

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

маг.инж. Татяна Маринова Димова

**МОДЕЛИРАНЕ НА СЕПАРАТОРИ С ПОСТОЯННИ
МАГНИТИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „Доктор”**

**по докторска програма „Електрически машини и
апарати“**

**Научни ръководители: доц. д-р инж. Бохос Р. Апрахамян
доц. д-р инж. Мария И. Маринова**

Рецензенти:

1.....

2.....

Варна, 2015г.

Дисертационният труд е обсъден на 30.10.2015г. в катедра „ЕТЕТ” и насочен за защита пред научно жури.

Докторантката работи в катедра „Електротехника и електротехнологии”.

Автор: маг.инж.Татяна Маринова Димова

Заглавие: Моделиране на сепаратори с постоянни магнити

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

маг.инж. Татяна Маринова Димова

**МОДЕЛИРАНЕ НА СЕПАРАТОРИ С ПОСТОЯННИ
МАГНИТИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „доктор”**

**по докторска програма „Електрически машини и
апарати“**

**към професионално направление „Електротехника,
електроника и автоматика“**

Научни ръководители: Доц. д-р инж. Бохос Р. Апрахамян

Доц. д-р инж. Мария И. Маринова

Варна, 2015г.

Дисертационният труд съдържа 146 страници, 10 страници приложение, включително 135 фигури и 41 таблици. Материалът е оформен в 5 глави, завършващи с обобщения и изводи. Списъкът на използваната литература включва 122 заглавия, от които 50 на кирилица и 72 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои наг.
отч.

в Конферентната зала на ТУ - Варна на открито заседание на научно жури,
сформирано със заповед на Ректора №/.....г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата)
са на разположение на интересувалите се във ФД „Докторанти”, стая 318
НУК.

СЪДЪРЖАНИЕ

Обща характеристика на дисертационния труд	4
Актуалност на проблема	4
Проблем	4
Цел и задачи на дисертационния труд	4
Обект на изследването	5
Предмет на изследването	5
Методи на изследване	5
Място на изследване	5
Научна новост на изследването	5
Практическа ценност на изследването	5
Апробация на изследването	6
Съдържание на дисертационния труд	6
Първа глава. Анализ на специфичните изисквания при магнитно сепариране	6
Втора глава. Експериментално определяне на факторите, които влияят върху технологичния процес на сепариране с постоянни магнити	7
Трета глава. Експериментално и теоретично определяне на картината на разпределение на магнитното поле	14
Четвърта глава. Моделиране на технологичния процес на сепариране с постоянни магнити	22
Пета глава. Изследване влиянието на технологичните параметри върху процесите на сепариране с постоянни магнити	26
Научни и научно-приложни приноси	29
Списък на научните публикации по дисертационния труд	31
Коротко описание дисертации	32
Abstract	32

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Устройствата за магнитно сепариране, в частност тези с постоянни магнити, са в основата на най-широко използваните методи за разделяне на материали в индустриалната сфера. Това е процес, застъпен широко при разделяне на минерали, насипни гранулирани материали с различна природа, флуиди, семена, хранителни продукти, битови отпадъци и много други. В сравнение с електромагнитния метод, сепарирането с постоянни магнити притежава редица предимства – висока ефективност; ниски експлоатационни разходи; постоянство на магнитния поток, върху големината на който не оказват влияние колебанията на захранващото напрежение; слабо зависи от температурата, запрашеността и рН на средата; мобилност и гъвкавост, т.к. не зависят от захранващата мрежа; опростяване на конструкцията и увеличаване на надеждността поради липсата на възбудителни намотки; намаляване на габаритните размери на магнитната система; висока селективност на извличане; не изисква специални мерки за безопасна работа (освен екранировка при високоенергийните производства); по-малка себестойност в сравнение с електромагнитните сепаратори (до определени габаритни размери); възможност за пълна автоматизация на процеса и др.

С цел повишаване качеството на обработваните продукти е необходимо постигане на максимална степен на почистване. Това изискване може да се постигне чрез предварителен числен анализ на съществуващи сепариращи апарати с постоянни магнити и последващ подходящ избор на технологични параметри. Не на последно място се удовлетворяват и изискванията от Наредба №31 и регламент на ЕС № 742/2010.

Понастоящем съществуват редица изследвания, проведени чрез математични модели най-вече на барабанни и окачен тип конструкции магнитни сепаратори. Но в зависимост от характера на обработвания продукт съществува голямо многообразие и всеки един от представените модели представлява конкретно решение за конкретен случай. Това определя актуалната нужда от постоянно предлагане на частни решения, удовлетворяващи точно определена конфигурация и параметри.

Проблем

Необходимост от разработване и прилагане на алгоритъм за повишаване на ефективността на процеса на сепариране с постоянни магнити, изразяващо се в максимална степен на почистване при минимален брой работни цикли, като функционалното състояние на сместа съответства на стандарта.

Цел и задачи на дисертацията

Цел: Подобряване на резултатите от технологичните процеси на сепарация и почистване на насипни продукти чрез създаване и приложение на математични модели на сепаратори с постоянни магнити и на реализирани с тях технологии с предварително зададени параметри.

Задачи:

1. Експериментално определяне на експлоатационните и технологични фактори, влияещи върху технологичния процес на сепариране с постоянни магнити за различни обекти от електротехническата и стъкларска промишленост (магнезиев оксид, кварцов пясък, керамична смес), но също така и обекти на сепариране от хранителновкусовата промишленост (слънчогледови семена, сурова нерафинирана какаова маса и др.).

2. Експериментално и теоретично определяне на картината на разпределение на магнитното поле в различни конструкции на сепаратори с постоянни магнити. Анализ на влиянието на геометрията на магнитната система и характеристиките на обработвания продукт, върху технологичния процес на сепарация с постоянни магнити.
3. Моделиране на технологичния процес на сепариране с постоянни магнити на различни обекти. Анализ и настройка на факторите, които влияят върху процеса на сепариране с цел извеждане на обобщено уравнение за описание на процеса на сепарация с постоянни магнити.
4. Моделиране на технологичния процес на сепариране с постоянни магнити, разработка и приложение на алгоритъм за повишаване на ефективността на процеса на сепариране с постоянни магнити, изразяващо се в максимална степен на почистване при минимален брой работни цикли, като функционалното състояние на сместа съответства на стандарта.
5. Изследване влиянието на технологичните параметри върху процесите на сепариране с постоянни магнити.

Обект на изследването

Сепариращи апарати с постоянни магнити за отделяне на феромагнитни частици, с различна големина и форма, от продукти, използвани в различни сфери на промишлеността – електротехническата и хранителновкусовата.

Предмет на изследването

Разработване на компютърни модели за изследване на сепаратори с постоянни магнити за реализация на технологични процеси на почистване със зададени параметри.

Методи на изследване

При провеждане на изследванията са използвани – статистически регресионен анализ и метод на крайните елементи.

Място на изследване

Изследванията в дисертацията са извършени в лаборатория „Електротехнологии”, катедра ЕТЕТ при ТУ - Варна, в „Елика Елеватор“ ООД – гр.Силистра, „Папас Олио“ АД - гр. Балчик и „Слънчеви лъчи Провадия“ ЕАД - гр. Провадия.

Научна новост на изследването

Систематизиран е математичен модел на сепаратор с постоянни магнити, с който са реализирани модели на конкретни системи за сепариране с практическа насоченост, осигуряващи зададени по технология режими на почистване и разпределение на магнитното поле. Разработките имат научен и научно-приложен характер, и са станали обществено достояние у нас и в чужбина чрез публикуването и докладването им на научни форуми. В голямата си част те са лично дело на авторката на дисертацията, като са подпомогнати от колектива, с който тя е работила и публикувала резултатите от изследванията. Една от шестте публикации е самостоятелна, а останалите пет са в съавторство, като във всяка от тях докторантката е на първо място.

Практическа ценност на изследването

Резултатите от изследването върху конкретните сепаратори с постоянни магнити дават възможност за настройване на технологичните параметри за осигуряване на

предварително зададени магнитно поле и степен на почистване на обработвания материал.

Методологията за моделиране на сепаратори с постоянни магнити предполага прилагането ѝ в предварителни проектни изчисления относно геометрията, типа на постоянните магнити и разпределението на магнитното поле при зададено функционално състояние на сместа, съответстваща на стандарта и минимален брой работни цикли.

Апробация на изследването

Разработките по всяка от задачите на дисертацията са докладвани на научни форуми и отпечатани. Направени са общо 6 публикации, както следва:

- една (1) в годишник в България;
- пет (5) на международни конференции в България;
- едно (1) цитиране в международно списание в чужбина.

Резултатите от математичното моделиране са използвани и внедрени във фирма за нестандартно оборудване „Елика Елеватор“ ООД – гр.Силистра. Това е удостоверено с писмо за полезност и приложност на резултатите от дисертацията.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ПЪРВА ГЛАВА: АНАЛИЗ НА СПЕЦИФИЧНИТЕ ИЗИСКВАНИЯ ПРИ МАГНИТНО СЕПАРИРАНЕ

В първа глава е направена класификация на: методи за магнитна сепарация на материали от електротехническата и хранителновкусовата промишленост и характеристики; методи и специфични изисквания свързани с технологичните особености.

Подробно са разгледани основните типове магнитни сепаратори и е установена областта на приложение на магнитната сепарация с постоянни магнити. Анализирани са механизмите на магнитна сепарация с постоянни магнити, както и основните изисквания към качеството на сепариране.

Разгледани са видове сепаратори с постоянни магнити, методи и програмни продукти за анализ и моделиране на разпределението на магнитното поле и технологичните процеси при сепариране с постоянни магнити.

Направеният литературен обзор и сравнителен анализ водят до следните изводи:

- Магнитната сепарация е процес, застъпен широко при разделяне на материали с различна магнитна проницаемост. Тя се прилага не само когато целевите продукти на преработката са феросъдържащи материали, но и в случаите, в които феромагнитните включвания са нежелан компонент или има ограничения по отношение на концентрацията им в продукта.
- Магнитна сепарация с постоянни магнити (МСПМ) е един от най-масово използваните в индустриалната и лабораторната практика процес за третиране на минерални суровини, поради икономичността ѝ. Той е намерил промишлено приложение в обогатяването на различни видове руди и въглища, за пречистване на кварцов пясък, каолини, глини, хранителни и селскостопански суровини, промишлено замърсени води и др.
- Поради енергоспестяващите си предимства сепараторите с постоянни магнити успешно заместват в практиката традиционно използваните

електромагнитни и електростатични сепаратори. Условието на провеждане и възможностите за управление на процеса на магнитна сепарация с постоянни магнити с цел неговата оптимизация, са обект на множество теоретични и експериментални изследвания. Трябва да се отбележи, че повечето от изведените математически модели за описание на процеса се базират на редица идеализирани допускания и опростявания, поради което често са неподходящи за практически цели.

- Провеждането на изследвания върху приложимостта на МСПМ за разделяне на реални системи, както и изучаването на влиянието на основните технологични параметри – интензивност на магнитното поле, концентрация и скорост на движение на суспензията, форма, размери и натоварване на магнитния филтър и др. – върху ефективността на процеса и качеството на продуктите представлява значителен практически интерес, т.к. не са известни в класическата литература какво точно е взаимодействието между тях.
- Изясняването на факторите, лимитиращи ефективността на сепарацията на насипни гранулирани материали и оценката на тяхната значимост при конкретните условия би спомогнало по-точно да се прогнозира възможностите и границите на приложение на МСПМ при преработката на тези материали.

ГЛАВА ВТОРА: ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ФАКТОРИТЕ, КОИТО ВЛИЯТ ВЪРХУ ТЕХНОЛОГИЧНИЯ ПРОЦЕС НА СЕПАРИРАНЕ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

2.1. 2.1. Определяне на критерии за избор на конструкция за магнитна сепарация

Изборът на конструкция за магнитна сепарация зависи от факторите, които влияят върху процеса на сепариране. За да бъде той оптимален, се изисква целта на сепарацията да бъде точно дефинирана, а условията – предварително определени. Тъй като теоретичните модели описват сравнително опростени системи, все още експерименталният опит е от фундаментално значение за успешното реализиране на сепарационния процес [6, 22, 31, 39, 45, 47, 86]

Към сепараторите с постоянни магнити се предявяват и редица високи изисквания :

- Технологични изисквания
 - Вид на транспортиран материал;
 - Дебит на материала за един час;
 - Плътност;
 - Ситов анализ;
 - Влажност и температура;
 - Дебелина на слоя материал
- Конструктивни изисквания
 - Широчина на лентата;
 - Диаметър на задвижващата ролка (ако има такава);
 - Наклон на транспортното съоръжение;
 - Вид на транспортното съоръжение;
 - Монтаж – на открито или на закрито.
- Експлоатационни изисквания

- Температура на околната среда;
- Форма и магнитни свойства на феромагнитните частици;
- Размери на извлечените феромагнитни частици (min и max);
- Количество отделени феромагнитни частици за един ден - определя ритмичност и начин на почистване на работните части (ръчно или автоматично);
- Време за контрол, диагностика и настройка
- Скорост на транспортиране на материала.

Средата, в която се движат феромагнитните частици, които са обект на почистване е от особено значение, т.к. тя оказва влияние върху скоростта на извличане и необходимата сила на привличане, т.к. стълба от обработван материал създава определено налягане върху извлечената частица. Освен това вискозитетът на обработваната смес определя степента на прилепване на немагнитните към феромагнитните частици.

Важна предпоставка за ефективността на почистване е разположението на магнитния сепаратор по пътя на обработвания материал – дали е непосредствено включен в поточната линия, разположен на критично място в самия тръбопровод или е организиран като технологичен байпас. Много често технологичните изисквания налагат повторно почистване на обработваната продукция, т.е. различаваме отворен и затворен цикъл на обработка.

Анализът на достъпната литература [11, 18, 57, 63, 83 и др.] показва, че много често технологичните изисквания не са достатъчни, за да осигурят максимална степен на почистване. Затова е необходимо да се разшири периметърът на изследванията, като се добавят допълнителни параметри за изследване, а предварително определените параметри да бъдат изследвани по нов метод и начин, при който да се подберат онези фактори, които да включват в себе си и други параметри, оказващи влияние върху процеса.

Всички конструктивни, технологични и експлоатационни изисквания могат да бъдат разглеждани като параметри, които определят началните условия при осъществяване на технологичния процес магнитно сепариране. Всички изисквания от своя страна поражда фактори, които да бъдат определени като съществени или не спрямо ефективността на процеса, т.е. влияещи в една или друга степен върху процента на извличане на феромагнитни частици, а следователно и върху остатъчното количество, съдържащо се в изходния продукт. При всички случаи се цели максимален процент на извличане и нулев процент на остатъчно съдържание на феромагнитните включвания. Това налага по – обстоен анализ на факторите, влияещи върху технологичния процес на сепариране с постоянни магнити.

2.2. Теоретично определяне на факторите, влияещи върху технологичния процес на сепариране.

При определянето на магнитната сила е необходимо да се обърне особено внимание върху всички съпътстващи параметри, които са важен фактор при описание на процеса магнитна сепарация. В повечето литературни източници [17, 30, 36, 51, 63, 66 и др.] не са отбелязани кои параметри и фактори са избрани за водещи и съществени за процеса на магнитна сепарация или са избрани такива, но малко на брой – два, три, най-много четири параметъра. Тогава възникват въпросите: това ли са всички известни параметри, могат ли да бъдат определени други, кои са те, съществува ли взаимовръзка помежду им и какво е тяхното влияние върху степента на почистване на един материал. Параметрите, влияещи върху процеса на сепариране чрез сепаратори с постоянни магнити могат да бъдат разделени в няколко групи:

2.2.1. Параметри свързани с вида, характера и магнитната проницаемост на извлечените най-често магнитни примеси;

2.2.2. Параметри свързани с вида и свойствата на обработвания продукт;

2.2.3. Параметри свързани с изисквания за максимална степен на почистване според стандарта за дадена обработвана суровина;

2.2.4. Параметри свързани с геометрията и местоположение на магнитната система.

Влиянието на посочените параметри е комплексно и много често общият им брой е над 25 фактора. Някои от факторите съществуват само за определени конструкции сепаратори и същевременно други от тях се определят по експериментален път чрез статистически анализ.

Подобна класификация на параметрите при сепариране с постоянни магнити липсва в литературата. Групирането на параметрите по различен признак значително облекчава подбора на фактори и дефинирането на опитната постановка. Всички изброени параметри биха могли да повлияят и са тясно свързани с избора на конструкция на сепаратор с постоянни магнити.

2.3. Експеримент върху сепаратор с постоянни магнити за обработка на магнезиев оксид

Целта на експеримента е да се определи влиянието на пет базисни фактора, които са взаимно независими. Интерес представлява как те се изменят и как си влияят един на друг в процеса на сепарация.

Петте базисни фактора са: концентрация на феромагнитните включения, дебелина на обработвания продукт, брой сепарации, температура и относителна влажност. Изборът на тези параметри се основава на: подробен анализ на технологичния процес за дадения обект и неговите специфични особености, параметрите които конструкцията позволява да бъдат настройвани (дебит, скорост, продължителност на работа и др.) и контрола на експлоатационните условия.

За опитите е използван сепаратор тип WM-50C с постоянни магнити. Неговата конструкция е максимално опростена и намира приложение в практиката при производството на тръбни нагреватели. Изискването е в материала да няма феромагнитни частици, които автоматично биха довели до дефектирането на нагревателя.



Фиг.2.1. Принципна схема на сепаратор с постоянни магнити тип WM-50C
1 – контейнер за обработван материал; 2 – шибър; 3 –ръкохватка; 4 – система от постоянни магнити; 5 – алуминиев разделител

Този тип сепаратор с постоянни магнити се използва с успех при сепариране на леярски пясък и порцеланови смеси (CaCO_3 , MgCO_3 , и др.). Сепараторът е с малки габарити и висока степен на почистване в сравнение с други сепаратори от същия клас [7, 8, 38]. Сепараторът успешно отделя феромагнитни частици с тегло в широки граници: $(10 \div 500)\mu\text{g}$.

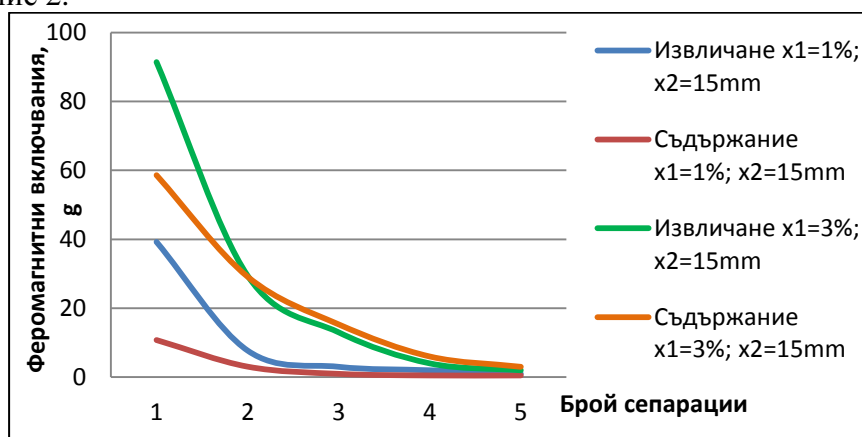
2.3.1. Използвана измервателна апаратура. Състои се от:

- измервателно сито с оплетка от неръждаема стомана ISO 3310/1, с едрина до 500 μm , диаметър 100 mm, височина 40 mm. (фиг. 2.2 а.) С него предварително се пресява обработвания продукт, за да се гарантира неговата еднородност.
- лабораторна везна ABJ 80 4M KERN & Sohn GmbH (фиг. 2.2 б.) С нейна помощ се определя количеството отделени феромагнитни частици.
- гаусметър DC Gaussmeter Model GM-1-ST – за измерване големината на магнитната индукция в работната въздушна междина (фиг. 2.2 в.).

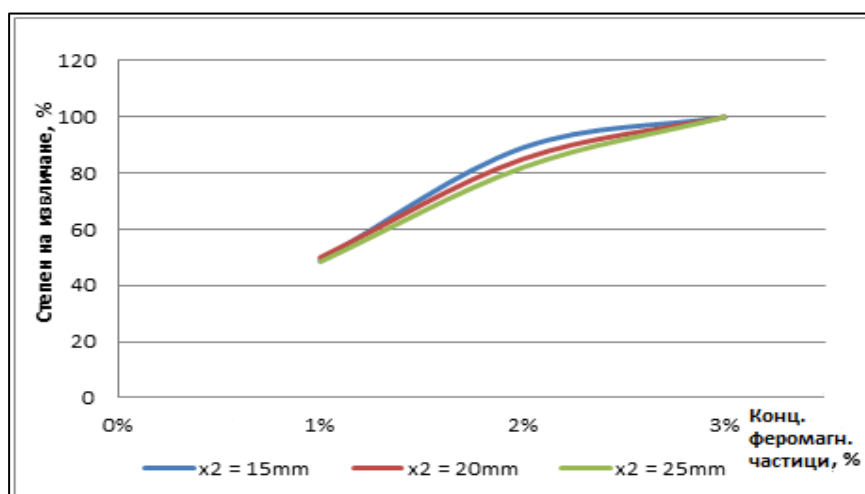


Фиг.2.2. Използвана измервателна апаратура

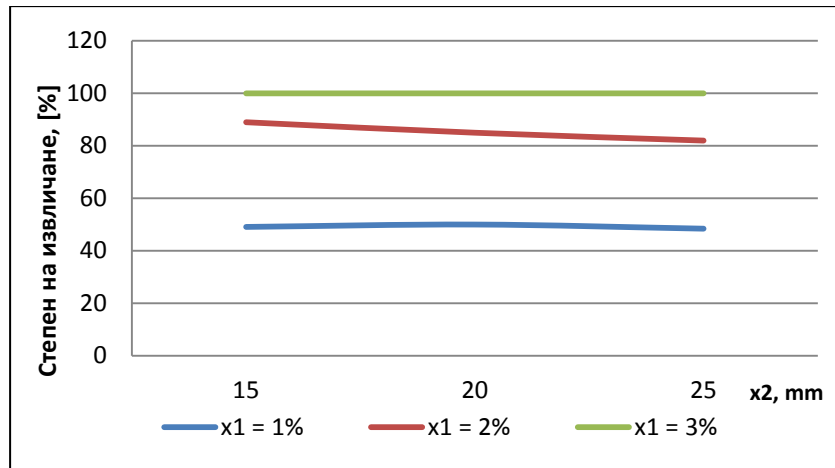
Част от експерименталните резултати са представени на фиг. 2.3., фиг. 2.4., фиг. 2.5. и приложение 2.



Фиг.2.3. Резултати от относително извличане и съдържание на феромагнитни частици в зависимост от броя сепарации, при концентрация на феромагнитните включения 1% и дебелина на обработвания продукт 15 mm



Фиг.2.4. Степен на извличане в зависимост от концентрацията на феромагнитни включения и дебелина на обработвания продукт x_2



Фиг.2.5. Степен на извличане в зависимост от дебелина на обработвания продукт x_2 при различна концентрация на ферромагнитни включения x_1

На базата на получените резултати е реализиран многофакторен регресионен анализ. Използвана е компютърна програма, по стандартен математичен модел [15]. Регресионното уравнение е от вида:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_m \cdot x_m + b_{12} + x_1 \cdot x_2 + \dots + b_{m-1,m} \cdot x_{m-1} \cdot x_m + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{124} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + \dots + b_{m-2,m-1,m} \cdot x_{m-2} \cdot x_{m-1} \cdot x_m + \dots \quad (2.1)$$

Уравнение (2.1) дава зависимостта между целевата функция и изходният параметър - „ y ”, а също и връзката с разглежданите фактори, като може да се търси и оптималното решение [15, 46, 97].

Всички количествени фактори могат да бъдат разпределени на две категории: взаимносвързани и взаимнонесвързани. Взаимнонесвързаните са тези които могат да бъдат зададени с определени стойности независимо един от друг. За разлика от тях изменението на стойността на един от взаимносвързаните фактори води до изменение на един или повече от останалите. Например едрината на обработвания продукт влияе върху ъгълът на естествен откос и сипливостта, които пък от своя страна оказват косвено влияние върху скоростта на кварцовия пясък, магнезиевия оксид и т.н. В случая концентрацията на ферромагнитни частици, дебелината на обработвания продукт и броя сепарации са взаимнонесвързани. Поради големия брой параметри, които оказват влияние в процеса на сепариране, изследванията се ограничават върху технологичните фактори, които са най-съществени за обработвания продукт и конструкцията позволява тяхното регулиране [6, 26, 100]. Тези фактори се изменят в определени граници от 1 до 3 %, за да се намали смущаващото им влияние.

Проведен е пълен факторен експеримент. За построяването на стандартен ортогонален план е необходимо количествените фактори да се преведат в относителни единици. Затова факторите се кодират.

Кодирането и интервалите на вариране на изследваните фактори са дадени в табл. 2.1.

След като са получени коефициентите на разглежданото регресионно уравнение, е направена оценка на дисперсиите по критерии на Фишер. Дисперсиите са еднородни по цялото пространство на факторите.

Таблица 2.1. Кодирание на факторите

Интервали на вариране на факторите						
Фактор	Нива			Интервали на вариране	Дименсия	Наименование
	-1	0	1			
x ₁	1	2	3	1	%	концентрация на Fe включвания
x ₂	15	20	25	5	mm	дебелина слой
x ₃	1	2	3	1	бр	бр. сепарации
x ₄	2	4	6	2	%	относителна влажност
x ₅	20	25	30	5	°C	температура
План на експеримента 2 ⁵						

Изчислени са коефициентите на уравнението на регресията и е направена проверка за значимост на факторите, и техните взаимодействия по критерии на Стюдънт ($t_0 \div t_i$) [15, 79]. От получените резултати може да се заключи, че моделът е адекватен. Полученото нелинейно регресионно уравнение за степен на почистване е от вида:

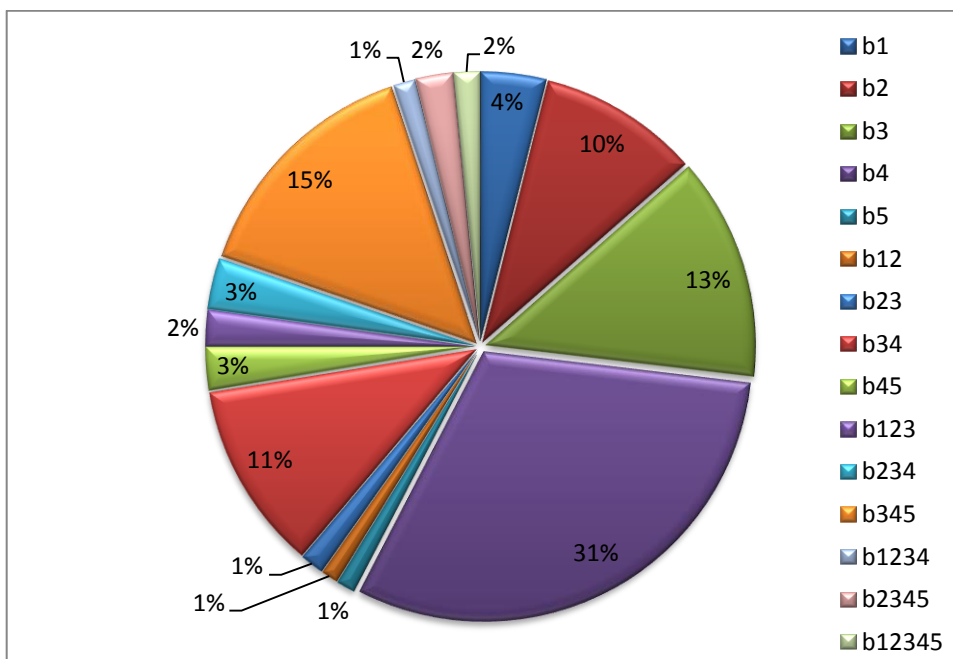
$$y = 17,55 + 0,33 \cdot x_2 + 1,31 \cdot x_3 - 1,51 \cdot x_4 - 0,45 \cdot x_3 \cdot x_4 - 0,38 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (2.2)$$

Параметърът „y“ отразява остатъчното съдържание на феромагнитни включвания в отработената лабораторна проба с обем 5000g.

Оценката за адекватност е при доверителна вероятност 0,95 и ниво на значимост 0,05. Относителната грешка е 13%.

Графично процентното влияние на разглежданите фактори и комбинациите помежду им са показани на фиг. 2.6. Означенията $b_1 \div b_{123}$ представляват коефициентите пред изследваните фактори „x“ в регресионното уравнение (2.1).

Чрез тях са определени значимите фактори записани в уравнение (2.2).



Фиг. 2 5. Влияние на разглежданите фактори и комбинациите помежду им, изразено в %.

Анализ на влиянието на изследваните фактори:

Най-силно изразено влияние от всички фактори оказва влажността. При влажност от 2% до 6% степента на очистване на феромагнитни частици постепенно се увеличава, но при влажност над 6% рязко се намалява и извличането на феромагнитни частици е минимално. Причина за това е, че фините феромагнитни частици полепват с неферомагнитни такива и се увличат от обработваната смес. Получава се голямо остатъчно съдържание на феромагнитни частици и обработваната смес е остава замърсена.

С нарастване на концентрацията на феромагнитните частици се увеличава и извличането. Постига се минимално остатъчно съдържание на феромагнитни частици дори при най-големите начални концентрации, ако се зададат x_2 и x_4 с минимални стойности и x_3 x_4 с максимални такива, в предварително избраните интервали на вариране за всеки.

Дебелината на обработвания продукт (x_2 - 15, 20 и 25mm) се нарежда на второ място по влияние в процентно отношение спрямо останалите фактори. Това е факторът, който трябва да се поддържа в посочените по-горе граници, тъй като извън него, когато $x_2 < 15\text{mm}$ се получава задръстване на сепаратора при високите концентрации и обратното при $x_2 > 25\text{mm}$ се получава увличане на материала и ефектът на очистване силно се влошава.

Брой сепарации (1, 2 и 3бр.)- това е факторът, който влияе най-силно в посока подобряване извличането на феромагнитни частици. Колкото повече на брой сепарации се осъществяват, толкова очистването е по-добро. Поради тази причина в реалните поточни линии се извършва каскадно сепариране с вградени два и повече на брой сепариращи апарата с постоянни магнити, които са с различна конструкция.

Влиянието на взаимодействието между факторите се оценява от полученото уравнение (2.2). Това са x_3x_4 и $x_3x_4x_5$. Отрицателният знак пред коефициентите на смесените членове оказва въздействие в посока към намаляване на остатъчното съдържание на феромагнитни частици при едновременно увеличение на x_1 , x_2 , x_3 , и x_4 , т.е. извличането на феромагнитни частици нараства и процеса на сепариране се подобрява.

2.4. Изводи от втора глава

1/ Чрез статистическо моделиране е установено процентно влияние на разглежданите фактори и комплексното въздействие на различните взаимодействия помежду им. Анализирани са влиянието на заложените фактори и възможните комбинации поотделно за частен случай на сепариране с постоянни магнити.

2/ Полученото нелинейно регресионно уравнение (2.2) е с относителна грешка 13%, което позволява да се заключи, че моделът е достоверен. От него могат да бъдат изчислени оптимални стойности на факторите за настройка на сепаратора – дебелина на обработвания продукт, скорост на подаване на продукта, брой сепарации и др. Регресионното уравнение (2.2) потвърждава теоретичното очакване, като доказва, че е възможно намаляване на обема от експериментална и изчислителна работа.

3/ Многобройните експериментални изследвания на взаимодействията в магнитния сепаратор и изведените математични модели на процеса на магнитна сепарация описват с висока точност реалните процеси. Ето защо изследванията на динамичното поведение в процеса на работа на сепаратор с постоянни магнит, при проектирането на съоръжения или с цел развитие на методите и техниките на сепарация се базират (проверяват с) на емпирични зависимости, установени в серии от експериментални изследвания на реалните системи.

ГЛАВА ТРЕТА: ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО И ТЕОРЕТИЧНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КАРТИНАТА НА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА МАГНИТНОТО ПОЛЕ.

В настоящата глава са реализирани модели на сепариращи апарати с постоянни магнити за отделяне на феромагнитни частици от немагнитни. Анализирани са два конкретни случая:

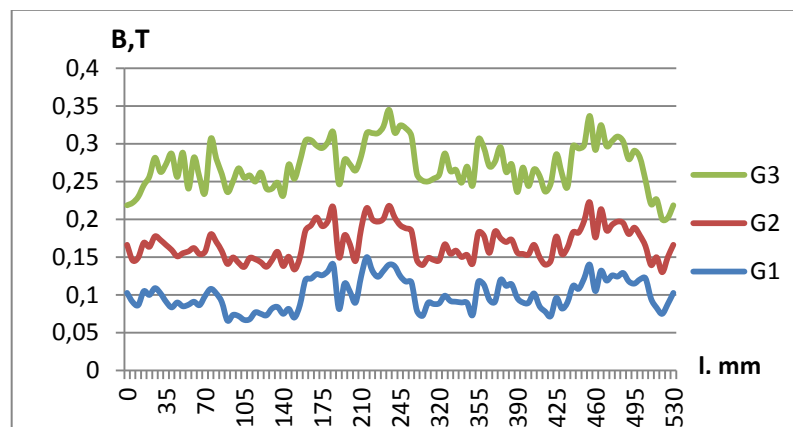
- Конструкция за сепариране на продукти от електротехническата промишленост (магнезиев оксид и кварцов пясък);
- Конструкция за сепариране на продукт от хранителновкусовата промишленост (слънчогледови семена).

Тъй като материалите, които са обект на сепариране са немагнитни, относителната им магнитна проницаемост е равна на единица, а проницаемостта на феромагнитните включвания е приета за 1000 Н/т. Анализът се провежда с помощта на апаратура от фиг.2.2.

3.1. Експеримент и модел на конструкция за сепариране на неорганичен продукт.

Експериментално е изследвана картината на разпределение на магнитното поле на сепаратор с постоянни магнити, който е разгледан в глава втора. Целта на това изследване е да се определи траекторията на движение на извличаните феромагнитни частици, които в случая не са целеви продукт в технологичния процес, но начинът им на отстраняване е съществен и оказва влияние върху степента на извличане и остатъчното съдържание трябва да е нула.

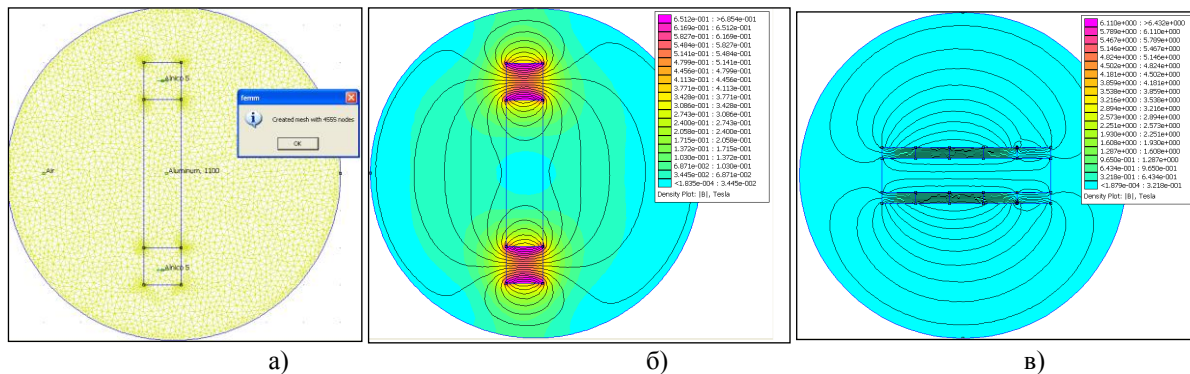
Задачата е да се генерира компютърен модел, отговарящ на условията и допусканията посочени в глава втора, и да се постигне достоверност на резултатите с експерименталните. Първоначално е проведено изследване на разпределението на магнитната индукция в работното пространство, като част от резултатите са предстванени на фиг. 3.1.



Фиг. 3.1. Разпределение на магнитна индукция в по дължината на магнитната система, измерени в различни области от повърхността на горен ред магнити G1, G2 и G3

Чрез компютърно моделиране е визуализирана картината на магнитното поле в напречно сечение на магнитната система с цел постигане на такава неравномерност в работната въздушна междина, че да се получи по-пълно почистване на продукта. Моделирането е извършено с програмен пакет FEMM, базиран на метода с крайни елементи [77, 88, 105]. Входните данни за модела са идентични с тези от експеримента (крива на намагнитване и размагнитване на постоянните магнити, магнитна

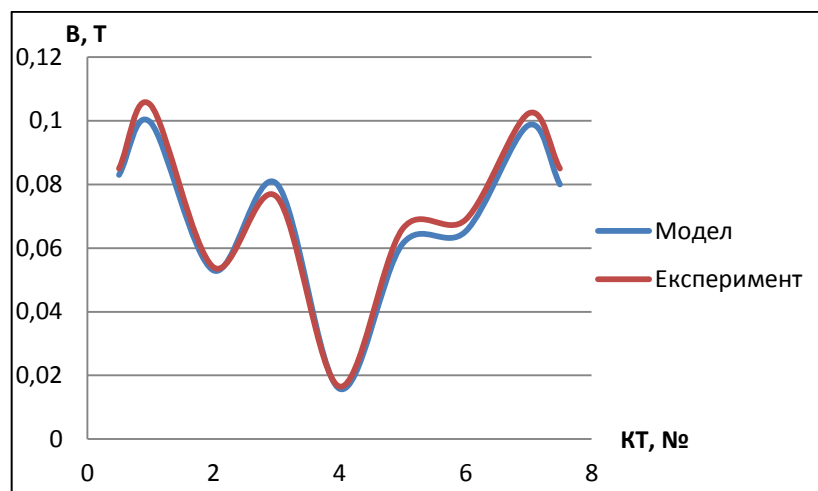
проницаемост на обработваната смес и на извличаните феромагнитни частици, геометрия на магнитната система и др.).



Фиг. 3.2. Мрежа от крайни триъгълни елементи (а); магнитосилови линии в напречното (б) и надлъжното (в) сечение на магнитната система.

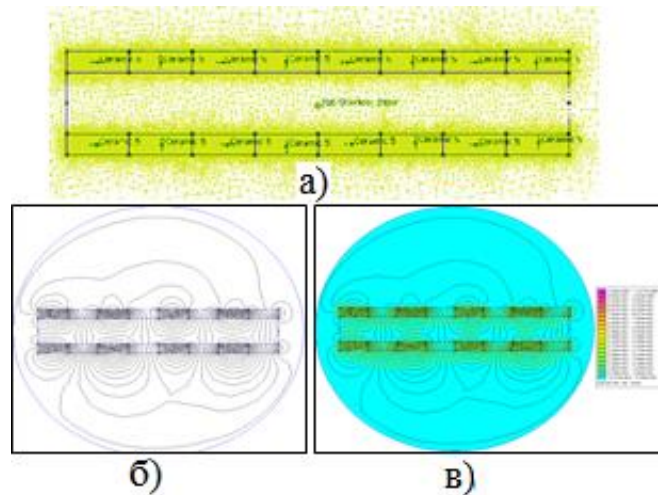
Получената по изчислителен път стойност на магнитната индукция е сравнена (фиг.3.3.) с измерената и е установено, че тя отговаря на предварително измерената в работното пространство индукция с помощта на гаусметър тип AlphaLab Inc. GM-1-ST.

Създаденият модел позволява да се извърши предварителна оценка на магнитното поле при замяна на Alnico магнитите с други постоянни магнити с по-висока остатъчна индукция и коерцитивна сила. Моделът позволява също да се определи силата на привличане на феромагнитна частица от обема на обработваната смес.



Фиг. 3.3. Сравнение разпределението на магнитната индукция между експеримент и модел в девет контролни точки (КТ, №) от магнитната система

За намиране на подходящо разпределение на магнитното поле, което да гарантира по-добро почистване, са направени различни варианти на магнитната система. При всеки вариант са зададени различни посоки на вектора на магнитната индукция. При различна ориентация на вектора на магнитната индукция се получават различни по конфигурация разпределения на магнитосилови линии и различна магнитна сила за извличане на феромагнитните частици. Избрани резултати са представени на фиг. 3.4.



Фиг. 3.4. Разпределение на магнитната индукция

а) мрежа с триъгълни елементи и посоки на векторите на магнитната индукция, които определят посоката на подмагнитване на постоянните магнити (надлъжно по оста С и/или по височината Н); б) разпределение на магнитосилови линии; в) разпределение на магнитната индукция.

3.2. Експеримент и модел на конструкция за сепариране на органичен продукт.

Изследван е реален сепаратор с постоянни магнити тип MCR5 на фирма за нестандартно оборудване “Елика – Елеватор” ООД, гр. Силистра. (фиг.3.5.) Сепараторът е предназначен за обработка на белени слънчогледови семки преди пакетаж, използван като суровина за износ. Нуждата от сепариране възниква в следствие намалените нива съгласно Регламент на (ЕС) № 742/2010 за процентно съдържание на примеси в хранителни продукти от всякакъв род. Докато през 2011 година нивата са били 0,4%, то от януари 2013г. са занижени на 0,2%.



а) при експлоатация



б) при лабораторно изследване

Фиг 3.5. Сепаратор с постоянни магнити тип MCR5

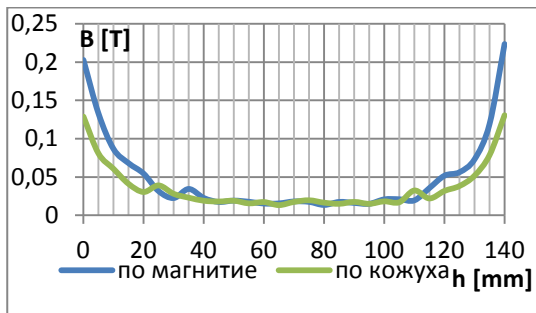
3.2.1. Модел и експеримент при празен ход.

Реализирано е измерване на магнитната индукция при пълна магнитна система – 14 броя постоянни магнити, последователно подредени с редуване на полюсите им N-S. По този начин те формират един монолитен постоянен магнит с магнитна сила, равна на сбора от всички сили на 14-те броя (фиг. 3.5.б).

Стойностите са снети при два варианта:

- Директно по повърхността на магнитната система, състояща се от 14 пръстеновидни и последователно свързани постоянни магнита;
- По повърхността на кожуха от немагнитен материал, в който е поместена самата магнитна система (т.е. измерена е индукцията на 2mm разстояние от повърхността на магнитите, затова и кривата е разположена по-ниско).

От резултатите (фиг.3.6) ясно личат краевите ефекти, които се получават в началото и края на магнитната система, т.е. в тези участъци полето е по-силно и феромагнитните частици ще се улавят предимно там. Корпусът и цилиндърът, в който са поставени постоянните магнити (наречен условно кожух фиг.3.7.) са от немагнитна стомана не оказва влияние върху магнитосиловите линии на магнитната индукция.

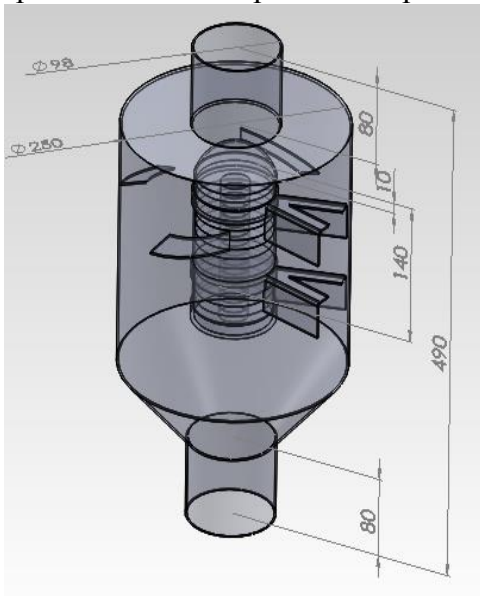


Фиг 3.6. Сепаратор с постоянни магнити тип MCR5

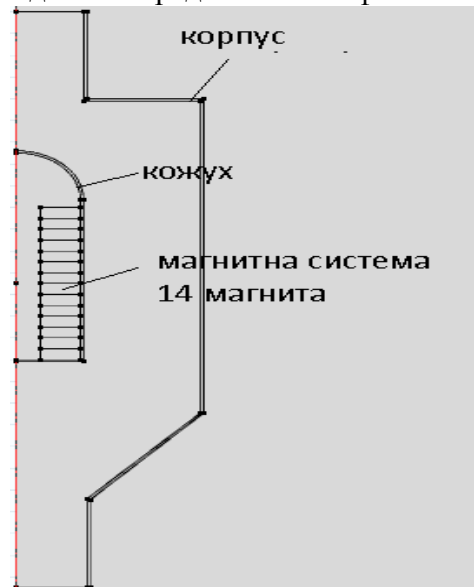


Фиг 3.7. Сепаратор с постоянни магнити тип MCR5 с добавени немагнитни междини

Задачата е да се намери по-рационално разпределение на магнитното поле, което да генерира такава магнитна сила на извличане на феромагнитни частици, че да осигури максимална степен на почистване. За целта са реализирани модели и експерименти с неметални дистанционни вложки между постоянните магнити (фиг.3.7.), а също така и с феромагнитни концентратори (фиг.3.8. и 3.9.). Резултатите от проведените експерименти и реализираните модели са представени на фиг. 3.10.

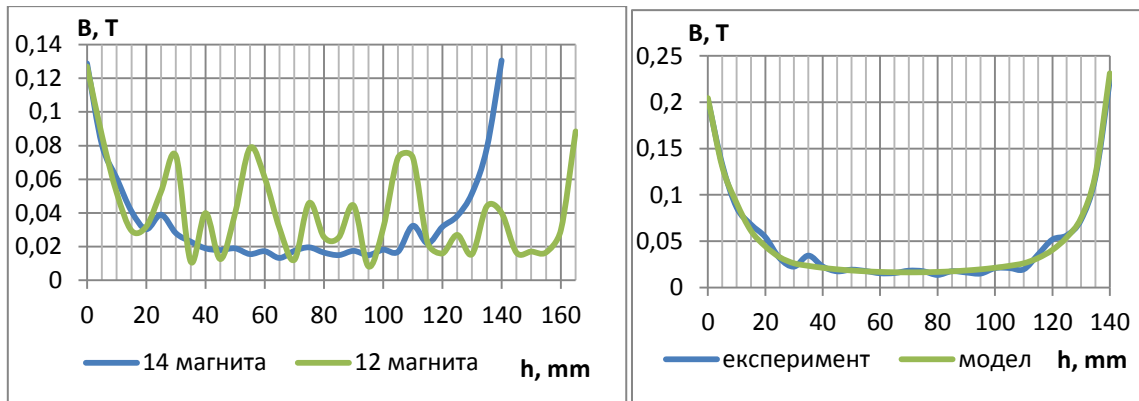


Фиг.3.8. Геометрия на сепаратор MCR5



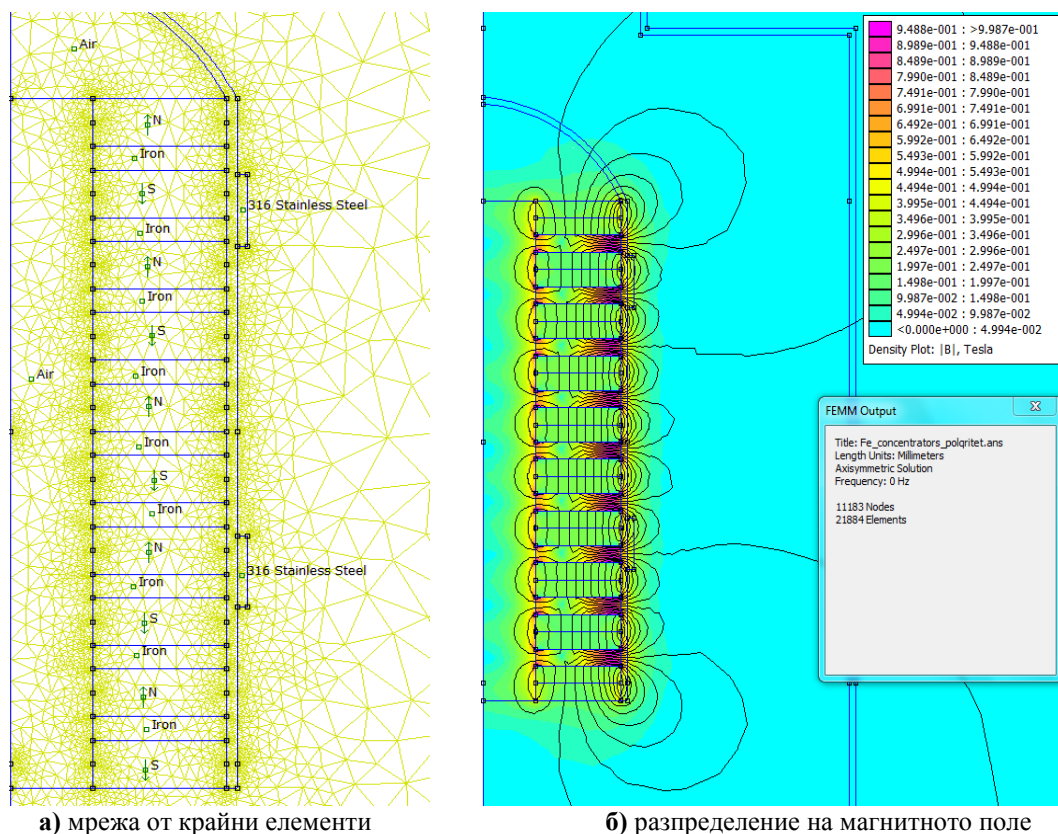
Фиг.3.9. Геометрия с първоначално разположение на постоянните магнити

На фиг.3.10 са посочени резултати за разпределение на магнитната индукция по повърхността на магнитния филтър при празен ход.



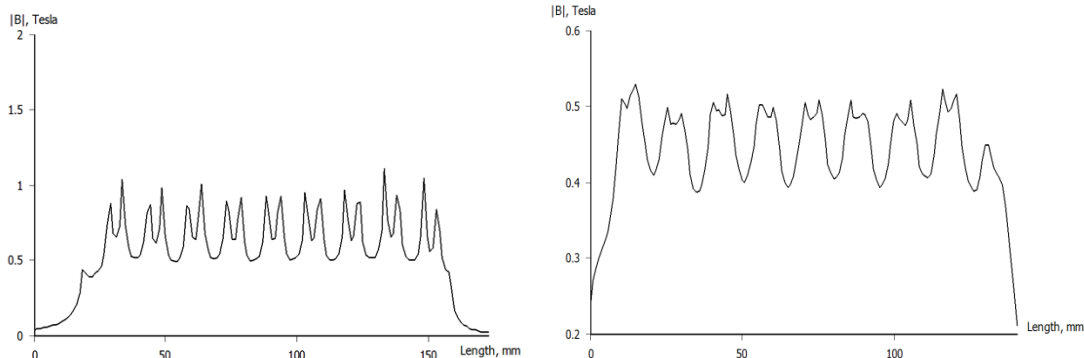
а) експеримент при различен брой постоянни магнити б) сравнение между експеримент и модел
Фиг.3.10. Разпределение на магнитната индукция при различен брой постоянни магнити.

От направената проверка за адекватност модела на може да се заключи, че той е достоверен, т.к. установената относителна грешка между модел-експеримент е под 15% [51, 54, 60, 79] на база на който са разработени различни варианти на магнитния филтър с цел повишаване магнитната индукция в средата му и постигане на по-добро очистване на продукта. Част от резултатите са представени в приложение, а останалите на фиг.3.11.-фиг.3.14



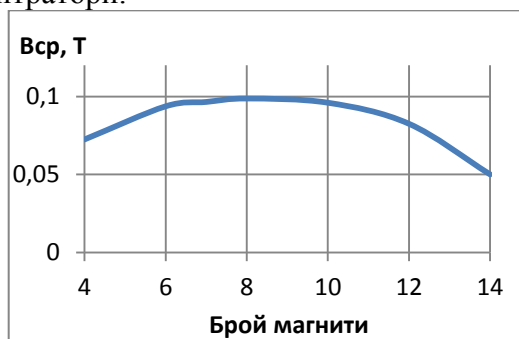
а) мрежа от крайни елементи б) разпределение на магнитното поле
Фиг.3.11. Разпределение на полето при десет броя постоянни магнита и ферромагнитни концентратори.

Резултатите представени на фиг.3.11. и фиг.3.12. са до 3 пъти по-високи в сравнение с предходните, като се намаляват краевите ефекти при първоначалното разположение на системата.

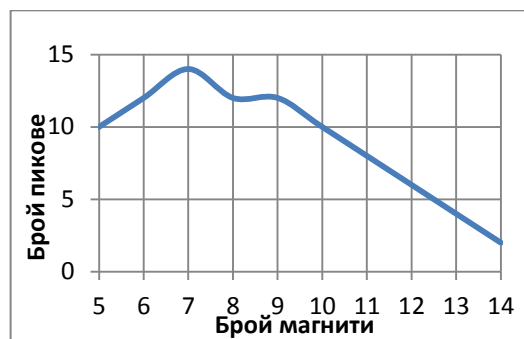


Фиг.3.12. Разпределение на магнитната индукция при десет броя постоянни магнита, на различни разстояния от повърхността.

При анализ на съотношението брой пикове на магнитната индукция, които ще пресече при движението си феромагнитна частица, се получава разпределението представено на фиг.3.14. Представените резултати са в случай без феромагнитни концентратори.



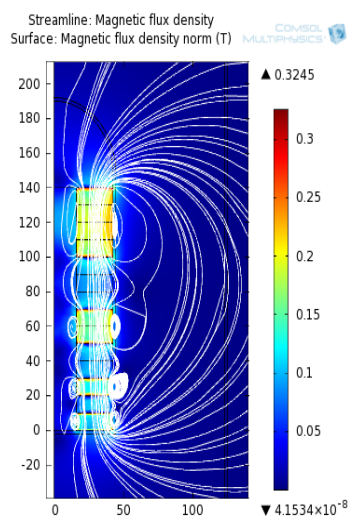
Фиг.3.13. Зависимост на магнитната индукция от броя магнити в магнитния филтър



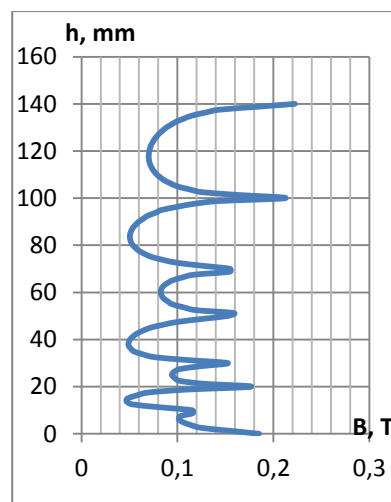
Фиг.3.14. Максимален брой пикове на магнитната индукция от броя магнити в магнитния филтър.

Според получените резултати следва, че моделът е адекватен на експеримента.

В случай с въздушни междини: най-голямата средна стойност се получава при 8 магнита, но най-голям възможен брой пикове с максимална индукция могат да се получат при 7 магнита и тъй като разликата между индукциите е сравнително малка, удачно би било магнитният филтър да се изпълни с от седем до десет магнита, в конкретно разглежданото устройство и в аналогични сепариращи апарати.



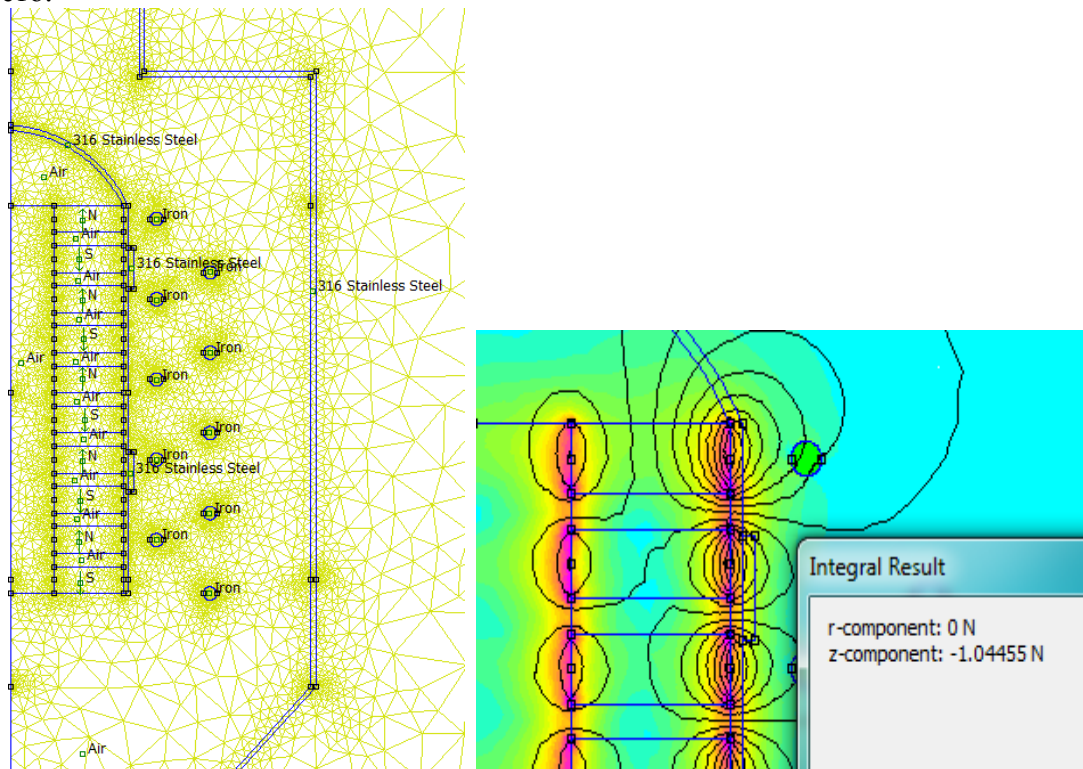
Фиг.3.15. Примерно разположение на магнити с цел постигане на максимални по стойност пикове на магнитната индукция в различни части по височина на магнитния филтър



За сравнение са създадени математични модели (фиг.3.15.) на разглежданата система от постоянни магнити с увеличен брой, но резултатите показват, че не се постига по-благоприятно разпределение на полето или по-високи стойности на магнитната индукция и сила в работното пространство на сепарация апарата.

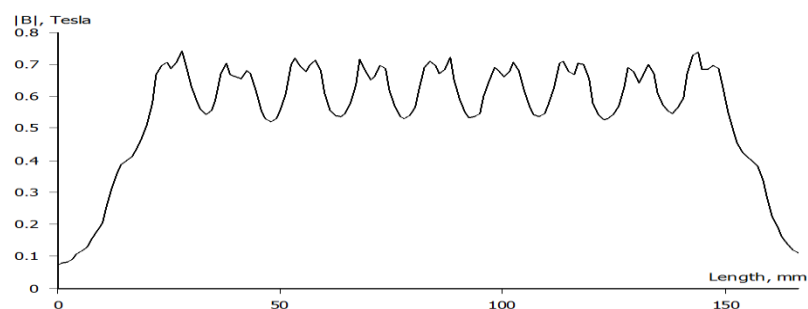
3.2.2. Модел и експеримент при натоварване.

Резултати от модел на сепаратор MCR5 под товар с въздушни междини при оптимален брой постоянни магнити равен на 10 бр. Задачата е решена в средата на програмния продукт FEMM 4.2. Съставеният модел е ососиметричен, със зададени естествени гранични условия в остъта на симетрия и нулево гранично условие по външната граница (фиг.3.16). Генерираната мрежа се състои от над десет хиляди триъгълни елемента и отразява с точност под 10% относителна грешка разпределението на полето.

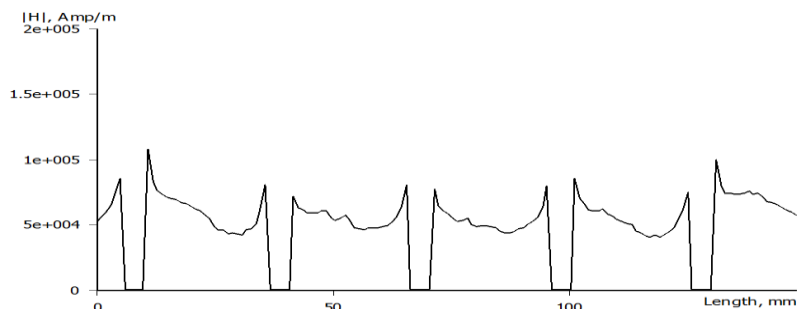


Фиг.3.16. Разпределение на полето с отчитане на магнитната сила по направление z, т.е. на привличане.

Данните за свойствата на материалите, присвоени на съответните области от модела, са идентични с тези на реалния сепариращ апарат, а разпределението на магнитната индукция и напрегнатостта на полето по дължината на магнитния филтър са представени на фиг.3.17. и фиг.3.18.



Фиг.3.17. Разпределение на магнитната индукция по дължината на магнитния филтър

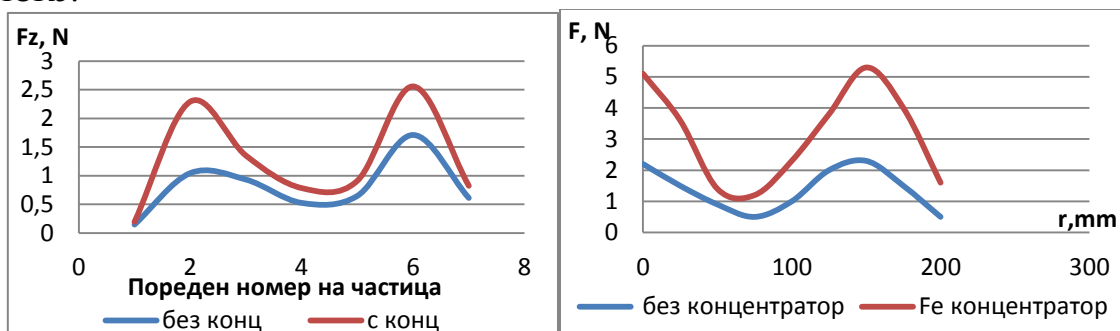


Фиг.3.18. Разпределение на напрегнатостта на полето по дължината на магнитния филтър

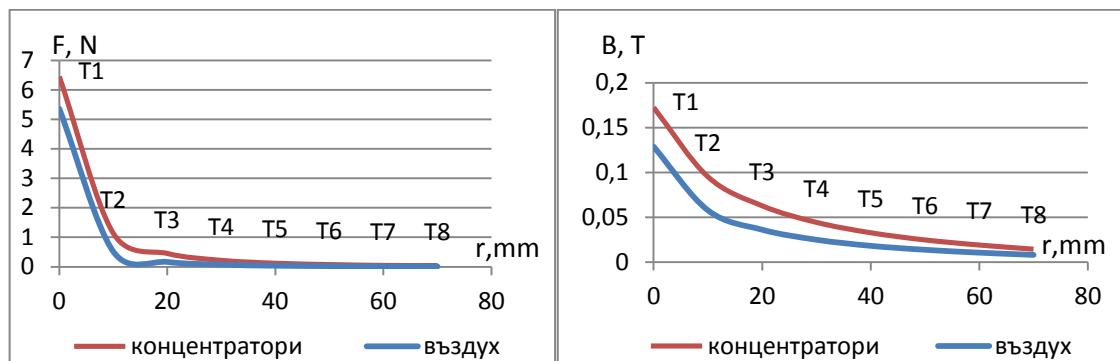
3.2.3. Сравнителен анализ на резултатите получени от експеримент и модел.

3.2.3.1. Оценка за адекватност на модела.

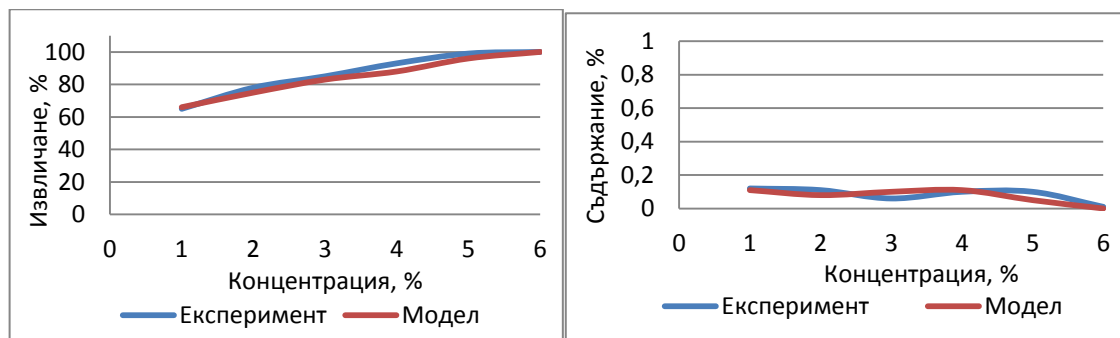
На по-долу посочените фигури 3.19. и фиг.3.20. са сравнени резултатите, получени посредством експеримент и модел. На фиг.3.21 са представени относителната степен на извличане и остатъчно съдържание на феромагнитни частици за сепаратор тип MCR5.



Фиг.3.19. Стойности на магнитната сила в зависимост от местоположението на частицата



Фиг.3.20. Разпределение на магнитната индукция и сила по радиуса на сепаратора, под товар за различни феромагнитни частици означени посредством T1 до T8.



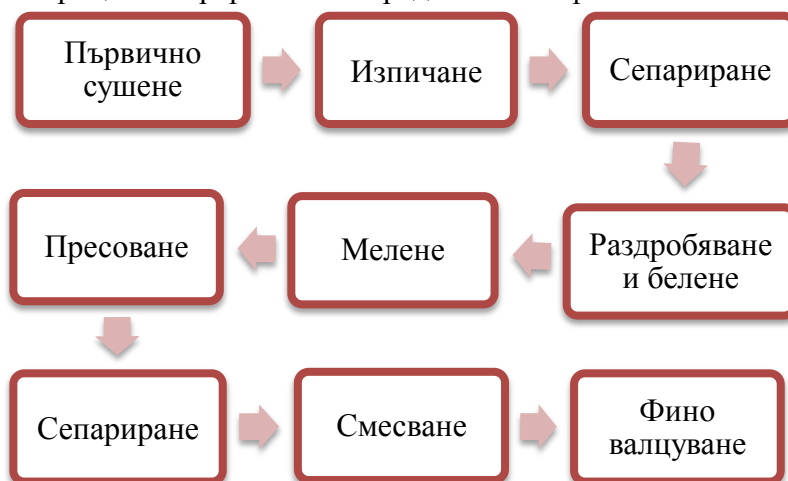
Фиг.3.21. Стойности на извличане и съдържание при модел и експеримент.

3.2.4. Изводи от глава трета:

- При поставянето на въздушни междини от немагнитен материал или феромагнитни концентратори се постига следното:
 - Неравномерност на магнитната индукция в средния участък на магнитната система, намаляване на краевите ефекти и получаване на по-голяма магнитна сила на привличане F_m , [N];
 - Намаляване на броя постоянни магнити, което ще намали себестойността на устройството;
 - Намаляване на теглото на сепариращото устройство;
 - Повишаване степента на почистване.
- От реализираните модел и експеримент се вижда, че една част от магнитния поток се разсейва извън сепаратора. Това може да се избегне, ако корпусът на устройството се изработи от парамагнитна стомана, която да затвори и ограничи магнитната индукция.
- Създаденият 2D модел позволява да се извърши предварителна оценка на магнитното поле, да се оцени разпределението му във вътрешността на сепаратора и същото да се изследва при различни конфигурации на магнитния филтър.
- Разработените варианти с феромагнитни концентратори между всеки от постоянните магнити показват, че това е добър вариант за реализация на магнитния филтър, защото концентраторите обуславят по-голяма сила на привличане на феромагнитните частици в продукта.
- Предложен е вариант на магнитната система с използване на феромагнитни концентратори и въздушни междини, с което се постига повишаване на магнитната сила в средния участък на магнитния филтър.
- Представеният модел е адекватен при следните условия: относителна влажност на материала, не по-висока от 10%; скорост на движение – не по-висока от 0,039m/s; дебелина на обработвания материал не по-малка от 15mm; температура на обработвания материал до 30°C; концентрация на феромагнитни частици до 6%;

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА: МОДЕЛИРАНЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИЯ ПРОЦЕС НА СЕПАРИРАНЕ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

В настоящата глава е разгледан сепаратор с постоянни магнити, предназначен за обработка на сурово какао. Характерно за процеса на сепарация тук е необходимостта от поддържане на обекта на сепариране в определено функционално състояние. Технологичният процес на преработка е представен на фиг. 4.1.



Фиг.4.1. Схема на технологичен процес за обработка на сурово какао

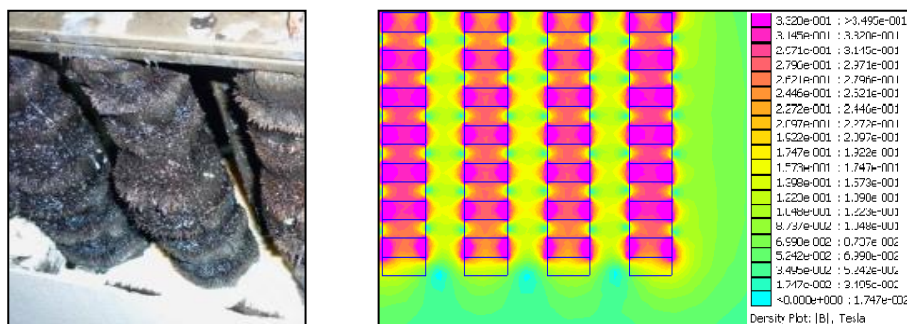
Резултатите от изследванията, отнасящи се до конкретния случай, служат като отправна точка за реализиране на динамичен модел на сепариране с постоянни магнити.

4.1. Определяне на входните фактори.

Интервалите на вариране на входните фактори са в широки граници: температура след сушене ($10 \div 55$)°C; магнитна индукция ($0,001 \div 0,8$)Т; феромагнитни частици с тегло ($10 \div 500$) μg и големина на отделните частици ($6,5 \div 65$) μm ; скорост ($0,03 \div 0,5$) m/s; масов дебит ($5 \div 30$) kg/s. Границите са определени експериментално и съответстват на препоръки от фирма производител.

4.2. Обект на изследване и приложение на представения алгоритъм за настройка на технологичния цикъл за оптимален резултат при сепариране на крайния продукт.

С цел определяне на максимална ефективност на сепарация е анализирано магнитното поле в разглежданата конфигурация. Картината на магнитното поле, създадена от 28 на брой феритни постоянни магнита, е представена на фиг.4.2.б)[52, 77]



а) експериментално

б) теоретично

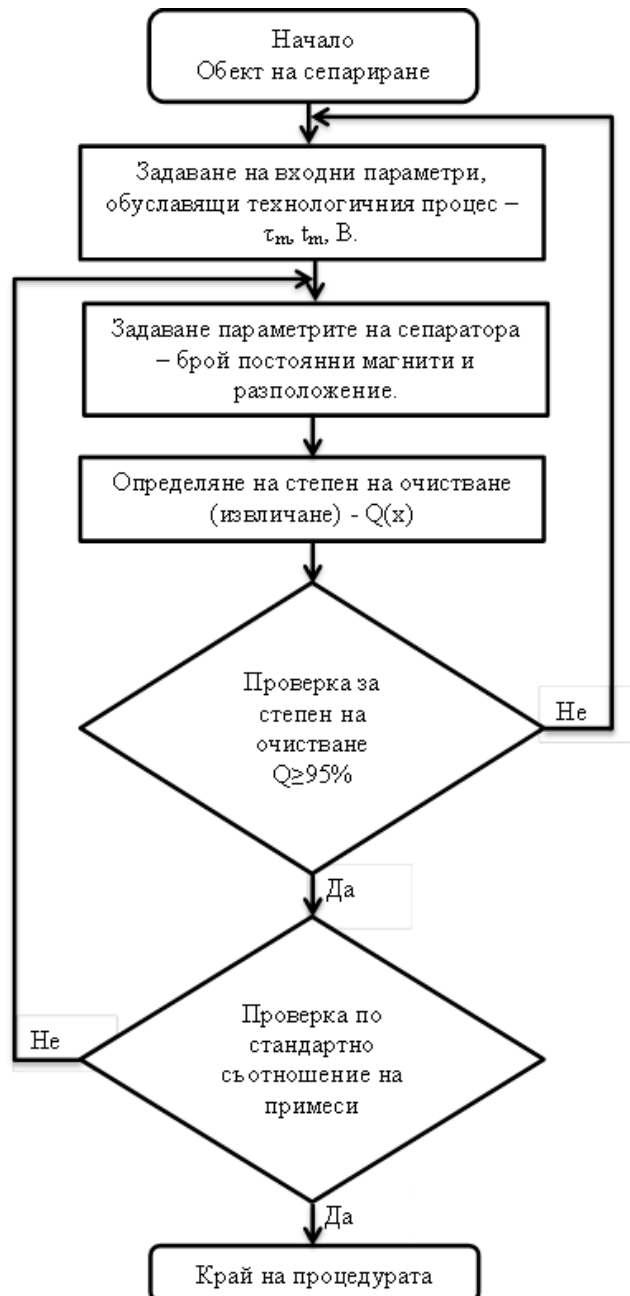
Фиг.4.2. Визуализация на магнитното поле

За да се постигне целта е решена следната задача с областни ограничения: Да се определят оптималните: температура (t_m), времетраене на смилане (τ_m) (или едрина на частиците) и големина на магнитната индукция (B), зададени в определени граници за сепаратор с постоянни магнити при производството на какаов кувертюр така, че да се получи максимално почистване (сепариране) от нежелани феромагнитни примеси Q при спазване на ограниченията: количество какаово масло Ψ_1 да бъде по-голямо от Ψ_{10} и концентрацията на феромагнитни включения Ψ_2 да бъде по-малко от Ψ_{20} , съответстващо на минимален брой работни цикли.

Търси се $(t_m^*, \tau_m^*, B^*) = ?$, така че $Q(t_m^*, \tau_m^*, B^*) = Q_{\max} > Q(t_m, \tau_m, B)$ при

- $(t_m^*, \tau_m^*, B^*) \in V_x$ принадлежи на допустимо пространство;
- $\Psi_1(t_m^*, \tau_m^*, B^*) \geq \Psi_{10}$ (стандартно допустимото съдържание на какаово масло според [120]);
- $\Psi_2(t_m^*, \tau_m^*, B^*) \leq \Psi_{20}$ (съдържание на феромагнитни примеси според стандарта [121]);
- минимален брой работни цикли.

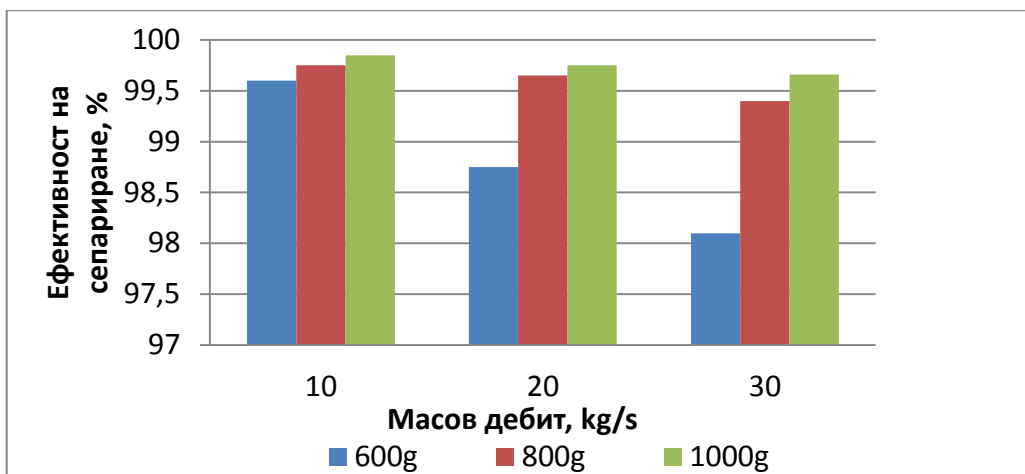
На тази база е разработен алгоритъм, представен на фиг. 4.3 В него са включени косвено и останалите параметри, като: концентрация на феромагнитните включения, количество масло (процентното съдържание на маслото зависи от температурата и влажността) в какаото, налягане, скорост или дебит. (последните са приети за константа, поради относително малкия диапазон на изменение).



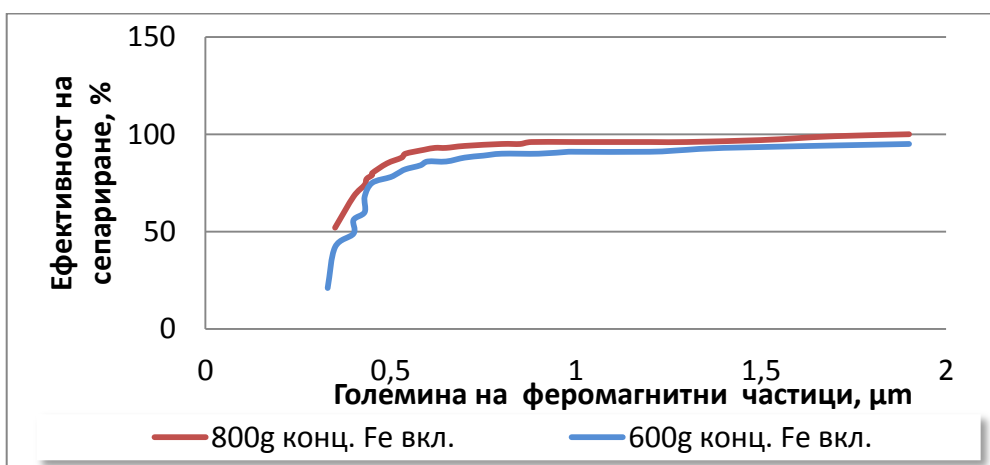
Фиг.4.3. Алгоритъм за повишаване на ефективността на магнитно сепариране

4.2.1. Експериментално определяне на степента на очистване на продукта

Отчитайки факта, че ефективността на магнитното сепариране се определя най-често със степен на извличане на феромагнитни включения и остатъчно съдържание на феромагнитните примеси е проведен планиран трифакторен експеримент в реални производствени условия. Изследваните фактори са: концентрация на феромагнитни включения в [g], дебит в [kg/s] и едрина на обработвания продукт в [μm]. Резултатите са представени на фиг. 4.4 и 4.5.



Фиг. 4.4. Степен на почистване в зависимост от масовия дебит при различни концентрации феромагнитни частици - 600g, 800g и 1000g



Фиг.4.5. Степен на почистване в зависимост от големината на феромагнитни частици

Изследваните феромагнитни включения, които са извлечени, могат да се характеризират с различни магнитни свойства. В конкретния частен случай на магнитна сепарация, извлечените феромагнитни включения се характеризират като ниско коерцитивни и лесно размагнитващи се. Тези магнитни свойства благоприятстват технологичния процес на магнитна сепарация (за получаване на чист концентрат феромагнитни включения).

4.1. Изводи от глава четвърта

На основание на получените резултати от проведените изследвания на магнитна сепарация може да се направят следните изводи:

- Използването на глобални модели за описанието на значимите функционални фактори не може да отрази характерните промени в сепарираната смес, а от там и в параметрите на процеса сепариране. Затова е необходимо поддържане на системата от фактори, отнасящи се до сместа, в определено функционално състояние, което да осигури оптимално сепариране.
- Предложеният алгоритъм за повишаване ефективността на магнитно сепариране с постоянни магнити позволява да се намали обема на необходимата лабораторна работа, като се акцентира на високо развитата до настоящият момент инструментална техника за изследване на вещественият

състав на продуктите. Включването на междинни средства за поддържането на обекта на сепариране в определено функционално състояние, гарантира високи технологични резултати, намаляване разхода на енергия и по - рационално разположение на оборудването.

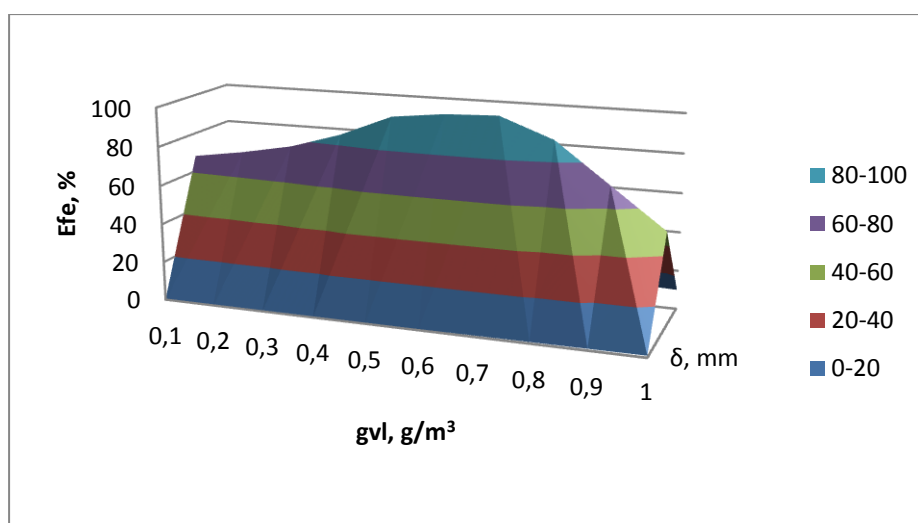
ПЕТА ГЛАВА: ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ ВЪРХУ ПРОЦЕСИТЕ НА СЕПАРИРАНЕ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Задачата на настоящата глава е да се направи обобщаване на изследваните технологични и конструктивни параметри при експлоатацията и приложението на сепариращи апарати с постоянни магнити.

5.1. Теоретично изследване на степента на почистване посредством сепаратори с постоянни магнити

Посредством модела на сепариране с постоянни магнити на неорганичен материал, описан в глава Втора (фиг. 2.3. и фиг. 2.6.), е извършено теоретично изследване на влиянието на технологичните параметри върху степента на извличане на феромагнитни частици. Предложеният подход за определяне на магнитните сили според [44, 61, 86, 102] е допълнен с теоретично получената зависимост от т. 2.2, като е съчетан класическия подход със собствено изградената програма за статистическо пресмятане. Обърнато е внимание на съпътстващите процеса параметри – коефициент на сипливост на продукта, ритмичност на почистване на сепариращия апарат, наклон на транспортиращото съоръжение, скорост на транспортиране и др..

Критерий за ефективността на процеса на сепариране е степента на извличане на феромагнитни частици, която гарантира максимална чистота на крайния продукт. Влажността на обработваните материали не бива да надвишава 35% [10, 41, 46, 63], поради фината структура и хидроскопичност на някои от примесите в материала. Дебелината на обработвания слой материал се контролира на входа на сепариращия апарат в определени граници, посочени в табл.2.1., и е определяща за дебита и скоростта на движение на материала. Зависимостта на степента на извличане от влажността и дебелината на слоя материал, когато той е неорганичен, е посочена на фиг. 5.1.



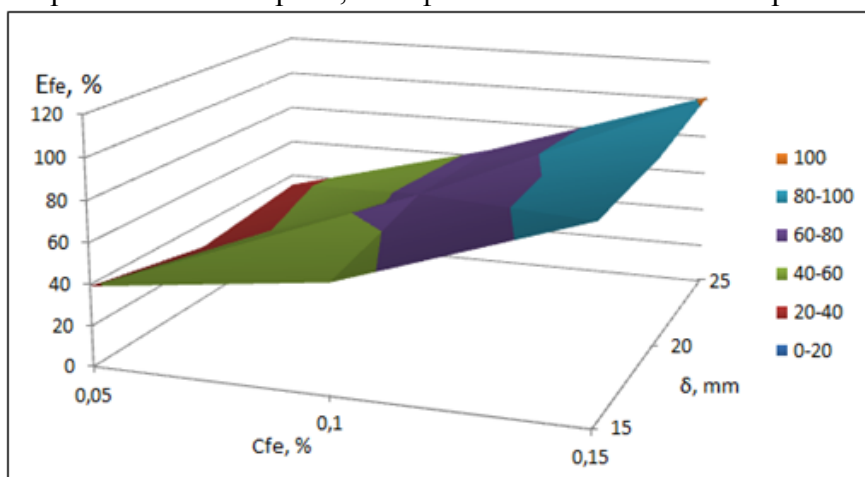
Фиг. 5.1. Степен на извличане на феромагнитни включения от немагнитен материал в зависимост от параметрите влажност и дебелина на обработвания продукт.

На база на постигнатите резултати относно определяне на основните параметри, които влияят на процеса на сепариране, тяхното конкретизиране и

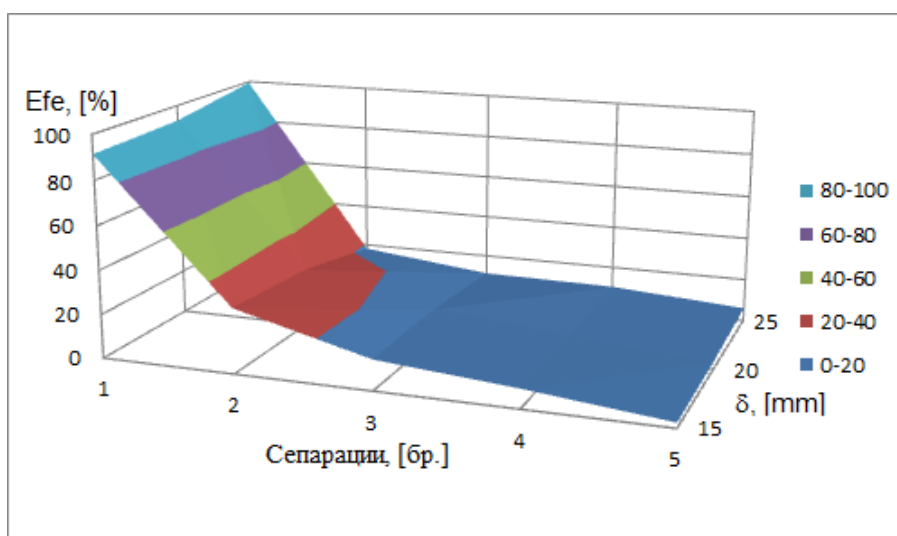
определената магнитна сила, може да се оразмери цялата конструкция на сепарацията апарат.

Това позволява да бъде оразмерена напълно цялостната конструкция (геометрични размери съобразени с поточна линия и конфигурация на магнитния филтър) на сепарацията апарат с постоянни магнити още на предварителния етап от проектирането, като това би довело да съществени ползи за производителите на нестандартно оборудване, които се стремят да удовлетворят високи технологични изисквания поставени от потребителя. Технологичните изисквания към обработваните материали са посочени в [50, 70, 120] .

За оценка степента на въздействие и приложимостта на сепарацията апарат с постоянни магнити са извършени над 100 проби с материали от електротехническата промишленост и 81 проби с материали от хранителновкусовата промишленост, на базата на които е направен статистически анализ. Използвани са конструкции, прилагани се с областта на електротехниката и хранителната промишленост – фиг.2.1, фиг.3.5. и фиг.4.2. На фиг.5.2. са представени обобщени данни за степента на извличане в зависимост от концентрацията на феромагнитни частици, които са случайна величина и дебелината на обработвания материал, а на фиг.5.3. в зависимост от брой сепарации.



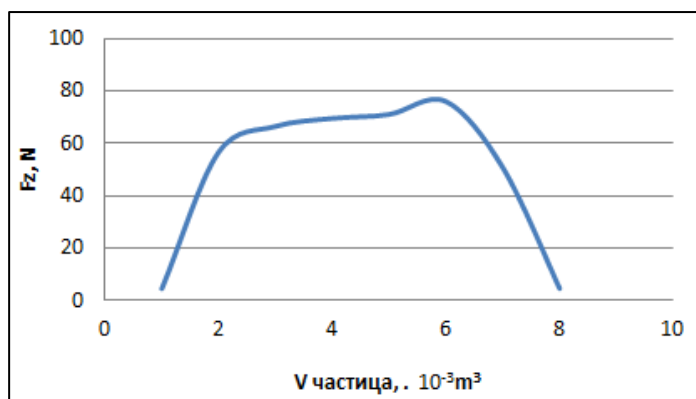
Фиг. 5.2. Степен на извличане на феромагнитен материал в зависимост от концентрацията на феромагнитни примеси и дебелината на обработвания материал



Фиг.5.3. Степен на извличане и остатъчно съдържание при различен брой сепарации

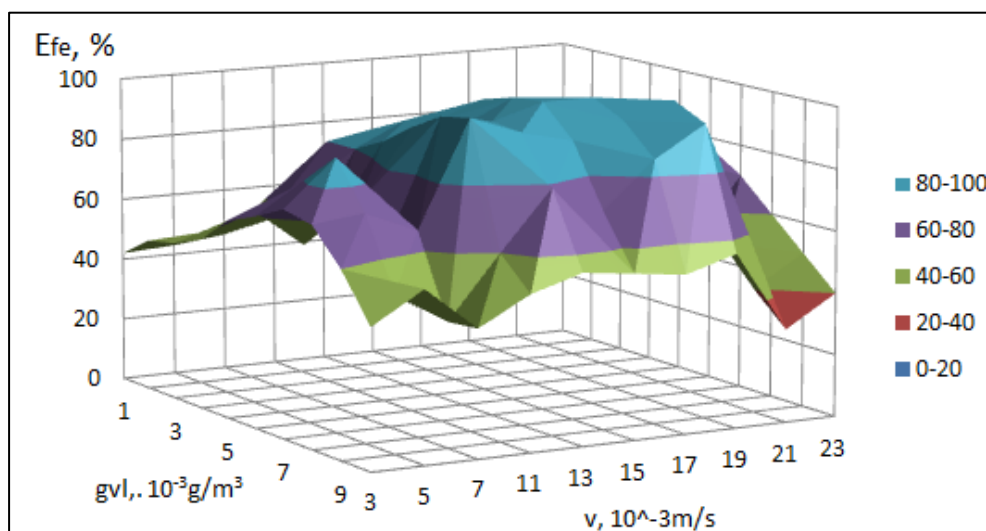
От получените резултати за стойностите на степен на извличане и остатъчно съдържание е определено експериментално, че зададената конфигурация (на подредба) на постоянните магнити в сепарация апарат се осигурява максимална степен на извличане при следните граници на изменение на параметрите – дебелина на обработвания продукт 25mm и концентрация на феромагнитните включения 0,15%. На базата на зададената (използваната) магнитна индукция е определена магнитната сила, теобходима за извличаните на феромагнитни примеси, според [46, 87, 100].

И в трите случая е установено сходно изменение на силата в обема на феромагнитните частици, които са с близки по стойност магнитна проницаемост. Това изменение е представено на фиг.5.4.



Фиг.5.4. Магнитна сила, която действа върху частиците, движещи се от горе на долу в случай с въздушни междини

Анализът на получените резултати показва, че поддържането на влажността в определени граници и правилно подбрана конфигурация на магнитния филтър водят до пълното очистване на нежелани феромагнитни включения. Промяната в скоростта, влажността и дебелината на сепарирания обект рязко променят степента на извличане и би довело до два нежелани изхода: задръстване на сепарация апарат или увличане на вече отделените върху повърхността на магнитния филтър феромагнитни частици. И в двата случая това би довело до високо остатъчно съдържание на вредни примеси в крайния продукт.



Фиг.5.5. Степен на извличане в зависимост от относителната влажност и скорост на движение на феромагнитните включения

Посредством модела и експеримента на сепаратор с постоянни магнити, описан в т 4.2. и фиг.4.2, е извършено теоретично изследване на влиянието на технологичните параметри върху степента на извличане и остатъчно съдържание при различна относителна влажност и скорост на движение. Резултатите са представени на фиг.5.5.

5.2. Анализ и изводи от глава пета

- Предложените аналитични зависимости позволяват да се определи магнитната сила чрез отчитане на параметрите оказващи влияние при конкретна задача или конструкция и същевременно да се проследят по-съществените – диаметър на корпус, скорост на движение на материала, дебелина на слоя обработван продукт и др. Това от своя страна дава възможност за по-точна количествена оценка на параметрите, които спомагат за правилния избор и оразмеряване на магнитната система за сепаратори с постоянни магнити
- Обобщаващите признаци, чрез които се изпълнява създадената процедура за моделиране и анализ на процеса на сепарация с постоянни магнити са: степен на очистване, магнитна индукция, магнитна сила, концентрация на феромагнитните включвания, брой сепарации, температура и влажност на обработвания продукт.
- Създадените модели имат сходен алгоритъм, а част от получените резултати са внедрени във фирма производител на нестандартно оборудване.

НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

В процеса на решаване на теоретичните и експериментални задачи на дисертацията са постигнати резултати, определящи следните научни и научно-приложни приноси:

1. Теоретично е определена картината на разпределение на магнитното поле в различни конструкции на сепаратори с постоянни магнити. Предложени са 2D модели на системи от постоянни магнити, показващи картината на разпределение на магнитното поле в магнитния сепаратор. Анализираните 2D модели на системи с постоянни магнити за магнитни сепаратори показват с достатъчна точност (от 7÷13%) картината на магнитното поле и осигуряват теоретична възможност за реализация на зададени параметри – равномерност или концентрираност на магнитния поток в работната въздушна междина.
2. Извършен е анализ на влиянието на геометрията на магнитната система и характеристиките на обработвания продукт върху технологичния процес на сепарация с постоянни магнити. Експериментално са определени факторите, влияещи върху технологичния процес на сепариране с постоянни магнити за различни обекти, например магнезиев оксид, кварцов пясък, керамична смес и други.
3. Извършено е моделиране на технологичния процес на сепариране с постоянни магнити на различни обекти. Резултатите от моделирането са синтезирани чрез извеждане на обобщено уравнение за описание на процеса на сепарация с постоянни магнити с цел настройка на влияещите фактори.
4. Предложен е вариант на магнитната система на сепаратор с използване на феромагнитни концентратори и въздушни междини, с което се постига повишаване на магнитната сила в средния участък на магнитния филтър на сепаратора. Предложеният 2D модел на магнитната система на сепаратор с

използване на феромагнитни концентратори и въздушни междини позволява да се извърши предварителна оценка на магнитното поле, да се оцени разпределението му във вътрешността на сепаратора и същото да се изследва при различни конфигурации на магнитния филтър.

5. Предложен е алгоритъм за повишаване ефективността на магнитното сепариране с постоянни магнити, който позволява постигането на високи технологични резултати, намаляване разхода на енергия и по-рационално разположение на оборудването при сепарация.
6. Създадена е процедура за моделиране и анализ на процеса на сепарация с постоянни магнити. Създадените модели имат сходен алгоритъм, а получените резултати са потвърдени с над 120 експеримента. Това дава основание и позволява моделите да бъдат използвани при проектиране и подобряване на резултатите от процеса на сепариране, като по този начин се удовлетворяват изискванията за максимална степен на почистване и минимално, клонящо към нула остатъчно съдържание на феромагнитни частици. Последното е критерий за ефективността на сепариращите апарати с постоянни магнити. Резултатите от създадените модели в дисертацията водят до:
 - правилен подбор на факторите, които влияят върху процеса на сепарация;
 - комплексно изследване на експлоатационни и конструктивни параметри;
 - промяна в конструктивното изпълнение на магнитния филтър, а от там и до изменение на технологичните параметри;
 - съкращаване на обема на необходимата лабораторна работа свързана с контрола и проверката на адекватна работа на сепариращия апарат;
 - повишаване на степента на почистване.
7. Резултатите от проведените изследвания са приложени от фирма "Елика-Елеватор" ООД – гр. Силистра – производител на магнитни сепаратори. Разработените в дисертационния труд модели на реални сепариращи апарати позволяват да се прецени предварително степента на почистване при конкретен технологичен режим, което е съществен принос в практиката, защото усъвършенства проектирането на магнитни сепаратори, например произвежданите от фирмата магнитни сепаратори тип MCR 5. Предложената в дисертацията методика помага успешно да се оптимизира технологичния процес на почистване, особено при обработката на продукти от хранителновкусовата промишленост.

СПИСЪК НА НАУЧНИТЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Димова Т., **Експериментално изследване на сепаратор с посоянни магнити**. Том I, Годишник ТУ–Варна, 2012г., 31÷36 стр., България
2. Dimova T., Arahamian B., **Determining the impact of some technological parameters on the process of separation of ferromagnetic particles through a separator with permanent magnets** , XVII-th International Symposium of Electrical Apparatus and Technologies, Siela 2012, p.34÷41, 28-30 May, Burgas, 2012. SIELA 2012
3. Димова Т., Апрахамян Б., Щреблау М., **Едно изследване върху технологичните параметри при сепарация с постоянни магнити**, Трети международен научен конгрес, 50 години Технически университет – Варна, том 3, 214÷218 стр., 04÷06 Октомври, 2012.
4. Димова Т., Апрахамян Б., Щреблау М., **Изследване конфигурацията на магнитното поле в сепаратори с постоянни магнити за почистване на слънчогледови семена**, Юбилейна научна международна конференция, 50 години катедра ЕТЕТ, Годишник на ТУ – Варна, 4- 6 октомври 2013г., Том I, с.54÷58, ISSN 1311-896X, 2013г.
5. Dimova T., Marinova M., Arahamian B., Streblau M., **Increasing the efficiency of permanent magnet separators by maintenance of certain functional state of the object of separation**, SIELA 2014, Part 2, p.29÷32, 29-30 may 2014г., ISBN 978-954-28-1441-2, SIELA Bulgaria
6. Dimova T., Marinova M., Arahamian B., Streblau M., **Application of the magnetic field in separation of biological products**, Proceedings of the XIVth International Conference on Electrical Machines, Drives and Energy Systems, TU-Varna, 2015, под печат

Статията Dimova T., Arahamian B., Marinova M., Streblau M., Increasing the efficiency of permanent magnet separators by maintenance of certain functional state of the object of separation, Proceedings of the XVIII-th International Symposium of Electrical Apparatus and Technologies SIELA'2014, vol. I, 2014, p. 29 – 32

е цитирана в:

Jiangang Ku , Huihuang Chen , Kui He , Quanxiang Yan, Simulation and observation of magnetic mineral particles aggregating into chains in a uniform magnetic field, Minerals Engineering, Volume 79, 2015, pp. 10–16

Изказвам благодарности на колегите от катедра „Електротехника и Електротехнологии” към Технически Университет – Варна, проф. д-н инж. Сава Контров, доц. д-р инж. Атанас Иванов, доц. д-р инж. Христофор Тахрилов и всички оказали ми помощ и подкрепа в работата по този дисертационен труд.

КОРОТКОЕ ОПИСАНИЕ ДИСЕРТАЦИИ

для присуждения образовательной и научной степени „доктор”

Тема: МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕПАРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ
маг.инж. Татьяна Маринова Димова

В кандидатской диссертации исследованы сепараторы с постоянными магнитами с помощью специально созданных программных моделей.

Цель заключается в обеспечении максимальной степени очистки обработанного продукта при заданных технологических параметров.

Первая глава представляет классификацию магнитных сепараторов и описывает рабочий процесс магнитной сепарации (механизм разделения).

Вторая глава описывает процесс извлечения ферромагнитных частиц из смеси с помощью статистического анализа и определения необходимой силы, чтобы сделать это.

Третья глава описывает модель, разработанную для расчета магнитного поля в рабочем пространстве сепаратора с постоянными магнитами.

Четвертая глава описывает алгоритм, предназначенный для повышения степени очистки обрабатываемого продукта.

Пятая глава описывает обобщенную модель сепаратора с постоянными магнитами.

ABSTRACT

Of PhD Thesis

Subject: MODELING OF SEPARATORS WITH PERMANENT MAGNETS

By Tatyana Marinova Dimova

In the PhD thesis are investigated separators with permanent magnets using a specially created software models.

The aim is to ensure the maximum degree of purification of the treated product at given technological parameters.

The first chapter presents the classification of the magnetic separators and describes the working process of magnetic separation (the mechanism of separation).

The second chapter describes the process of extraction of ferromagnetic particles from the mixture by statistical analysis and determine the required force to do it.

The third chapter describes a model developed to calculate the magnetic field in the working space of the separator with permanent magnets.

The fourth chapter describes an algorithm designed to increase the degree of purification of the processed product.

The fifth chapter describes a generalized model of separator with permanent magnets.