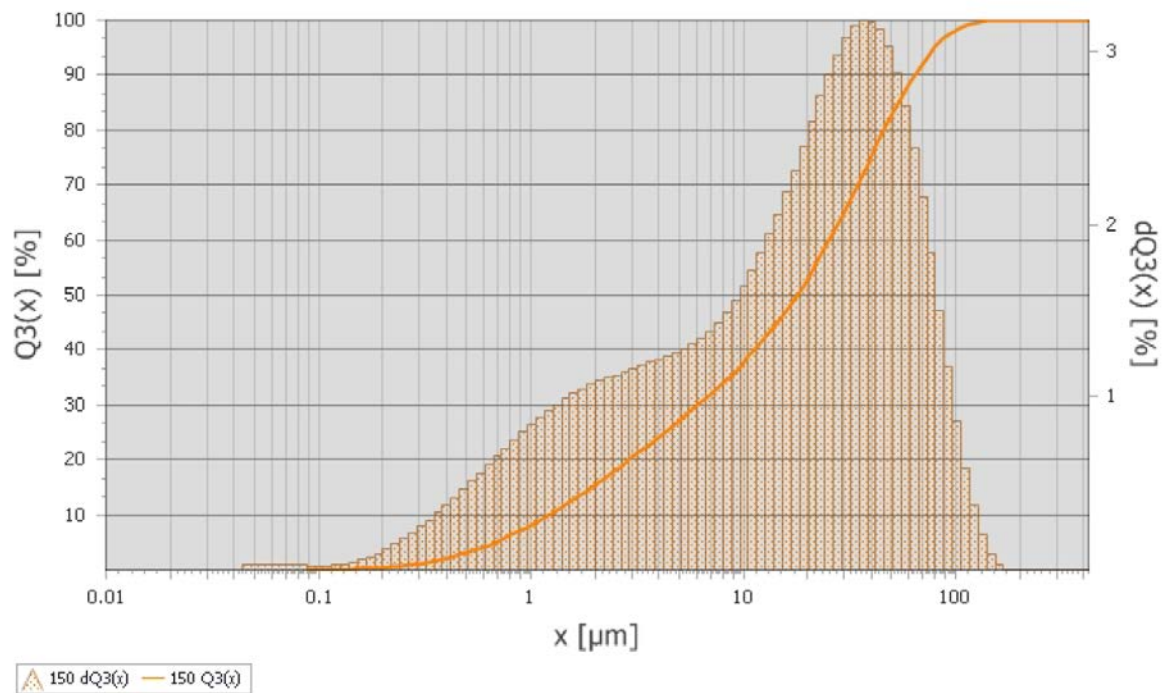
За цимент тип 32,5 разпределението на частиците е показано на **фиг. 4.2** и **таблица 4.4**, **таблица 4.5** и **таблица 6.6**.

## Overview of all Measurements

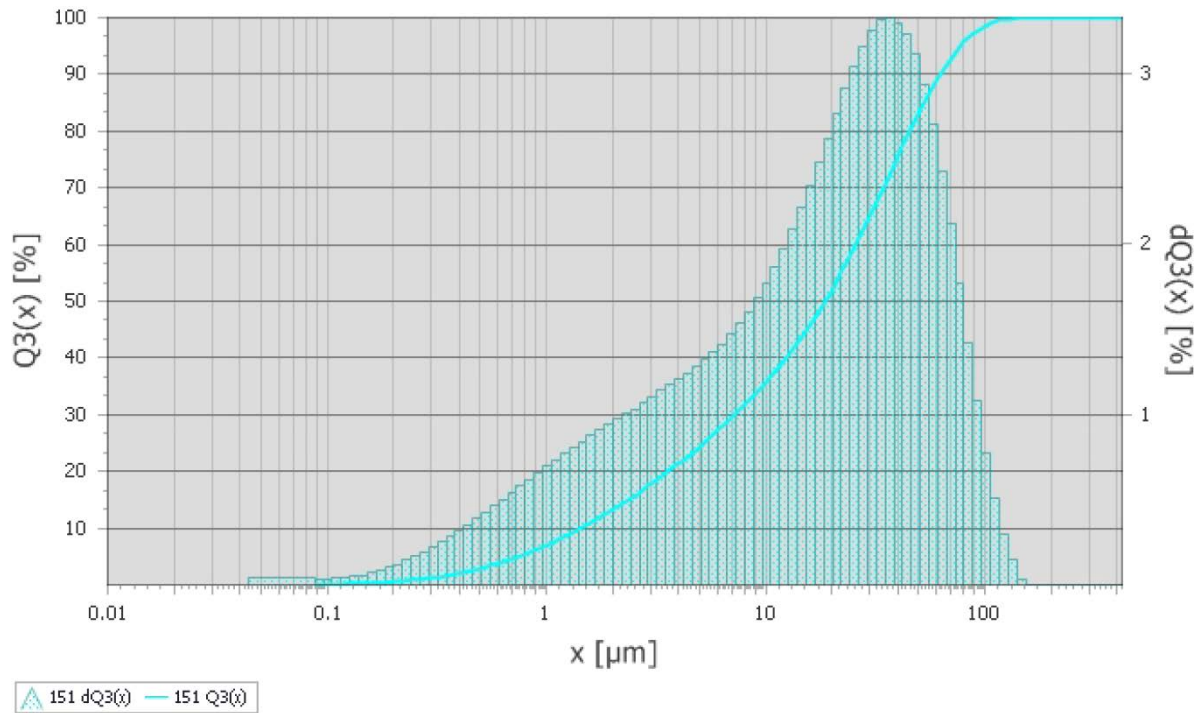


Q3(x) [%]	x [µm]	CV [%]	M150	M151	M152
10	1.5	15.9	1.2	1.4	1.8
20	3.7	18.8	2.9	3.6	4.6
30	7.3	13.7	6.1	7.2	8.6
50	18.6	3.4	17.9	18.6	19.4
80	45.5	0.8	46.1	45.4	45.2
90	62.8	1.5	64	62.3	61.9
99	107.6	2.4	111.2	105.7	105.7

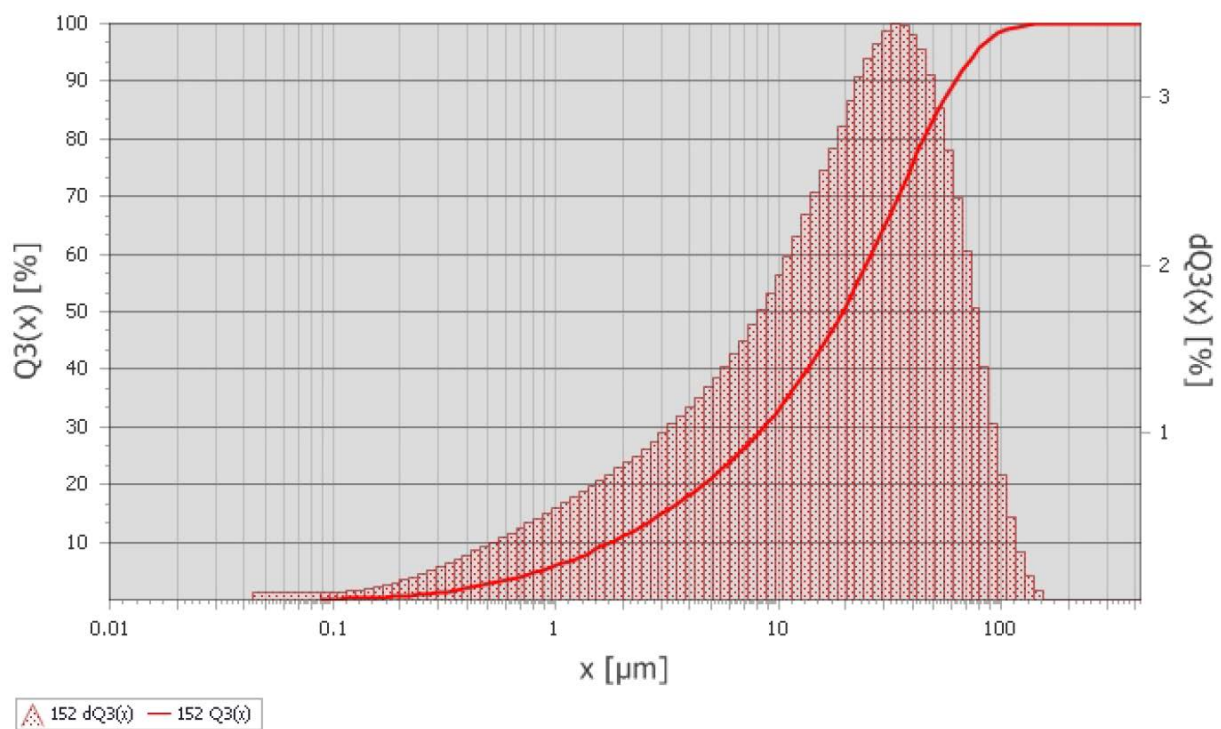
а – обща графика на трите измервания



б – измерване 1



в – измерване 2



г – измерване 3

**Фиг.4.2.** Изследване на цимент 32,5: а – обща графика на трите измервания, б – измерване 1, в – измерване 2, г – измерване 3

На **фиг.4.2 а** е представено прекриването на 3те измервания. В съответните цветове. Таблицата под графиката показва данните за трите измервания, от която става

ясно, че проба М150 (служебно име от уреда, което означава М-measurement) – 111,2  $\mu\text{m}$ , измерване М151 – 105,7  $\mu\text{m}$  и измерване 3, което се препокрива с 2 – 105,7  $\mu\text{m}$ .

На **фиг. 4.2. б, в, г** е показана детайлна графика на измерванията с плавна крива, което говори за добри и достоверни резултати.

За по-голяма прегледност и детайлност са съставени три таблици с трите вида изследвания, а именно **таблица 4.4** измерване 1 (М150), **таблица 4.5** измерване 2 (М151) и съответно **таблица 4.6** измерване 3 (М152).

**Таблица 4.4.** Измерване 1

Q3(x) [%]	x [ $\mu\text{m}$ ]
10	1.2
20	2.9
30	6.1
50	17.9
80	46.1
90	64
99	111.2

**Таблица 4.5.** Измерване 2

Q3(x) [%]	x [ $\mu\text{m}$ ]
10	1.4
20	3.6
30	7.2
50	18.6
80	45.4
90	62.3
99	105.7

**Таблица 4.6.** Измерване 3.

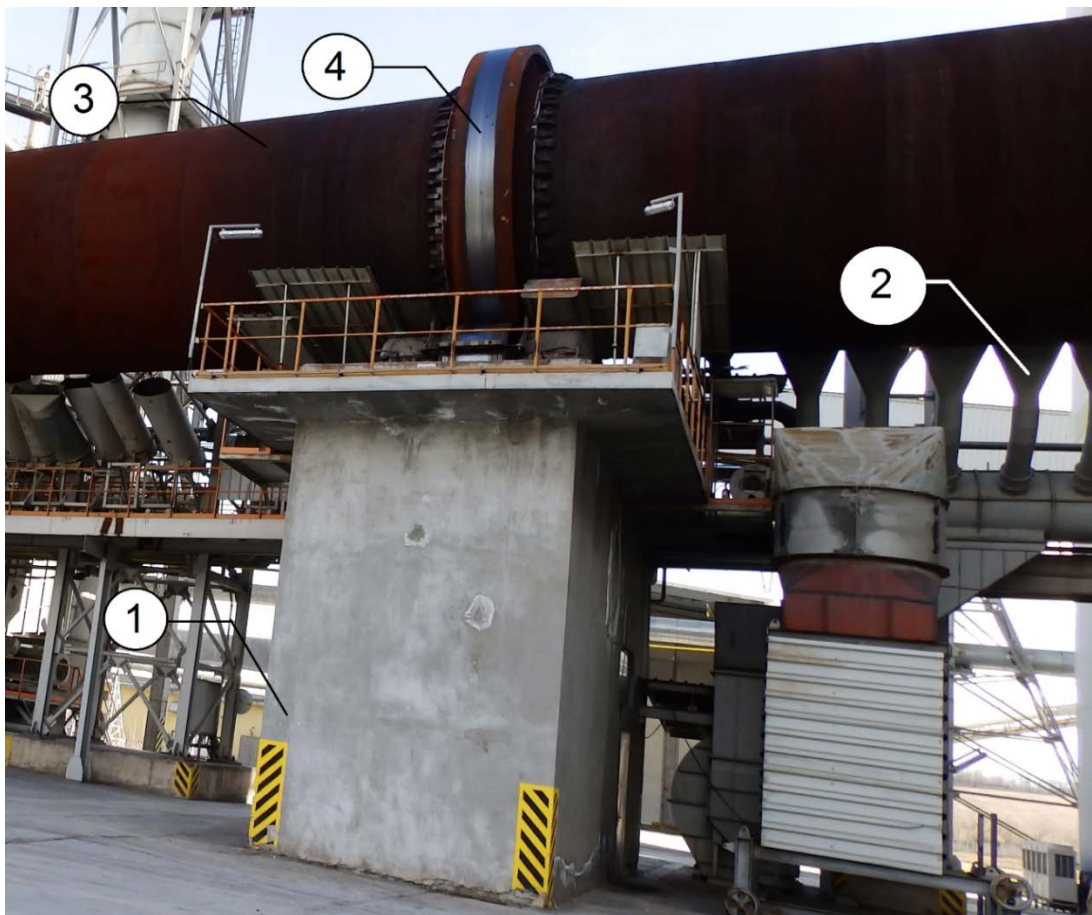
Q3(x) [%]	x [ $\mu\text{m}$ ]
10	1.8
20	4.6
30	8.6
50	19.4
80	45.2
90	61.9
99	105.7

За постигане на настоящите резултати са направени редица измервания, тъй като има редица фактори, оказващи влияние при процеса на измерването. Всеки тип (вид) материал за измерване е индивидуален.

#### 4.2. Изследване на температура при ротационна пещ

Производството на цимент се състои от няколко етапа. Един от тези етапи е пещта. Пещта е предназначена за постигане на максимална ефективност на топлопредаването от горивото към суровината. В топлообменната кула суровините бързо се нагряват до около 1000°C, като варовикът образува негасена вар. В ротационната пещ температурата достига до 2000°C. При тази висока температура минералите се стапят и смесват, като образуват кристали с преобладаващо калциево-силикатен състав - циментов клинкер [9, 14].

Съгласно методиката в глава 3, т. 3.2 (Съставяне на методика за изследване на температура при ротационна пещ), е необходимо запознаване с компонентите на пещта, показани на **фиг. 4.3** в реална експлоатация.



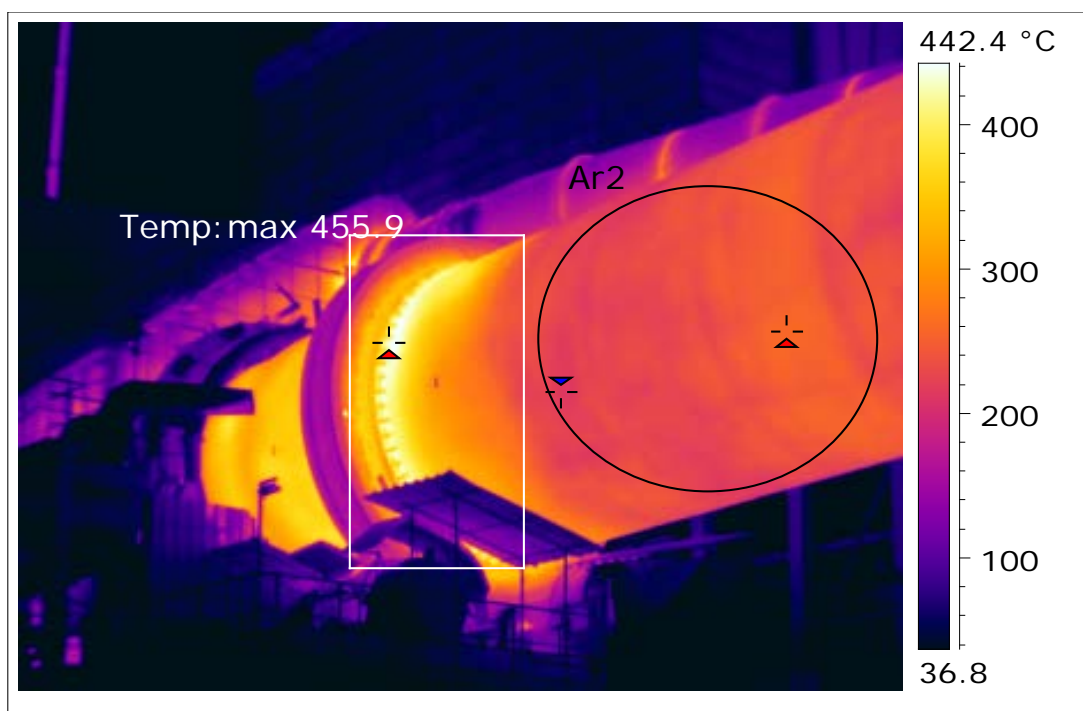
**Фиг. 4.3.** Пещ, 1 – фундамент, 2 – охладители, 3 – пещ, 4 – лагер

Температурата по цялата дължина трябва да бъде равномерна с нормални отклонения. Пример за равномерност е „Ar2“ от **фиг. 4.4**. Там температурата е в диапазона от 212,5°C (син маркер) до 259,4°C (червен маркер) – **таблица 4.7**. Самата



пещ е снабдена с охладители в долната си част (**фиг. 4.3**, позиция 2), които да поддържат равномерното разпределение на тези температури.

Поддържането на температурата в зададени граници и равномерност е от особена важност за правилната експлоатация и за времето на живот на компонентите на пещта (в частност носещите лагери). Неправилното разположение и режим на работа на охладителите води до прегряване и понижаване живота и качеството на лагерите. Термографското изследване по предложената методика има за цел оптимално разполагане и режим на работа на охладителите, както и периодичен контрол. Също така на контрол подлежи и облицовката на пещта, тъй като при дефекти и изтънявания това може да се регистрира чрез промяната в термо картината.



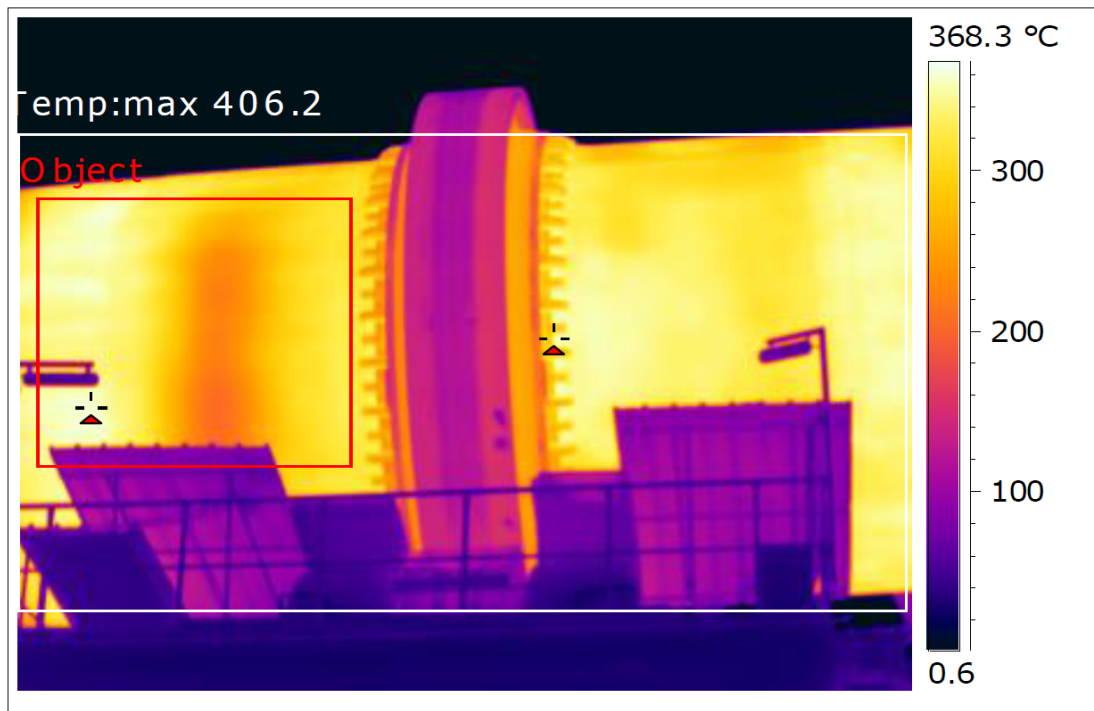
**Фиг. 4.4.** Термография на ротационна пещ за топкова мелница отсек 1

**Таблица 4.7.** Данни от термография на ротационна пещ на отсек 1

Image Camera Type	FLIR P640
Temp. Emissivity	0.79
Ar2 Max. Temperature	259.4 °C
Ar2 Min. Temperature	212.5 °C
Temp Max. Temperature	455.9 °C

Направените изследвания с термалната камера FLIR P640 показват неравномерно разпределение на топлината при лагера на пещта (**Фиг. 4.4**). Максималната температура, достигаща при лагера Temp: max. 455,9 °C (червен маркер) – **таблица 4.7** е твърде висока. Високата температура при лагера спомага за по-бързата му амортизация.

Същият ефект се наблюдава и при другият лагер, показан на **фиг. 4.5**. Там максималната температура (**таблица 4.8**) достига  $406^{\circ}\text{C}$  (червен маркер), като освен при лагера, се наблюдава покачена температура и след него, показано в червеният квадрат с максимална температура от  $404^{\circ}\text{C}$  (червен маркер). Повишената температура води до по-бързото износване и на самата облицовка на ротационната пещ.

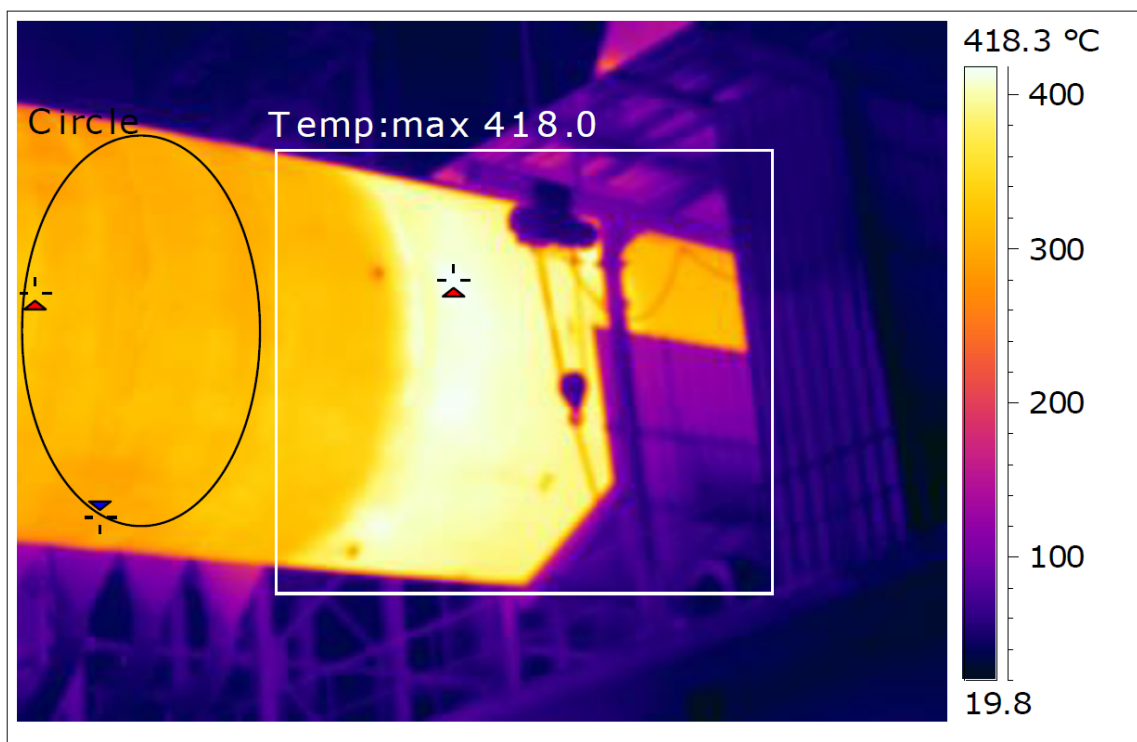


**Фиг. 4.5.** Термография на ротационна пещ за топкова мелница отсек 2

**Таблица 4.8.** Данни от термография на ротационна пещ на отсек 2

Image Camera Type	FLIR 640
Object Emissivity	0.79
Object Distance	10.0 m
Object Max. Temperature	$404.0^{\circ}\text{C}$
Temp Emissivity	0.79
Temp Max. Temperature	$406.2^{\circ}\text{C}$
Temp Object Distance	10.0 m

На **фиг. 4.6** се наблюдава отново проблем при охлаждането на кожата на пещта (**таблица 4.9**) с температура от  $418^{\circ}\text{C}$  (червен маркер), като за сравнение с желаната поддържана температура от около  $290^{\circ}\text{C}$  до около  $340^{\circ}\text{C}$  е дадено в черния кръг със съответните топла зона от  $334^{\circ}\text{C}$  (червен маркер) и студена зона от  $287,7^{\circ}\text{C}$  (син маркер).



Фиг. 4.7. Термография на ротационна пещ за топкова мелница отсек 3

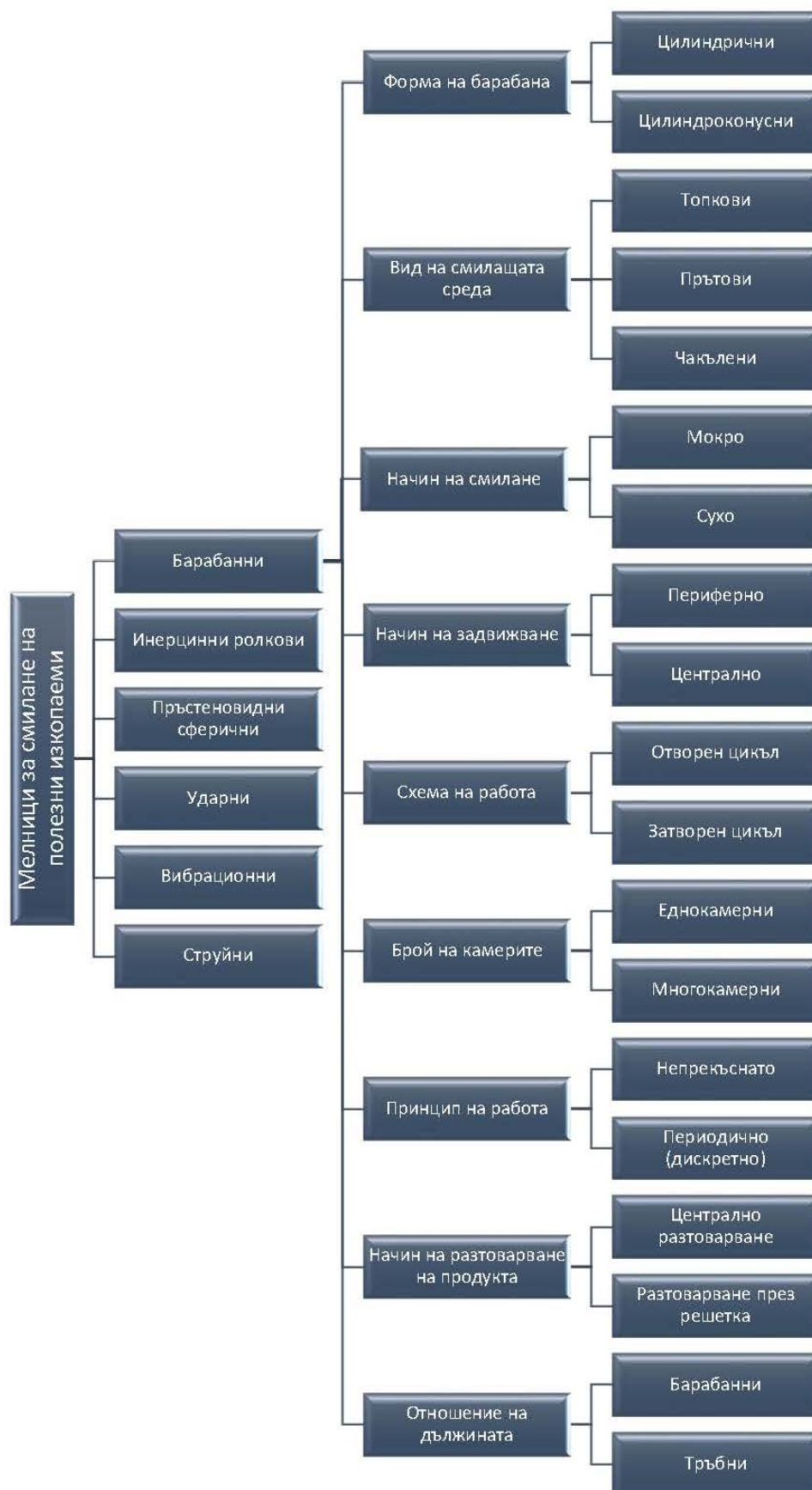
Таблица 4.9. Данни от термография на ротационна пещ на отсек 3

Image Camera Type	FLIR P640
Temp Max. Temperature	418.0 °C
Temp Emissivity	0.79
Circle Max. Temperature	334.0 °C
Circle Min. Temperature	287.7 °C
Circle Emissivity	0.79

### 4.3. Изследване движението и взаимодействието на тела с променлива форма

При направеният литературен обзор става ясно, че мелниците за смилане се делят на поне 5 вида, съдържащи под видове и под типове. За да се добие по добра представа от всички налични мелници е направен опит за класификация на тези машини за смилане, показан на **фиг. 4.8**. Най-голямо внимание е обърнато на барабанните топкови мелници.

Описаната в глава 3, т. 3.3 (Съставяне на методика за симулиране на смилателни процеси), изисква построяване на геометричен модел. За такъв модел са взети размери на реална лабораторна топкова мелница със следните размери: вътрешен диаметър  $D=305\text{mm}$  и дължина от  $L=305\text{mm}$ . Тази мелница максимално се доближава до габаритите на мелница на БОНД.

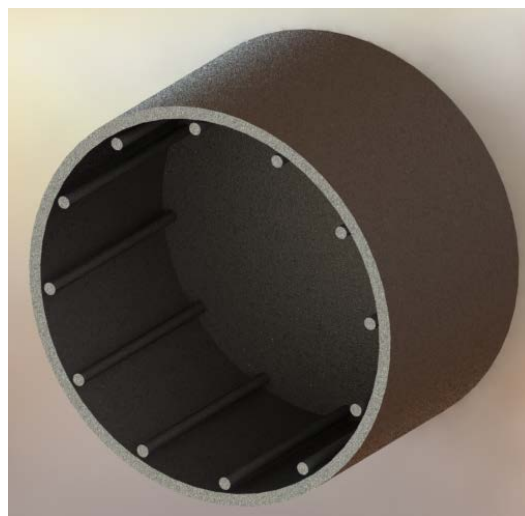


Фиг. 4.8. Класификация на машини за смилане

#### 4.3.1. Конструктивните характеристики на барабанна топкова мелница

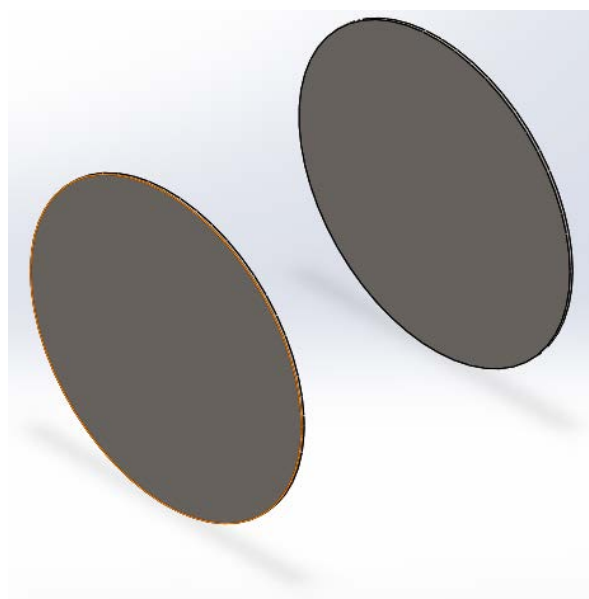
Конструктивните характеристики на барабанната топкова мелница представляват три камерна конструкция с различна ширина на поясите – 150, 100 и 50mm. Това дава възможност за получаване на 7 различни ширини. Страничните капаци са прозрачни, предпазени са с метална решетка. Това позволява наблюдаване на различните режими на смилане и заснемане на смиланите тела. Мелницата има възможност за добавяне на лифтери, като техният брой е до 24. Задвижването е безстепенно.

За да се осъществи изследването е необходимо горепосочената мелница да бъде моделирана на 3D CAD продукт, позволяващ записване в някой от следните формати – \*.igs, \*.iges, \*.stp, \*.step, \*.msh, \*.stl. 3D CAD моделът е показан на **фиг.4.9**.

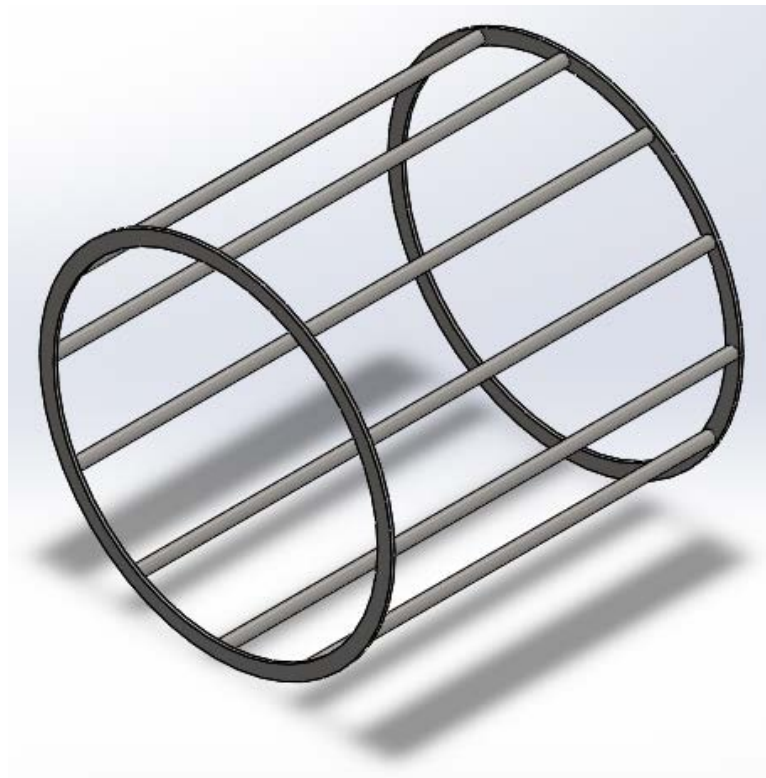


**Фиг.4.9.** Общ вид на 3D CAD модел на лабораторната мелница

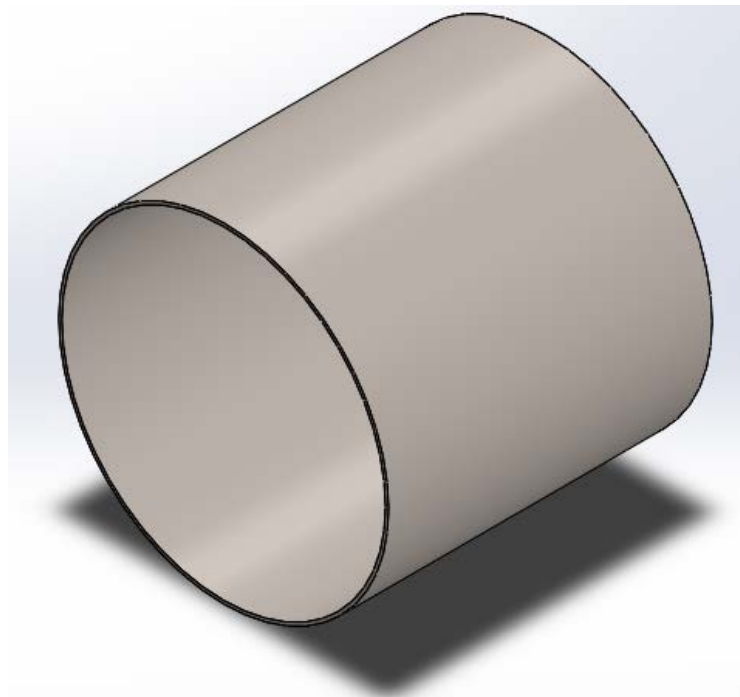
Моделът е разделен на три основни компонента, показани на **фиг. 4.10**.



а) капаци



б) лифтери



в) кожух

**Фиг. 4.10.** Основни компоненти на топкова лабораторна мелница: а – капаци, б – лифтери, в – кожух

Разделянето на компоненти позволява по-лесна промяна на параметри като дължина и диаметър, както и брой и форма на лифтерите.

Преди да се предприеме симулация, трябва да се установи броят на лифтерите, който в случая е 12, количеството мелещи тела, използвани за запълването на мелницата – по литературни данни 30% и диаметърът на мелещите тела, който е 25mm.

Определена е критичната скорост на мелницата по формулата:

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{g}{R}} = 8,02 \text{ rad/s} = 76 \text{ rpm} \text{ Edem Software Manual}$$

Където:

$V_{cr}$  – критични обороти на мелницата

$g$  – земно ускорение;

$R$  – вътрешен радиус на барабана

Мелниците в повечето случаи работят със скорост от 65 до 85% от критичните обороти. За този обект на изследване се използват 75% от критичните, което е 57 rpm. Тук се достига до най-използвания режим на работа – катарактен режим.

Според Левенсон оптималното запълване на мелницата със смилаци тела трябва да съответства на  $h = 0,16 D$  (фиг.4.11).

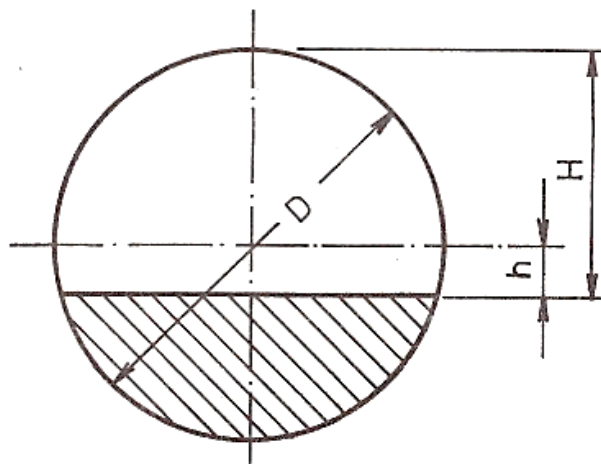
Коефициентът на запълване представлява отношението на обема на смилациите тела към работния обем на мелницата. Изчислява се по формулата:

$$\varphi = \frac{100.G}{g.V}$$

Където  $G$  е масата на пълнежа, t;

$g$  – обемната маса на пълнежа,  $t/m^3$ ;

$V$  – работният обем на мелницата,  $m^3$ .



Фиг.4.11. Запълване на мелницата със смилаци тела

Съществуват различни методи за определяне размера на смилащите тела. ъна сферичните смилаци тела се изчислява по формулата на Бонд:

$$B = 20,17 \sqrt{\frac{F}{k}} \cdot \sqrt[3]{\frac{W_i \cdot S}{c_s \cdot \sqrt{D}}}, mm$$

където  $B$  е диаметърът на сферата, mm

$F$  – едрина на зърната на подавания материал, равна на размер на сито, при което 80% от материала преминава през него,  $\mu m$ ;

$W_i$  е работният индекс на Бонд, равен на специфичния разход на електроенергия,  $kWh/t_{кор}$ ;

$c_s$  – скорост на мелницата, % от критичната;

$s$  – плътността на смилания материал,  $g/cm^3$

$D$  – вътрешният светъл диаметър на мелницата, m

$k$  – константа (за стоманени топки при мокро смилане  $k = 350$ , при сухо смилане  $k = 335$  за отворен и затворен цикъл). [103]

#### 4.3.2. Задаване на входни данни за симулирането на сферични мелеци тела

От описаната методика следва да се зададат следните входни данни:

- Определяне и задаване на необходимият модел - Hertz-Mindlin (no slip)
- Определяне на необходимите връзки между частици или частици и геометрия – избрана е връзка между всички обекти, участващи във симулацията, тъй като всеки един обект оказва влияние.
- Задаване на гравитация – гравитацията е нанесена по ос  $Z = 9,81 m/s^2$ ,
- Задаване на материали – за задаването на материалите са използвани реалните – стомана за мелеци тела, както и стомана за геометрията на мелницата.
- Задаване свойства на материалите – определени са коефициент на Поасон, плътност на материалите.
- Задаване на връзки между различните материали – зададени са връзки между телата и геометрията.
- Определяне размерите на частиците, повърхнините им, материал, обем, моменти на инерции по оси  $X, Y, Z$
- Импортиране на 3D моделите, задаване на материала им - стомана, определяне на центъра на масата.
- Задаване на динамични характеристики (линейна ротация – 57 rpm). Задаване на продължителност на действието.

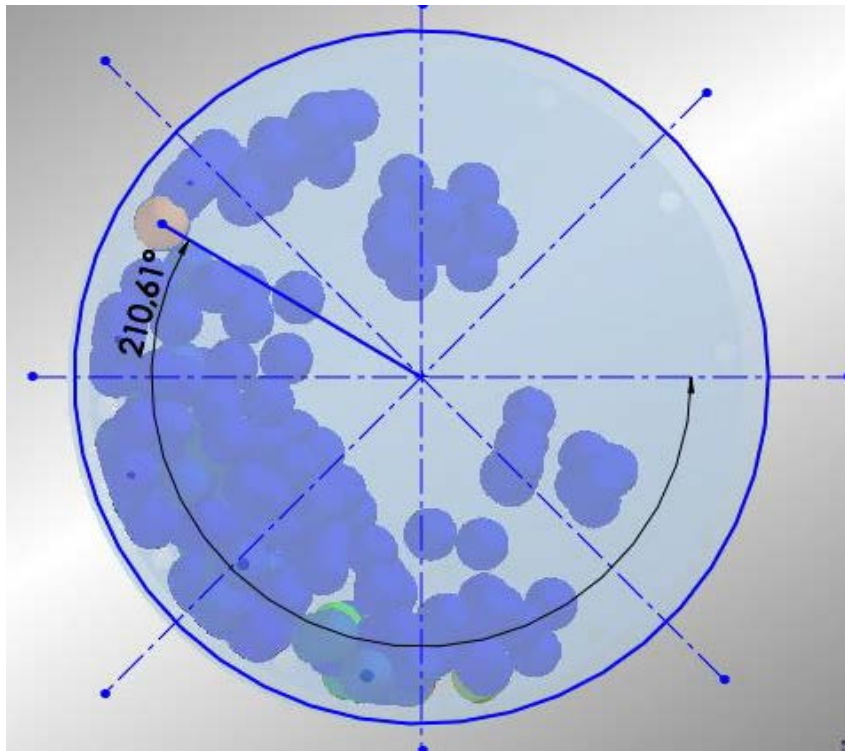


- Определяне посоката на действие по ос X.
- Определяне на необходимият брой частици – 30% от общия обем на мелницата, времето за което ще се осъществи генерирането им – 1s. Време от което ще започнат да се генерират 0s.
- Задаване на параметри на частиците като тип - стандартен, размер - непроменен, позиция - случайна.
- Задаване на време, необходимо за извършване на симулацията – 10s.

#### 4.3.3. Анализирание данните от симулацията на сферични мелеци тела

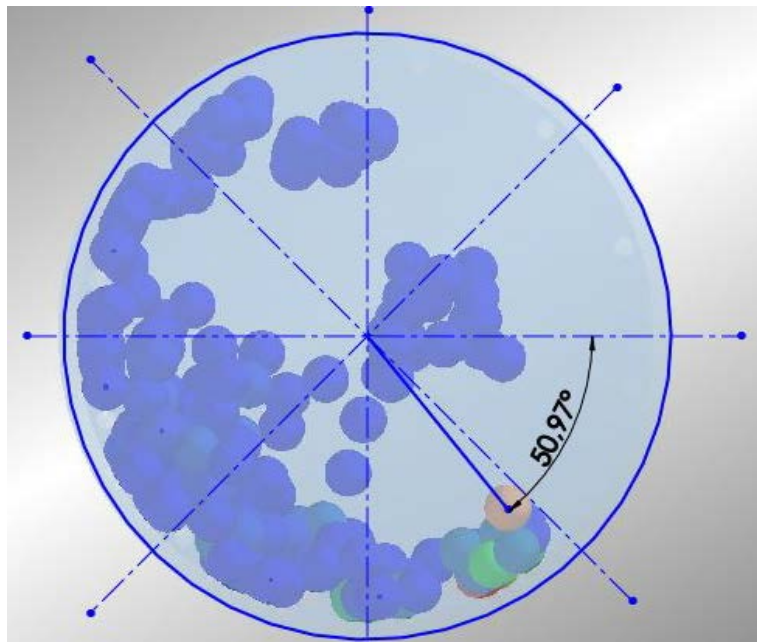
На базата на тези зададени данни е осъществена симулация само с мелеци тела, с цел да се отчете ъгъл на отделяне от рамото на мелницата, ъгълът на падане и силата на удар при падане – **фиг. 4.12 - 4.15** [105-108].

- Ъгъл на отделяне от рамото на мелницата –  $210,61^\circ$



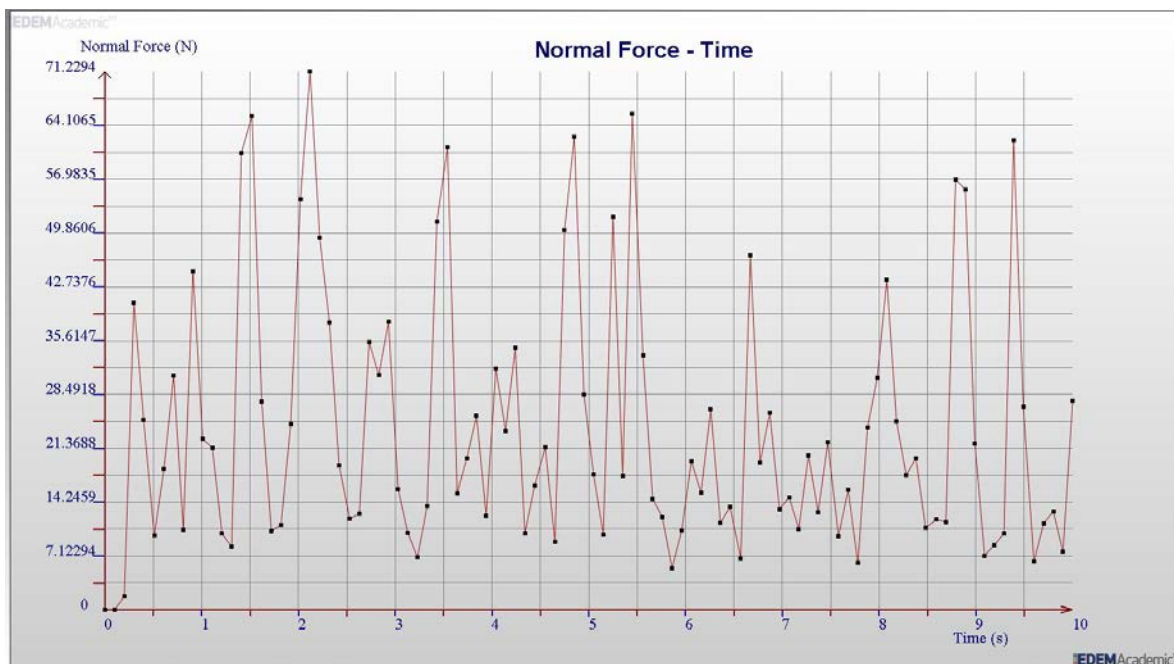
**Фиг.4.12.** Определяне ъгъла на отделяне от рамото

- Ъгъл на падане –  $50,97^\circ$

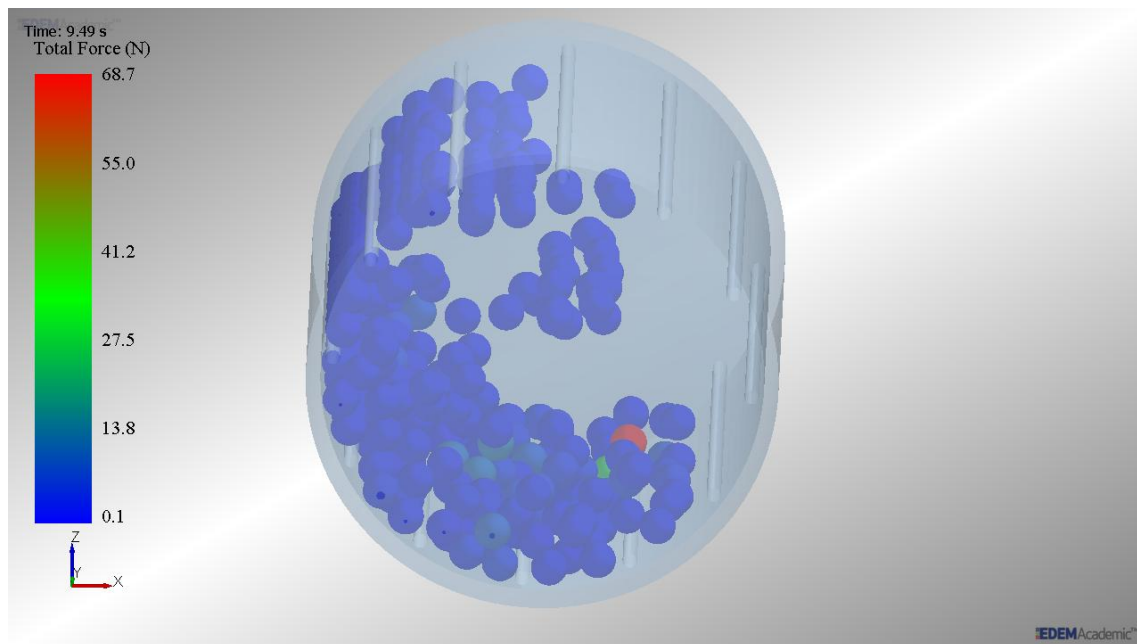


Фиг.4.13. Определяне ъгъла на падане

- Сила на удар при падане.



Фиг.4.14. Разпределение на силата за цялата симулация



**Фиг.4.15.** 3D изображение на сила на удара в момент 9,49s от симулацията

Постигнатите резултати от симулацията са от особено значение за проследяване на цялостния процес на движение на телата. Очаква се при промяната на ключови фактори (промяна диаметъра и броя на топките, промяна оборотите на мелницата, промяна вида и броя на лифтерите) да се променят и стойностите, отчетени от симулацията.

#### 4.3.4. Задаване на входни данни за симулирането на сферичен тетраедър

От описаната методика следва да се зададат следните входни данни, близки до тези при симулация със сферични мелещи тела:

1. Определяне и задаване на необходимият модел - Hertz-Mindlin (no slip)
2. Определяне на необходимите връзки между частици или частици и геометрия – избрана е връзка между всички обекти, участващи във симулацията, тъй като всеки един обект оказва влияние.
3. Задаване на гравитация – гравитацията е нанесена по ос  $Z = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,
4. Задаване на материали – за задаването на материалите са използвани реалните – стомана за мелещи тела, както и стомана за геометрията на мелницата.
5. Задаване свойства на материалите – определени са коефициент на Поасон, плътност на материалите.
6. Задаване на връзки между различните материали – зададени са връзки между телата и геометрията.
7. Определяне размерите на частиците, повърхнините им, материал, обем, моменти на инерции по оси X, Y, Z, импортиране на форма.

8. Импортиране на 3D моделите, задаване на материала им - стомана, определяне на центъра на масата.
9. Задаване на динамични характеристики (линейна ротация – 57 rpm). Задаване на продължителност на действието.
10. Определяне посоката на действие по ос X.
11. Определяне на необходимият брой частици – 30% от общия обем на мелницата, времето за което ще се осъществи генерирането им – 1s. Време от което ще започнат да се генерират 0s.
12. Задаване на параметри на частиците като тип - стандартен, размер - непроменен, позиция - случайна.
13. Задаване на време, необходимо за извършване на симулацията – 10s.

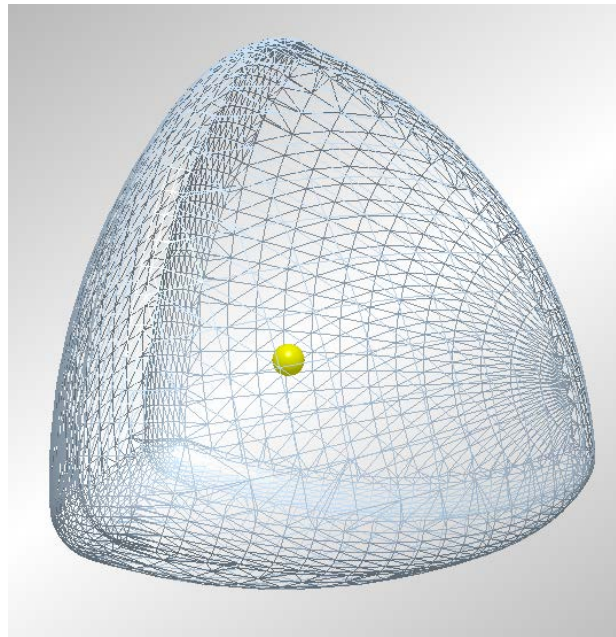
Спецификата при тази симулация е формата на мелещото тяло. Според литературни източници [21], това тяло има по-добра ефективност, но не е изследвано както сферичните мелещи тела. Това налага изследването му, което не е просто като при сферичните мелещи тела, поради спецификата на работа на софтуера.

За да се осъществи симулиция, първо тялото трябва да бъде моделирано в 3D софтуер (**фиг. 4.16**).



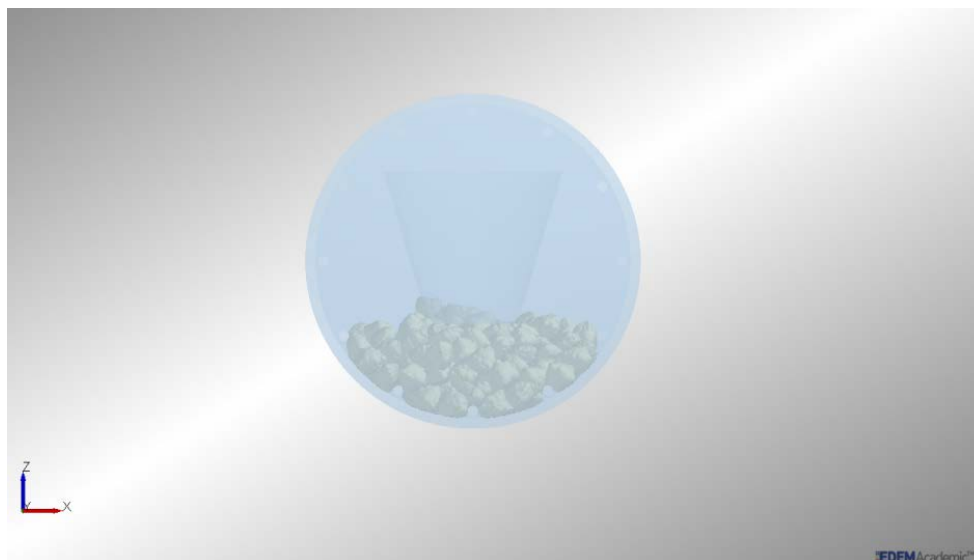
**Фиг. 4.16.** 3D модел на сферичен тетраедър

Построеният модел се импортира в софтуера, като цялото му съдържание трябва да се запълни с голям брой сфери. Всяка сфера трябва да бъде поставена във модела и ориентирана по XYZ. Процесът е показан на **фиг. 4.17**.



**Фиг. 4.17.** Импортиран модел в EDEM Software

За запълване на мелницата отново се използват 30%, за да може да бъдат сравнени симулациите.



**Фиг.4.18.** Запълване 30% със сферични тетраедри

Поради специфичната форма на този тип мелецо тяло е необходимо съставяне на методика за отчитане на резултатите му.

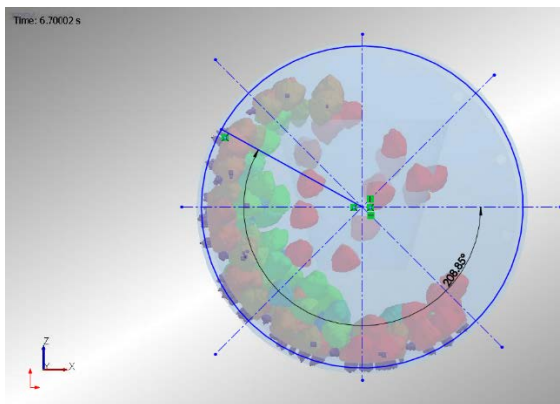
За изследване поведението на сферичния тетраедър при движение в лабораторна мелница се използва симулационно моделиране в софтуерна среда EDEM Software. Техническата реализация на методиката е в следната последователност:

- Определяне размерите на сферичния тетраедър.
- Построяване на сферичния тетраедър.

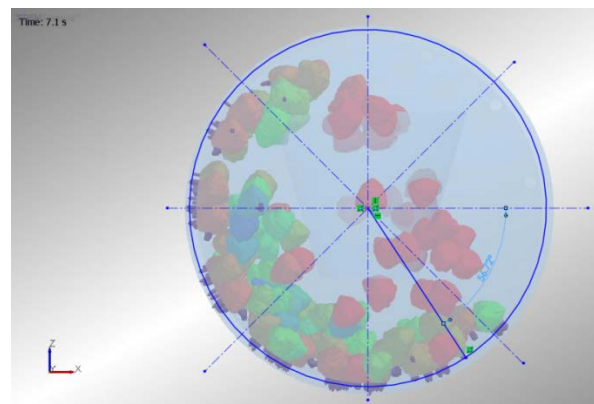
- Задаване на стойностите на параметрите:
  - Посока на въртене.
  - Обороти на лабораторната мелницата.
  - Процентно запълване със сферични тетраедри на лабораторната мелница
- Определяне на „контактното петно“ между сферичния тетраедър и вътрешната повърхнина на мелницата.
- Определяне на ъгъла на отделяне чрез контактен вектор.
- Определяне на ъгъла на падане на сферичния тетраедър.
  - падане върху повърхнината на мелницата;
  - падане върху лифтер;
  - падане върху друго мелещо тяло.

#### 4.3.5. *Анализиране данните от симулацията на сферични тетраедри.*

В произволен момент от времето на симулацията е взето произволно тяло. Проследена е траекторията на това тяло. Определени са ъгълът на отделяне и ъгълът на падане на това тяло. Координатата „x“ се възприема за  $0^\circ$  Спрямо него се определят ъгълът на отделяне от рамото на мелницата, който в случая е  $208,85^\circ$  (фиг.4.19). Ъгълът на падане е  $56, 72^\circ$  (фиг.4.20).

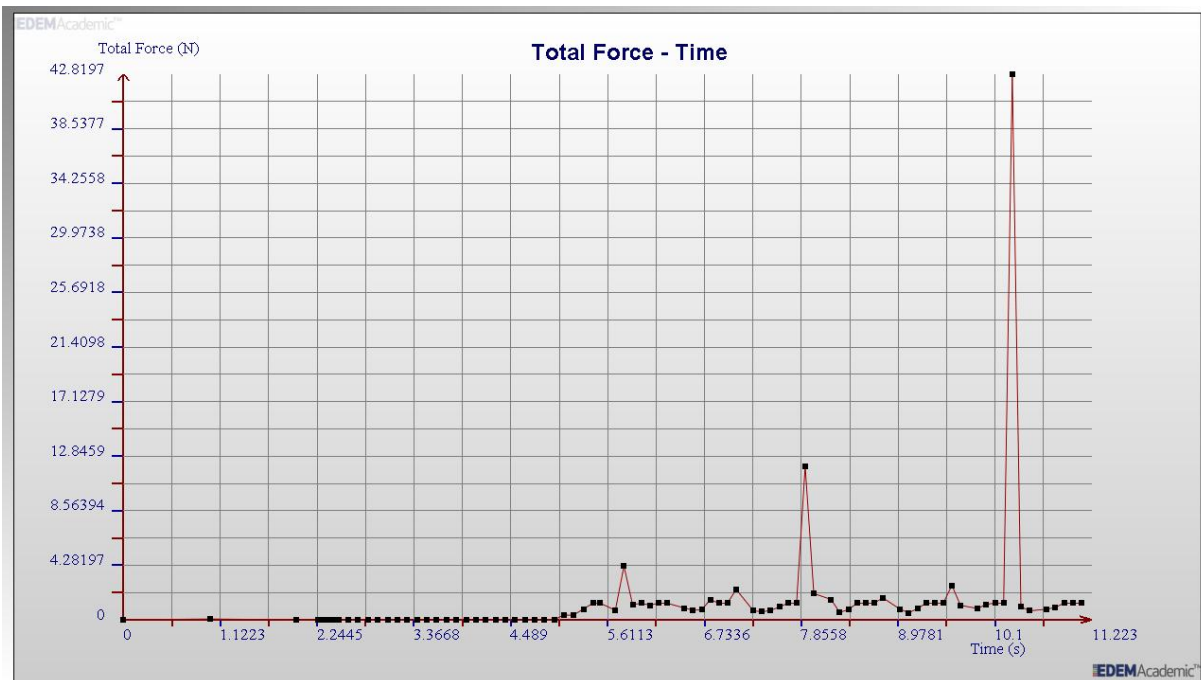


**Фиг. 4.19.** Определяне ъгъла на отделяне от рамото



**Фиг. 4.20.** Определяне ъгъла на падане

След определянето на ъглите трябва да се намери зависимостта на силата, която действа на даденото тяло. В момента, който е определен ъгълът на падане, това тяло не пада на стената на мелницата или на лифтер, а контактува с други тела. На **фиг. 4.21** е извадена силата, която действа на тялото през целия период на симулацията. Да се направи анализ на падането на тялото според силата в графиката.



**Фиг. 4.21.** Сила на удар на избрана частица

При пик 1 от графиката, силата получена в момента на удара при време  $t = 5,8$  s е  $F = 4,22$  N. Получава се контакт между 3 тела. При пик 2,  $t = 7,9$  s, силата  $F = 12,03$  N, контакта е с други 2 тела. И при третият пик  $t = 10,3$  s, силата  $F = 42,82$  N, осъществява се контакт с друго тяло.

При промяна на размерите на мелещите тела, както и промяна размерите на мелниците, а също и оборотите, тези ъгли се променят. Трябва да се търси оптимален вариант на съотношение между тези три параметъра.

Очакваните постигнати резултати до известна степен се потвърдиха. Те ще бъдат като база на по-нататъшните експериментални изследвания при използването на симулационното моделиране с помощта на EDEM Software.

#### 4.3.6. Сравнителен анализ между различни форми мелещи тела

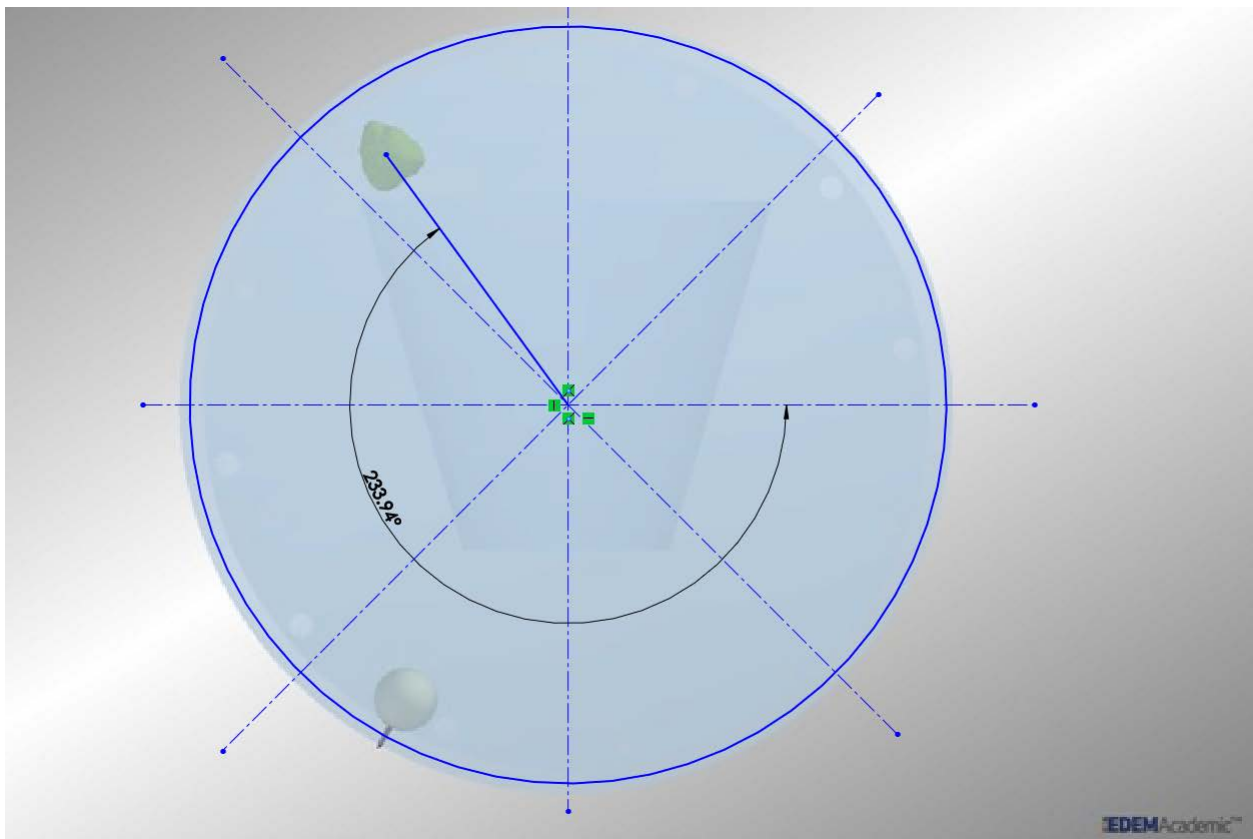
В EDEM Software е направен сравнителен анализ между две тела с различна форма. Сферично мелещо тяло и сферичен тетраедър. Двете тела са в една мелница и са с еднаква маса. Определен е ъгъл на отлепяне от рамото на мелницата и ъгъл на падане. По време на симулацията, която е 30 секунди е сравнен и броят на „успешните“ издигания до получаване на желанийт режим на работа (катарактен режим) на двете тела, описан в Глава 1 [109-112].

Броят на издиганията на тетраедъра е 26, а броят на сферичното тяло са 21.

Отчетени са (фиг. 4.22 – 4.33):

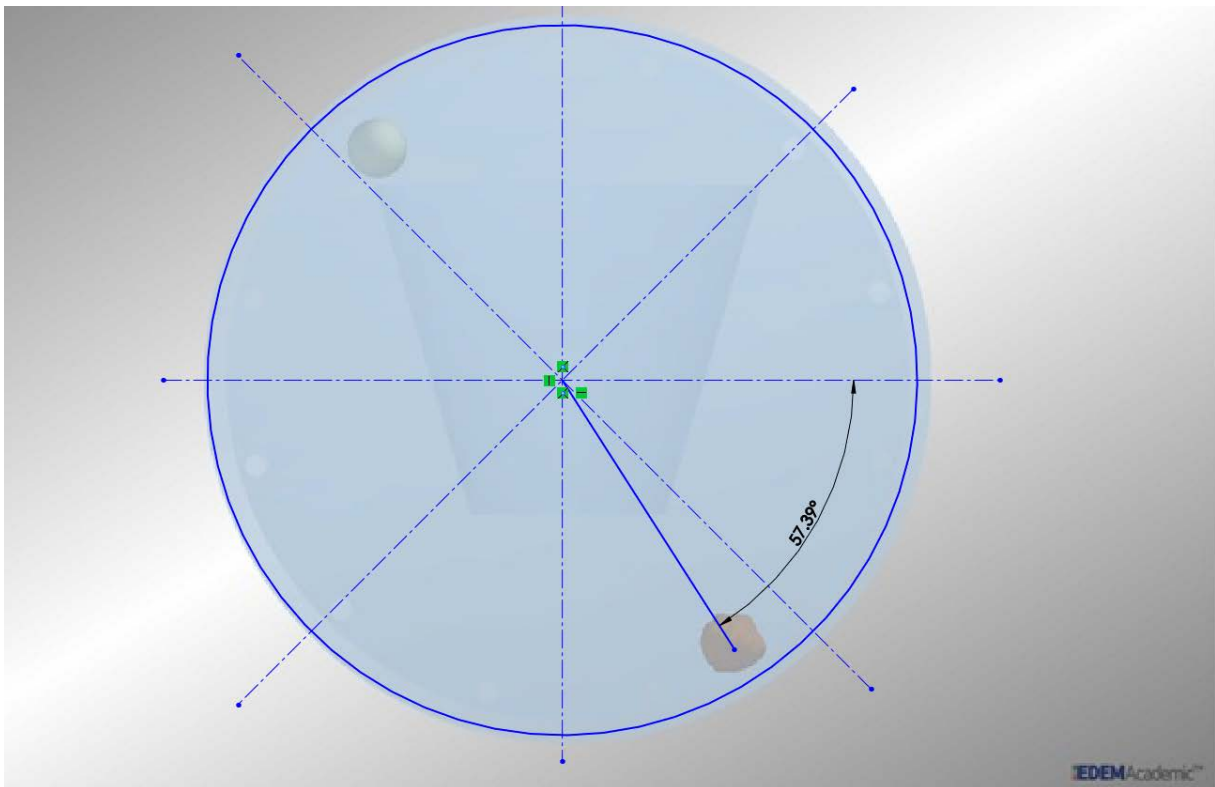
- Ъглова скорост тетраедър;
- Ъглова скорост сферично тяло;

- Сила тетраедър;
- Сила сферично тяло;
- Ускорение тетраедър;
- Ускорение сферично тяло;
- Скорост тетраедър;
- Скорост сферично тяло.

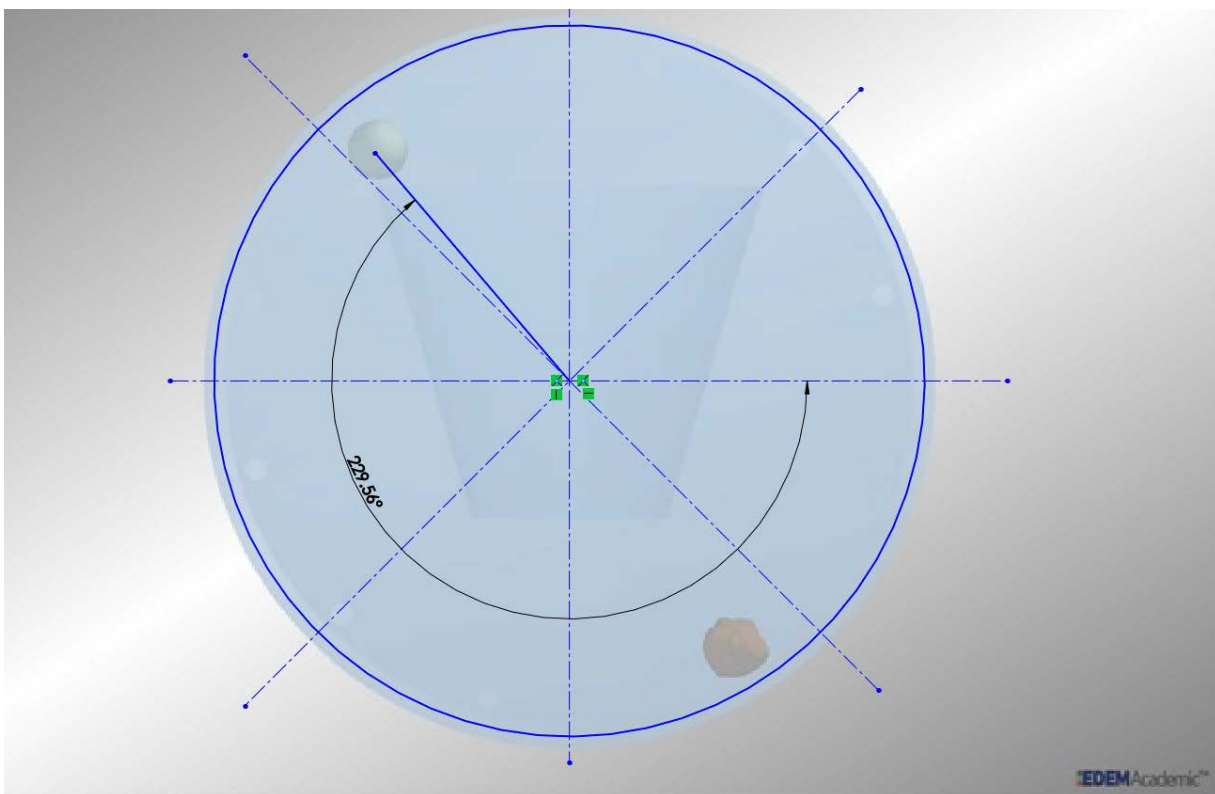


**Фиг. 4.22.** Определяне ъгъла на отделяне на тетраедър

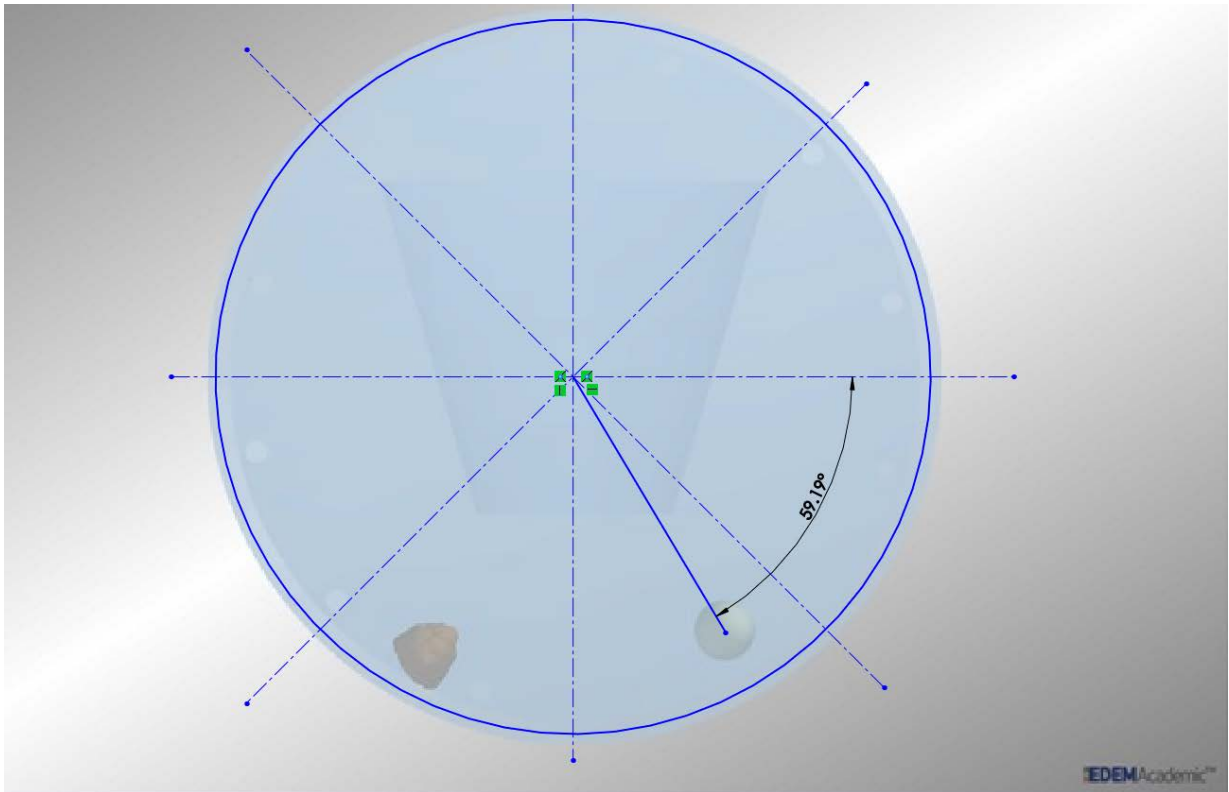




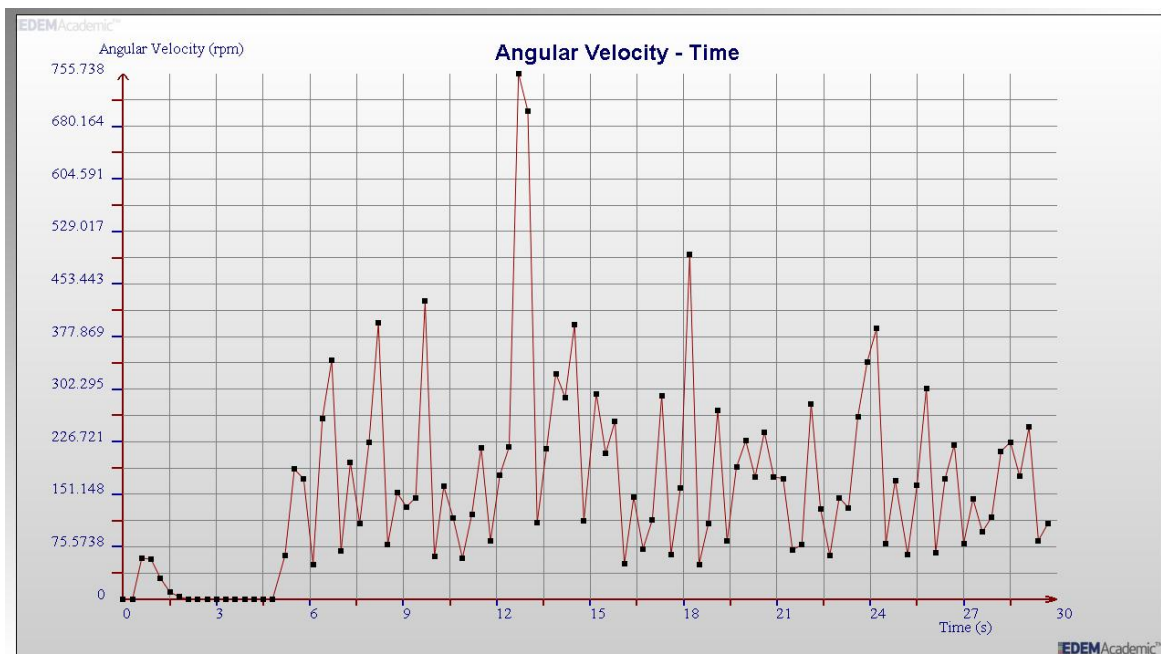
Фиг. 4.23. Определяне ъгла на падане на тетраедър



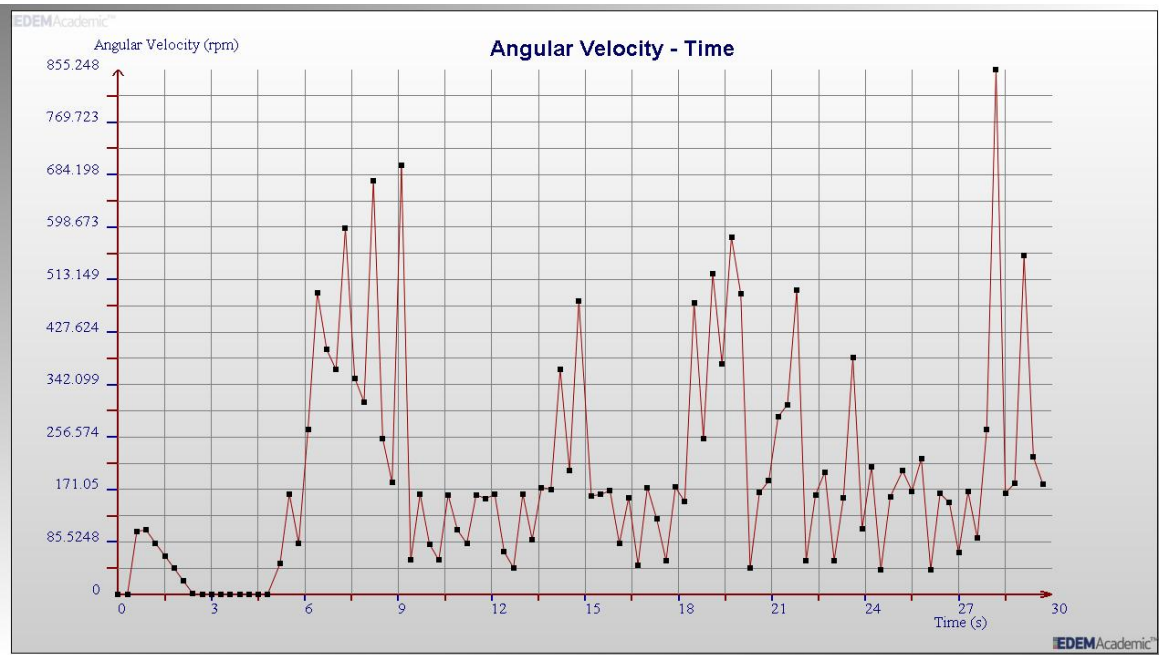
Фиг. 4.24. Определяне ъгла на отлепяне на сферично тяло



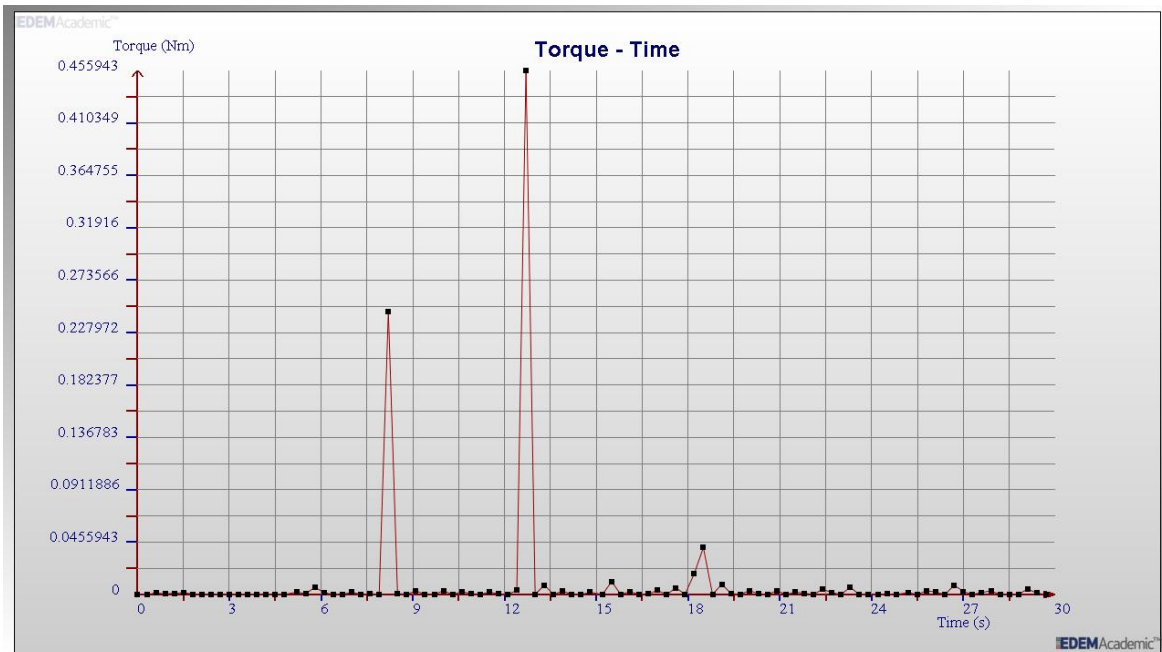
**Фиг. 4.25.** Определяне ъгъла на падане на сферично тяло



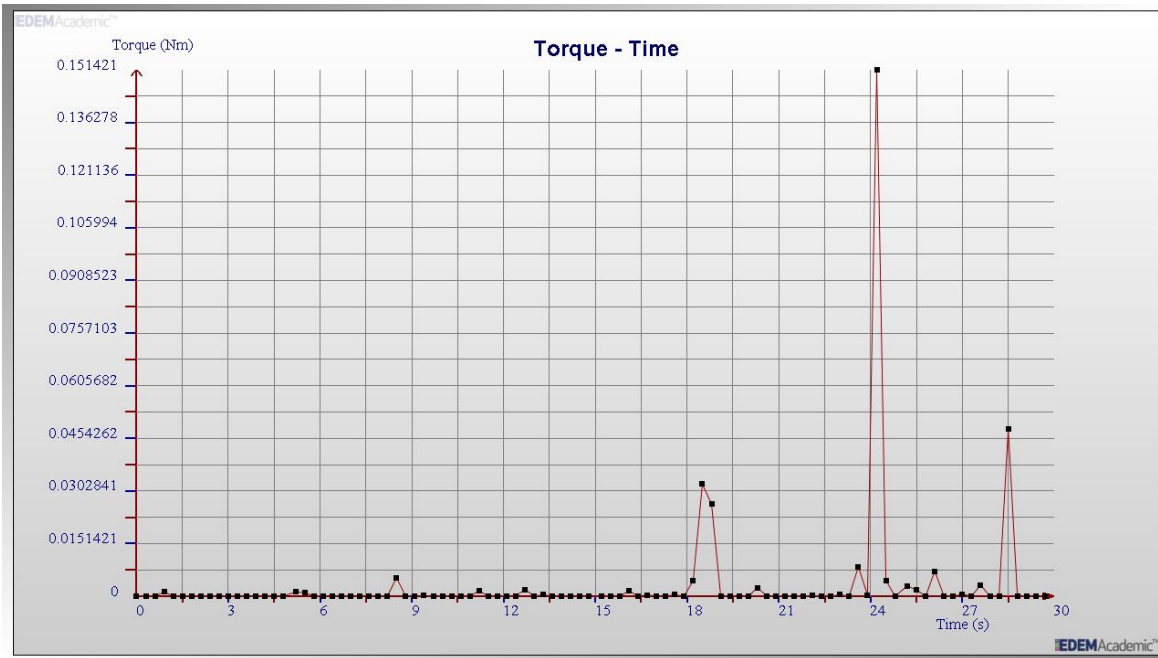
**Фиг. 4.26.** Ъглова скорост тетраедър



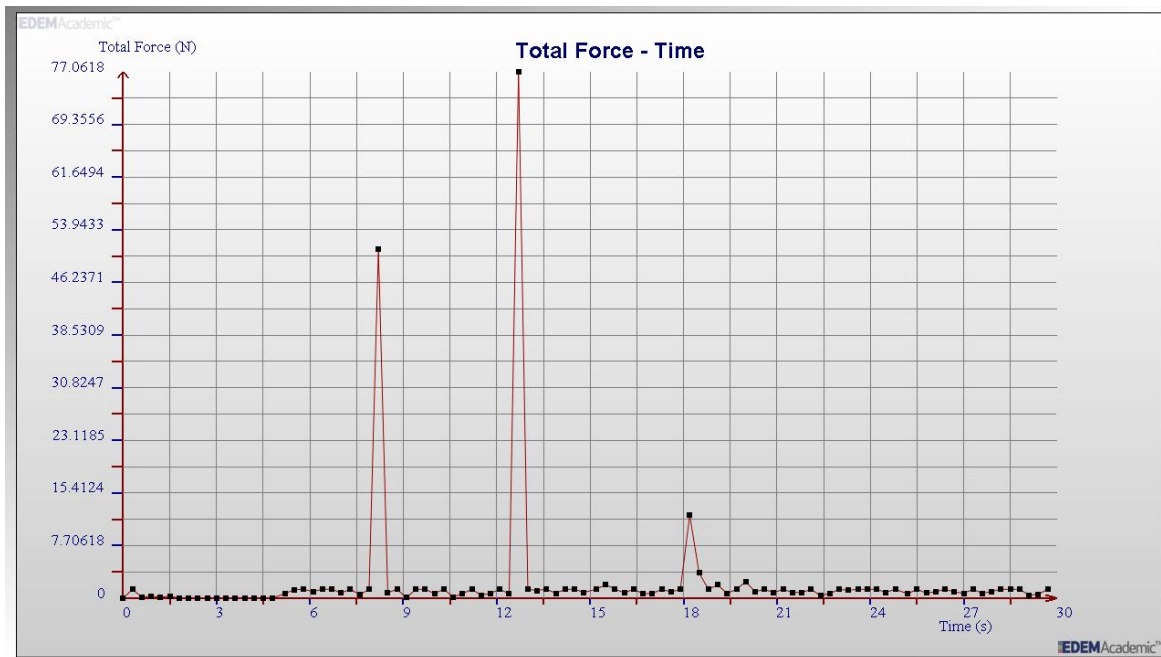
Фиг. 4.27. Ъглова скорост сферично тяло



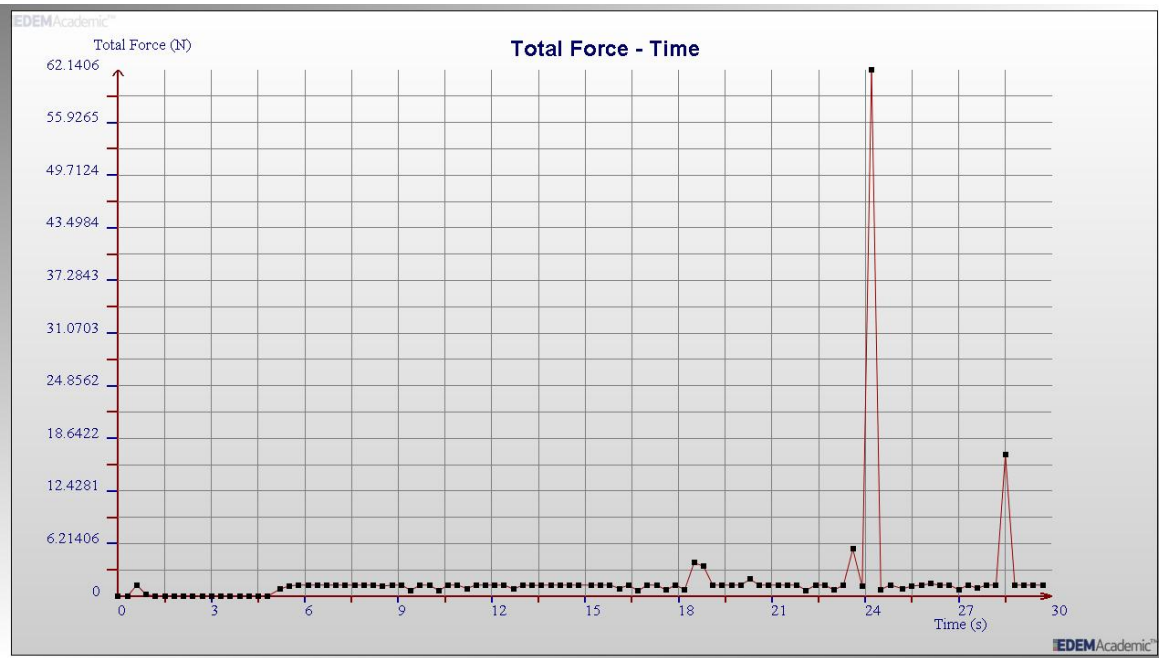
Фиг. 4.28. Ускорение тетраедър



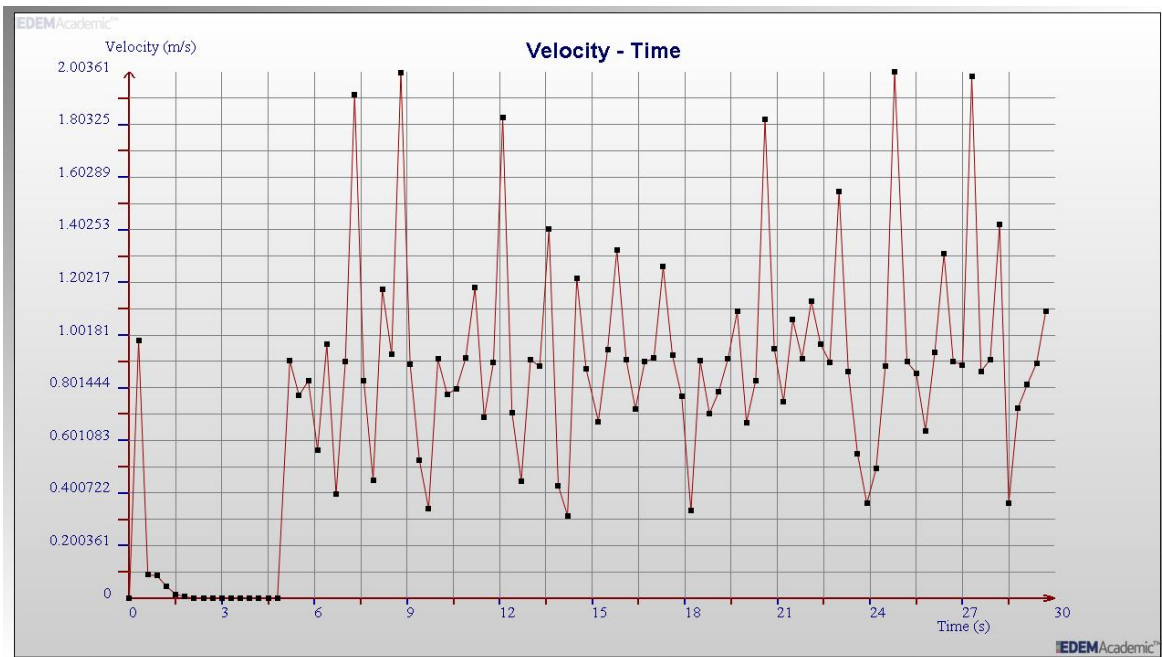
Фиг. 4.29. Ускорение сферично тяло



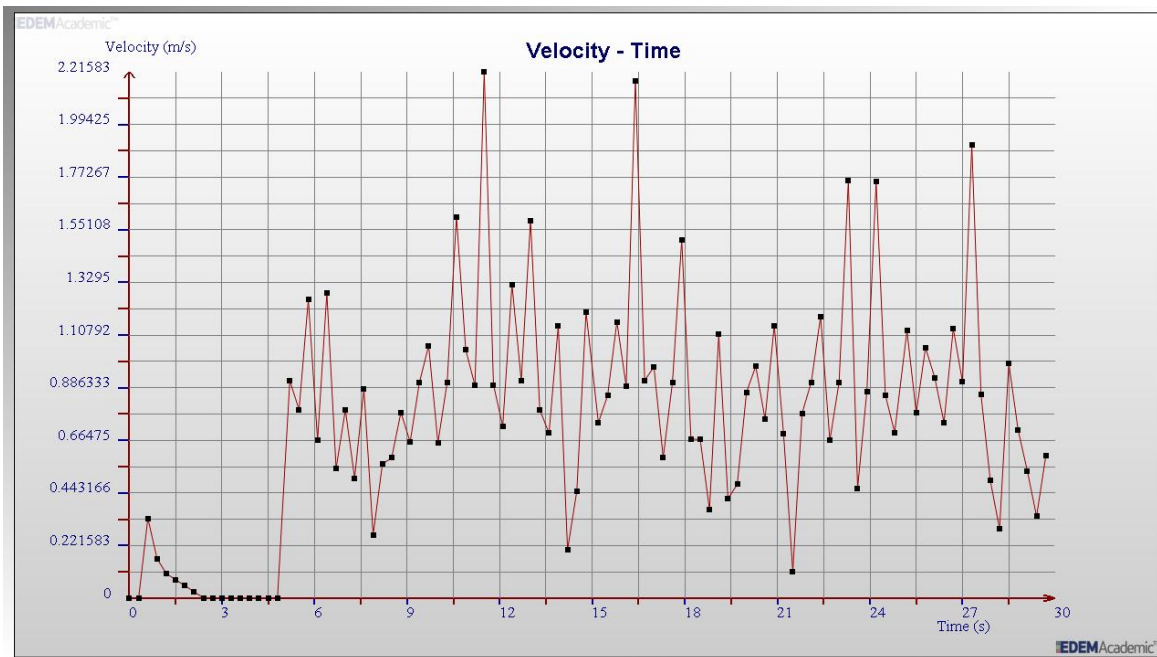
Фиг. 4.30. Сила тетраедър



Фиг. 4.31. Сила сферично тяло



Фиг. 4.32. Скорост тетраедър



Фиг. 4.33. Скорост сферично тяло.

От получените данни става ясно, че ъгълът на отделяне на сферичния тетраедър е  $233,94^\circ$ , за разлика от този на сферичното тяло, който е  $229,56^\circ$ . Ъгълът на падане на тетраедъра е  $57,39^\circ$ , а този на сферичното тяло е  $59,19^\circ$ . Следствие на по-големият ъгъл на отделяне, тялото има по-голяма височина на падане, съответно се получава по-голяма сила при падане. Силата, получена при сферичния тетраедър е  $77,06\text{ N}$ , с  $14,92\text{ N}$  по-голяма от тази на сферичното тяло ( $62,14\text{ N}$ ). Максимално отчетената ъглова скорост на сферата е  $855,248\text{ rpm}$ , тази на тетраедъра е  $755,738\text{ rpm}$ . Максималното ускорението на сферата е  $0,151421\text{ Nm}$ , а това на сферичния тетраедър е  $0,455943\text{ Nm}$ .

#### 4.4. Лифтер тип сфероидален тетраедър на Ръоло

Задълбоченото изследване на процесите, възникващи при топкови мелници доведе до създаването на заявка за патент, отнасящ се до лифтер за натрошаване, раздробяване и смилане до необходимата едрина на материала и ще намери приложение в мелниците в минната индустрия.

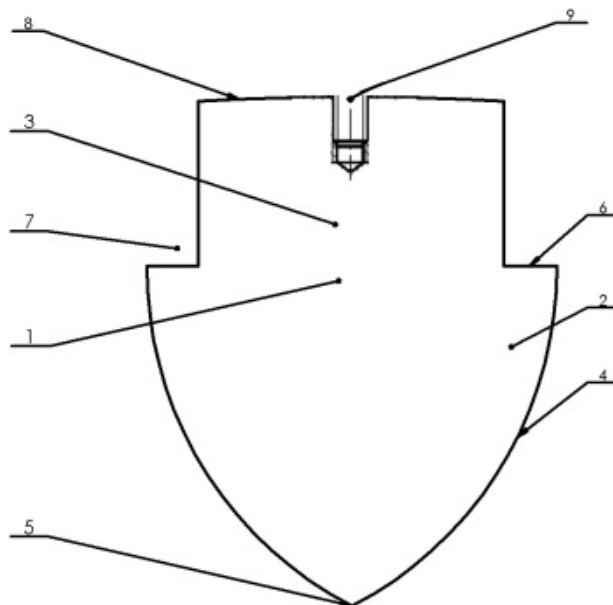
Задачата на изобретението е да се създаде лифтер, с който разтрошаването и смилането на материала да става по-бързо и по-лесно.

Задачата е решена с лифтер, състоящ се от тяло, глава и основа, като главата представлява триъгълник със сфероидални стени и заострен връх, при което основата е с по-малък размер от главата, а главата завършва с перпендикулярна стена към основата, като пространството между стената на основата и перпендикулярната стена образува джоб.

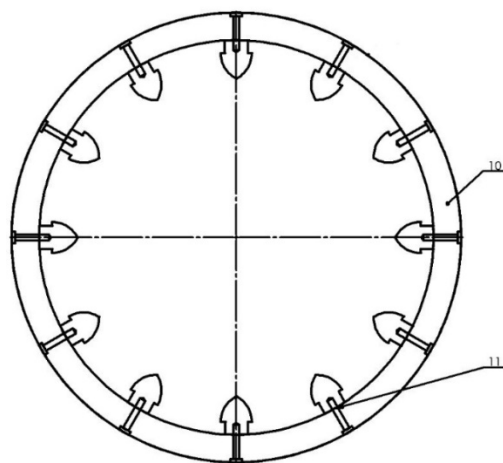
Предимство на лифтера е повишеното натрошаване на материала, като основно натрошаването става при попадане на материала върху заострения връх.

Друго предимство на лифтера е, че е по-здрав, поради това, че сфероидалните стени на главата предпазват заострения връх от счупване поради разсейване на енергията.

Лифтерът, показан на **фиг. 4.34** – а) представлява разрез на лифтера, б) – представлява напречен разрез на мелницата и разположените в нея лифтери.



а)



б)

**Фиг. 4.34.** Схема на патентна претенция за лифтер

Лифтерът се състои от тяло 1, глава 2 и основа 3. Главата 2 представлява триъгълник със сфероидални стени 4 и заострен връх 5. Основата 3 е с по-малък размер от главата 2, а главата 2 завършва с перпендикулярна стена 6 към основата 3, като пространството между стената на основата 3 и перпендикулярната стена 6 образува

джоб 7. Осевото на челото 8 на основата 3 е изработен отвор 9 за закрепване на лифтера към барабана 10 на мелницата през отвор 11 в барабана 10.

Действието на устройството се осъществява по следния начин: през отвора за захранване на мелницата се подава материал за смилане. Според типа мелница захранването с материал може да бъде с прекъснат и непрекъснат цикъл. При движението на барабана 10 на мелницата с определени обороти, постъпилия материал започва да се върти заедно с мелницата. С помощта на лифтерите, материалът се издига до дадена височина, след което се отделя от стената на барабана 10 на мелницата и попада във вътрешността на барабана 10. При попадането си върху лифтер материалът се натрошава и смилва. Според желаната изходна едрина на материала за смилане се определя и времето за въртене на мелницата.

Главата 2 на лифтера и заостреният връх 5 спомагат за натрошаването на материала. Джобът 7 задържа материала и спомага за издигането на материала до по-високо ниво, което от своя страна повишава производителността. Основата 3 се монтира към барабана 10 през отвор 9 и отвор 11.

1. Патентната претенция се състои в това, че: Лифтерът, състоящ се от тяло (1), глава (2) и основа (3), **характеризира** се с това, че главата (2) представлява триъгълник със сфероидални стени (4) и заострен връх (5), като основата (3) е с по-малък размер от главата (2), при което главата (2) завършва с перпендикулярна стена (6) към основата (3), а пространството между стената на основата (3) и перпендикулярната стена (6) образува джоб (7).

#### 4.5. Заключение

Направен е пълен анализ на едрината на частиците на различни видове цимент. По аналитични изчисления ще се сведе до минимум широкия диапазон на едрина на частиците. Това може да се постигне чрез навременна подмяна на мелещите тела.

При направената термография на печта, осигуряваща затоплянето на топкова мелница в завода за цимент бе открит проблем с по-висока температура, която освен че спомага за по-бързото амортизиране на лагерите, нарушава и покритията на самата пещ както отвътре, така и отвън. Проблемът може да бъде решен при избор на по-ефективно охлаждане, да се промени топологията на самите охладители.

От направените изследвания на различните форми мелещи тела (сфери и сферични тетраедри) и сравнителният анализ между тях се установи, че: ъгълът на отлепяне е по-голям от този на сферичното тяло. Това означава, че при една и съща скорост на въртене тетраедъра се издига на по-голяма височина, следствие на което скоростта при приземяване и силата на удара са по-големи. Това от своя страна означава, че ще натрошава продукцията за смилане по-ефективно и за по-малък период от време. Ъгълът на падане също е различен.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В разработената дисертация са направени обзор, анализ и систематизация на методи и средства за реализация на смилателни процеси (мелници, мелещи тела и мелещи среди, параметри на процесите на раздробяване и смилане).

Предложени са методики и алгоритми за моделиране и изследване на смилателните процеси, мелещите тела и мелещите среди, както и на получения продукт.

Извършени са експерименти със специализиран софтуер за 3Д моделиране по Метод на дискретните елементи на движението и взаимодействието между видове мелещи тела.

С лазерен нано грануломер са изследвани едрината на частиците за видове цименти при различни режими на работа.

С термо камера са изследвани топлинните режими на пещи, изследвана е вътрешната структура и износването на мелещи тела.

Предложени са иновативни параметри на смилателни модули (лифтери по облицовката на топкова мелница) с цел получаване на най-добри параметри на смления материал.

Точният им подбор и прилагане могат значително да повишат качеството на продукцията и да повишат енергийната ефективност, с което реално да се намалят времената и разходите в производството.

## НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ:

В резултат на работата, извършена в дисертацията и резултатите, получени в хода на изследването и изложени по-горе, могат да бъдат формулирани следните научно-приложни приноси:

1. Анализирани и систематизирани са в своята пълнота различните методи и средства за реализация на процеси на раздробяване, смилане и обогатяване.
2. Предложен е подход за теоретично изследване на движение и взаимодействие между тела и мелеци среди с променлива форма.
3. Проведени са редица експерименти за 3Д моделиране и изследване на движението и взаимодействието между мелеци тела с различна форма.
4. Резултатите от експериментите са верифицирани, анализирани и оптимизирани с цел повишаване качеството на продукцията и енергийната ефективност.
5. Разработена е методика за оценка свойствата на получените материали при различни параметри на смилателните процеси
6. Предложени са модули в смилателни устройства с иновативна форма и са изследвани формата, структурата и плътността на получените продукти.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков Х., Обогащителни машини, ДИ „Техника“, С., 1988г.
2. Жълтов А., Машини за строителни материали“ ДИ „Техника“, С., 1980г.
3. Metso Crushing and screening solutions – Brochure [www.metso.com](http://www.metso.com)
4. Gupta, A., D. Yan, *Mineral Processing Design and Operations: An introduction*, 718 pages, Elsevier, May 2006.
5. Powell, M.S., I. Smit, P. Radziszewski, P. Cleary, B. Rattray, K. Eriksson, L. Schaeffer, The selection and design of mill liners, In *Advances in Comminution*, Ed. S.K. Kawatra. ISBN-13: 978-0-87335-246-8, Society for Mining, metallurgy, and exploration, Inc., Colorado, USA. pp. 331-376, 2006.
6. Wills, B.A., T.J. Napier-Munn, *Mineral Processing Technology*, Elsevier Science & Technology Books, 7-th Edition, 2006.
7. Денев С. Трошене смилане и пресяване на полезни изкопаеми, София, Техника, 1964, 141-161
8. David Royston, „Lifter bars“ WIPO No: W000/33963
9. David J Page, Pramod Kumar, Raj K. Rajamani, Robert Mepham “LILFTER BAR” Pub.No.: US 2012/0228416 A1, Pub. Date: Sep.13, 2012.
10. Карастоянов Д., Н. Стоименов, Заявка за патент на Република България, ЛИФТЕР, Рег. № 112174, приоритет от 14.12.2015
11. Henan Bailing Machinery Co. Ltd <http://www.bailingmachinery.com/>, посетен февруари 2016 г.
12. Ajaal, T., R.W. Smith, W.T. Yen, The development and characterization of a ball mill for mechanical alloying, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol 41, No 1, pp 07-14, 2002.
13. Colacino, E., P. Nun, F.M. Colacino, J. Martinez, F. Lamaty, Solvent-free synthesis of nitrones in a ball-mill, *Tetrahedron*, Vol. 64, pp. 5569–5576, 2008.
14. Hristov, N., D. Mochev, L. Kuzev, Selective vibration grinding, In Proc. IX Int. Mineral Processing Symposium, September 18-20, 2002, Cappadocia Turkey.
15. Hristov, N., L. Kuzev, Fine in size products obtained by vibration grinding and vibration attrition, In Proc. 10-th European Symposium on Comminution, September 2-5, 2002, Heidelberg Germany.
16. Kuzev, L., Improvements in raw perlite grinding technology, In IX Balkan Mineral Processing Congress, September 11-13, 2001, Istanbul Turkey.
17. Kuzev, L., N. Hristov, Vibration grinding – an approach for secondary use of refuse metallic aluminum, In VIII Int. Mineral Processing Symp., October 16-18, 2000, Antalya Turkey.
18. Kuzev, L., N. Hristov, S. Sexenov, Multifunctional possibilities of horizontal vibrational grinding mills, In Proc. XXIV Int. Mineral Processing Congress, September 24-28, 2008, Beijing China.
19. Kuzev, L., M. Metodiev, S. Sexenov, Vibrational grinding of different ranks of coal, In 12-th Int. Coal Preparation Congress, May 23-27, 1994, Cracow Poland.
20. Kuzev, L. D. Mochev, N. Hristov, Modelling of vibration attrition, In Proc. XXIII Int. Mineral Processing Congress, September 3-8, 2006, Istanbul Turkey.
21. Kuzev, L., T. Penchev, D. Karastoyanov, New Shape Milling Bodies for Ball Mills, *Problems of Engineering Cybernetics and Robotics*, Vol. 61, pp. 11-19, 2009.

22. Kuzev, L., S. Sexenov, Vibration grinding by attrition, In Proc. XX IMPC, Vol. 2, September 21-26, 1997, Aachen Germany.
23. DOERING GmbH <http://www.doering-sinn.de/>, посетен май 2016г.
24. Paul O. Abbe, Principles of Grinding: <http://www.pauloabbe.com/>, посетен май 2016г.
25. CoorsTek Grinding Media - [http://www.coorstek.com/resource-library/library/8510-1746\\_Grinding\\_Media\\_Brochure.pdf](http://www.coorstek.com/resource-library/library/8510-1746_Grinding_Media_Brochure.pdf), посетен април 2016г.
26. Metso Grinding Media Solutions - [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/C3C13C7F3DBCF\\_A97C2257E12003C0EF1/\\$File/grinding\\_media\\_steel\\_range\\_en.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/C3C13C7F3DBCF_A97C2257E12003C0EF1/$File/grinding_media_steel_range_en.pdf)
27. Ulusoy, U., M. Yekeler, Correlation of the surface roughness of some industrial minerals with their wettability parameters, Chemical Engineering and Processing, Vol. 44, pp.557–565, 2005.
28. Kotake, N., M. Kuboki, S. Kiya, Y. Kanda, Influence of dry and wet grinding conditions on fineness and shape of particle size distribution of product in a ball mill, Advanced Powder Technology (2010), doi:10.1016/j.apt.2010.03.015.
29. Kolacz, J., Measurement system of the mill charge in grinding ball mill circuits, Minerals Engineering, Vol. 10, No. 12, pp. 1329-1338, 1997.
30. Montini, A., M.H. Moys, The measurement of rheological properties inside a grinding mill, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., vol. 88, no. 6, pp. 199-206, Jun. 1988.
31. Moys, M.H., M.A. Van Nierop, I. Smit, Progress in measuring and modelling load behavior in pilot and industrial mills, Minerals Engineering, Vol. 9, No. 12, pp. 1201-1214, 1996.
32. Bond, F.C. Crushing and grinding calculations Part I, British Chemical Engineering, Vol.6, No.6, pp.378-385, 1961.
33. Deniz, V., A study on the specific rate of breakage of cement materials in a laboratory ball mill, Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 439–445, 2003.
34. Erdem, A.S., S.L. Ergun, The effect of ball size on breakage rate parameter in a pilot scale ball mill, Minerals Engineering, Vol. 22, pp. 660–664, 2009.
35. Fuerstenau, D.W., J.J. Lutch, A. De, The effect of ball size on the energy efficiency of hybrid high-pressure roll mill/ball mill grinding, Powder Technology, Vol. 105, pp. 199–204, 1999.
36. Kotake, N., K. Daibo, T. Yamamoto, Y. Kanda, Experimental investigation on a grinding rate constant of solid materials by a ball mill—effect of ball diameter and feed size, Powder Technology, Vol. 143–144, pp. 196–203, 2004.
37. Kotake, N., K. Suzuki, S. Asahi, Y. Kanda, Experimental study on the grinding rate constant of solid materials in a ball mill, Powder Technology, Vol. 122, pp. 101–108, 2002.
38. Partyka, T., D. Yan, Fine grinding in a horizontal ball mill, Minerals Engineering, Vol. 20, pp.320–326, 2007.
39. Bond, F.C. Crushing and grinding calculations Part II, British Chemical Engineering, Vol.6, No.8, pp.543-548, 1961.
40. Aksani, B., B. Sonmez, Simulation of bond grind ability test by using cumulative based kinetic model, Minerals Engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 673-677, 2000.
41. Lewis, K.A., M. Pearl, P. Tucker, Computer simulation of the Bond grind ability test, Minerals Engineering, Vol. 3, No. 1/2, pp. 199-206, 1990.

42. Albertin, E., A. Sinatora, Effect of carbide fraction and matrix microstructure on the wear of cast iron balls tested in a laboratory ball mill, *Wear*, Vol. 250, pp. 492–501, 2001.
43. Cleary, P.W., Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods, *Minerals Engineering*, Vol. 11, No. 11, pp. 1061-1080, 1998.
44. Norquist, D.E., J. E. Moeller, Relative Wear Rates of Various Diameter Grinding Balls in Production Mills, *Transactions AIME*, Vol. 187, *Mining Engineering*, pp. 712-714, June 1950.
45. Vermeulen, L.A., D.D. Howat, Abrasive and impactive wear of grinding balls in rotary mills, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, vol. 86, no. 4, pp. 113-124, Apr. 1986.
46. Vermeulen, L.A., D.D. Howat, C. L. M. Gough, Theories of ball wear and the results of a marked-ball test in ball milling, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp.189-197, August 1983.
47. Liddell, K.S., M.H. Moys, The effects of mill speed and filling on the behavior of the load in a rotary grinding mill, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, vol. 88, no. 2, pp. 49-57, Feb. 1988.
48. Dorfler, W. (Supervisor), Modeling seminar summer term 2000: Dynamics of balls and liquid in a ball mill, University of Kaiserslautern Department of Mathematics, 67653 Kaiserslautern, Germany.
49. Hu, G., H. Otaki, K. Watanuki, Motion analysis of a tumbling ball mill based on non-linear optimization, *Minerals Engineering*. Vol. 13, No. 8-9, pp. 933-947, 2000.
50. Moys, M.H., A model of mill power as affected by mill speed, load volume, and liner design, *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 93, no. 6., pp. 135-141, 1993.
51. Powell, M.S., G.N. Nurick, A study of charge motion in rotary mills Part 1—Extension of the theory, *Minerals Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 259-268, 1996.
52. Powell, M.S., G.N. Nurick, A study of charge motion in rotary mills Part 2—Experimental work, *Minerals Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 343-350, 1996.
53. Powell, M.S., G.N. Nurick, A study of charge motion in rotary mills Part 3—Analysis of results, *Minerals Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 399-418, 1996.
54. Schilz, J. Internal kinematics of tumbler and planetary ball mills: A mathematical model for the parameter setting, *Materials Transactions, J I M*, vol.39, No 11, pp.1152-1157, 1998.
55. Govender, I., M.S. Powell, G.N. Nurick, 3D Particle tracking in a mill: a rigorous technique for verifying DEM predictions, *Minerals Engineering*, Vol 14, No 10, pp 1329-1340, 2001.
56. Govender, I., M. S. Powell, G. N. Nurick, Automated imaging to track the 3D motion of particles, *Journal of Experimental Mechanics*, Vol. 42, pp. 153-160, 2002.
57. Govender, I., A.T. McBride, M.S. Powell, Improved experimental tracking techniques for validating discrete element method simulations of tumbling mills, *Journal of Experimental Mechanics*, Vol. 14, pp. 593-607, 2004.
58. Kiangi, K.K, M.H. Moys, Measurement of the load behavior in a dry pilot mill using an inductive proximity probe, *Minerals Engineering*, Vol. 19, pp. 1348–1356, 2006

59. Martins, S., B. Picard, W. Li, P. Radziszewski, A. Faucher, S. Makni, S. Caron, Instrument disk dynamics in a 2D tumbling mill, In Proceedings of the XXIV International Mineral Processing Congress, 4 vols., pp. 2448-2457, Beijing China, 2008.
60. Zapata-Massot, C., C. Frances, N. L. Bolay, On the use of scanning electron microscopy for the modelling of co-grinding kinetics in a tumbling ball mill, Powder Technology, Vol. 143-144, pp. 215-229, 2004.
61. Zoz, H., R. Reichardt, J.S. Kim, Application and Design of Drummills, PM<sup>2</sup>TEC'2002, Proceedings of the World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Materials, June 16-21, 2002, Orlando, FL, USA.
62. Mishra, B.K., C. Thornton, An improved contact model for ball mill simulation by the discrete element method, Advanced Powder Technol., Vol. 13, No. 1, pp. 25-41, 2002.
63. Mishra, B.K., A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method Part II—Practical applications, Int. J. Miner. Process., Vol. 71, pp. 95-112, 2003.
64. Mori, H., H. Mio, J. Kano, F. Saito, Ball mill simulation in wet grinding using a tumbling mill and its correlation to grinding rate, Powder Technology, Vol. 143-144, pp. 230-239, 2004.
65. Powell, M.S., A.T. McBride, A three-dimensional analysis of media motion and grinding regions in mills, Minerals Engineering, Vol. 17, pp. 1099-1109, 2004.
66. Blecher, L., J. Schwedes, Energy distribution and particle trajectories in a grinding chamber of a stirred ball mill, Int. J. Miner. Process, Vol. 44-45, pp. 617-627, 1996.
67. Ipek, H., The effects of grinding media shape on breakage rate, Minerals Engineering, Vol. 19, pp. 91-93, 2006.
68. Lameck, N.S., K.K. Kiangi, M.H. Moys, Effects of grinding media shapes on load behavior and mill power in a dry ball mill, Minerals Engineering, Vol. 19, pp. 1357-1361, 2006.
69. Lameck, N.S., M.H. Moys, Effects of media shape on milling kinetics, Minerals Engineering, Vol. 19, pp. 1377-1379, 2006.
70. Shi, F., Comparison of grinding media—Cylpebs versus balls, Minerals Engineering, Vol. 17, pp. 1259-1268, 2004.
71. Sinnott, M.D., P.W. Cleary, R.D. Morrison, Is media shape important for grinding performance in stirred mills, Minerals Engineering, Vol. 24, pp. 138-151, 2011.
72. Agrawala, S., R.K. Rajamani, P. Songfack, B.K. Mishra, Mechanics of media motion in tumbling mills with 3D discrete element method, Minerals Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 215-227, 1997.
73. Cleary, P.W., Axial transport in dry ball mills, Applied Mathematical Modelling Vol. 30, pp.1343-1355, 2006
74. Cleary, P.W., D. Hoyer, Centrifugal mill charge motion and power draw: comparison of DEM predictions with experiment, Int. J. Miner. Process., Vol. 59, pp. 131-148, 2000.
75. Radziszewski, P., Comparing three DEM charge motion models, Minerals Engineering, Vol. 12, No. 12, pp. 1501-1520, 1999.
76. Rajamani, R.K., B.K. Mishra, R. Venugopal, A. Datta, Discrete element analysis of tumbling mills, Powder Technology, Vol. 109, pp. 105-112, 2000.

77. Hennart, S.L.A., W.J. Wildeboer, P. Van Hee, G.M.H. Meesters, Identification of the grinding mechanisms and their origin in a stirred ball mill using population balances, *Chemical Engineering Science*, Vol. 64, pp. 4123-4130, 2009.
78. Metzger, M.J., D. Glasser, B. Hausberger, D. Hildebrandt, B.J. Glassera, Use of the attainable region analysis to optimize particle breakage in a ball mill, *Chemical Engineering Science*, Vol. 64, pp.3766-3777, 2009.
79. Tavares, L.M., R.M.D. Carvalho, Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills, *Minerals Engineering*, Vol. 22, pp. 650–659, 2009.
80. Wills, B.A., T.J. Tuzun, M.A., B.K. Loveday, A.L. Hinde, Effect of pin tip velocity, ball density and ball size on grinding kinetics in a stirred ball mill, *Int. J. Miner. Process.*, Vol. 43, pp. 179-191, 1995.
81. Ruzic J., N. Stoimenov, *Advanced copper matrix composites*,– Monography, Academic Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Science, Sofia, 2016 ISBN 978-954- 322-859- 1
82. [http://www.fritsch-international.com/fileadmin/Redakteur/Downloads/Reports\\_sizing/Introduction\\_Laser\\_Scattering/Laser\\_Scattering - introduction.pdf](http://www.fritsch-international.com/fileadmin/Redakteur/Downloads/Reports_sizing/Introduction_Laser_Scattering/Laser_Scattering_-_introduction.pdf)
83. Annapragada A., A. Adjei, An analysis of the Fraunhofer Diffraction method for particle size distribution analysis and its application to aerosolized sprays, *International Journal of Pharmaceutics*, 127 (1996) 219-227
84. Ruzic J., K.Jakimovska, N. Stoimenov, S. Gyoshev, D. Karastoyanov, Influence of mechanical alloying time on particle size of copper matrix composite, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 68 (2015) 53-58
85. <http://www.flir.com/cores/display/?id=51886> посетен Януари 2016г.
86. *Thermography Level 1 Course Manual*, Infrared Training Center, Stockholm, 2015
87. Zhu H., Zhou Z., Yang R., Yu A., Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments, *Chemical Engineering Science*, 62 (2007) 3378-96
88. Cleary P., DEM prediction of industrial and geophysical particle flows, *Particuology*, 8 (2010) 106-18
89. EDEM Software Platform – [www.dem-solutions.com](http://www.dem-solutions.com)
90. Hertz H., On the contact of elastic solids, *J. reine und angewandte Mathematik*, 92 (1882) 156-171
91. Mindlin R. D., Compliance of elastic bodies in contact, *Journal of Applied Mechanics*, 16 (1949) 259-268
92. Mindlin R. D., Deresiewicz H., "Elastic spheres in contact under varying oblique forces." *ASME*, (1953) 327-344
93. Tsuji Y., Tanaka T., Ishida T., "Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe." *Powder Technology*, 71 (1992) 239-250
94. Cundall P. A., Strack O., "A discrete numerical model for granular assemblies" (*Geotechnique*), 29 (1979) 47-65
95. Johnson K., Kendal K., Roberts A., "Surface energy and the contact of elastic solids." *Proc. R. Soc. Lond., A* 324 (1971) 301-313
96. EDEM 2.5 Hertz-Mindlin with JKR cohesion model [www.dem-solutions.com](http://www.dem-solutions.com)

97. Oleh B., DeGennaro A., Rame E., Wilkinson A., DEM Simulation of a Schulze Ring Shear Tester, Proceedings of the 6th International Conference on Micromechanics of Granular Media, (2009) 409-412
98. Gilabert F. A., Roux J., Castellanos A., Computer simulation of model cohesive powders: Influence of assembling procedure, Phys. Rev. E 75 (2007) 011303
99. Zhou Y., Wright B., Yang R., Xu B., Yu A., "Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation." 269 (1999) 536-553
100. Jun A, Chen J., Rotter J., Ooi J., Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations, Powder Technology, 206 (2011) 269-282
101. Potyondy D. O., Cundall P., A bonded-particle model for rock, Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41 (2004) 1329-1364
102. Bodhisattwa C., Muzzio F., Tomassone M., Modeling of heat transfer in granular flow in rotating vessels, Chemical Engineering Science, 61 (2006) 6348-6360
103. Додеков И., Л. Люцканов, Т. Димитров, С. Горанов, В. Георгиев, Ц. Младенов, Ръководство по циментопроизводство – ТОМ 1, „ИКО – Информ“, С, 1990г.
104. Holcim Bulgaria – <http://www.holcim.bg/>
105. Doukovska L., D. Karastoyanov, N. Stoimenov, I. Kalaykov, InterCriteria Decision Making Approach for Iron Powder Briquetting., Fifth International Symposium on Business Modeling and Software Design, Milan, Italy, 6-8 July 2015, pp 292-296 ISBN: 978-989- 758-111- 3.
106. Stoimenov N., Advanced computing for energy efficiency of milling processes., Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 66, 2015, ISSN 0204-9848, pp 83-92
107. Stoimenov N., J. Ruzic, INVESTIGATION OF MILLING PROCESSES IN HIGH ENERGY MILL (ATTRITOR), XXV International Scientific and Technical Conference, ADP - 2016., June 23-26th 2016, Sozopol, Bulgaria. pp.85-90, ISSN – 13 10 -3946.
108. Стоименов Н., Симулационно моделиране движението на тела в лабораторна мелница., Международна Научна Конференция "Високи Технологии. Бизнес. Общество 2016" 14-17.03.2016, Боровец, България, част 1, стр. 12-15 ISBN: 1310-3946
109. Stoimenov N., Simulation of energy efficiency milling processes., International Conference Robotics, Automation and Mechatronics'15 RAM 2015, Sofia, Bulgaria, November 05, 2015., стр. 50-54, ISSN 1314-4634
110. Стоименов Н., Д. Карастоянов, Изследване движението и взаимодействието на различни форми мелещи тела., XXIV МНТК „АДП – 2015” 18-21 Юни, Созопол 2015г., стр.148-153, ISSN – 13 10 -3946.
111. Стоименов Н., Симулация движението на сферични тела в лабораторна мелница с помощта на Edem Software, International Conference Robotics, Automation and Mechatronics'14 RAM 2014, Sofia, Bulgaria, November 05-07, 2014., стр. 59-62, ISSN 1314-4634.
112. Стоименов Н., Д. Карастоянов, Анализирание на технологичния процес за смилане в топкови мелници., XXIII МНТК „АДП – 2014” 19-22 Юни, Созопол 2014г., стр. 188-193.



## ДЕКЛАРАЦИЯ ЗА ОРИГИНАЛНОСТ

Декларирам, че дисертацията съдържа оригинални резултати, получени при проведени от мен научни изследвания с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител.

Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени са коректно и подробно цитирани в библиографията.

Настоящият дисертационен труд не е прилаган за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис:.....

/маг.инж. Николай Стоименов/

## Публикации по дисертационната тема

### На Международни Конференции в чужбина:

1. Doukovska L., Karastoyanov D., **Stoimenov N.**, Kalaykov I., InterCriteria Decision Making Approach for Iron Powder Briquetting., Fifth International Symposium on Business Modeling and Software Design, Milan, Italy, 6-8 July 2015, pp 292-296 ISBN: 978-989- 758-111- 3.

### В реферирани списания на английски език в България:

2. **Stoimenov N.**, Advanced computing for energy efficiency of milling processes., Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 66, 2015, ISSN 0204-9848, pp 83-92

### На Международни конференции в България

3. **Stoimenov N.**, J. Ruzic, INVESTIGATION OF MILLING PROCESSES IN HIGH ENERGY MILL (ATTRITOR)., XXV International Scientific and Technical Conference, ADP - 2016., June 23-26<sup>th</sup> 2016, Sozopol, Bulgaria. pp.85-90, ISSN – 13 10 -3946.

4. **Стоименов Н.**, Симулационно моделиране движението на тела в лабораторна мелница., Международна Научна Конференция "Високи Технологии. Бизнес. Общество 2016" 14-17.03.2016, Боровец, България, част 1, стр. 12-15 ISBN: 1310-3946

5. **Stoimenov N.**, Simulation of energy efficiency milling processes., International Conference Robotics, Automation and Mechatronics'15 RAM 2015, Sofia, Bulgaria, November 05, 2015., стр. 50-54, ISSN 1314-4634

6. **Стоименов Н.**, Д. Карастоянов, Изследване движението и взаимодействието на различни форми мелещи тела., XXIV МНТК Автоматизация на дискретното производство „АДП – 2015” 18-21 Юни, Созопол 2015г., стр.148-153, ISSN – 13 10 - 3946.

7. **Стоименов Н.**, Симулация движението на сферични тела в лабораторна мелница с помощта на Edem Software, International Conference Robotics, Automation and Mechatronics'14 RAM 2014, Sofia, Bulgaria, November 05-07, 2014., стр. 59-62, ISSN 1314-4634.

8. **Стоименов Н.**, Д. Карастоянов, Анализирание на технологичния процес за смилане в топкови мелници., XXIII МНТК Автоматизация на дискретното производство „АДП – 2014” 19-22 Юни, Созопол 2014г., стр. 188-193.

### Заявка за патент:

9. Карастоянов Д., **Н. Стоименов**, ЛИФТЕР, Заявка за патент на България, Рег. № 112174, приоритет от 14.12.2015

## Цитирания

### *Цитиран труд*

Doukovska L., D. Karastoyanov, N. Stoimenov, I. Kalaykov, InterCriteria Decision Making Approach for Iron Powder Briquetting., Fifth International Symposium on Business Modeling and Software Design, Milan, Italy, 6-8 July 2015, pp 292-296 ISBN: 978-989-758-111-3.

### *Място на цитиране*

1. Gyoshev S., High speed briquetting of metal chips and powders., International Conference Robotics, Automation and Mechatronics'15 RAM 2015, Sofia, Bulgaria, November 05, 2015., pp. 55-59, ISSN 1314-4634
2. Gyoshev S., T. Penchev, Advanced computing for high speed briquetting of metal chips and powders., International Conference Robotics, Automation and Mechatronics'15 RAM 2015, Sofia, Bulgaria, November 05, 2015., pp. 44-49, ISSN 1314-4634
3. Gyoshev S., D. Ivanova, Иновативни методи и средства за високоскоростно брикетиране на метален скрап., International Scientific Conference "High Technologies, Business. Society 2016", Borovets, Bulgaria, 14-17 March 2016, стр. 8-11, ISSN 1310-3946



## **ПРИЛОЖЕНИЯ**



## **ПРИЛОЖЕНИЕ 1**



# Tenova Bateman Mills (SAG, AG, Rod, Ball)

Optimal solutions for Comminution

TENOVA is a worldwide supplier of advanced technologies, products and engineering services for the iron & steel and mining industries.

## STANDARD MILL RANGES

### SAG MILL STANDARD RANGE

MOTOR POWER - MAX (kW)	NO. OF PINIONS	MILL DIMENSIONS			MILL DIMENSIONS		
		D (feet)	L (feet)	EGL (feet)	D (m)	L (m)	EGL (m)
190	1	12	5	4	3.66	1.52	1.22
375	1	14	6	5	4.27	1.83	1.52
600	1	16	7	6	4.88	2.13	1.83
950	1	18	8	6.75	5.49	2.44	2.06
1,300	1	20	8	6.75	6.10	2.44	2.06
2,250	1	22	10	8.5	6.71	3.05	2.59
2,600	1	24	10	8.5	7.32	3.05	2.59
3,350	1	26	10	8.5	7.92	3.05	2.59
4,100	1	28	10	8.5	8.53	3.05	2.59
5,600	1	28	14	12.5	8.53	4.27	3.81
5,600	1	30	12	10.5	9.14	3.66	3.20
6,700	1	32	14	12.5	9.75	4.27	3.81
8,200	2	32	14	12.5	9.75	4.27	3.81
9,700	2	32	16	14.5	9.75	4.88	4.42
10,450	2	34	15	13.25	10.36	4.57	4.04
11,950	2	34	17	15.25	10.36	5.18	4.65
11,950	2	36	15	13.25	10.97	4.57	4.04
14,900	2	36	19	17.25	10.97	5.79	5.26

### BALL MILL STANDARD RANGE (ALL SINGLE PINION)

MOTOR POWER - MAX (kW)	MILL DIMENSIONS			MILL DIMENSIONS		
	D (feet)	L (feet)	EGL (feet)	D (m)	L (m)	EGL (m)
55	5	8	7.5	1.52	2.44	2.29
90	6	6	5.5	1.83	1.83	1.68
90	6	8	7.5	1.83	2.44	2.29
150	7	9	8.5	2.13	2.74	2.59
225	8	10	9.5	2.44	3.05	2.90
275	8	12	11.5	2.44	3.66	3.51
300	8	14	13.5	2.44	4.27	4.11
350	9	12	11.5	2.74	3.66	3.51
375	9	14	13.5	2.74	4.27	4.11
525	10	15	14.5	3.05	4.57	4.42
750	11	17	16.5	3.35	5.18	5.03
950	12	18	17.5	3.51	5.49	5.33
1,120	13	17	16.5	3.96	5.18	5.03
1,300	13	19	18.5	3.96	5.79	5.64
1,500	14	18	17.5	4.27	5.49	5.33
1,680	14	20	19.5	4.27	6.10	5.94
1,875	15	19	18.5	4.57	5.79	5.64
3,000	16.5	24	23.5	5.03	7.32	7.16
3,750	16.5	30	29.5	5.03	9.14	8.99
4,100	17	33	32.5	5.03	10.06	9.91
4,500	18	30	28.5	5.49	9.14	8.69
6,750	20	32	33	6.10	9.75	10.06

## BASIC MILL APPLICATION DATA

The Third Theory of Grinding, published by Fred C. Bond of Allis Chalmers in 1952, for calculating crusher and grinding mill power requirements permits

- rapid, accurate power calculation,
- evaluation of circuit efficiency, and
- selection of the most economically sized comminution machines.

The Third Theory, also known as the Bond Formula, was based upon data compiled and correlated from several thousand laboratory tests and was confirmed in the field from operating data, gathered over a period of more than 40 years. The results revealed that

- the quantity of size reduction is proportional to the work required to accomplish that reduction.
- each material has a definite Work Index (Wi).
- each mill size has a definite rated power.

The Bond Formula yields the work required to reduce a material, of known Work Index, from an infinitely large size to the desired product size, less the work required to reduce the same material to its present (partially reduced) feed size from an infinite size.

The resultant work (W), measured in kilowatt-hours per ton, indicates the overall energy requirement to reduce the material, of known Work Index, from present Feed size to the desired Product size.

$$W = \frac{(10 Wi)}{\sqrt{P}} - \frac{(10 Wi)}{\sqrt{F}}$$

Where W = Work in kilowatt-hours/ton

Wi = Work index of material as derived from laboratory tests or empirical data

P = 80 % passing point of product screen analysis in microns

F = 80 % passing point of feed screen analysis in microns

Actual Grinding Mill Power is

$$kW = (W) (EF_{\mathbf{T}})$$

(EF<sub>T</sub>) = Efficiency Factor (Total) for special material and circuit requirements (combined *product* of EF factors below)

Efficiency Correlation Factors (EF)

- EF1 Dry Grinding (rod and ball mills) 1.3
- EF2 Open Circuit (ball mill only) 1.04 to 1.7 (average: 1.2)
- EF3 Diameter Factor (rod and ball mills) Not normally used
- EF4 Oversize Feed (rod and ball mills) Use 1.0 except when Wi exceeds 14.0 and/or F exceeds 16,000 microns (rod) or 4,000 microns (ball)\*
- EF5 Fineness (ball mill only when P is below 70 microns)  $\frac{(P+10.3)}{(1.145 P)}$

EF6 Reduction Ratio (rod mill) 1.0 when Rr is between 10 and 20\*

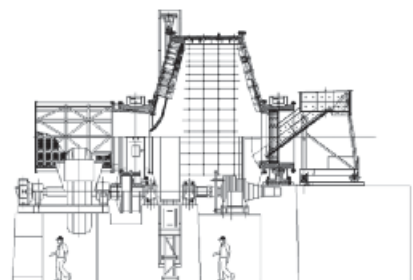
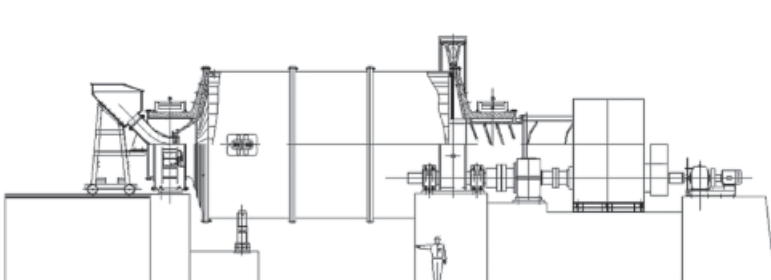
EF7 Reduction Ratio (ball mill) 1.0 when Rr exceeds 5.0\*

EF8	Feed	Preparation
	Open circuit crusher (rod mill only)	1.4
	Open circuit crusher (rod ball circuit)	1.2
	Closed circuit crusher (rod mill only)	1.2
	Closed circuit crusher (rod ball circuit)	1.0

\*NOTE: if outside above limitations or if rod mill (only) feed is scalped, consult the manufacturer.

For other factors that need to be considered, consult the mill designer.

Indemnity. Notwithstanding any application data and / or formulas provided in this brochure, final design and technical specifications of any particular piece of equipment should be obtained from Tenova TAKRAF.





## BASIC INFORMATION REQUIRED

Material Name.

Work Index (from lab test or empirical data).

Feed Size: F obtained from actual screen analysis.

Product Size Desired: P obtained from actual screen analysis.

Capacity in metric tons per hour.

Is mill feed crushed in open or closed circuit?

Is mill feed prescreened or classified to remove product size material?

Type of mill and type of circuit desired?

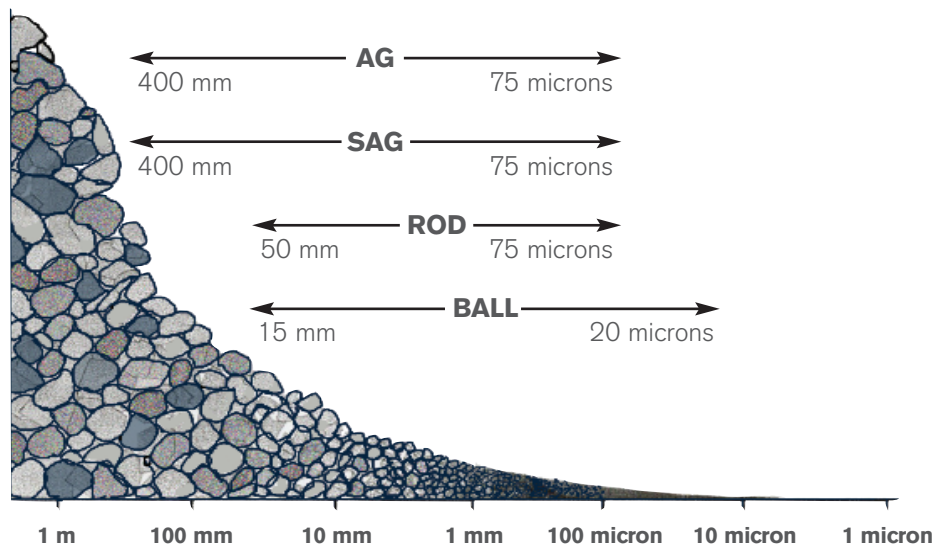


## TYPICAL BOND INDEX

Solids	Wi kWh/t	Solids	Wi kWh/t	Solids	Wi kWh/t	Solids	Wi kWh/t
Andesite	19.5	Ferrochrome	8.5	Taconite	16.0	Quartz	15.0
Barite	5.0	Ferromanganese	9.0	Lead Ore	13.0	Rutile Ore	14.0
Basalt	19.0	Ferrosilicon	11.0	Lead-Zinc Ore	12.0	Shale	17.5
Bauxite	10.0	Flint	29.0	Limestone	14.0	Silica Sand	15.5
Cement clinker	15.0	Fluorspar	10.0	Manganese Ore	14.0	Silicon Carbide	28.5
Cement raw material	12.0	Gabbro	19.5	Magnesite	12.5	Slag	11.5
Clay	7.0	Glass	14.0	Molybedum	14.0	Slate	16.0
Coal	14.5	Gneiss	22.0	Nickel Ore	15.0	Sodium Silicate	15.0
Coke	16.5	Gold Ore	16.5	Oil Shale	17.5	Spodumene Ore	11.5
Copper Ore	14.0	Granite	16.5	Phosphate Rock	11.0	Syenite	14.5
Diorite	23.0	Graphite	48.0	Potash Ore	9.0	Tin Ore	11.5
Dolomite	12.5	Gravel	17.5	Pyrite Ore	9.5	Titanium Ore	14.0
Emery	62.5	Hematite	14.0	Pyrrhotite Ore	11.0	Trap Rock	21.5
Feldspar	13.0	Magnetite	11.0	Quartzite	11.0	Zinc Ore	13.5

These values are typical and should be determined by test work to confirm the Bond Wi before mill power requirements are finalised.

## THEORETICAL SIZE REDUCTION FOR DIFFERENT GRINDING MILLS





#### **Tenova TAKRAF**

Tenova Mining & Minerals (Pty) Ltd  
1 Kramer Road  
Bedfordview  
Johannesburg  
PO Box 75996  
Gardenview, 2047  
South Africa  
phone +27 11 201 2300  
fax +27 11 455 4547  
enquiries.TMM@za.tenovagroup.com

TAKRAF GmbH  
Torgauer Straße 336  
04347 Leipzig  
Germany  
phone +49 341 2423 500  
fax +49 341 2423 510  
sales@takraf.com

Bahnhofstraße 26  
01979 Lauchhammer  
Germany  
phone +49 3574 854 0  
fax +49 3574 854 100  
service@takraf.com

Tenova S.p.A  
Via Albareto, 31  
16153 Genoa  
Italy  
phone +39 010 6054067  
fax +39 010 6054710  
bulkhandling@it.tenovagroup.com

#### **Tenova MINING & MINERALS**

Tenova Mining & Minerals (Pty) Ltd  
58 Emerald Parkway Road  
Greenstone Hill, Ext 21 1609  
PO Box 7737  
Johannesburg 2000  
South Africa  
phone +27 11 899 9111  
fax +27 11 899 2302  
enquiries.TMM@za.tenovagroup.com

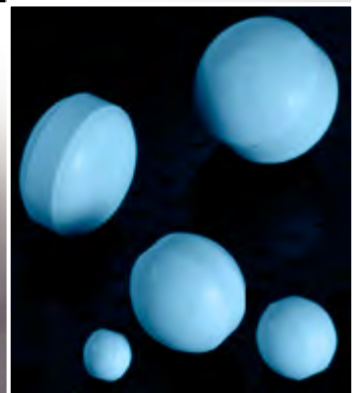
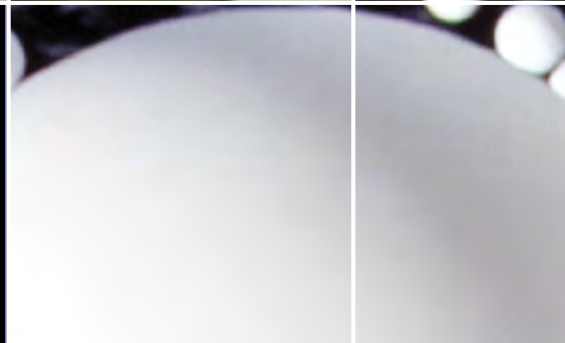
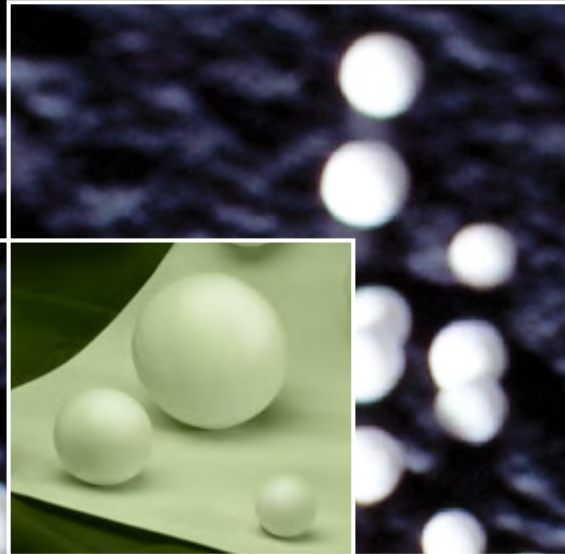
[www.tenovagroup.com](http://www.tenovagroup.com)  
[www.bet.bateman.com](http://www.bet.bateman.com)

**TECHINT GROUP**





## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2**



**GRINDING MEDIA**

## Follow These Tips for Better Grinding Results

Specify CoorsTek high-density media for particle size reduction and dispersion processes in minerals, ceramics, white cement, abrasives, and paint industries.

For general purpose grinding, CoorsTek supplies two materials: **AD-90 (90% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** – offering superior density and abrasion resistance. For the highest-purity material, select **AD-995 (99.5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** – ideal for harsh-duty environments where corrosives may attack the media or media induced product contamination is a concern.

You'll boost productivity, cut operating costs, and improve product purity with high-density nonporous CoorsTek High-Density Media – the tougher charge with exceptionally long useful life.

Specify CoorsTek High-Density Media in the size and shape you need.

Typical Physical Properties of CoorsTek High Density Ceramic Media						
	Specific Gravity	Hardness R45N	Water Absorption	Compressive Strength		Color
Units	g/cc	(MOHS)	–	MPa	(Kpsi)	–
AD-90/AB-9	3.6	79 (9)	None	2482	(360)	White
AD-995	3.9	83 (9)	None	2620	(380)	Ivory

### Which shape is right for you?

This depends primarily on the material to be ground, and on the work to be done. Generally, the ball shape is preferred for converting large size feed materials into finely ground products. CoorsTek Natural Shape – with its sliding, mortar-and-pestle action – is best when there's little requirement for primary size reduction. However, when you desire the largest amount of fine product. It's an extremely efficient shape for dispersing solids into a vehicle. When a uniformly fine product of limited size range is required, CoorsTek Rod media should be used.

Rod media are particularly effective in vibratory mills. The line contacts between the media provide more interface areas, thereby spreading the grinding energy over many particles to keep the amount of size reduction constant.

### What size should you use?

Requirements differ with the material being ground or dispersed, the feed size, and the finish size. Generally, the largest media selected should be at least 5 times larger than the largest feed particle. The balance of the charge should depend on the characteristics of the remaining feedstock.

## Work Toward a Seasoned Charge

Since particle size reduction takes place when the material being ground is sandwiched between the media, it is best to choose the smallest feasible grinding media combination as smaller media provides many more contacts than larger media.

Always use a balanced blend of between two to four media sizes when making up a new media charge, and then add the largest size as makeup to maintain a balanced media level. This ensures size reduction of the large particles with simultaneous grinding of the smaller particles.

Maintain the CoorsTek media charge at 48%-55% of total mill volume in batch-type mills and 38%-42% in continuous mills.

In most cases, production efficiency decreases and wear of the media increases rapidly if the level of the media charge

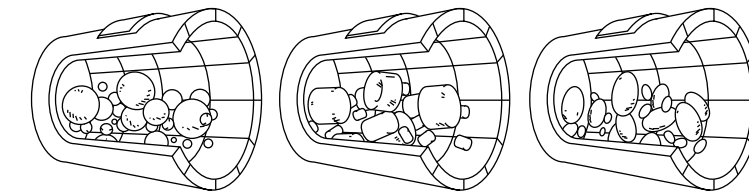
is allowed to drop below these recommended amounts, or if the media are not properly covered with material.

Batch mills should be charged to a level of 1 to 3 inches of product over the top of the grinding media.

Continuous mills should be charged to a product level just above and a media level just below the discharge grates.

Increase the consistency (viscosity or % of solids) of your batch material well above that used in mills charged with lighter grinding media.

This keeps the grinding media working against the material and not expending its energy on itself and on the lining of the mill. Noisy media indicate that you are grinding the grinding media-and producing excessive heat, wear and noise. The material to be ground should completely cover the media, filling all the voids in the media charge. Because CoorsTek media grinds faster, it is mandatory that you shorten the time cycle for batch mills or increase the feed rate for continuous mills. This, of course, also results in greater output of ground product.



## CoorsTek Mini Media

### Type A - Typical Applications

- For grinding of minerals, paper fillers, and coatings in high energy sand mills
- For paste viscosities over 90 KU at mill discharge temperature
- For premixes with high pigment loadings and vehicle solids
- For abrasion-resistant fillers in epoxy or urethane systems
- Not recommended for low-consistency sand mill dispersions

### Mill Cleaning Precautions

With both materials, use resin for initial cleaning & finish with solvent, keeping the cleaning cycle as short as possible. Longer than necessary cycles using solvent will result in excessive wear to both media and mill parts. Consult your mill manufacturer for proper cleanup procedures using ceramic medias.

### CoorsTek Mini Media is Available in the Following Sizes

Size	Stock No.	Mesh Size	Packaging
Microfine (0.79-1.18mm)	74582	16-20	50lb Bags
Fine (1.18-1.53mm)	74575	12-18	50lb Bags
1/16" (1.53-2.45mm)	74572	8-12	50lb Bags
1/8" (2.45-3.35mm)	74583	6-8	50lb Bags

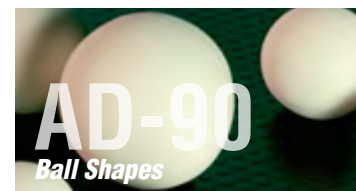
### Physical Properties

Material AD-90	Type A
Composition (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	89.3%
Density (g/cc)	3.5
Hardness (R45N)	79
Porosity	None
Compressive Strength	360 (kpsi)
Color	White

### Minimum Order - 50 lbs

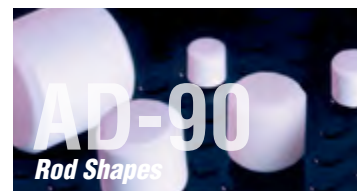
Standard Packing: 50 lbs sacks, or 2000 lbs Super Sacks (other packing available per customer request; additional charges may apply)

Terms - Net 30 days, subject to prior credit approval



Ball Shapes: AD-90 (Weight 138 lbs/Cu ft)

Size (in)	Part Number	Pieces per lb*	Surface Area (in <sup>2</sup> /lb)
2 1/2	74543	1	20
2	74540	2	25
1 3/4	74546	3	27
1 1/2	74536	5	35
1 1/4	74534	8	42
1	74532	15	47
3/4	74530	34	60
5/8	74528	60	74
1/2	74526	122	96
3/8	74524	285	126
1/4	74503	940	185
7/32	74502	1420	214



Rod Shapes: AD-90 (Weight 140-145 Lbs/Cu ft)

Size (in)	Part Number	Pieces per lb*	Surface Area (in <sup>2</sup> /lb)
1 1/4 x 1 1/4	74553	5	37
1 3/16 x 1 3/16	74551	18	56
1/2 x 1 1/2	74501	80	94
1/4 x 1/4	74549	600	176

\*Note: Number of pieces per pound based upon media density of 3.6 g/cc.



Natural Shapes: AD-90 (Weight 141 Lbs/Cu ft)

Size (in)	Part Number	Pieces per lb*	Surface Area (in <sup>2</sup> /lb)
1 1/4 x 7/8	74558	10	55
1 x 3/8	74555	19	64
1/2 x 2/3	74520	160	151

➔ For more information, please contact us at +1.303.277.4057 or [grindingmedia@coorstek.com](mailto:grindingmedia@coorstek.com)

For expert assistance with your next project, please call: +1.303.277.4057 in North America

For expert assistance with your next project, please call: +1.303.277.4057 in North America

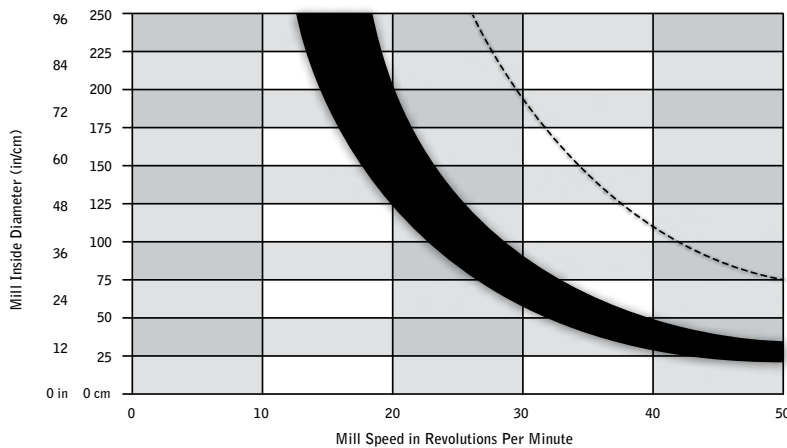
## Selecting Efficient Mill Speeds

At 100% critical mill speed, all media are centrifugally forced to the outside, and no grinding occurs. CoorsTek recommends 50% to 70% of critical mill speed for optimum grinding performance.

(100% critical mill speed =  $76.63 / \sqrt{D}$ ,  
where D is mill ID in feet)

Dry grinding requires faster mill speeds than wet grinding. Lifter bars may be required at very low mill speeds.

## Efficient Mill Speeds Wet Grinding



█ Recommended speed for mills with plain linings  
- - - - Critical speed



Let us help with your media problems. For more information, please contact us at **+1.303.277.4057** or **grindingmedia@coorstek.com**.

## Ball Mill Loading

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot L$$

total mill volume in cu. ft.

inside diameter in ft.

inside length in ft.

### Recommendations

(pounds per linear foot for three lining thicknesses)

Mill I.D.	For Batch-Type Mills 55% Charge		
	Lining Thickness	1½"	2"
36"	450	420	250
42"	630	600	370
45"	730	700	440
48"	840	800	520
54"	1080	1030	630
60"	1350	1300	880
72"	1970	1920	1330
84"	2720	2650	1870
96"	3580	3510	2510

Mill I.D.	For Continuous Mills 40% Charge		
	Lining Thickness	1½"	2"
36"	330	310	190
42"	460	440	270
45"	540	510	320
48"	610	580	380
54"	780	750	460
60"	980	940	640
72"	1440	1390	970
84"	1980	1930	1360
96"	2600	2550	1830

The chart is intended to illustrate typical properties. Property values vary with method of manufacture, size, and shape of part. Data contained herein is not to be construed as absolute and does not constitute a representation or warranty for which CoorsTek assumes legal responsibility.

European Union (EU) Directive on Restriction of Hazardous Substances (RoHS): The EU Directive on RoHS specifies that an electronic product or component may not contain a listed substance except as specifically provided in the directive. CoorsTek ceramic substrates meet the requirements of the Directive.

Superstrate, Amazing Solutions, and CoorsTek are registered trademarks of CoorsTek, Inc. OpX is a trademark of CoorsTek, Inc.



## **ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

## Product Information

# DOERING Cylpebs CHILLARD®

### What are DOERING CYLPEBS?

DOERING CYLPEBS are slightly tapered cylindrical grinding media with equal length and diameter. Their shape has been developed to maximize available grinding due to density and surface area advantages (fig.1).

### The manufacturing process

DOERING CYLPEBS are made from a low alloy chilled cast iron CHILLARD®. The molten metal leaves the furnace at 1500 degrees Celsius and is transferred to a continuous casting machine where the selected size Cylpebs is created, by changing the moulds the full range of cylindrical media can be manufactured via one simple process.

The Cylpebs are demoulded while still red hot and placed in a cooling section for several hours to relieve internal stress. Solidification takes place in seconds and is formed from the external surface inward to the center of the media, a short needle like structure pointing inwards grow along this front. From the innumerable crystallization points a tough pearlitic matrix is formed between very hard carbides (figs. 2 + 3).

It is this manufacturing process that contributes to the cost effectiveness of the Doering Media, by being more efficient and requiring less energy than the conventional forging method.

### Shape, dimensions, tolerances

DOERING CYLPEBS have a slightly tapered shape and all the edges are radiused. At the center of the larger circular face is a slight sink. This is a result of the natural contraction of the iron during solidification and in no way affects the serviceability of the Cylpebs. For practical reasons most mills are only topped up with one size of grinding media although the particle size spectrum of the mill feed material varies over a very wide range. Because of the technology used for manufacturing DOERING CYLPEBS the length tolerance of some of the Cylpebs fluctuates between 70 and 110 % of the nominal dimension. The resulting graduation in the weights of the Cylpebs compensates to some extent for the very wide particle size spectrum of the mill feed.



Fig. 1: Cylpebs



## Product Information DOERING Cylpebs CHILLARD®

### The grinding action of DOERING CYLPEBS

The iron carbide crystals, which are perpendicular to all the surfaces, give the surfaces of the grinding media a microscopic roughness. This has a beneficial effect on the grinding action of the Cylpebs because it ensures better transfer of the grinding media energy to the mill feed. (Interlocking effect, less slip between mill feed and grinding media, figs. 2 + 3).

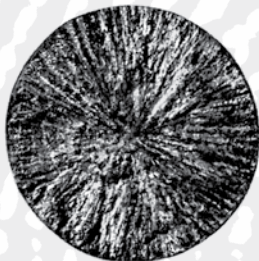


Fig. 2: Macrostructure

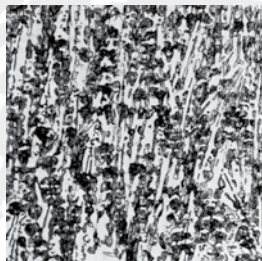


Fig. 3: Mikrophot 300 x

### Uniform wear characteristics

DOERING CYLPEBS have amazing shape retention, a feature that remains a major advantage over balls for the entire working life of the media. As the basic microstructure is perpendicular to all working surfaces the DOERING CYLPEBS even retain the original taper (fig. 4).

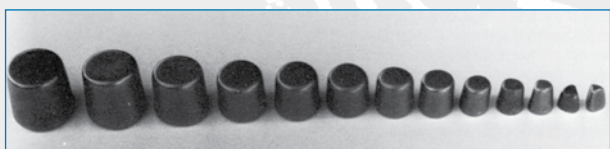


Fig. 4: Uniform wear characteristics retain the original taper.

### Hardness distribution over the cross-section

DOERING CYLPEBS are through hardened from the outer shell to the center core (fig. 5).

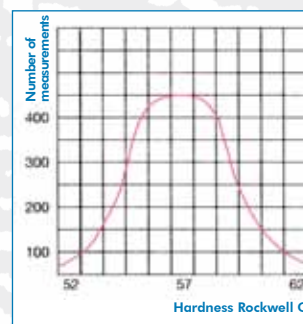


Fig. 5: Hardness distribution for the 20 x 20 mm; there is a slight shift of the curve to the left for the larger sizes, and to the right for the smaller sizes.

Hardness



### DOERING CYLPEBS are manufactured with the following dimensions (mm):

45 x 45	40 x 40	32 x 32
28 x 28	24 x 24	20 x 20
16 x 16	12 x 12	

## Product Information

### DOERING Cylpebs CHILLARD®

#### Wear on the grinding media

To maximize the production potential of DOERING CYLPEBS, mill operating procedures can play a major role. High filling rates will greatly assist the media, the combination of a constant feed of slurry and the surface area and density advantages of the cylindrical media, will allow greater through put by reducing the retention time in the mill.

Constant media to media contact is counter productive accelerating wear of the media. DOERING CYLPEBS have proved themselves in grinding a wide range of minerals offering a cost effective alternative to hardened balls. The typical wear rate expectation is parallel to balls in the hardness range of 650 Brinell hardness. When utilized in non impact type tower mills, the small DOERING CYLPEBS in the size range below 20 mm x 20 mm can give quite exceptional performance, with proven results matching the wear rates of cast balls having a chrome content above 18 %.

#### Advantages of DOERING CYLPEBS

The bulk density of DOERING CYLPEBS is 9 % greater than steel balls, 12 % greater than cast balls. The surface area of DOERING CYLPEBS is 14,5 % greater than balls of equal weight. The density and surface area combination, deliver 25 % greater grinding capacity in a typical mill charge.

The physical attributes of the DOERING CYLPEBS and their proven wear characteristics, combine with the low cost manufacture, to make available to industry a unique grinding tool. With the exception of the size 20 mm x 20 mm and below all products are available at one single price!

No longer do Metallurgists have to consider the commercial implications associated with small balls.



Equal volumetric grinding media charge.



## Product Information

### DOERING Cylpebs CHILLARD®

#### Comparative data for Cylpebs and balls

Cylpebs ( $\gamma = 7,65 \text{ kg/dm}^3$ )				
dimension	weight	surf. area	spec. surface	bulk density
mm	g	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup> /g	t/m <sup>3</sup>
45 x 45	560.0	95.4	0.17	4.9
40 x 40	379.0	75.4	0.20	4.9
35 x 35	245.0	57.7	0.24	4.9
32 x 32	190.0	48.3	0.25	4.9
28 x 28	128.0	37.0	0.28	4.9
24 x 24	82.5	27.0	0.33	4.9
20 x 20	45.0	19.0	0.40	4.9
16 x 16	23.5	12.0	0.51	4.9
12 x 12	11.1	6.8	0.55	4.9

balls ( $\gamma = 7,85 \text{ kg/dm}^3$ )				
dimension	weight	surf. area	spec. surface	bulk density
mm Ø	g	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup> /g	t/m <sup>3</sup>
50	510.0	79.0	0.15	4.5
45	372.0	63.6	0.17	4.5
40	264.0	50.0	0.19	4.5
35	175.0	38.5	0.22	4.5
30	112.0	28.0	0.25	4.5
25	65.0	20.0	0.31	4.5
20	33.0	12.5	0.38	4.5
15	13.0	7.0	0.54	4.5
10	4.5	3.1	0.69	4.5

#### Composition of grinding media charge

The correct sizing of media will be nominated by our engineers, upon receipt of the completed Mill Questionnaire available on this web page.

Kindly complete and transmit via either email or fax to receive our recommendations. For Metallurgists wishing to interpret their operating parameters, we include the Formula of Bond as a link to this site.

When replacing an existing mill charge, our standard policy is to establish the correct media size and then follow existing site procedures for top up media, it is not necessary to dump the existing charge prior to installing DOERING CYLPEBS.

#### Using DOERING CYLPEBS

For new installations, we recommend an initial graded charge. DOERING technicians will calculate the composition of such a charge and supply as a „first fill“, subsequent top up media will be sized based upon the data supplied on the completed mill questionnaire.

#### Technical Support

All DOERING products are sold with a guarantee of full support, our technicians will work through trial periods with metallurgical personal, perfecting the use of our media. To long term users we offer reviews to ensure optimum performance is achieved. We offer logistic assistance, investigating packaging options and materials handling methods based upon our experience in the field.

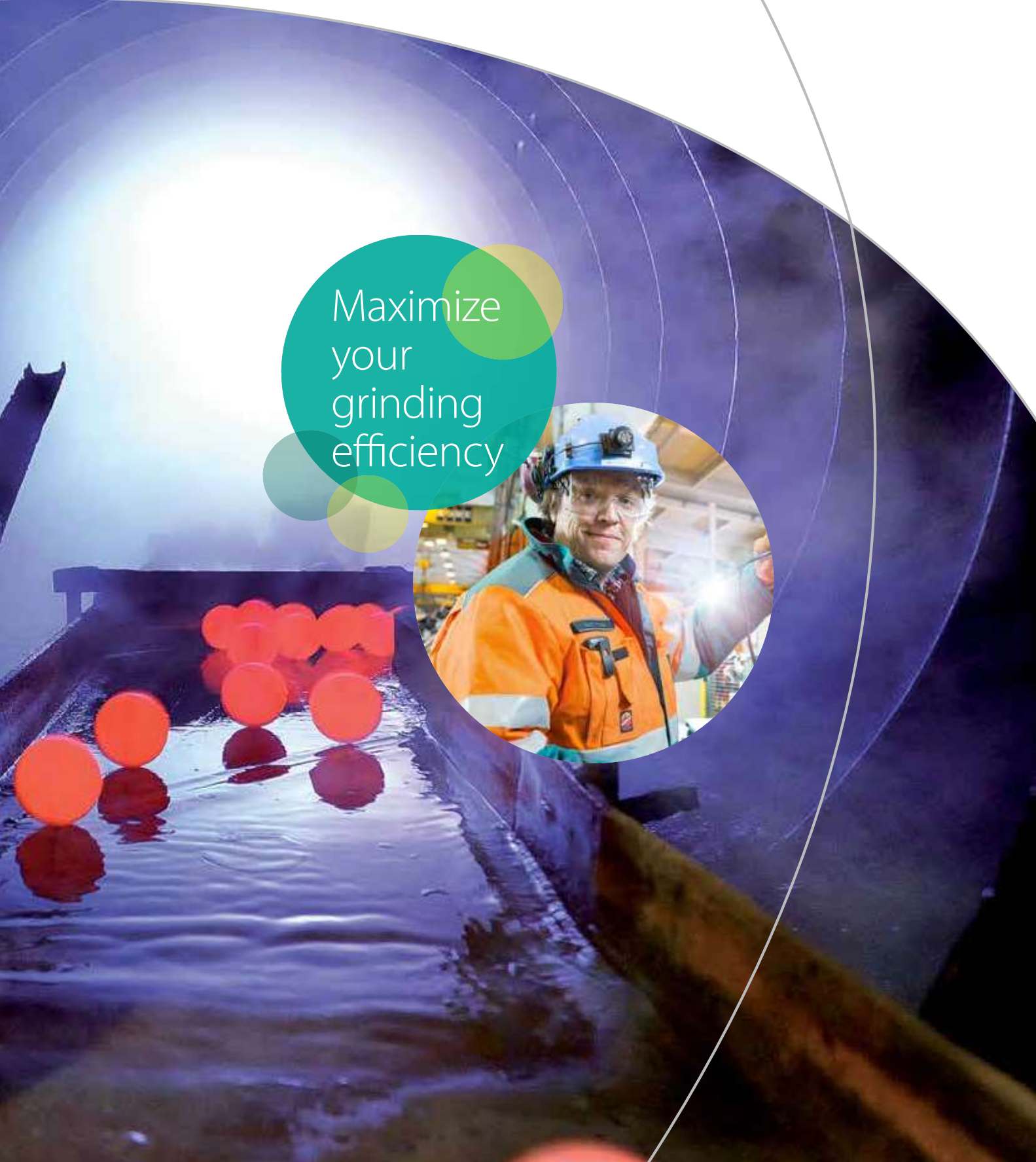


## **ПРИЛОЖЕНИЕ 4**

Grinding media solutions  
Steel grinding rods and balls



Maximize  
your  
grinding  
efficiency





The mining industry is facing a number of challenges when considering how to manage growth and profitability over the next decades.

## Grinding

# Challenges in your core process converted into opportunities

### Your aims

**Availability** - You want to reduce downtime of your equipment so that production time can be maximized.

**Production efficiency** - You wish to optimize your process, equipment and parts to get the most out of your plant. You look for ways to lower energy consumption and reduce total mine OPEX.

**Lowest sustainable cost** - You aim to have the lowest total cost for your operation.

**Safety** - You need to make sure your people are working in a safe environment.

### Your challenges

- To ensure that your equipment plus wear and spare parts are of high quality and are designed to keep your mill rolling.
- To see to it that installations are being carried out correctly and quickly, while making sure that safety is never compromised.
- To find a partner who can help you improve your total grinding efficiency, not just supply parts.

Grinding media is often an important avenue to explore when attempting to overcome your grinding challenges

Grinding media has a profound impact on grinding cost and performance, so the potential for savings is significant

Grinding media represents about  
**8%**  
of total mine OPEX



Grinding cost breakdown\*

- Power 50%
- Grinding media ~30%
- Mill lining ~10%
- Labor & miscellaneous 10%

\*indicative example case of a copper mine

Grinding media is often thought of as a commodity within mineral processing plants, but consider these well documented facts:

- Inferior grinding balls are known to spall and flake in service, and the resultant ball chips can dramatically and unnecessarily shorten the operational life of pumps, hydrocyclones, and recirculating load piping.
- Ball chips in a mill load contribute mass and therefore also contribute to mill power draw, but the individual chips lack the necessary mass for efficient grinding. This represents a needless waste of valuable energy.
- In SAG milling environments, sub-standard or improperly selected grinding media is known to explode, posing a threat of potentially life-changing injury to mill personnel.

# A holistic view is the key to efficient grinding

By combining the right choice of grinding media with optimized mill linings and services, we help you improve grinding efficiency and profitability.



## Wide range of media

With Metso, you have access to a complete range of high quality grinding media. We carefully select the optimal media to keep your mill rolling.

- Forged steel grinding balls
- Steel grinding rods
- Packaging of your choice (high strength bags, drums or bulk) according to your preference



See page 9

## Suited for all mills

Our grinding media is available for all types of mills that use steel grinding media.

- SAG mills
- Ball mills
- Rod mills
- Vertimills



## One stop shop

Achieve lowest sustainable cost and increase grinding efficiency through a holistic grinding approach.

- Mill linings of all types and materials
- Grinding media
- Spare parts packages
- Installation, wear monitoring and design optimization
- Grinding performance improvement







Grinding media represents a large portion of your total grinding cost and has a significant impact on your OPEX.

By taking a holistic view and combining high quality grinding media with world-leading mill linings and services, Metso helps you improve mill availability and grinding efficiency.

Metso offers the market's most complete range of products combined with unmatched know-how of equipment, grinding media and mill linings.

Contact us to find out more about how we can help you increase your profitability. [www.metso.com](http://www.metso.com)



**Santa Ana de Bolueta Grinding Media SA**, Parcela 2.2.1 PE Abra Industrial, Abanto y Cervana, Viscaya, Spain



QR code for smartphones



## **ПРИЛОЖЕНИЕ 5**

**VULCO®**

Wear Resistant Linings

**Mill Lining Systems**

Excellent  
Minerals  
Solutions



# Weir Minerals designers and engineers work to create Vulco® products that are continuously improving the state-of-the-art in mill lining systems.

## Mill liner experience and expertise

Weir Minerals has considerable experience in the design and manufacture of linings for autogenous (AG) and semi-autogenous (SAG) mills, primary, secondary, and re-grind ball and rod mills.

Using a holistic approach, our experienced staff of engineers, designers, and chemists custom design Vulco® mill liners for exceptional life and reliability in the most arduous grinding applications. Our in-house facilities enable total control of the entire process, from design to manufacture, so that our customers' needs and requirements for best quality mill liners are satisfied.

Before an optimal design and material can be recommended, a complete analysis is conducted for each milling duty. Factors such as mill dimensions, mill speed, mill power, ore type, feed top size, feed size distribution, throughput, charge volume and make-up, density and product size are considered.



*Above: Model mill for optimizing design of grate discharge assembly*

## Combining design and research tools

Design and research techniques used include scaled laboratory models, CFX fluid dynamics and Discrete Element Method (DEM) charge analysis. Combined with Unigraphics CAD systems, these tools ensure optimum system design and excellent liner fit. 3-D visualization with CAM is a necessity for the complicated geometries of grate and pulp discharge systems and new generation liner profiles.

After careful review of all data, the most appropriate design and materials are selected in order to deliver the optimal grinding performance and the lowest ownership cost.

## Continuous improvement and new development in technology

Weir Minerals global expertise in slurry hydraulics and wear resistant materials has partnered well with mineral processing research facilities of a number of prestigious universities to drive continuous improvement and new developments in mill lining technology. Our focus is on innovation and improved products for ball and SAG mill applications, specifically in areas such as grates and shell and head protection where our intimate understanding of discharge flow dynamics is beneficial.



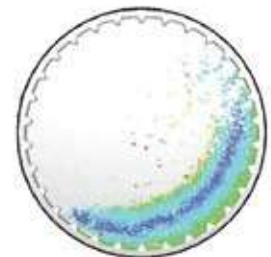
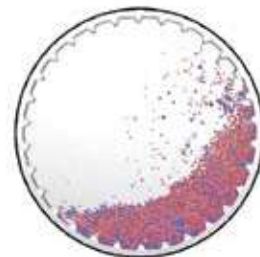
*Above top: Typical grate discharge assembly*

*Above bottom: New composite SFL plates for SAG mill application*



*Above: Vulco's patented heavy duty metal cap shell plate for extended service life in large diameter AG, SAG and ball mills*

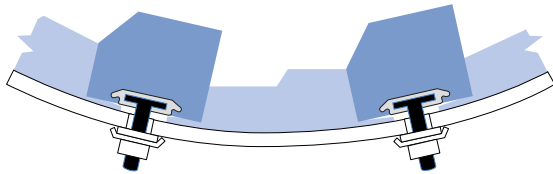
*Right: DEM simulations showing energy levels, size distribution and ball/mineral particles*



# Vulco mill liners help reduce costs per ton of material processed for plant owners and operators.

## Increasing importance of liner design

The emphasis on liner design to ensure efficient mill operation has grown, particularly as mills have increased in size. The extent to which a liner effectively protects the mill, imparts energy *and* controls the mill charge, impacts on the total ownership costs for plant owners and operators. In general, the harder the material fed to a grinding mill, the greater economy achieved using rubber liners.



Above: Typical Vulco mill liner with SIC/A lifters and SSL plates with liner bolt attachment system



Right: Typical large SAG mill

Below: Large mill in the copper industry with some of the local Vulco mill liner team

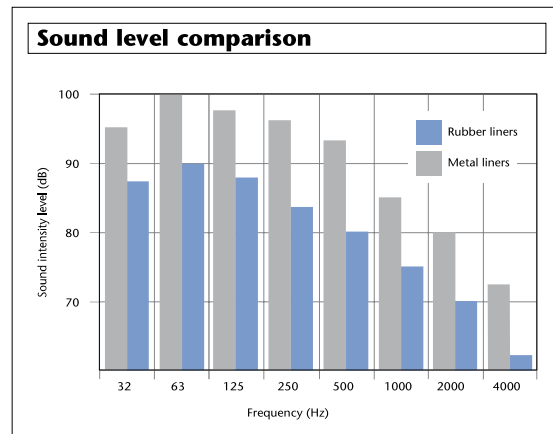


Versatile, economical, and efficient Vulco wear resistant rubber and metal cap mill liners provide:

- **Lower installed cost** – Since rubber and metal cap mill liners weigh up to 80% less than steel alone, they are faster, easier and safer to install.
- **Operating efficiency** – Vulco rubber compounds, specially formulated for maximum tear resistance and resilience, increase wear life and reduce downtime. Liner profiles are custom engineered to fit specific geometry and operating conditions. Reducing the mass of lining systems commits greater charge weight to be utilized, increasing throughput.
- **Reduced maintenance** – The low profile T-track system eliminates the need for frequent inspections, repair, and bolt tightening. Rubber conforms to the mill's internal surface creating a seal that prevents leakage and slurry erosion of the mill shell. Faster change outs and longer wear life with fewer maintenance interruptions mean greater mill availability and performance.
- **Health and safety** – Rubber liners significantly reduce the generated and transmitted sound level associated with grinding. The risk of strain injuries during installation is reduced because of the lighter weight of the liners. Converting to rubber linings from metal can reduce the number of components to be handled.



Above: Rubber retention ring



Compared to metal liners, rubber liners can reduce sound levels associated with grinding by up to 10dB, equal to a 50% reduction registered by the ear

- **Lower operating cost** – Next to the ongoing cost of electrical power and grinding media, mill liners are the highest recurring expense for a mineral grinding operation. Compared to traditional metal liners, the benefits of rubber liners effectively reduce this expense.

# Special developments in rubber liners evolved as the result of the rigorous demands of large primary grinding mills.

## Correct material and design extend mill availability

Mill lining design and wear materials that last longer and are easier and faster to change out are the solution to the requirement for increased mill availability. Rubber and metal cap meet both needs. Since impact forces in large primary autogenous and semi-autogenous mills may cause very high wear rates, downtime with high capital and maintenance costs is a major financial consideration.

## Rubber mill liners outlast steel on abrasive service

The inherent characteristics of Vulco rubber compounds—elasticity, high tensile strength, and corrosion resistance—make rubber the preferred mill lining material over steel. Rubber's elasticity permits restoration of its original profile after impact, and its high tensile strength prevents tearing.

## Shell plate and lifter bar profiles are custom designed

Vulco linings are custom designed for each grinding application with consideration given to factors such as plate thickness, width and height of lifter bars, distance between bars, shape of bars, mill capacity and power draw.

Various types of feed head liner, discharge head liner, shell plate, and lifter bar geometry options are available to ensure optimum grinding and lowest ownership costs.



Various shell plate configurations, top to bottom: SFL, SCL, SSL, SSW, SDW and STW

## High-low installation pattern reduces downtime

For primary grinding, unique sloped sided lifter bars up to 400mm (15.75") wide and up to 500mm (19.7") high are installed in an alternating high-low pattern. When high bars are worn down to the original height of low bars, new high bars replace the low bars. Therefore at every change of bars, only half are changed out.

Lifter bar lengths are easily adapted to the wear pattern in the mill. Shell plates last through several sets of bars. Replacing a minimal number of parts during shutdown periods ensures that a more cost efficient maintenance program can be adopted to deliver the maximum possible mill availability.



Above top: Metal cap shell plates and lifters plus metal cap lifters on the grate discharge mill end

Above bottom: Typical SAG/ball mill circuit

### Liner product codes

Lifter bar code	Lifter bar description	Width (mm)	Width (inches)
RIC/A	round top w/aluminum T-track	100 to 400	4 to 15.75
RIC/S	round top w/steel T-track	100 to 400	4 to 15.75
QIC/A	square top w/aluminum T-track	100 to 400	4 to 15.75
QIC/S	square top w/steel T-track	100 to 400	4 to 15.75
SIC/A	sloped edge w/aluminum T-track	100 to 400	4 to 15.75
SIC/S	sloped edge w/steel T-track	100 to 400	4 to 15.75
Head plate code	Head plate description	Thickness (mm)	Thickness (inches)
HFL	flat top	40 to 150	1.6 to 6
HCL	raised centerline (hump) top	40 to 150	1.6 to 6
HSL	step top	40 to 150	1.6 to 6
Shell plate code	Shell plate description	Thickness (mm)	Thickness (inches)
SFL	flat top	40 to 200	1.6 to 7.8
SCL	raised centerline (hump) top	40 to 200	1.6 to 7.8
SSL	step top	40 to 200	1.6 to 7.8
SSW	single wave top	40 to 200	1.6 to 7.8
SDW	double wave top	40 to 200	1.6 to 7.8
STW	triple wave top	40 to 200	1.6 to 7.8
Grate plate code	Grate plate description	Thickness (mm)	Thickness (inches)
GFL	flat top	40 to 200	1.6 to 7.8
GCL	raised centerline (hump) top	40 to 200	1.6 to 7.8
GSL	step top	40 to 200	1.6 to 7.8

**Notes**

1. Standard bars and plates are rubber; also available with metal caps in hardened steel plate and chrome-moly steel or iron
2. Inserts can be aluminum, carbon steel or stainless steel
3. Special width lifter bars up to 500 mm are available

# Weir Minerals specializes in SAG and AG applications.

## SFL composite shell plate reduces risk of breakage

SFL is a composite product that combines the best characteristics of metal alloys and rubber to obtain a superior element for use as a shell plate in AG or SAG grinding mills. By using special alloy steel segments molded into rubber, SFL plates greatly reduce breakage risk always present in the grinding process where balls of over 100mm (4") are used.

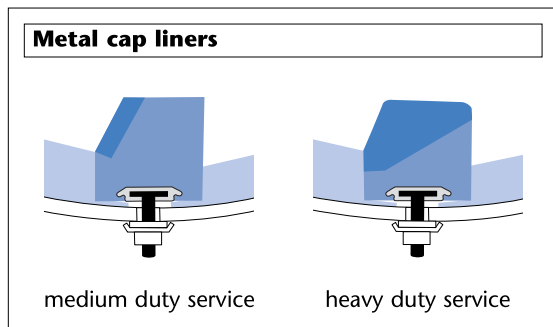
In addition, SFL linings are up to 60% lighter than equivalent metal liners. This can be translated into an increase in grinding capacity.

## Metal cap liners provide best possible service life

In aggressive SAG and AG applications, impact situations that exceed allowable stresses on rubber linings may dictate the use of a metal cap liner. A metal cap, pressure molded to the rubber, provides surface impact resistance with considerable weight savings.

Vulco SIC/S design lifter bar reduces cataracting during the initial stages of the lifter bar life. This reduces energy and media and lining material losses that would otherwise arise from unproductive cataracting of the grinding charge.

Vulco metal cap lifter bars utilize chromium-molybdenum steel or white iron castings vulcanized within a natural/synthetic elastomer matrix. The rubber compound is specifically designed for maximum abrasion resistance in the most aggressive grinding environments commonly found in primary milling applications. Metal cap lifter bars are designed to achieve the best possible service life by placing the more costly alloy where it will be most efficiently used.



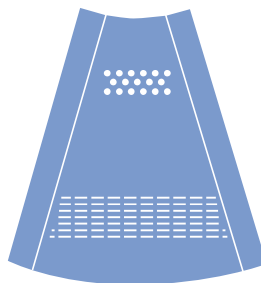
## Grate discharge head liners

Non-plugging grate openings, positive seals between manufactured parts, safety and ease of installation, and long wearing rubberized components are major benefits of Vulco grate discharge head liners. Large mill grate discharge heads offer improved flow and reduce recirculation to increase mill efficiency. Optimized design and material selection matches the wear life of linings.

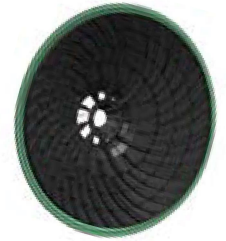
Both autoclave vulcanizing and molded parts are available as alternate manufacturing methods.

## Flexible reinforced grate plates have positive tapered holes

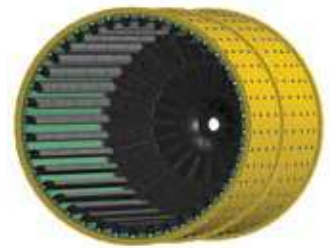
Vulco flexible, reinforced grate plates have positive tapered apertures which permit self-cleaning and minimize plugging. As a result, the grates have a very effective open area for good pulp extraction.



Left: Grate plate with an arrangement of different apertures



Above top: Head lining with a curved design



Above bottom: Shell lining with radial head liner design



Above: Metal cap lining used near the grate end of a mill

Left: Metal cap lifter for medium duty service

# Vulco mill lining systems offer a range of user benefits.



Above: Fit testing of pulp dischargers for large AG/SAG mill

## Optimum pulp discharge assembly design

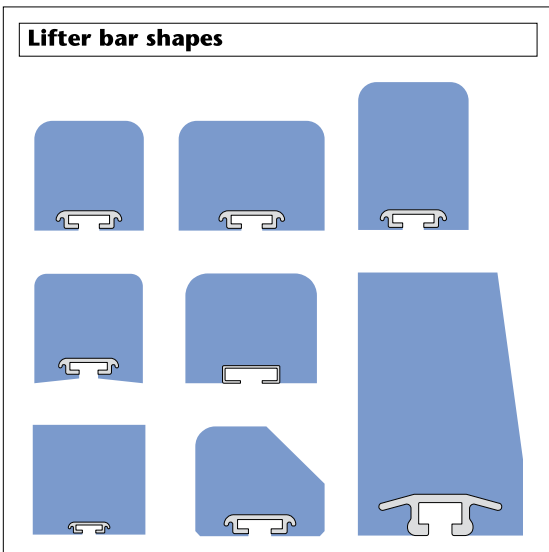
Pulp discharge assemblies, incorporating upper discharge or center cone design, preassemble to insure fit and avoid extended mill downtime. Each system is designed to prevent recirculation, extending overall assembly life.

## T-track fastening system provides safety and quick adjustment

An aluminum or steel T-track, molded into rubber under high pressure, provides both longer liner life and a safe secure attachment. This system takes advantage of both mechanical and chemical bonding to produce a low profile, metal insert lifter bar which affords maximum utilization of rubber, and can also be used with metal cap liners.

The T-track system allows worn or damaged parts to be quickly and easily replaced. Lifter bars can be replaced without removing the shell plates. Special molded corner segments fill the gap between shell and head liner, allowing the change of shell and head parts independent of each other.

Below: Various lifter bar shapes include round top, square top, and sloped edge



## Secure seals prevent leakage

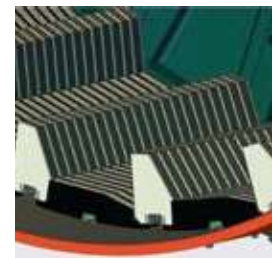
Liner installations are securely sealed to prevent any leakage by use of a rubber washer held in place by a steel cup washer. A special bushing, utilized when changing from steel to rubber linings, centers the bolt and prevents pulp from penetrating into the bolt hole and enlarging it by wear.

## Optimum lifter bar geometry

Discrete element method (DEM) charge trajectory analysis is conducted to guarantee the correct lifter bar face angle to ensure the available power is converted to ore size reduction in the most efficient manner.

## Lighter weight components mean increased cost savings

Pulp dischargers, cone liners, trunnions and trommel screens can be made as steel fabrications covered with thick, abrasive resistant sheet rubber and ceramic inserts when required. Lower operating costs through power savings are achieved via significant reduction in the overall system weight.



Above: Composite metal cap SFL shell lining

Left: Typical molded SFL lining section



**WARMAN®** Centrifugal Slurry Pumps  
**GEHO®** Positive Displacement Slurry Pumps  
**VULCO®** Wear Resistant Linings  
**CAVEX®** Hydrocyclones  
**FLOWAY® PUMPS** Vertical Turbine Pumps  
**ISOGATE®** Slurry Valves  
**MULTIFLO®** Mine Dewatering Pumps  
**HAZLETON®** Specialty Slurry Pumps  
**LEWIS PUMPS™** Vertical Chemical Pumps  
**BEGEMANN PUMPS™** Centrifugal Process Pumps



For further information on Weir Minerals products or services, contact the nearest sales office or visit [www.weirminerals.com](http://www.weirminerals.com)

**Weir Minerals North America–Rubber Engineering**

3459 S 700 W, Salt Lake City, UT 84119  
PO Box 26168, Salt Lake City, UT 84126  
USA

Tel: 801 574 2100  
Fax: 801 261 5587  
[www.weirminerals.com](http://www.weirminerals.com)

Excellent  
Minerals  
Solutions

