



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ
ТЕХНОЛОГИИ

Николай Иванов Стоименов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДВИЖЕНИЕТО И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕТО ПРИ
ТЕЛА С ПРОМЕНЛИВА ФОРМА

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

НА ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователната и научната степен „доктор“

по научна специалност 02.21.07 “Автоматизирани системи за обработка на
информация и управление“

Професионално направление: 5.2. „Електротехника, електроника и автоматика

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

София, 2016 г.

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на секция „Вградени интелигентни технологии“ на ИИКТ-БАН, състояло се на 15 юли 2016 г.

Дисертацията съдържа 144 стр., включващи фигури, таблици, приложения и литература, съдържаща 112 заглавия.

Защитата на дисертацията ще се състои на2016 г. от часа в зала 507 на блок 2 на ИИКТ-БАН на открито заседание на научно жури в състав:

1. Проф. дмн. Галя Ангелова
2. Проф. д-р Тодор Нешков
3. Проф. д-р Любомир Димитров
4. Проф. д-р Костадин Костадинов
5. Проф. д-р Димитър Карастоянов

Материалите за защитата са на разположение на интересуващите се в стая 215 на ИИКТ-БАН, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 25А.

Автор: ***Николай Иванов Стоименов***

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

Обща характеристика на дисертационния труд

Актуалност на проблема:

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.

Обект и област на изследването:

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.

Съдържание на дисертацията:

Дисертационният труд съдържа четири глави, списък на литература със 112 заглавия. Обемът му е в размер на 144 страници текст, включващ таблици, фигури, формули, приложения. Номерацията, фигурите и формулите е запазена в настоящия автореферат.

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, обърнато 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.

Цел и задачи на дисертацията

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. Поставените цели в този труд е да се изследват възможностите реализация на за 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.

Апробация на резултатите

Резултати, включени в дисертацията, са докладвани на: международна конференция в чужбина Fifth International Symposium on Business Modeling and Software Design, Milan, Italy, 6-8 July 2015, ISBN: 978-989- 758-111- 3.

Част от резултатите са представени на следните конференции: XXIII, XXIV, XXV МНТК Автоматизация на дискретното производство „АДП” Юни, Созопол 2014г., 2015г., 2016г., в списание „Проблеми на техническата кибернетика и роботиката“ и др.

Списък на публикациите по дисертацията

На Международни Конференции в чужбина:

1. 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.

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 23-26th 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.**, Карастоянов Д., 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.**, Карастоянов Д., Анализиране на технологичния процес за смилање 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., **Стоименов Н.**, 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 брикетирание на метален скрап. International Scientific Conference "High Technologies, Business. Society 2016", Borovets, Bulgaria, 14-17 March 2016, стр. 8-11, ISSN 1310-3946

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 смила 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.

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

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.

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 ремонтиране, отстраняване на повредени или износени лифтери. За да осигурява висока надеждност, конструкцията на лифтерите трябва да осигурява лесен монтаж, демонтаж и подмяна.

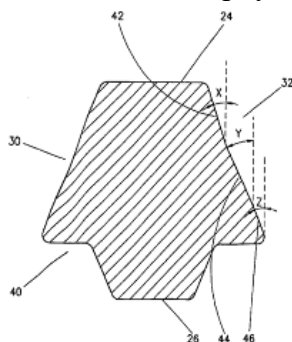
За фино смилане на материала, [7] предлага използването на гладка облицовка – **фиг. 1.5**, имаща за цел да осигурява стриващо действие.



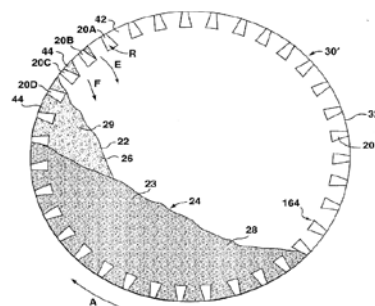
Фиг. 1.5. Гладка облицовка [7]

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.

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. 1.6. Лифтер [8]



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

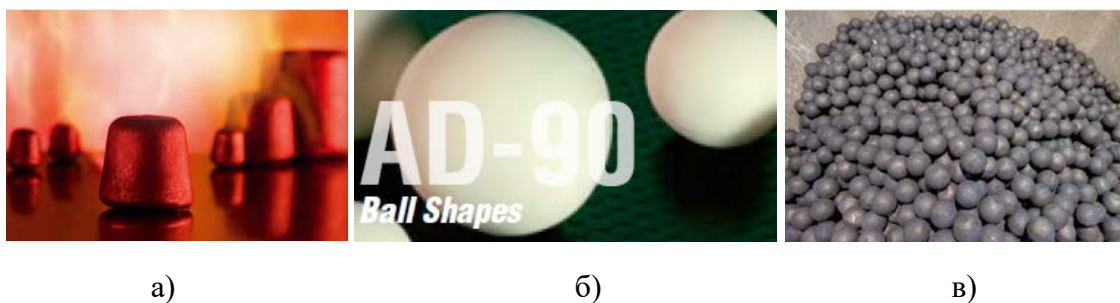
отношението на размера на частиците на входящия материал към размера на частиците на смления продукт на изхода на мелницата. В различните приложения той варира в широки граници, като те могат да са от 20:1 до 200:1, [4, 6]. Производственият капацитет се измерва в тона произведена продукция за час, а 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.

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 (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) cylpebs [23], б) керамични топки [25], в) стоманени топки [26]

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 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 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**.

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].



Фиг. 1.11. Разходи при процес смилане [26]

➤ 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.

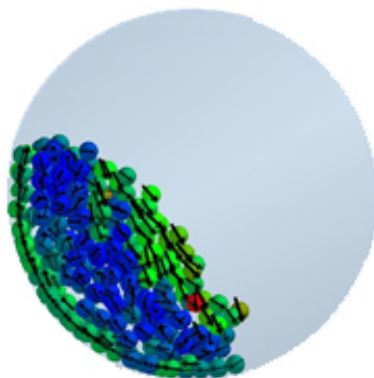
➤ Не трябва да се допуска повишаване на температурата и загряване на мелницата над допустимото. Прегряването може да се избегне чрез намаляване на скоростта на мелницата, което обаче удължава времето и намалява ефективността на процеса. Поради тази причина в конструкцията на някои мелници е предвидена система за охлаждане.

1.6. Режими 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

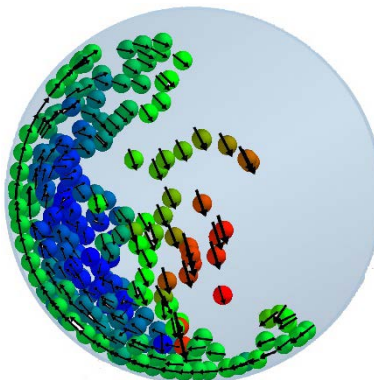
среда имат ниски стойности. Този режим се нарича каскаден режим, показан е на **фиг. 1.12**. Прилага се основно при прътови мелници, също така и в някои топкови мелници при втори и следващи стадии на смилане. Производителността е малка при работата на този каскаден режим. Затова този режим не се използва 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 смилащата среда се нарича смесен режим [1, 2, 7].

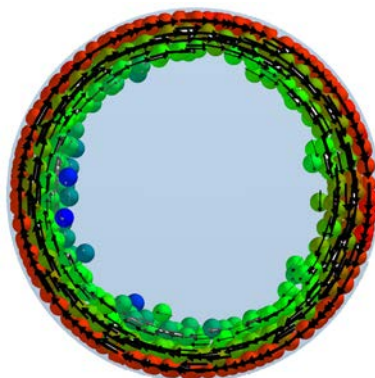
Водопаден режим на смилане е този, при който мелещите тела от всички слоеве (външни и вътрешни), издигайки се заедно с барабана до по-високо, изгубват контакт с барабана. Следствие на това се откъсват и преминават в състояние на „свободен полет“, след което отново се приземяват на дъното. Потенциалната 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 режим 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].

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 означае 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 ρ_R са съответно масата и плътността материала, а V_M е обема на мелницата. Аналогично, обемът V_B , заема от мелещата среда в проценти от обема на мелницата е

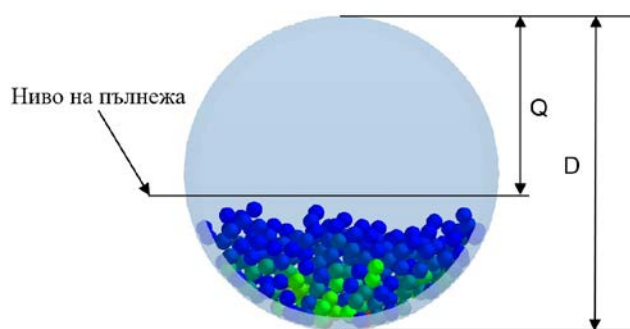
$$V_B = \frac{M_B / \rho_B}{V_M} \times 100, \quad (1.2)$$

където M_B и ρ_B са съответно масата и плътността на мелещите тела. Общият обем, заема от товара може да варира в известни граници в зависимост от типа на мелницата. Като правило, при топковите мелници от преливен тип товарът не бива да надвишава 45% от обема на мелницата, а при мелници от диафрагмен тип 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 смилаемост и F е размера в сантиметри на частиците на смилаемия 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 смилаемост 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.

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 смилаемия 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 и промяна в масата на металните топки.

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.

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, 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.

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].

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].

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 (cylpebs) 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.

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.

Авторите на [21] предлагат нова форма на мелещото тяло, определена като “сферичен тетраедър”, **фиг. 1.23**. 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. Мелешо 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.

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 метра, 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 уравн. 1.19, като тук допълнително се явява коефициентът C_F , представляващ комбиниран коригиращ 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.

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].

1.13. Заключение

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

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 предприятия, 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.

Заклучение

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 НА 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.

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 100µm и за цимент тип 52,5 от 80µm 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. ***Като на първо място измервателната клетка трябва да бъде добре почистена,***

Основните параметри за настройка на уреда 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.

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.*
- *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, както и охладителната система в областта на лагерите. Препоръчва се да бъде направено следене 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 необходимия 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.

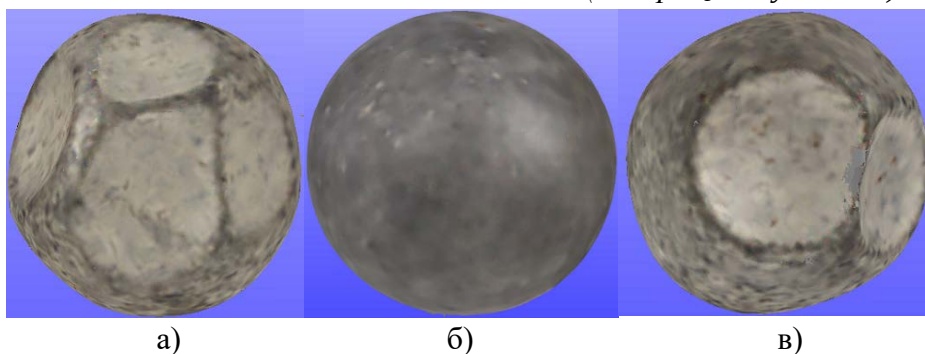
3.5. Реинженеринг на мелещи тела

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.

Вече дигитализираните мелещи тела са показани на **фигура 3.6**. Предстои да бъде направен сравнителен анализ между новата и работилите мелещи тела, за да бъде установено до каква степен са износени. Също така наличието на не работилото мелещо тяло може да се съпостави с 3D CAD модел (*m.nap. Quality control*).



Фиг. 3.6. Дигитализирани мелещи тела: а–работило, б–ново, в–работило мелещо тяло

3.6. Заключение

Спазването на разработените методики при изследване едрината на цименти допринася за получаването на бързи и достоверни резултати, при измерването на изходна продукция.

Изследването и следенето на температурите при ротационни пещи за топкови мелници допринася за правилна експлоатация на охлаждащата система, запазваща основните елементи като лагери и корпус на пещта.

Симулирането на смилателни процеси и анализирането и изследването на мелещи тела, както и анализирането на получени данни е от ключово значение при разбирането на процесите, възникващи при движението на тела.

Глава 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И РЕЗУЛТАТИ

Резултатите са получени вследствие 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

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 отсеиват 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 студените месеци на годината, поради гарантирана висока ранна якост на натиск – над 30 МПа 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 показват, че едрината на продукта варира 83,2 μm , 83,6 μm .

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].

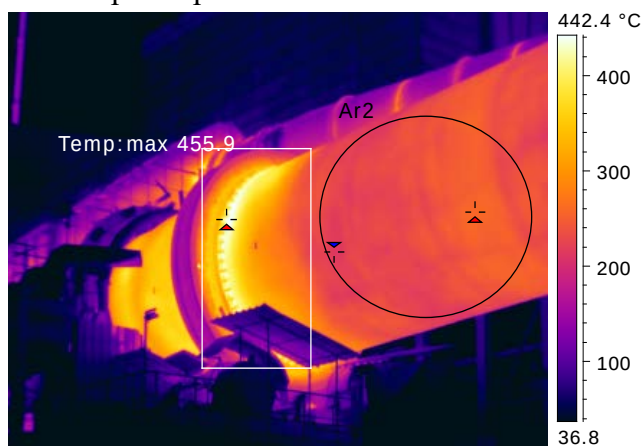
Съгласно методиката в глава 3, т. 3.2 (Съставяне на методика за изследване на температура при ротационна пещ), е необходимо запознаване с компонентите на пещта, показани на **фиг. 4.3** в реална експлоатация.

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 $212,5^{\circ}\text{C}$ (син маркер) до $259,4^{\circ}\text{C}$ (червен маркер). 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 термокартината.



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



Фиг. 4.4. Термография на ротационна пещ за топова мелница отсек 1

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

4.3. Изследване движението и взаимодействието на тела с променлива форма

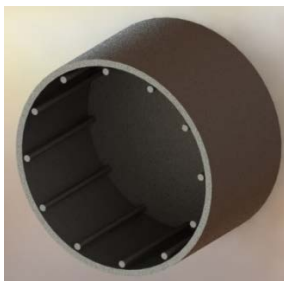
При направеният литературен обзор става ясно, че мелниците за смилане се делят на поне 5 вида, съдържащи под видове и под типове. За да се добие по добра представа от всички налични мелници е направен опит за класификация на тези машини за смилане. Най-голямо внимание е обърнато на барабанните топкови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

4.3.1. Конструктивните характеристики на барабанна топка мелница

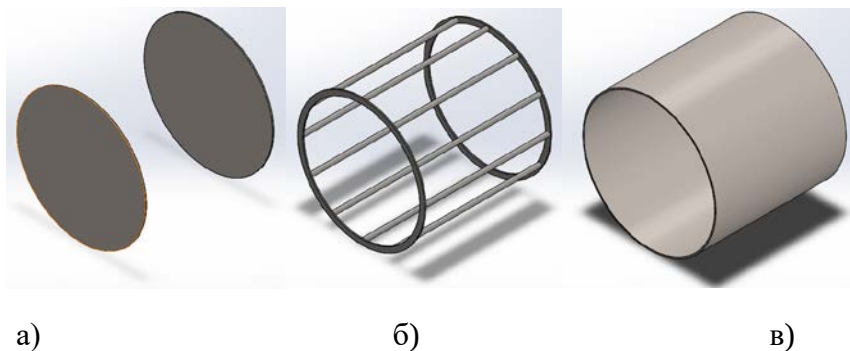
Конструктивните характеристики на барабанната топка мелница представляват три камерна конструкция с различна ширина на поясите – 150, 100 и 50mm. Това дава възможност за получаване на 7 различни ширини. Страничните капаци са прозрачни, предпазени са с метална решетка. Това позволява наблюдаване на различните 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**.



Фиг. 4.10. Основни компоненти на топка 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. Тук се достига до най-използвания режим на работа – катарактен режим.

4.3.2. Задаване на входни данни за симулирането на сферични мелещи тела

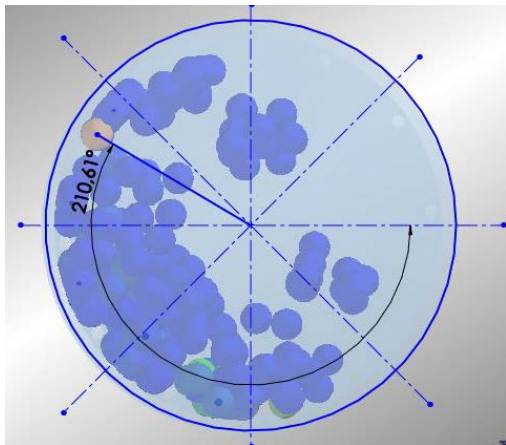
От описаната методика следва да се зададат следните входни данни:

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
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.

4.3.3. *Анализиране данните от симулацията на сферични мелещи тела*

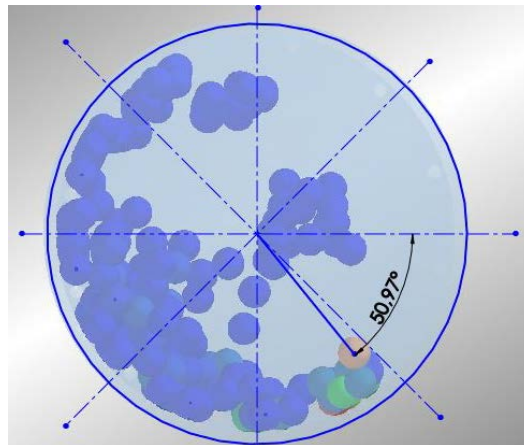
На базата на тези зададени данни е осъществена симулация само с мелещи тела, с цел да се отчете ъгъл на отделяне от рамото на мелницата, ъгълът на падане и силата на удар при падане, **фиг. 4.12 – 4.14** [105-108]..

Ъгъл на отделяне – $210,61^\circ$



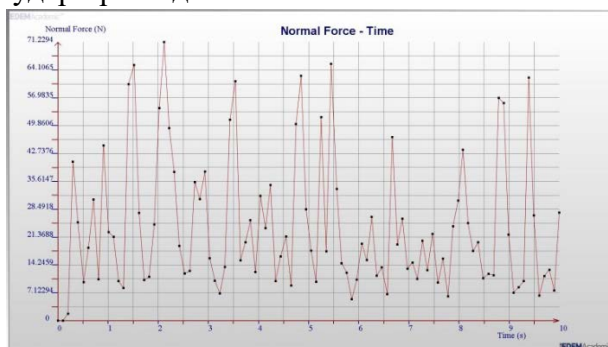
Фиг.4.12. Определяне ъгъла на отделяне

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

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 необходимия 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.

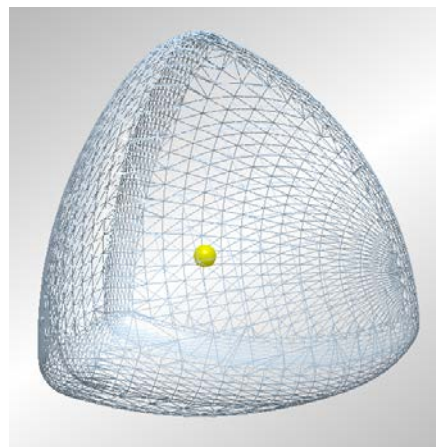
Спецификата при тази симулация е формата на мелещото тяло. Според литературни източници [21], това тяло има по-добра ефективност, но не е изследвано както сферичните мелещи тела. Това налага изследването му, което не е просто като при сферичните мелещи тела, поради спецификата на работа на софтуера.

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

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. 4.16. 3D модел на сферичен тетраедър.



Фиг. 4.17. Импортиран модел в EDEM Software.

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

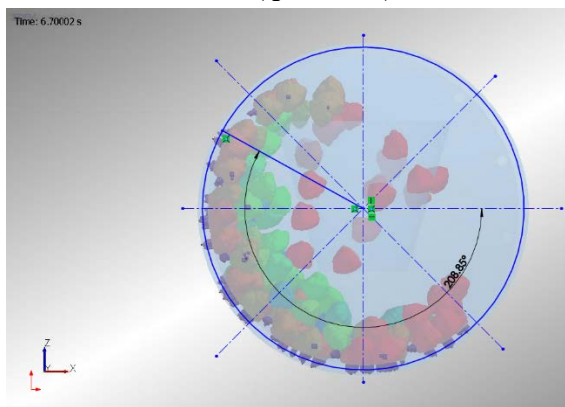
Поради специфичната форма на този тип мелещо тяло е необходимо съставяне на методика за отчитане на резултатите му.

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:

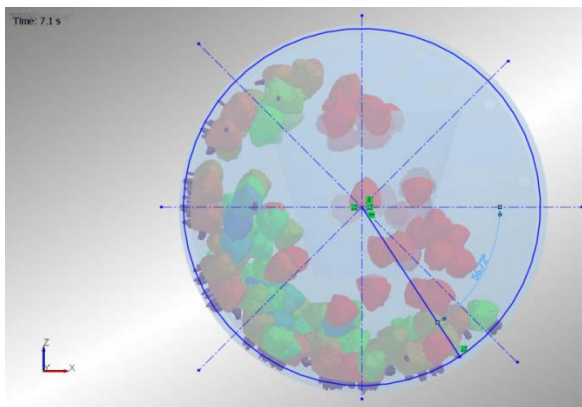
1. Определяне размерите на сферичния тетраедър.
2. Построяване на сферичния тетраедър.
3. Задаване на стойностите на параметрите:
 - 3.1.Посока на въртене.
 - 3.2.Обороти на лабораторната мелницата.
 - 3.3.Процентно запълване със сферични тетраедри на лабораторната мелница
4. Определяне на „контактното петно“ между сферичния тетраедър и вътрешната повърхнина на мелницата.
5. Определяне на ъгъла на отделяне чрез контактен вектор.
6. Определяне на ъгъла на падане на сферичния тетраедър.
 - 6.1 падане върху повърхнината на мелницата;
 - 6.2.падане върху лифтер;
 - 6.3 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° 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).



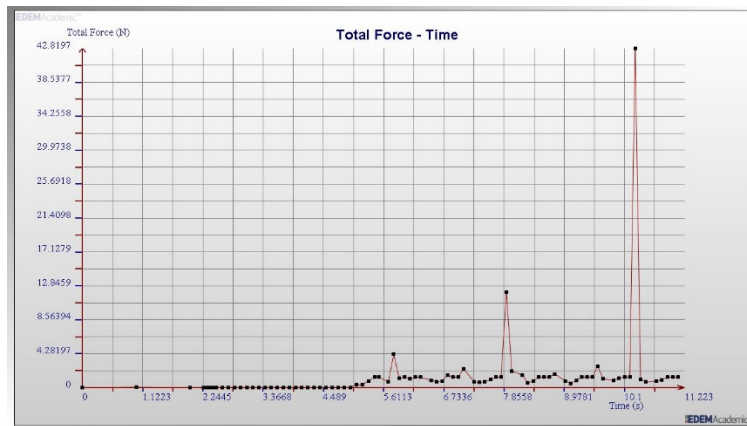
Фиг. 4.19. Определяне ъгъла на отделяне от рамото



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.

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



Фиг. 4.21. Сила на удар на избрана частица

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.

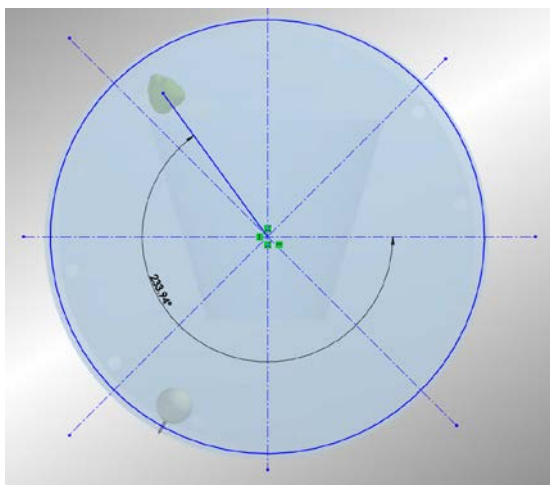
Очакваните постигнати резултати до известна степен се потвърдиха. Те ще бъдат като база на по-нататъшните експериментални изследвания при използването на симулационното моделиране с помощта на EDEM Software.

4.3.6. Сравнителен анализ между различни форми мелещи тела

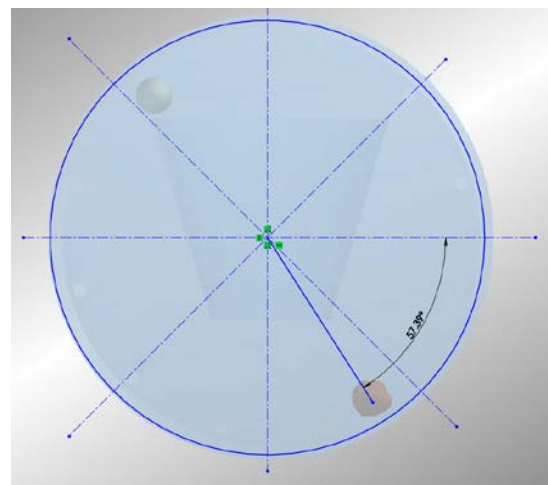
В EDEM Software е направен сравнителен анализ между две тела с различна форма. Сферично мелещо тяло и сферичен тетраедър. Двете тела са в една мелница и са с еднаква маса. Определен е ъгъл на отлепяне от рамото на мелницата и ъгъл на падане. По време на симулацията, която е 30 секунди е сравнен и броят на „успешните“ издигания до получаване на желаний режим на работа (катарактен режим) на двете тела, описан в Глава 1 (**фиг. 4.22 – 4.32**) [109-112].

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

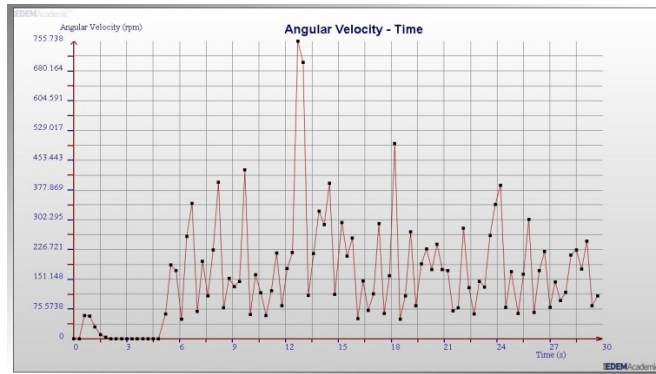
Отчетени са: Ъглова скорост тетраедър; Ъглова скорост сферично тяло; Сила тетраедър; Сила сферично тяло; Ускорение тетраедър; Ускорение сферично тяло; Скорост тетраедър; Скорост сферично тяло.



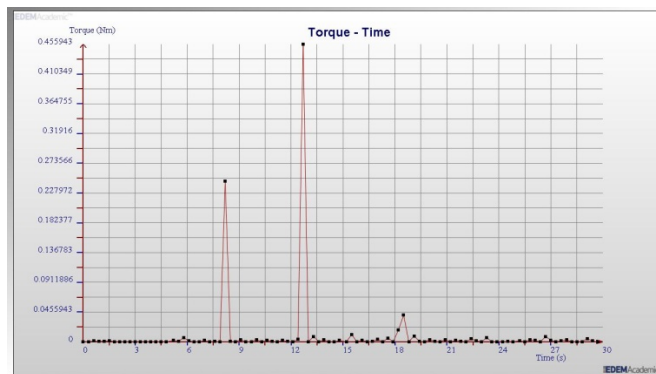
Фиг. 4.22. Определяне ъгъла на отделяне на тетраедър.



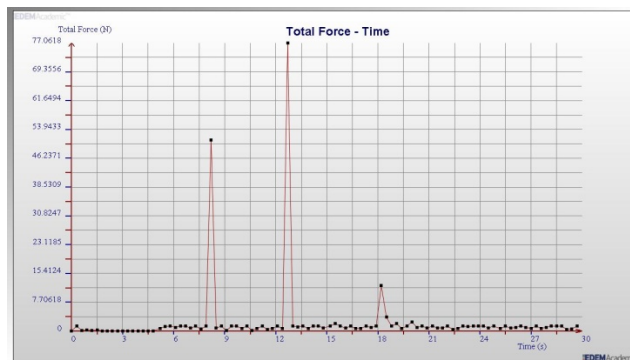
Фиг. 4.23. Определяне ъгъла на падане на тетраедър.



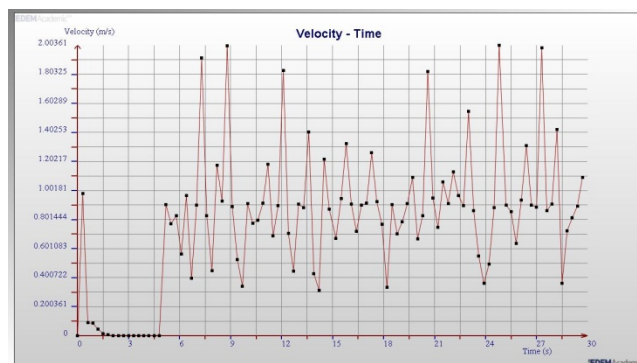
Фиг. 4.26. Ъглова скорост тетраедър



Фиг. 4.28. Ускорение тетраедър



Фиг. 4.30. Сила тетраедър



Фиг. 4.32. Скорост тетраедър

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 N, с 14,92 N по-голяма от тази на сферичното тяло (62,14N). Максимално отчетената ъглова скорост на сферата е 855,248 грт, тази на тетраедъра е 755,738 грт. Максималното ускорението на сферата е 0,151421 Nm, а това на сферичния тетраедър е 0,455943Nm.

4.4. Лифтер тип сфероидален тетраедър на Рело

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.

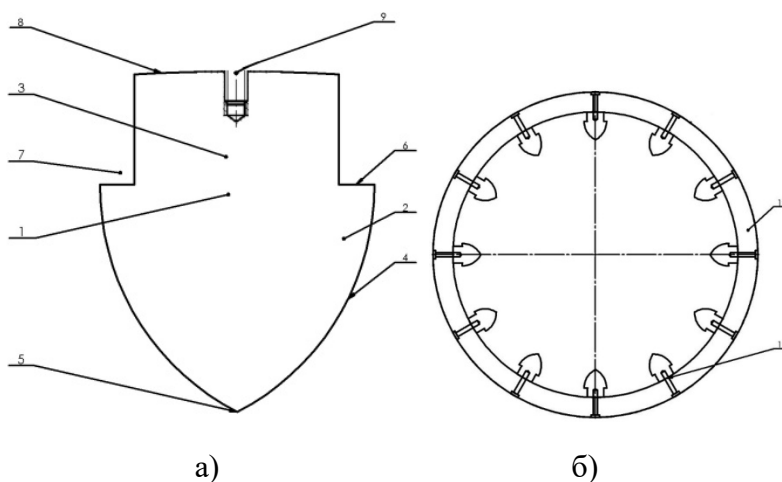
Задачата на изобретението е да се създаде лифтер, с който разтрошаването и смилането на материала да става по-бързо и по-лесно.

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.



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. Осево 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 смила. 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 частиците. Това може да се постигне чрез навременна подмяна на мелещите тела.

При направената термография на пещта, 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 е 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 силата при приземяване е по-голяма. 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 термокамера 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 мелещи среди с променлива форма.
3. Проведени са редица експерименти за 3Д моделиране и изследване на движението и взаимодействието между мелещи 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.

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 неустойимото 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 Ключков от катедра АДП към МФ на ТУ-София за подкрепата през всички тези години.

Сърдечно Благодаря на всички !!!

ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков Х., Обогащителни машини, ДИ „Техника“, С., 1988г.
2. Жълтов А., Машини за строителни материали“ ДИ „Техника“, С., 1980г.
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 Mephram “LILFTER BAR” Pub.No.: US 2012/0228416 A1, Pub. Date: Sep.13, 2012.
10. Карастоянов Д., Стоименов Н., Заявка за патент на Република България, ЛИФТЕР, Рег. № 112174, приоритет от 14.12.2015
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.
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, посетен април 2016г.
26. Metso Grinding Media Solutions - [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/C3C13C7F3DBCFA97C2257E12003C0EF1/\\$File/grinding_media_steel_range_en.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/C3C13C7F3DBCFA97C2257E12003C0EF1/$File/grinding_media_steel_range_en.pdf)
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.
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.
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, *PM²TEC'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.
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., Stoimenov N., Advanced copper matrix composites,– Monography, Academic Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Science, Sofia, 2016 ISBN 978-954-322-859- 1
103. Додеков И., Люцканов Л., Димитров Т., Горанов С., Георгиев В., Младенов Ц., 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, Анализиране на технологичния процес за смилане в топкови мелници., XXIII МНТК „АДП – 2014” 19-22 Юни, Созопол 2014г., стр. 188-193.

STUDY OF MOVEMENT AND INTERACTION OF DIFFERENT SHAPE BODIES

Nikolay Ivanov Stoimenov

**Institute of Information and Communication Technologies
Department Embedded Intelligent Technologies**

Abstract

An example of a investigation/study about the movement and interaction of bodies with different shape can be considered in ball mills. Changes in the shape and size of the grinding bodies and the material for grinding can be observed in the ball mills. The bodies and the grinding material affect also on the internal modules of the ball mill.

In dissertation is analyzed the types of mills, their inner lining and the workflow. The regimes of ball mills, charging and discharging, characteristics of the grinding media are examined.

Experimentally equipment is examined, which can help for detailed knowledge contributes to proper operation. Attention is paid to nano particle sizer, thermography is examined. Attention is paid to a software working on discrete element method, and different modules which can be used for various simulations.

Methodologies are implemented and are used for the necessary equipment, attention is paid to the basic functions influencing the measurements. A methodology is implemented and is used as a base for research which made the movement, interaction and shape of bodies with different shape.

Finally results are exposed, achieved by research and studies in production. An analysis of the distribution of particles in the types of cements is made. Temperatures of rotary furnace for ball mill are presented.

Simulations are implemented with software running on the method of discrete elements for movement of the grinding bodies in a laboratory ball mill. Innovative parameters of grinding modules are proposed (lifters for a ball mill) to obtain the best parameters of the ground material.