



МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ"

МИННОТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА "ОБОГАТЯВАНЕ И РЕЦИКЛИРАНЕ НА СУРОВИНИ"

маг. инж. Марин Георгиев Ранчев

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен „Доктор”

Професионално направление 5.8. Проучване, добив и обработка на полезните изкопаеми

Научна специалност „Обогатяване и рециклиране на суровини”

ТЕХНОЛОГИЧНИ ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ НА ЗЪРНОМЕТРИЧНАТА ПОДГОТОВКА НА МЕДНОПОРФИРНИ РУДИ ОТ НАХОДИЩЕ „АСАРЕЛ“

Научни консултанти:

Проф. д-р Иван Нишков

Доц. д-р Димитър Мочев

София, 2016

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от разширен катедрен съвет на катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини“, Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ – София.

Пълният обем на дисертацията е 211 страници, 76 таблици и 109 фигури. Използваната литература обхваща 86 заглавия на кирилица и латиница. Дисертацията се състои от въведение, девет глави обхващащи: литературен обзор, актуалност, цели и задачи на дисертационния труд, експериментална част, общи изводи и заключения, научно-приложни приноси и литературни източници и списък с публикациите по темата на дисертацията.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на открито заседание пред научно жури, назначено от Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ на 22.12.2016 г. от 15:00 часа в зала 138 „Каолин“, Миннотехнологичен факултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, гр. София на заседание на научното жури в състав:

1. Доц. д-р инж. Ирена Любенова Григорова - МГУ, катедра „ОРС“
2. Доц. д-р инж. Димитър Янков Мочев – МГУ, катедра „ОРС“
3. Проф. д-р инж. Методи Стоянов Методиев - експерт, външен член
4. Проф. д-р инж. Георги Стоянов Клисуранов - експерт, външен член
5. Доц. д-р инж. Георги Петров Меразчиев - експерт, външен член

Резервни членове:

1. Проф. д-р инж. Маринела Иванова Панайотова – МГУ, катедра „Химия“
2. Проф. д-р инж. Щелиана Димитрова Джендова – експерт, външен член

Автор: маг. инж. Марин Георгиев Ранчев

Заглавие: Технологични възможности за оптимизация на зърнометричната подготовка на меднопорфирни руди от находище „Асарел“

Научни консултанти:

Проф. д-р инж. Иван Михайлов Нишков

Доц. д-р инж. Димитър Янков Мочев

Материалите във връзка с предстоящата защита са на разположение на заинтересованите лица в сектор „Следдипломна квалификация“.

Печат: Издателска къща „Св. Иван Рилски“ – МГУ – НИС

*Изказвам благодарността си към моите научни ръководители **проф. д-р Иван Нишков** и **доц. д-р Димитър Мочев** за ценните съвети и напътствия, за придобитите знания, за помощта и моралната подкрепа, която ми оказаха през целия период на докторантурата.*

Благодаря на ръководството и колегите от фирма „Асарел-Медет“ АД за подкрепата и съдействието при провеждането на изследванията.

Благодаря и на всички членове от катедра “Обогатяване и рециклиране на суровини” към Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски” за полученото съдействие.

Съдържание на автореферата на дисертационния труд	Стр.
I. Въведение и обща характеристика на дисертационния труд	5
II. Изводи от литературния обзор	6
III. Актуалност на разработката	7
IV. Цел и задачи на дисертационния труд	7
V. Методология на изследването	8
V. 1. Анализ на оборудването в цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“ в ОФ „Асарел“	9
V. 2. Разработване на алгоритми за характеристика на суровината и изследваните продукти и оценка на ефективната работа на технологичните процеси.	10
V. 2. 1. Разработване на алгоритъм за изчисляване на зърнометрични характеристики	10
V. 2. 2. Разработване на алгоритъм за изчисляване на разделителни характеристики	11
V. 2. 3. Разработване на алгоритъм за изчисляване на разделителна едрина при процесите на пресяване и класиране	12
V. 2. 4. Разработване на алгоритъм за изчисляване на ефективност на процесите пресяване и класиране	14
V. 2. 5. Разработване на алгоритъм за определяне индекса на работата на Бонд (Bond Work Index - Wi)	16
V. 2. 6. Разработване на алгоритъм за изчисляване на баланса по зърнометрична класа (разчетна фракция) и по съдържание на твърда фаза за класиращите устройства	18
V. 2. 7. Разработване на алгоритъм за решаване на балансовите уравнения за схемата на смилане в затворен цикъл с хидроциклон	19
VI. Експериментална част	21
VI. 1. Изследване на корпус „Едро трошене“	22
VI. 2. Изследване на отделение „Дезинтеграция“	23
VI. 3. Изследване на корпус „Средно и ситно трошене“	27
VI. 4. Изследване на отделение „Мелнично“	31
VII. Общи изводи	38
VIII. Технологични решения за оптимизиране ефективността на работата на цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“	39
IX. Заключение	40
X. Научно – приложни приноси в дисертационния труд	41
XI. Публикации по дисертационния труд	42
Литература, посочена в автореферата на дисертационния труд	42

I. Въведение и обща характеристика на дисертационния труд

В цялата история на човешката цивилизация преработката на минерални суровини е свързана с произвеждането на по-ситни и по-фини размери на продукта от по-големите размери на началния материал. При това в някои случаи формата не е съществена, в други тя е от съществено значение. Това правило е в сила и в случаите, когато продуктът е готов за приложение, напр. строителни пясъци и чакъли, както и в случаите, когато е предхождаща операция за следваща технологична преработка - флотация, гравитационно или магнитно обогатяване, металургична преработка, производство на стъкла и керамика, пълнители, материали за неорганичен синтез [Мочев, Григорова, 2013].

Поради постоянно променящите се условия на работа, често е необходимо модифициране на наличното оборудване и възприетите технологични операции в цялата схема на обогатителните фабрики. Така например, ограничаване производителността на стадиите на трошене, поради недостатъчния капацитет или затруднения в отделенията по топково, автогенно или полуавтогенно смилане, е един от често срещаните недостатъци на обогатителните фабрики със средна и висока производителност.

Оптимизацията на схемите на зърнометрична подготовка в обогатителните фабрики зависи най-вече от целите, които бихме желали да постигнем, като най-често повечето преработвателни комплекси се стремят към максимална производителност и постоянно качество на крайния продукт. Подобряване практиките на зърнометрична подготовка е една от най-важните задачи, пред които всяка компания рано или късно се изправя. Можем да разделим тези подобрения на два основни типа:

- ❖ Фундаментални промени в производствените технологии или въвеждане на нови такива;
- ❖ Постепенни подобрения на технологиите, приложенията и оперативните практики.

Последните по същество включват оптимизиране работата на оборудването за зърнометрична подготовка (трошачки, мелници, пресевни уредби и класиращи устройства), като от икономическа гледна точка се гарантира, че инсталираният капиталов актив се експлоатира възможно най-ефективно. Оптимизацията на технологичната верига има следните предимства:

- ❖ Намаляване оперативните разходи (BGN/t преработена суровина);
- ❖ Увеличаване на производителността;
- ❖ Подобряване работата на съпътстващите операции по технологичната верига, като резултат от по-добрата зърнометрична характеристика на продуктите или комбинация от изброените.

Установената трайна тенденция към намаляване съдържанието на ценни компоненти, особено при металните полезни изкопаеми е една предпоставка за изследване възможностите за оптимизиране и подобряване ефективността на работа на заложените технологични операции.

В настоящият труден момент за минерално-суровинната индустрия е от изключително важно значение, минните компании да поставят по-голямата част от иновативния си фокус върху оптимизирането на остарелите технологии в стремеж да намалят разходите и да повишат ефективността на производствените процеси, както от икономическа, така и от екологична гледна точка.

В първа част (Част I) е направен литературен обзор, включващ общи сведения за хидротермалното рудообразуване, особеностите и разпространението на меднопорфирните находища. Анализирани са съвременните практики при операциите на зърнометрична подготовка, като е обърнато специално внимание на планирането, изследването, подходите при оптимизацията на схемите и влиянието на някои технологични параметри върху ефективността на процесите на зърнометрична подготовка.

Втора част (Част II) на дисертацията конкретизира актуалността на разработката, както

и целите и задачите, които трябва да бъдат решени.

В *трета част (Част III)* е представена методологията на изследването на цикъл „Зърнометрична подготовка“ в обогатителна фабрика „Асарел“, включваща анализ на производственото оборудване в основните технологични корпуси, разработване на алгоритми за характеристика на суровината и изследваните продукти, както и за ефективната работа на технологичните процеси. Въз основа на разработените алгоритми е разработена методика за изследване на четирите основни отделения на цикъла на „Зърнометрична подготовка на рудата“ (Приложение I).

Четвърта част (Част IV) на дисертацията обхваща експерименталната част на дисертацията, като основният фокус е върху получените резултати от разработените алгоритми и проведените изследвания на четирите основни отделения на цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“ в обогатителна фабрика „Асарел“. Въз основа на приложените алгоритми и изчислените основни технологични показатели е направен анализ на установените „тесни места“ в технологичната верига на цикъла „Зърнометрична подготовка на рудата“.

Общите изводи, технологичните решения за оптимизиране ефективността на работата на цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“, научно-приложните приноси, литературните източници и публикациите по дисертационния труд са описани в последните пет части (*Част V - IX*) на дисертацията.

II. Изводи от литературния обзор

Меднопорфирната система в централната част на Средногорската зона е представена от три главни находища (Медет, Асарел и Елаците) и няколко по-малки находища (Цар Асен, Влайков връх, Карлиево и др.), всичките разположени в Панагюрско – Етрополския руден район. От 1950 до 2002 година са преработени повече от 460 мил. тона руда със средно съдържание на мед от 0.42 %, като са произведени приблизително 1.9 мил. тона мед и 2.5 милиона унции злато (Strashimirov, S. et al., 2002).

Находище „Асарел“ и обогатителната фабрика към него са въведени в експлоатация на 6 декември 1989 год., като основен предмет на дейност е открит добив и обогатяване на медни руди и биохимично извличане на мед. Понастоящем в обогатителна фабрика „Асарел“ се преработват над 13.5 млн. тона медно-порфирни руди годишно. Преработваната суровина е със сравнително сложен минерален състав – високо съдържание на пирит и извънредно високо съдържание на глинести минерали. Характерните за находище „Асарел“ три типа вместиращи скали (аргилизити, пропицити и вторични кварцити) се различават както по зърнометричен, така и по минерален състав. След първично трошене в челюстни трошачки, глинестите агрегати се разрушават при процесите на промиване и частично автогенно смилане, осъществявани в отделение „Дезинтеграция“. Друга характерна черта на изходната руда е финото разпределение на промишлените минерали, в резултат на което се изисква смилане на рудата преди флотация до едрина на зърната - 80.00 % „-0.100 mm“. Всички тези факти определят сложната схема на зърнометрична подготовка на рудата с цел по ефективното разкриване на ценните компоненти преди флотационния цикъл.

Терминът оптимизация е доста неопределен, освен ако не е дефиниран по отношение на някоя измерима величина и подчинен на оперативни или други ограничения. Най-често обсъжданите технологични параметри в лимитирания кръг на възможните оптимизации в схемите на зърнометрична подготовка са производителността и зърнометричния състав. Въпреки това е възможно да се включат и някои допълнителни критерии.

Чрез използването на различни математически и оперативни модели на цикли и обогатителни операции, бихме могли да извършим оптимизация в различните схеми и управление на процесите, в зависимост от желаните цели:

- ❖ Цикъл на зърнометрична подготовка - по отношение на зърнометричния състав, производителността или потреблението на електроенергия;
- ❖ Цикъл на зърнометрична подготовка - по отношение на по-доброто извличане в последващите операции;
- ❖ Цялата обогатителна фабрика – по отношение на определени производствени критерии.

Всяка от тези оптимизационни стратегии, предлага значителна възвращаемост на полезна информация, свързана с работата на съответния технологичен процес, неговите ограничения и експлоатационни условия, както и възможности за ефективно управление на производствения процес.

С увеличаване обхвата и прецизността на техниките на математическото моделиране, въвеждането на една приемлива степен (последователност) на оптимизация за даден процес, би могла да се възприеме още в най-ранните фази на проучване и проектиране. Избраната стратегия за технологична преработка, може да окаже съществено влияние, върху това което разглеждаме като отпадък (загуби) със значително въздействие върху разходите за добив. Предизвикателството се намира в това, специалистите в сферите на добив и преработка на минералните суровини, да съумеят да представят успешни модели за оптимизация на технологичните процеси, които да доведат до по-успешното оползотворяване на природните ресурси.

Направеният по-горе извод важи в пълна сила за преработващите фабрики в момента, където въвеждането на техниките на математическото моделиране за управление на процеса зърнометрична подготовка са необходими и актуални, с цел ефективното оползотворяване на минералните суровини.

III. Актуалност на разработката

Изправени пред все по-сложна пазарна среда, за компаниите преработващи минерални суровини е от съществено значение постоянното оптимизиране на производствените операции и оборудване, с цел обезпечаване на едно по-сигурно бъдеще в производствен, технико-икономически и екологичен аспект.

Внедряването на съвременни технологии, рационалното и своевременно използване на оперативната информация, притежават потенциала на най-добрите стратегии за оптимизиране на производствения капацитет и редуциране на разходите за често колебливите преработвателни и икономически условия. Тази възможност ще бъде ключов и основен елемент на конкурентоспособните компании през XXI век.

Оптимизирането на процесите на зърнометрична подготовка, като трошене, пресяване, смилане и класиране, и по този начин увеличаване съдържанието на зърната на разкритите рудни минерали, неминуемо ще доведе до повишаване извличането на ценните компоненти от преработваната изходна руда.

IV. Цел и задачи на дисертационния труд

Основната цел на дисертационния труд е да се потърсят технологични възможности за оптимизиране ефективността на работа на съществуващото оборудване и процесите в цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“ в обогатителна фабрика „Асарел“.

Изследователският фокус на дисертационния труд е насочен към разработване на алгоритми за изчисляване на основните показатели на процеса „Зърнометрична подготовка“. Прилагането в практиката на такъв тип алгоритми води до установяване на „тесните места“ в цикъла на „Зърнометрична подготовка на суровините“. Разработването на технологични

решения за максимално разкриване на рудните минерални фази, поддържането на постоянен зърнометричен състав и съдържание на твърда фаза в захранването на флотационния цикъл ще доведе до повишаване степента на извличане на ценните компоненти.

Основните задачи на дисертационния труд са:

1. Разработване на алгоритми за изчисляване на зърнометрични и разделителни характеристики.
2. Разработване на алгоритми за изчисляване на разделителна едрина и ефективност на пресяване.
3. Разработване на алгоритми за определяне ефективността на работа на хидроциклоните в отделение „Мелнично“.
4. Разработване на алгоритъм за изчисляване на баланса по съдържание на твърда фаза и зърнометрична класа (разчетна фракция) за класиращите устройства в отделение „Мелнично“.
5. Разработване на алгоритъм за решаване на балансовите уравнения за схемата на смилане в затворен цикъл с хидроциклон
6. Изследване работата на корпус „Едро трошене“ и анализиране на зърнометричен, минерален, химичен състав и влага на трите типа руди. Формулиране на технологични решения за отстраняване на установените „тесни места“ в технологичната верига.
7. Изследване работата на отделение „Дезинтеграция“ и определяне ефективността на операциите: автогенно смилане, промиване и класиране по едрина. Формулиране на технологични решения за отстраняване на установените „тесни места“ в технологичната верига.
8. Изследване работата на отделение „Средно и ситно трошене“ и анализ на основните технологични параметри на затворения цикъл „средно трошене – контролно / предварително пресяване – ситно трошене – контролно пресяване“. Формулиране на технологични решения за отстраняване на установените „тесни места“ в технологичната верига.
9. Изследване работата на отделение „Мелнично“ и ефективността на процесите смилане и класиране при установените три режима на работа на смилещите апарати в отделение „Мелнично“. Формулиране на технологични решения за отстраняване на установените „тесни места“ в технологичната верига.

V. Методология на изследването

Основна цел на проведеното изследване на цикъл „Зърнометрична подготовка“ в обогатителна фабрика „Асарел“ е да се потърсят технологични възможности за управление на процесите с цел максимално разкриване на рудните минерални фази и поддържането на постоянен зърнометричен състав и съдържание на твърда фаза в захранването на флотационния цикъл.

Методологията на изследването на цикъл „Зърнометрична подготовка“ в ОФ „Асарел“, включва анализ на производственото оборудване в основните технологични корпуси на цикъл

„Зърнометрична подготовка на рудата“, разработване на алгоритми за характеристика на суровината и изследваните продукти, както и за ефективната работа на технологичните процеси.

Разработени са теоретичните основи на прилаганите в практическата част алгоритми за определяне и изчисляване на:

- ❖ Зърнометрични и разделителни характеристики;
- ❖ Индекс на работата на Бонд (Bond Work Index - W_i);
- ❖ Разделителна едрина и ефективност на пресяване/класиране;
- ❖ Баланса по зърнометрична класа (разчетна фракция) и по съдържание на твърда фаза за класиращите устройства;
- ❖ Балансови уравнения за схемата на смилане в затворен цикъл с хидроциклон.

Въз основа на разработените алгоритми е разработена методика за изследване на четирите основни отделения на цикъла на „Зърнометрична подготовка на рудата“ (Приложение I).

Въз основа на приложените алгоритми и изчислените основни технологични показатели е направен анализ на установените „тесни места“ в технологичната верига на цикъла „Зърнометрична подготовка на рудата“. Формулирани са съответните технологични решения за отстраняването им с цел подобряване работата на цикъл „Зърнометрична подготовка“ и повишаване степента на извличането на ценните компоненти.

V. 1. Анализ на оборудването в цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“ в ОФ „Асарел“

Беше анализирано производственото оборудване в четирите основни технологични звена – корпус „Едро трошене“ (1); отделение „Дезинтеграция“ (2); корпус „Средно и ситно трошене“ (3) и отделение „Мелнично“ (4) - на цикъл „Зърнометрична подготовка“ в условията на ОФ „Асарел“ (фигура V. 1).



Фигура V. 1. Технологични звена в цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“ в ОФ „Асарел“

В табличен вид са представени техническите характеристики (размери, производителност, номинален работен обем, честота на въртене и др.) на основното оборудване в изследваните преработвателни звена включващи: челюстни трошачки за едро трошене, автогенни мелници, барабанни пресевни уредби, конусни трошачки за средно и ситно трошене, вибрационни пресевни уредби за мокро и сухо пресяване, топкови мелници и класиращи устройства (хидроциклони).

V. 2. Разработване на алгоритми за характеристика на суровината и изследваните продукти и оценка на ефективната работа на технологичните процеси.

V. 2. 1. Разработване на алгоритъм за изчисляване на зърнометрични характеристики

Зърнометричният състав е най-важната характеристика при обогатяването на полезните изкопаеми, по него се определя схемата на трошене и смилане и зависи ефективността на много процеси, като например класиране и пресяване. С помощта на различните методи на зърнометричен анализ много лесно би могло да се опише каква количествена част от материала е по-ситна или по-едра от даден базов размер.

Най-качествена оценка на данните след провеждането на ситов анализ е възможна при представянето на данните в графична форма. Много по-лесно е да се сравняват данните от множество различни тестове, ако са нанесени на една обща графика, отколкото ако се опитваме да сравним данни, представени в табличен вид.

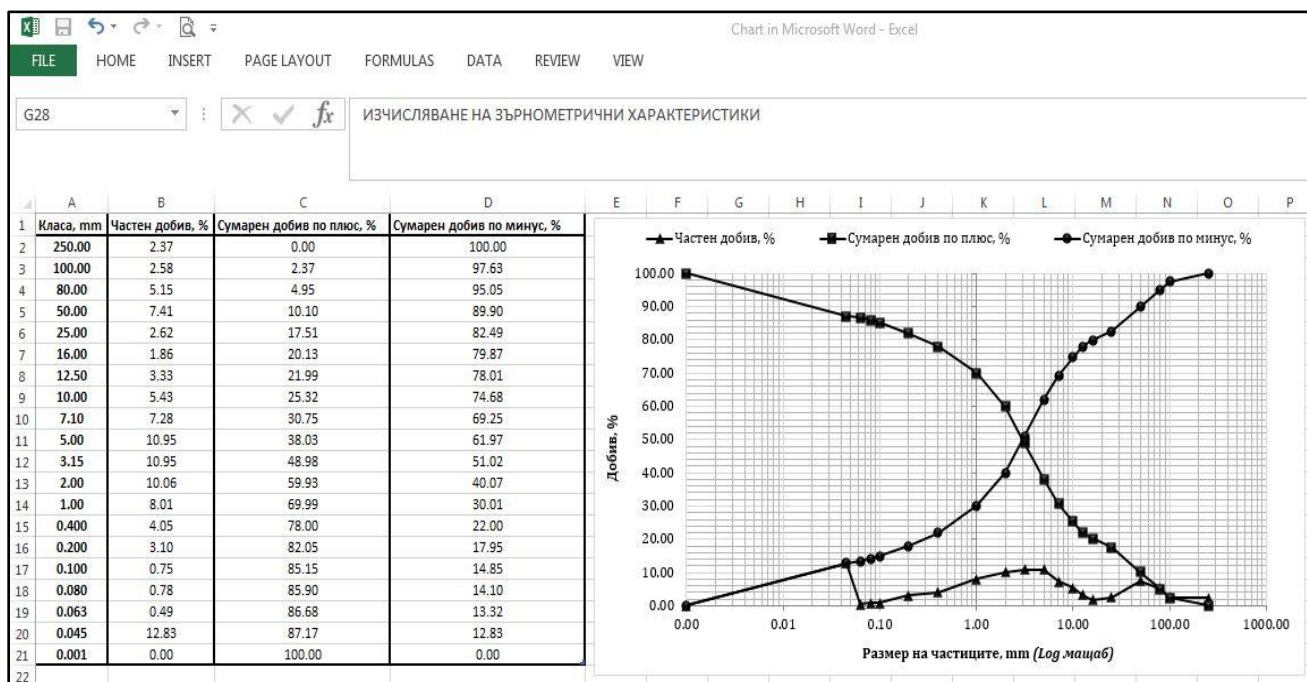
От множеството графични методи най-често използваните методи за графично представяне на получените от ситовия анализ резултати са, както следва:

- ❖ *Графично представяне на частните добиви;*
- ❖ *Графично представяне на сумарните добиви;*
- ❖ *Нормално или квадратно графично представяне (линеен мащаб);*
- ❖ *Полу-логаритмично представяне;*
- ❖ *Логаритмично-логаритмично представяне;*
- ❖ *Двойно логаритмична диаграма за разпределението на Rosin-Rammler.*

Както се вижда по-нататък линейните и логаритмичните мащаби са използвани на съответните места:

- ❖ *Логаритмичният мащаб е използван, там където линейният мащаб не дава добра картина на зърнометричните характеристики;*
- ❖ *В случай, когато при логаритмичните мащаби се получава изпъкване на графиката;*

На фигура V. 2 е представен общия изглед на разработения в Excel алгоритъм за изчисляване на зърнометрични характеристики.



Фигура V. 2. Алгоритъм за изчисляване на зърнометрични характеристики

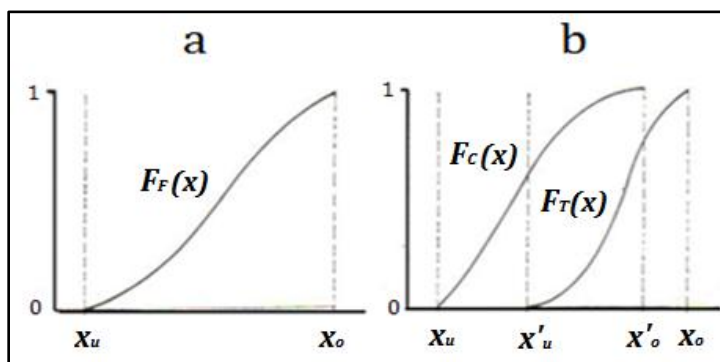
V. 2. 2. Разработване на алгоритъм за изчисляване на разделителни характеристики

При процесите на класиране и сортиране (процеси на сепарация) разделяме дадена смес от вещества на най-малко два продукта, различаващи се по стойността на показателя на разделителния параметър. При зърнометричната подготовка на суровините най-често се използват физическите свойства на зърната – едрина, плътност, скорост на утаяване, проницаемост и дифракция на светлината.

При процесите на разделяне, отделните зърна в захранващия материал са разпределени непрекъснато между една долна гранична стойност x_u и една горна гранична стойност x_o . Това би могло да се опише с функцията на разпределение на показателя на зърнеността на захранването, както е представено на фигура V. 3.

Технологичната цел на разделянето се състои в това всички зърна, които имат стойност на показателя на зърнеността $x \leq x_s$ да бъдат изнесени в един продукт **C** (концентрат; подситов продукт), а всички зърна със стойност на показателя $x \geq x_s$ в друг продукт **T** (отпадък; надситов продукт). Промислените процеси на разделяне реално никога не са идеални, т.е. сто процентово разделяне на практика не е възможно.

Вследствие на това зърната от средния обхват на показателя на зърнеността $x'_u - x'_o$ ($x'_u \geq x_u$ и $x'_o \leq x_o$) се разпределят в продуктите **C** и **T**. Зърната с показател $x \leq x'_u$ отиват изцяло в продукта **C**, а зърната с показател $x \geq x'_o$ преминават изцяло в продукта **T**. Зърната, които имат едрина $x \leq x_s$ с много голяма вероятност преминават в продукта **C**, а зърната с $x \geq x_s$ е много вероятно да преминават в продукта **T**.

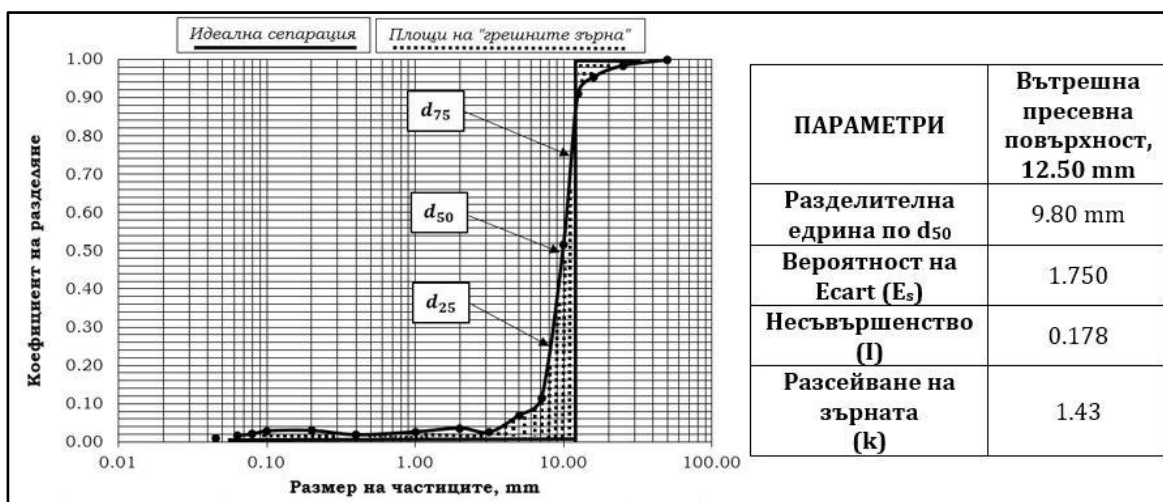


Фигура V. 3. Характеризиране на резултатите от разделянето

a) Функция на разпределение на показателя на зърненост $F_F(x)$ на захванването; b) Функция на разпределение на показателя на зърненост $F_C(x)$ и $F_T(x)$ на продуктите C и T;

За характеризирание поведението на разделяне се въвежда *функция на разделяне*, която се означава като *крива на разделителните числа*, *T-крива*, *крива на Тромп* или *разделителна крива* (Тромп, К., 1937).

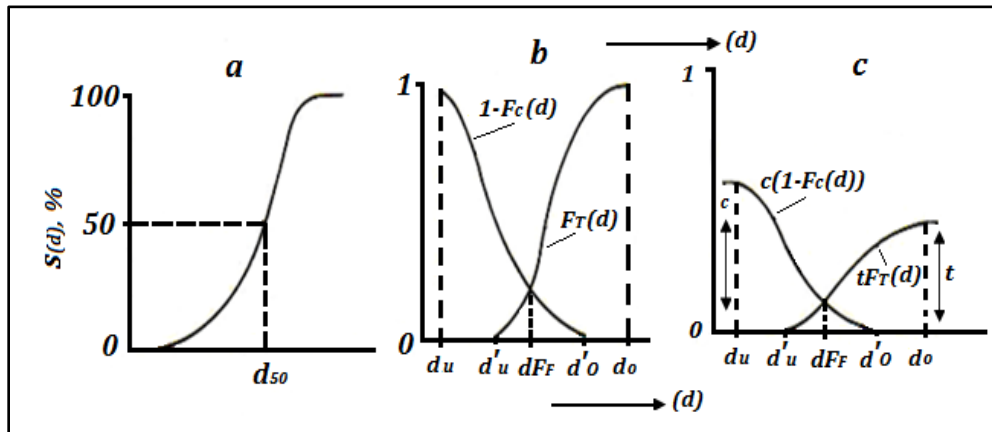
На база разработения алгоритъм за изчисляване на разделителните характеристики при процесите на пресяване и сортиране, по-долу е представена съответната разделителна крива (фигура V. 4) и определените показатели на остротата на разделяне за вътрешната пресежна повърхност (12.50 mm) на двойните барабанни сита в отделение „Дезинтеграция“.



Фигура V. 4. Разделителна крива и показатели на остротата на разделяне за вътрешната пресежна повърхност – 12.50 mm

V. 2. 3. Разработване на алгоритъм за изчисляване на разделителна едрина при процесите на пресяване и класиране

Под понятието сечение на разделяне (разделителна едрина) се разбира стойността на показателя за тази диференциална класа за която $s_{(d)} = 50\%$. Това ще рече, чиято маса се разделя на две равни части в двата продукта на разделянето (фигура V. 5a). Това сечение трябва да се означава като фактическо сечение на разделянето (d_{50} съответно d_s).

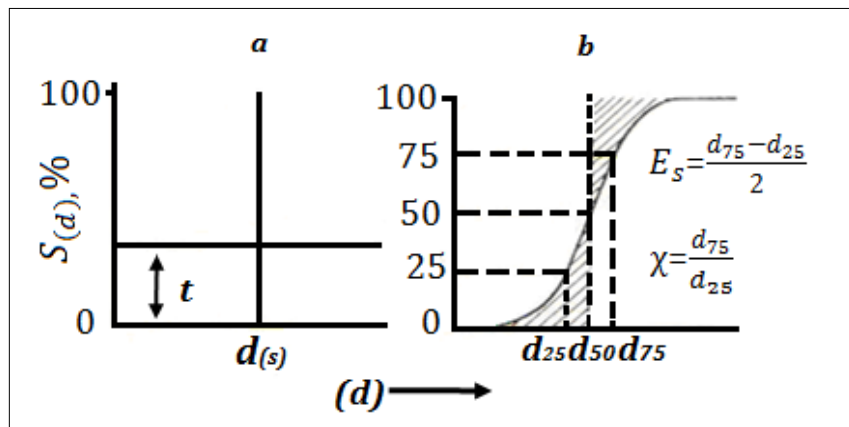


Фигура V. 5. Определяне на разделителния разрез

- a) Действителен разделителен разрез; b) Разделителен разрез при еднакви части на непреминалите зърна; c) Разделителен разрез при еднакви маси на непреминалите зърна.

Разделителният разрез dF_F „по равни части“ на грешните зърна се получава като абсциса на пресечната точка на графиката $(1 - F_C(d))$ и графиката $F_T(d)$ съответно на фигура V. 5b, а сечението на разделяне според еднакви маси на непреминалите зърна се получава като абсциса на точката на разделяне от $c(1 - F_C(d))$ и $F_T(d)$ според фигура V. 5c. С помощта на функцията на разделяне определяме качеството на разделяне – остротата на разделяне.

Идеалният процес на разделяне се характеризира с факта, че всички зърна с размер $d \leq d_s$ са преминали в продукта С и всички зърна с $d \geq d_s$ са преминали в продукт Т. Този процес дава функция на разделяне, която на диаграмата на **s-кривите** се представя с вертикална права в точка d_s (фигура V. 6a). Резултатът от един процес на разделяне е толкова по-лош, колкото функцията на разделяне се отклонява от идеалното разделяне. Това изразява например големината на площите на “грешното разтоварването” (фигура V. 6b), „грешни зърна” (застрихованите площи).



Фигура V. 6. Определяне на остротата на разделяне

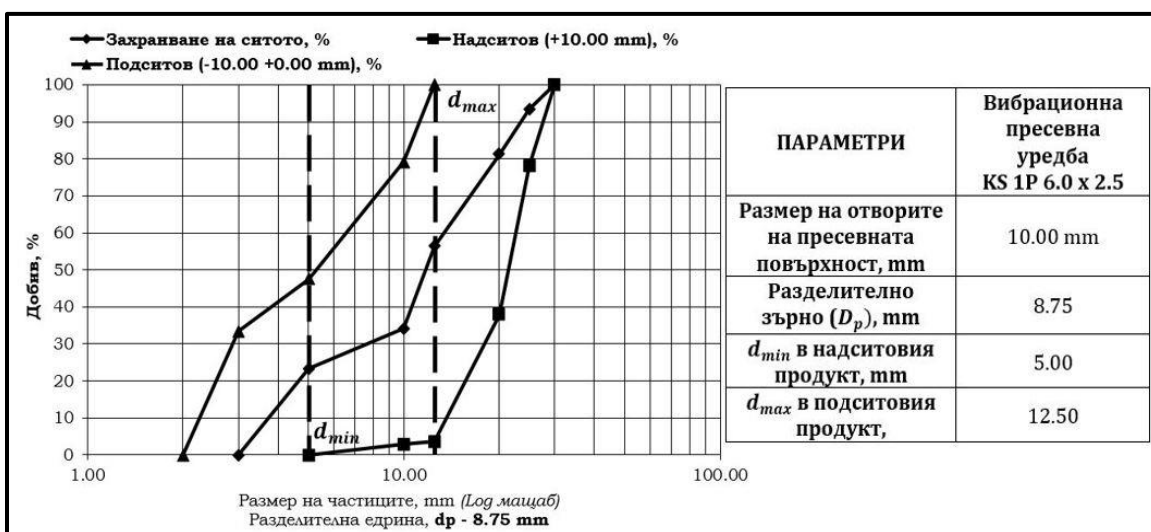
- a) Идеална сепарация и разпределение; b) Площи на “грешното” в разтоварването, Ecart de Terra E_T и разсейване на зърната χ

С разделителна едрина, големина на разделителното зърно или сечение на разделяне, обозначаваме теоретичната стойност при идеална острота на разделяне, която обозначаваме

като D_p . Като първо приближение можем да приемем стойността на размера, който съответства на средата на така определения интервал на припокриване.

Интервалът на припокриване се дефинира като разстоянието между d_{min} за надситовия (при процеса пресяване)/за пясъците (при процеса класиране) и d_{max} за подситовия (при процеса пресяване)/за прелива (при процеса класиране) продукти. Интервалът на припокриване може да служи за приблизителна оценка на ефективността на разделяне. Колкото е по-широк интервалът на припокриване, толкова е по-ниска „остротата на разделяне“ и обратно, което се явява като мярка за ефективността на работа на класиращото устройство.

На база разработения алгоритъм за изчисляване на разделителната едрина при процесите на пресяване и класиране на фигура V. 7 са представени получените резултати в графичен и табличен вид за вибрационна пресевна уредба KS 1P 6.0 x 2.5 (размер на отворите 10.00 mm), захранвана с материал след ситно трошене в корпус „Средно и ситно трошене“.

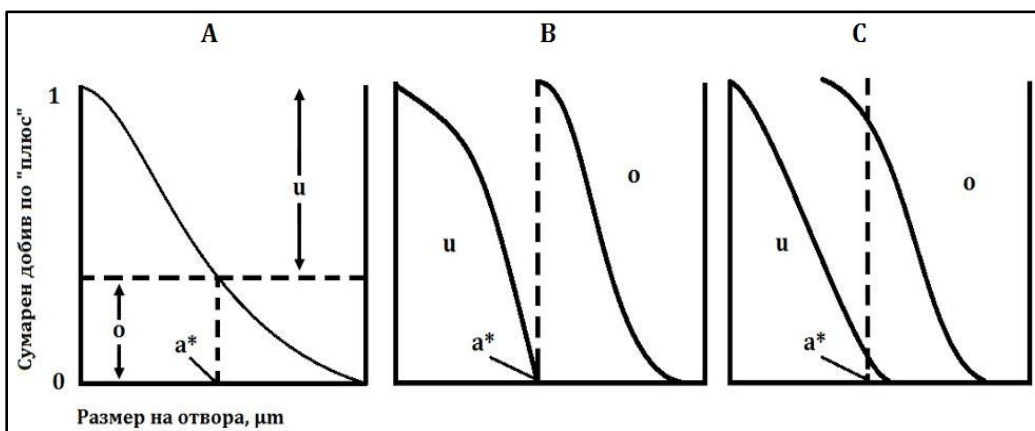


Фигура V. 7. Разделителна едрина (D_p) на вибрационна пресевна уредба пресевна KS 1P 6.0 x 2.5 (размер на отворите 10.00 mm)

V. 2. 4. Разработване на алгоритъм за изчисляване на ефективност на процесите пресяване и класиране

Ефективността на пресяване или ефективността на сепарация, показва степента на успешното разделяне на плюсовата и минусовата фракция в изходния материал, захранващ изследваната ситова повърхност. Идеална сепарация никога не се постига в една промишлена пресевна операция.

Фигура V. 8А, показва ситовите анализи на захранващия материал, представени като зависимост на сумарния добив по „плюс“ от отворите на ситото. Тук за ефективния размер на ситото a^* , фракцията o - представлява плюсовите частици, а фракцията u – минусовите частици. За едно перфектно разделяне, ситовите анализи на тези две фракции трябва да бъдат, както е показано на фигура V. 8В - в плюсовата фракция няма частици по-малки от a^* , а в минусовата фракция няма по-големи a^* . На практика обаче частици с нежелани размери се появяват в потоците на плюса и на минуса (фигура V. 8С).



Фигура V. 8. Сумарни криви по „плюс“

A) захранване на пресевната уредба; B) идеална сепарация; C) реално пресяване

Една операция на пресяване разделя захранването **F**, на горен продукт (+) **O** и на долен продукт (-) **U**. Ако **F**, **O** и **U** представляват масовите дебити на тези потоци, един общ баланс на процеса дава формулата $F = O + U$, а за баланса на плюсовия материал $F \cdot X_F = O \cdot X_O + U \cdot X_U$, където X_F , X_O и X_U са истинските части (съдържания) на плюсовия материал. При перфектно пресяване $O \cdot X_O = F \cdot X_F$. За реално пресяване можем да дефинираме две ефективности:

За реално пресяване можем да дефинираме две ефективности:

- Ефективност E_1 , която е мярка за успешното извличане на плюсовите частици в горния поток:

$$E_1 = \frac{O \cdot X_O}{F \cdot X_F}$$

- Ефективност E_2 , отразяваща извличането на минусов материал в долния поток:

$$E_2 = \frac{U(1 - x_u)}{F(1 - x_f)}$$

Общата ефективност **E** може да се дефинира като произведения на тези две ефективности, т.е.

$$E = E_1 \cdot E_2$$

- Коефициент на качеството на пресяване E_{qs}

Коефициентът на качеството на пресяване (E_{qs}) дефинираме като разликата между извличането на подситовата класа в подситовия продукт и извличането на подситовата класа в надситовия продукт. Като обозначим:

S_f – съдържание на минусови зърна в захранването, %;

S_o – съдържание на минусови зърна в надситовия продукт, %;

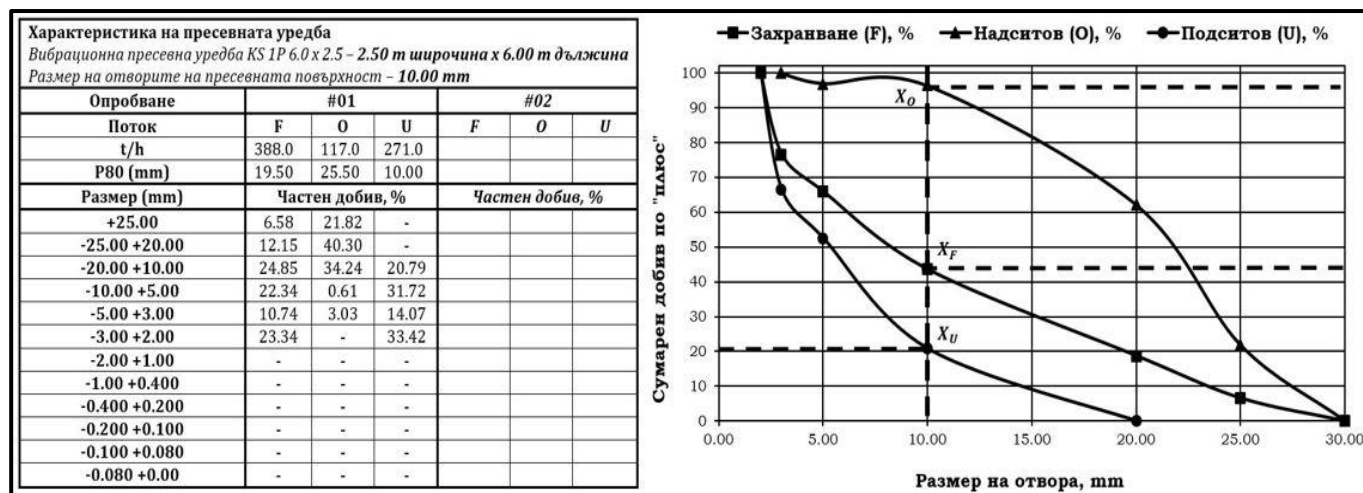
S_u – съдържание на минусови зърна в подситовия продукт, %;

за E_{qs} получаваме:

$$E_{qs} = \frac{(S_f - S_o)(S_u - S_f) \cdot 100}{(100 - S_f)(S_u - S_o)S_f} \cdot 100, \%$$

На база разработения алгоритъм за изчисляване на ефективността на процесите пресяване и класиране на фигура V. 9 и таблица V. 1 са представени получените резултати за

изследваната пресеивна повърхност (размер на отворите 10.00 mm) на вибрационна уредба KS 1P 6.0 x 2.5 в корпус „Средно и ситно трошене“.



Фигура V. 9. Резултати от ситов анализ (ляво) и сумарни добиви по „плюс“ за трите потока (дясно)

В таблица V. 1 са показани стойностите на ефективността на пресеиване за изследваната пресеивна повърхност (10.00 mm).

Таблица V. 1. Ефективност на пресеиване за изследваната пресеивна повърхност

Ефективност на пресеиване за уредба: KS 1P 6.0 x 2.5	
Размер на отворите на пресеивната повърхност: 10.00 mm	
E_1	0.6667
E_2	0.9805
Обща ефективност - E	65.37
Коефициент на качеството на пресеиване - E_{qs}	64.74

V. 2. 5. Разработване на алгоритъм за определяне индекса на работата на Бонд (Bond Work Index - W_i)

Индексът на работата на Бонд (Bond Work Index - W_i , kWh/t) дефинираме като енергията, приложена за смилането на 1 тон материал от едрина близка до безкрайност до 80.00 % съдържание на класа 100 μ m. Тестът включва серия от последователни смилания на определено количество от изпитваната суровина в лабораторна топкова мелница.

Изходният материал се натрошава в лабораторна челюстна трошачка с последващо контролно пресеиване на сито с размер 3.35 mm, като целта е 100.00 % от пробата, постъпваща на смилане да е с размер -3.35 mm. Всяка проба се съкращава и се отделя приблизителното количество за всяко отделно смилане.

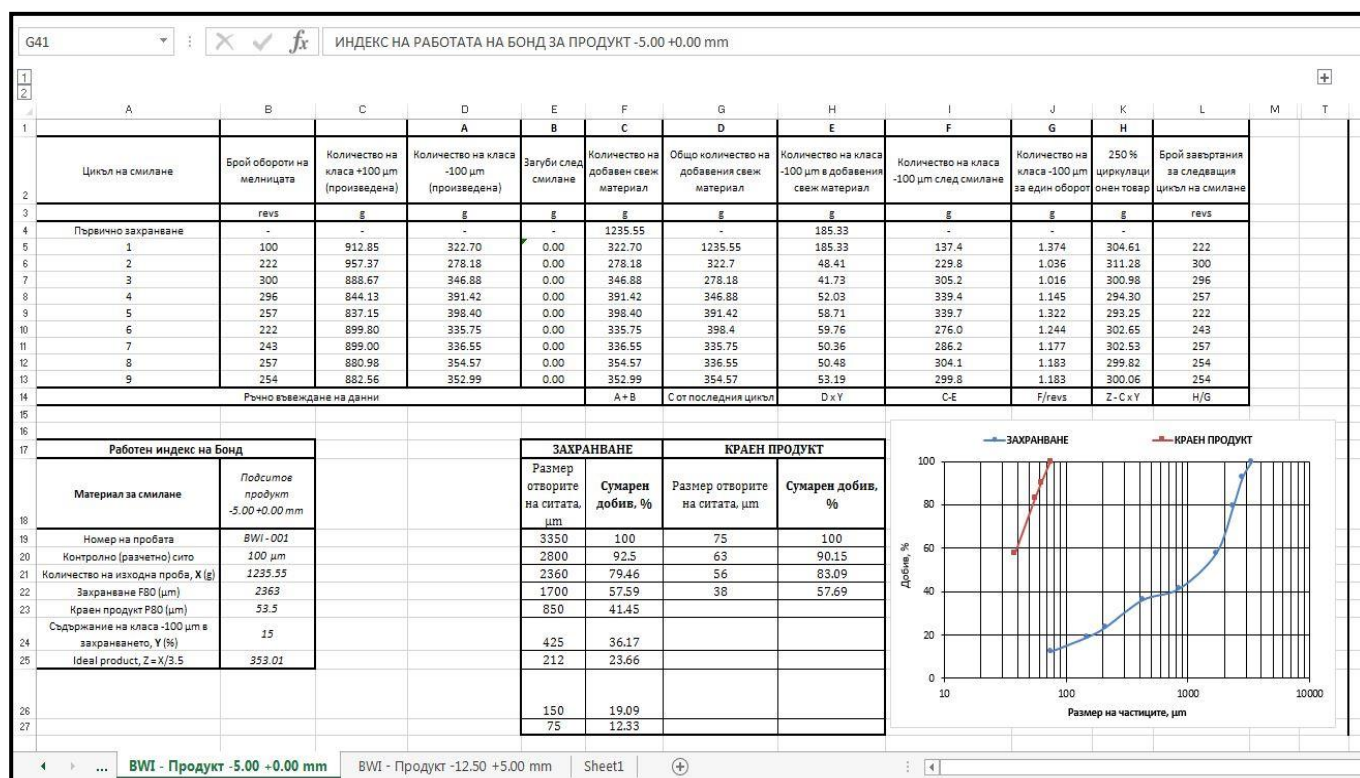
След приключване на тестовете по смилане, се определя зърнометричния състав на крайния продукт, като се установява 80%-ния добив на разпределението на едрината на зърната в материала.

Работният индекс на Bond (kWh/t) се изчислява по формула (Bond, 1961):

$$W_i = \frac{44.5}{P_C^{0.23} \cdot G^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)}, \text{ kWh/t} \quad (\text{V. 1})$$

Въз основа на разработеният алгоритъм за определяне индекса на работата на Бонд (Bond Work Index), бяха проведени тестове по смилане с продукти от цикъла на зърнометрична подготовка на рудата в обогатителна фабрика „Асарел“. По-долу (фигура V. 10) са представени получените резултати от лабораторните тестове с подситов продукт от външната пресевна повърхност на двойните барабанни сита с размер на зърната -5.00 +0.00 mm. Продуктът се транспортира към зумпфовете на топковите мелници, откъдето заедно със смления продукт, постъпва на класиране в батериите хидроциклони.

На фигура V. 10 е представена разработената електронна таблица и получените данни от проведените лабораторни тестове с подситов продукт -5.00 +0.00 mm от двойните барабанни сита в отделение „Дезинтеграция“.



Фигура V. 10. Електронна таблица (Excel) за обработка и съхранение на данните при провеждането на лабораторни тестове по смилане на Бонд

В таблица V. 2 са представени получените резултати от проведените лабораторни тестове.

Таблица V. 2. Индекс на работата на Бонд за изследвания продукт

Размер за 80 % добив на изходния продукт – F80, (μm)	Размер за 80 % добив на краен продукт P80, (μm)	Специфичен добив на новообразувана контролна класа, (g/rev)	Индекс на работата на Бонд W_i , (kWh/t)
2363	53.50	1.183	13.37

V. 2. 6. Разработване на алгоритъм за изчисляване на баланса по зърнометрична класа (разчетна фракция) и по съдържание на твърда фаза за класиращите устройства

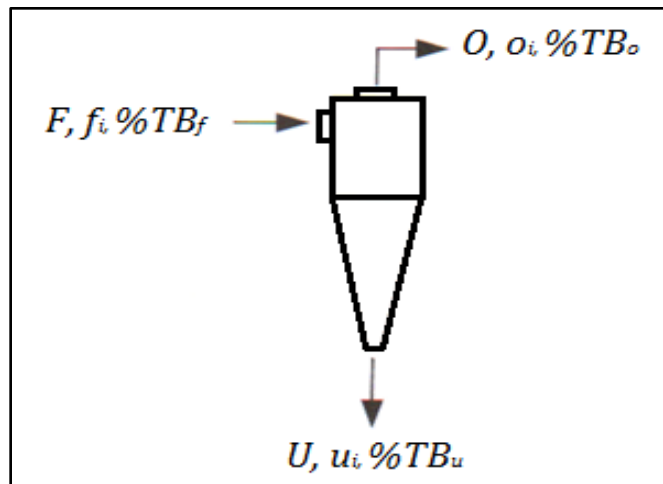
Балансът на масите е най-използваният метод за оценка на данните. За да се оцени работата на обогатителната фабрика и за по-ефективно управление на технологичните процеси е необходимо да се отчитат теглата на потоците и съдържащите се в тях полезни компоненти. Балансът на масите е особено важен при отчитането на разпределението на ценния компонент – минерал, метал или размер на фракция, като в този аспект двупродуктовата формула е изключително полезна.

В центъра на баланса на масите е необходимо да се постави класификатор или зумпф, т.е. възел смесване или разделяне. Такъв баланс ще онагледим, чрез представения по-долу алгоритъм.

За целите на цифровизацията на схемата първо се използват данните от два ръчни анализа:

- ❖ Баланс на водата на циклона;
- ❖ Изчисляване на разделянето на масата във всяка от зърнометричните фракции от циклона.

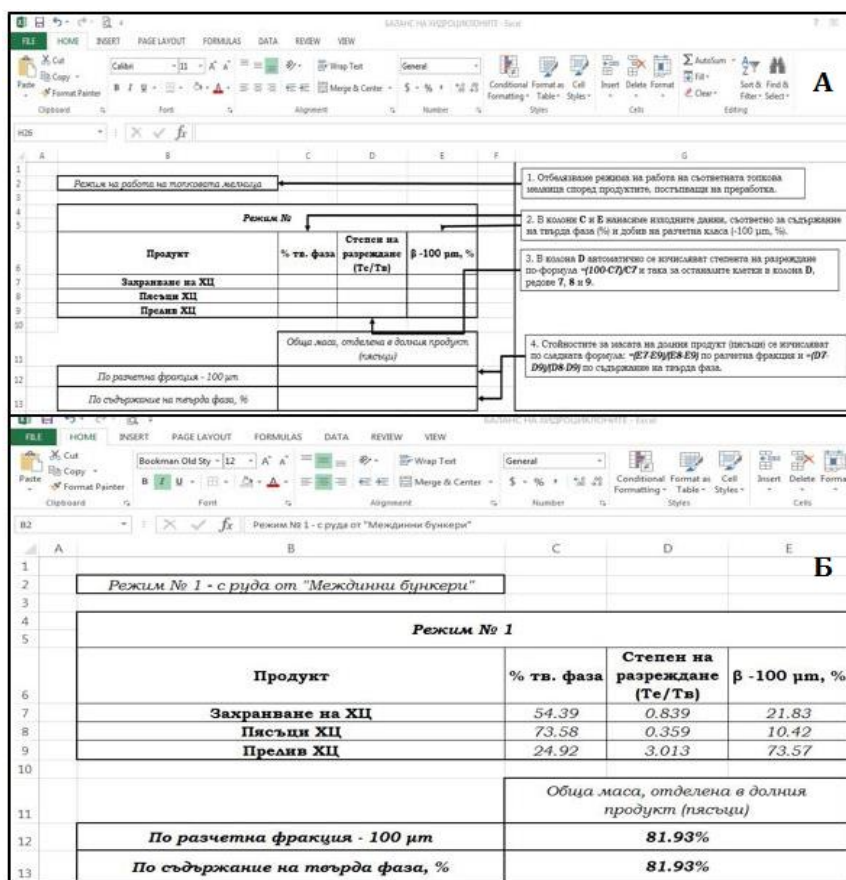
И двата вида изчисления се базират на двупродуктовата формула, както е очертано по-долу. Като обозначим потоците по-маса на твърдото с F , O и U , процентът на всяка от зърнометричните фракции с f_i , o_i и u_i , а процентното съдържание на твърда фаза в захранването, преливът и пясъците с $\%TB_f$, $\%TB_o$ и $\%TB_u$.



Фигура V. 11. Величини в схемата на циклона

Балансът на масите във възела се дава от двупродуктовата формула ($F = O + U$), и за всяка зърнометрична фракция $F \cdot f_i = O \cdot o_i + U \cdot u_i$ а за течната фаза $\left(\frac{100}{\%TB_f} - 1\right) F = \left(\frac{100}{\%TB_o} - 1\right) O + \left(\frac{100}{\%TB_u} - 1\right) U$, Тогава добивът на долния продукт (пясъците), може да бъде изчислен от зърнометричния анализ и/или от данните за съдържание на твърда фаза.

На фигура V. 12 е представен общия вид на разработената електронна таблица и последователността на въвеждане на данните (V. 12A), както и получените резултати от извършените изчисления за баланса на масите в батерията хидроциклони при първи режим на работа на топковата мелница (V. 12B).



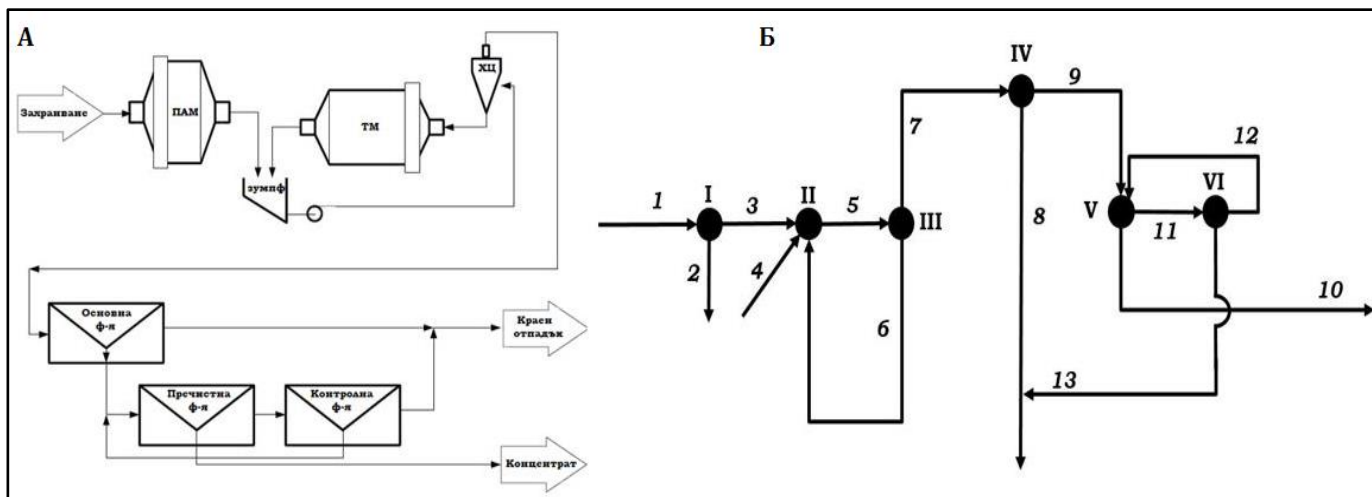
Фигура V. 12. Разработена електронна таблица (Excel) и последователност на въвеждане на изходните данни (A); Резултати от извършените изчисления за първи режим на работа на топковата мелница (B)

V. 2. 7. Разработване на алгоритъм за решаване на балансните уравнения за схемата на смилане в затворен цикъл с хидроциклон

Балансовите изчисления описват един основен елемент от инженерните проблеми, където една част от дебитите на потоците и тяхната характеристика (едрина, плътност, съдържание на полезен компонент) в различните технологични операции е известна, а друга част не. Целта на изчисленията е охарактеризиране на неизвестните потоци чрез математическо анализиране на получените данни от познатите ни потоци.

Алгоритъмът за изчисляване на балансните уравнения включва следните по-важни стъпки:

- ❖ Създаване на диаграма (схема) за съответната технологична операция и отбелязване на входящите и изходящи потоци (фигура V. 13A);
- ❖ Изобразяване на схемата на преработка (смилане, класиране, флотация, др.) под формата на граф от възли и потоци (фигура V. 13B);



Фигура V. 13. Примерна схема на преработка, включваща операциите на смилане, класиране и флотация (А) и диаграма под формата на възли (Б)

- ❖ *Определяне минималният брой на потоците, които трябва да бъдат опробвани:*

$$N = 2(F + S) - 1 \tag{V. 2}$$

където F е броят на захранващите потоци, а S – броят на разделителните операции.

- ❖ *Съставяне на балансовите уравнения:*

За възел II на фигура V. 13, можем да представим следните балансови уравнения:

Баланс на количеството на твърдата фаза в потоците:

$$S_3 + S_4 + S_6 = S_5 \tag{V. 3}$$

където S_i – количество на твърдата фаза в i -тия поток.

Баланс на водните дебити:

$$W_3 + W_4 + W_6 = W_5 \tag{V. 4}$$

където W_i – дебитът на водата в i -тия поток, а отношението на твърдата към течната фаза в i -тия поток, отбелязваме като:

$$r = \frac{T_B}{T_e} \tag{V. 5}$$

и като заместим за количеството на твърдата фаза в **i -тия** поток, получаваме:

$$S = r \cdot W, \text{ t/h} \tag{V. 6}$$

съответно за количеството на водата в i -тия поток, получаваме:

$$W_i = \frac{S}{r}, \text{ m}^3/\text{h} \tag{V. 7}$$

- ❖ *Въвеждане на известните данни (данни от опробване, производствени данни и др.) в електронна таблица;*

❖ Извеждане на система линейни уравнения за съответните възли:

$$\begin{cases} S_{11}x_1 + S_{12}x_2 + \dots + S_{1n}x_n = b_1 \\ S_{21}x_1 + S_{22}x_2 + \dots + S_{2n}x_n = b_2 \\ \dots \\ S_{m1}x_1 + S_{m2}x_2 + \dots + S_{mn}x_n = b_m. \end{cases} \quad (V. 8)$$

➤ Цифровизация на схемата, чрез дефиниране на матрицата на известните коефициенти:

$$A = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{m1} & S_{m2} & \dots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad (V. 9)$$

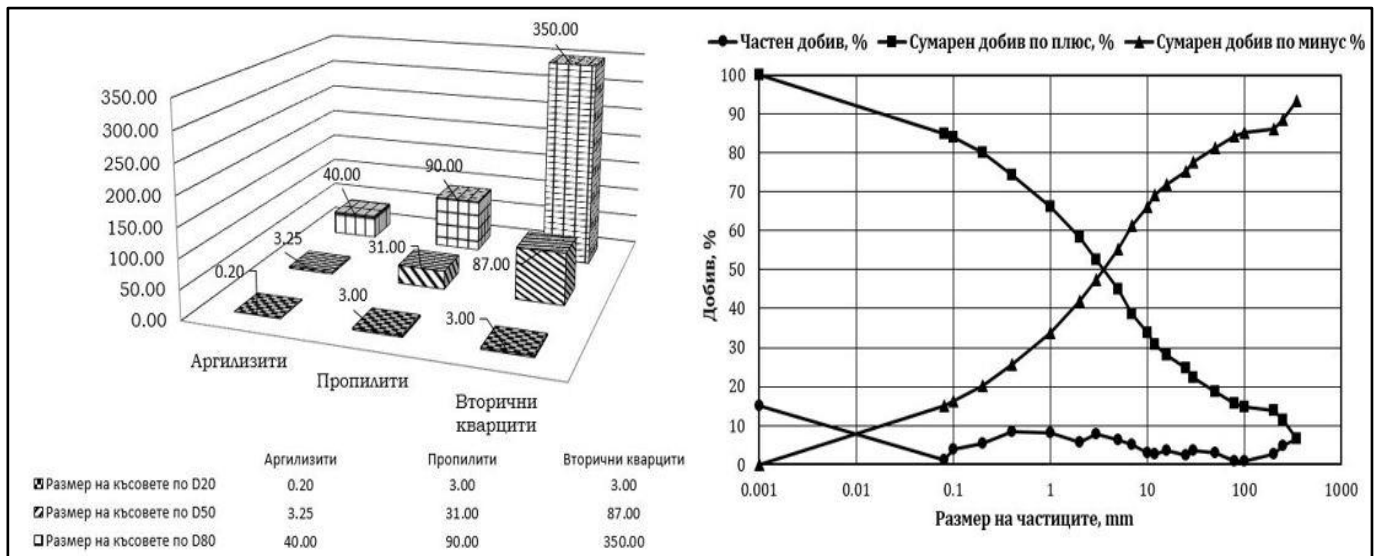
Където матрицата на известните коефициенти обозначаваме с A , а матрицата на свободните членове B в системата получава вида:

$$B = \begin{bmatrix} S_{1n} \\ S_{2n} \\ \dots \\ S_{mn} \end{bmatrix} \quad (V. 10)$$

VI. Експериментална част

VI. 1. Изследване на корпус „Едро трошене“

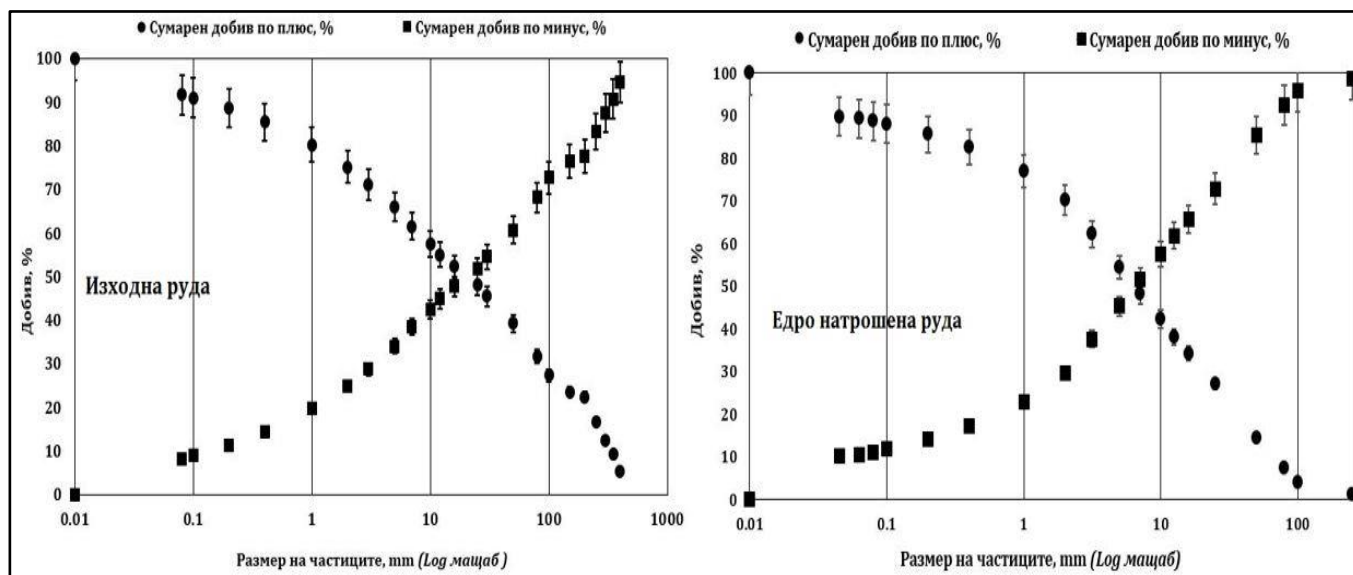
Зърнометричните характеристики на трите типа изследвани руди са разработени по модела на алгоритъма за изчисляване на зърнометрични характеристики.



Фигура VI. 1. Зърнометрична характеристика на рудата от типа Аргилизити (отляво) и разпределение на характерните едрини в трите типа опробвани руди (отдясно)

Нарастването на стойностите на d_{20} , d_{50} и d_{80} в реда аргилизити, пропиликти и вторични кварцити е свързано с характеристиката на типа вместващи скали на рудата и съдържанието на

глинест компонент в нея, което също така се потвърждава и от извършения минераложкия анализ.



Фигура VI. 2. Зърнометрични характеристики на изходната и натрошената руда в корпус „Едро трошене“

Получените зърнометрични характеристики по плюс и по минус намаляват/нарастват сравнително гладко. Доверителните отклонения в 5.00 % база на грешката, показват възможност за още по-плавно изравняване на графиките, откъдето можем да направим заключението, че е получена добра функционална зависимост от експерименталните резултати. Въз основа на това, без да се извършват други специални изследвания за точността на анализа може да се твърди, че резултатът от опробването и обработката на данните са достатъчно прецизни и са извършени с необходимата точност.

VI. 1. 1. Анализ на резултатите от изследването на трите типа руди и корпус „Едро трошене“

Въз основа на получените резултати и техния анализ, биха могли да се направят следните по-важни изводи:

Корпус „Едро трошене“ работи стабилно и осигурява суровина със сходство във веществения състав и технологичните показатели - зърнометричен състав, влага и количество. За периода на опробване установената производителност на корпуса е над средната, заложена в технологичния проект на обогатителната фабрика.

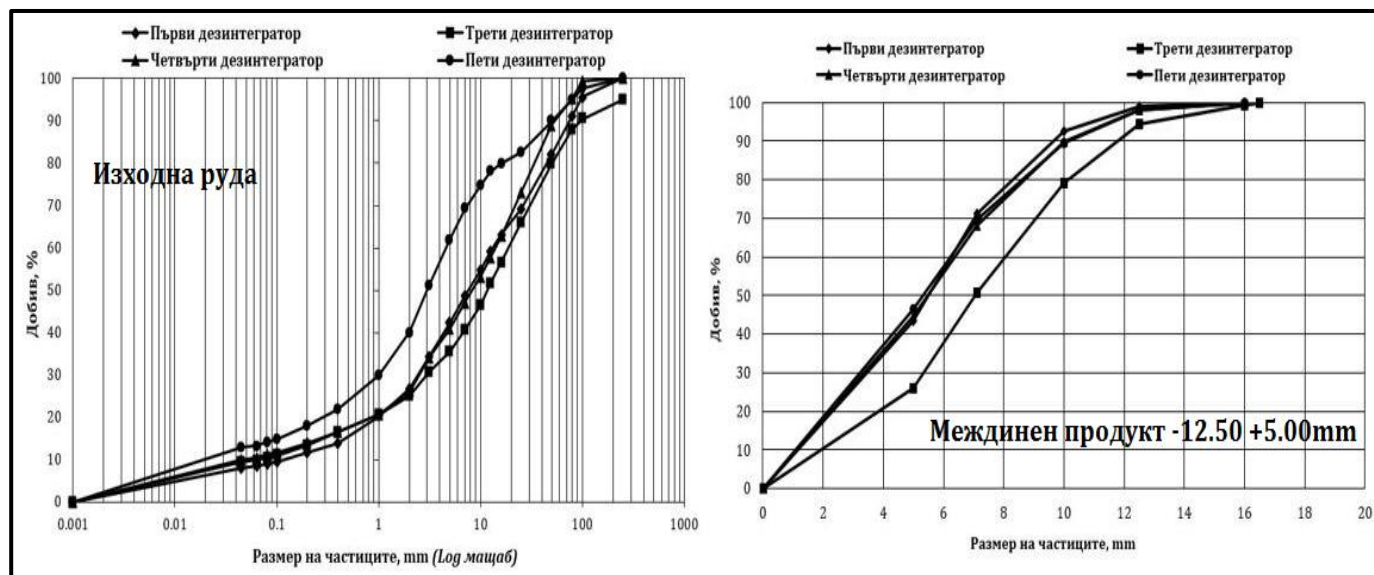
Изчислените зърнометрични характеристики на трите типа руди показват, че късове с едрина +100.00 mm се съдържат основно във вторичните кварцити, а средните (-10.00 +0.00) и ситните (-1.00 +0.00 mm) класи преобладават в рудата от типа аргилизити. Количествено разпределение на частиците според размера показва високо съдържание на класи -5.00 +0.00 и -3.00 +0.00 mm, съответно 34.00 и 29.00 %. Която и да е от посочените фракции, заема значителна част от ефективния работен обем на челюстните трошачки ЩДП 21 x 15.

Основни носители на фините класи са аргилизитите и пропицитите. От извършения химичен анализ на представителни проби от трите типа руди се установява високо съдържание на мед в следните класи: -0.400 +0.200 mm; -0.200 +0.100 mm; -0.100 +0.080 mm.

VI. 2. Изследване на отделение „Дезинтеграция“

VI. 2. 1. Определяне на зърнометричните характеристики на изследваните продукти

Зърнометричните характеристики на изследваните продукти (фигура VI. 3) са разработени по модела на алгоритъма за изчисляване на зърнометричните характеристики.



Фигура VI. 3. Зърнометрични характеристики на изследваните продукти в отделение „Дезинтеграция“

Съдържанието на класа +80.00 mm в рудата, захранваща четирите изследвани дезинтегратора е ниско за процеса автогенно смилане. За постигане на висока производителност е необходимо съдържанието на тази класа да не е по-малко от 35.00 %. Това предполага, че в дезинтеграторите се извършват основно процеси на промиване и класификация и в по-малка степен на смилане.

Зърнометричните характеристики на надситовите продукти на външната пресевна повърхност (размер на отворите 5.00 mm), показват високото съдържание на класа -5.00 +0.00 mm, вариращо в границите от 26.00 до 46.00 %.

VI. 2. 2. Определяне разделителната едрина на зърната при пресяване в двойното барабанно сито на всеки от изследваните дезинтегратори

Разделителната едрина на зърната при пресяване в двойното барабанно сито на всеки от изследваните дезинтегратори е определена по модела алгоритъма за изчисляване на разделителната едрина при процесите на пресяване и класиране (Вж. V. 2. 3.)

Определените стойности на разделителните зърна (фигура VI. 4) при обработката на резултатите от извършените експериментални изследвания в отделение „Дезинтеграция“, показват значително по-високата ефективност на разделяне на вътрешната пресевна повърхност (12.50 mm) в сравнение с ефективността на външната (5.00 mm).



Фигура VI. 4. Стойности на разделителните едрини за пресевните повърхности на изследваните барабанни сита

VI. 2. 3. Изчисляване на разделителните характеристики за вътрешната (12.50 mm) и външната (5.00 mm) пресевни повърхности на изследваните дезинтегратори

На база разработения алгоритъм за изчисляване на разделителните характеристики при процесите на пресяване и сортиране (Вж. точка V. 2. 2), в таблица VI. 1 са представени получените резултати (разделителна едрина и показатели на остротата на разделяне) за изследваните пресевните повърхности (12.50 и 5.00 mm) на двойните барабанни сита в отделение “Дезинтеграция”.

Таблица VI. 1. Показатели на остротата на разделяне за пресевните повърхности на изследваните дезинтегратори

Дезинтегратор №	Пресевна повърхност с размер	ПАРАМЕТРИ			
		Разделителна едрина по d_{50}	Вероятност на Ecart (E_s)	Несъвършенство (Γ)	Разсейване на зърната (k)
I	12.50 mm	9.80 mm	1.750	0.178	1.43
	5.00 mm	2.60 mm	1.250	0.480	2.92
III	12.50 mm	11.50 mm	1.125	0.098	1.21
	5.00 mm	3.50 mm	1.150	0.328	2.00
IV	12,50 mm	10.50 mm	1.975	0.188	1.44
	5.00 mm	2.75 mm	1.250	0.454	2.25
V	12.50 mm	11.75 mm	2.000	0.170	1.42
	5.00 mm	3.00 mm	1.650	0.550	2.50

След като е определен интервала на припокриване при обработката на резултатите от извършеното изследване на отделение „Дезинтеграция“, като разстоянието между d_{min} за надситовия и d_{max} за подситовия продукт анализираме правилото, че колкото е по-широк интервала на припокриване толкова е по-ниска остротата на разделяне (Вж. V. 2. 3). Забелязва се, че вътрешните пресевни повърхности на изследваните барабанни сита дават тесен интервал

на припокриване, а външните - широк, т.е. ефективността на пресяване на ситата с размер 12.50 mm е значително по-висока от ефективността на пресяване на тези с размер 5.00 mm. Това се прецизира и от построените разделителни характеристики, които дават максимално точния размер на разделителното зърно, а големината на площите идентифицира разсейването на зърната.

VI. 2. 4. Изчисляване на ефективността на пресяване на двойните барабанни сита на изследваните дезинтегратори

Ефективността на пресяване на двойните барабанни сита е изчислена по модела на алгоритъма за изчисляване на ефективността на процесите пресяване и класиране (Вж. V. 2. 4).

Получените резултати за ефективността на пресяване на двойните барабанни сита на изследваните дезинтегратори са представени в таблица VI. 2.

Таблица VI. 2. Ефективност на пресяване за изследваните барабанни сита в отделение „Дезинтеграция“

Дезинтегратор №	Пресевна повърхност с размер	Ефективност на пресяване			
		E_1	E_2	$E = E_1 \cdot E_2$	E_{qs}
I	12.50 mm	0.9403	0.9872	92.72 %	97.16 %
	5.00 mm	0.9992	0.9176	91.68 %	91.75 %
III	12.50 mm	0.9660	0.9920	95.83 %	95.65 %
	5.00 mm	1.000	0.9468	94.75 %	94.70 %
IV	12.50 mm	0.9836	0.9883	97.21 %	98.39 %
	5.00 mm	0.8408	0.8997	75.64 %	89.97 %
V	12.50 mm	0.9838	0.9968	98.07 %	99.27 %
	5.00 mm	0.8576	0.8845	75.86 %	89.93 %

Получените резултати показват, че ефективността на пресяване за вътрешната пресевна повърхност на двойните барабанни сита е значително по-висока, в сравнение с външната, което също така се потвърждава и от определените в точка разделителни едрини и характеристики на изследваните пресевни повърхности.

След пресяване в двойното барабанно сито (двойна бутара) на всеки дезинтегратор в надситовия продукт (-12.50 +5.00 mm), постъпващ в „Междинни бункери“ се съдържа висок процент класа -5.00 +0.00 mm. При извършеното изследване на работещите дезинтегратори съдържанието на тази класа е средно 40.00 % или общо 85.00 t/h.

VI. 2. 5. Определяне ефективността на смилане, производителност и степен на натоварване на оборудването в отделение „Дезинтеграция“

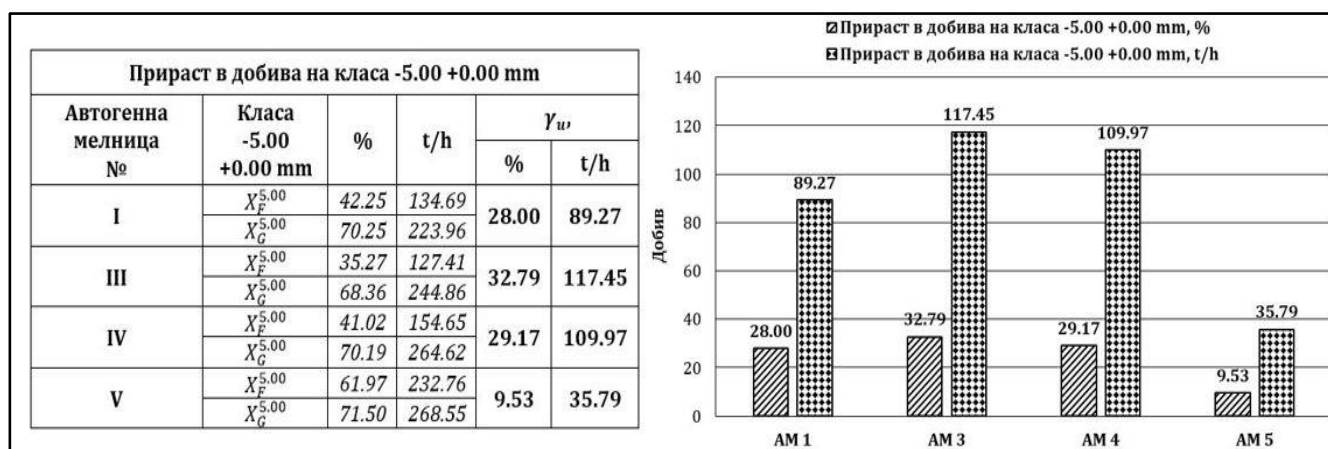
В съответствие с размера на отворите на пресевните повърхности на двойните барабанни сита, бяха избрани три зърнометрични фракции за които да бъде отчетена ефективността на смилане (фракции +12.50 mm и -12.50 +5.00 mm) и прираст в добива (фракция -5.00 +0.00 mm) на подситовия продукт, постъпващ в отделение „Мелнично“.

Обобщените резултати от извършените изчисления за представени на фигури VI. 5 и VI. 6, където $X_F^{\text{класа,mm}}$ - % съдържание на изследваната фракция в изходната руда; $X_G^{\text{класа,mm}}$ - % съдържание на изследваната фракция в смляната руда, а прирастът в добива (γ_u) на подситовия

продукт (класа -5.00 +0.00 mm), представяме като разликата между съдържанието на съответната класа в изходната руда и в смления материал, постъпващ на пресяване в двойните барабанни сита.

Ефективност на смилане по класа +12.50 mm					Ефективност на смилане по класа -12.50 +5.00 mm				
Автогенна мелница №	Класа +12.50 mm	%	t/h	E_g , %	Автогенна мелница №	Класа -12.50 +5.00 mm	%	t/h	E_g , %
I	$X_F^{12.50}$	40.76	129.94	48.77	I	$X_F^{12.50+5.00}$	16.99	54.16	41.30
	$X_G^{12.50}$	20.88	66.56			$X_G^{12.50+5.00}$	9.97	31.79	
III	$X_F^{12.50}$	48.45	173.55	56.16	III	$X_F^{12.50+5.00}$	15.98	57.24	35.29
	$X_G^{12.50}$	21.24	76.08			$X_G^{12.50+5.00}$	10.34	37.04	
IV	$X_F^{12.50}$	42.27	159.36	52.64	IV	$X_F^{12.50+5.00}$	16.71	63.00	41.41
	$X_G^{12.50}$	20.02	75.47			$X_G^{12.50+5.00}$	9.79	26.91	
V	$X_F^{12.50}$	21.99	82.59	10.60	V	$X_F^{12.50+5.00}$	16.04	60.25	45.00
	$X_G^{12.50}$	19.66	73.84			$X_G^{12.50+5.00}$	8.84	33.20	

Фигура VI. 5. Ефективност на смилане по фракции +12.50 mm и -12.50 +5.00 mm



Фигура VI. 6. Прираст в добива на класа -5.00 +0.00 mm

Стойностите на определените ефективности на смилане за характерните класи показват, че за фракция +12.50 mm се постига висока ефективност, като тя варира в рамките на 48.0 – 56.0 %, а за фракция -12.50 +5.00 mm, варира в границите на 35.0 – 45.0%. Това показва, че с посочените проценти е редуцирано съдържанието на съответните класи в смляната руда по отношение на съдържанието ѝ в изходната руда.

Стойностите на определените прирасти в добива на класа -5.00 +0.00 mm в смления продукт показват, че се постига значителен прираст по готов продукт в границите от 35.00 до 117.00 t/h.

VI. 2. 6. Анализ на резултатите от изследването на отделение „Дезинтеграция“

Сравнението на изчислените зърнометрични характеристики посредством разработения алгоритъм показва, че рудата постъпваща за преработка в автогенните мелници е с идентично разпределение за периода на изследване на отделението. Съществена разлика се наблюдава в пети дезинтегратор, където от построените зърнометрични криви се установява значително по-високото съдържание на ситни и фини класи.

Установява се високо съдържание на ситни (-5.00 +0.00 mm) и фини класи (-0.100 +0.00 mm) средно около 50.00 % в рудата, което оказва влияние върху процеса автогенно смилане.

Резултатите от графично представените зърнометрични характеристики, показват, че се постига висока ефективност на смилане по разчетни класи $-80.00 +12.50$ и $-12.50 +5.00$ mm. Също така, в изследваните автогенни мелници се реализира значителен прираст в добива на ситните класи $-5.00 +0.00$ mm. Получените резултати показват, че при съдържание на твърда фаза в пулпа близки до оптималния диапазон $60.00 - 65.00$ % се постига най-висок прираст на класата. Установява се, че може да бъде постигнато нарастване на количеството на тази класа до приблизително 120.00 t/h.

Изчислените стойности на разделителните едрини на зърната, разделителни характеристики и ефективностите на разделяне за двойните барабанни сита на всеки от изследваните дезинтегратори показват, че ефективността на пресяване на сито с размер 12.50 mm (вътрешна пресевна повърхност на всички дезинтегратори) е значително по-висока от ефективността на пресяване на външната пресевна повърхност (5.00 mm). Ефективността на пресяване за външната пресевна повърхност за всички дезинтегратори очевидно е незадоволителна.

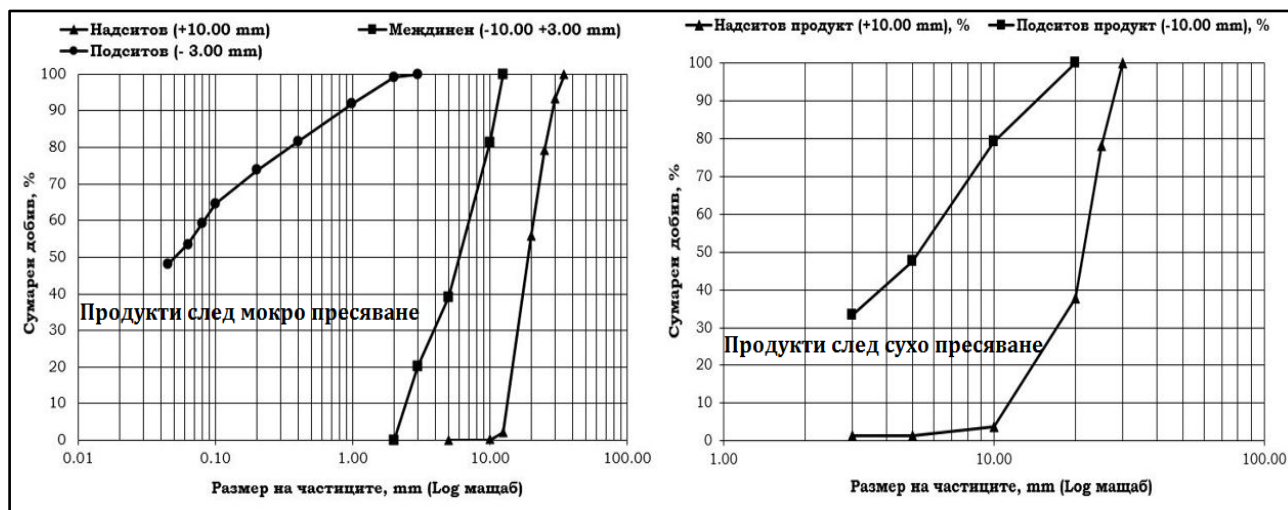
Установява се непостоянство в дебита и съдържанието на твърда фаза в продукта $-5.00 +0.00$, постъпващ заедно с прелива от топковите мелници на класиране. Това естествено би довело до по-ниска ефективност на класиране в батериите хидроциклони на „Мелнично отделение“. Това допускане се потвърди с резултатите, получени посредством алгоритъма за изчисляване на ефективността на процесите пресяване и класиране при изследването на „Мелнично отделение“.

VI. 3. Изследване на корпус „Средно и ситно трошене“

VI. 3. 1. Определяне на зърнометричните характеристики на изследваните продукти

Зърнометричните характеристики на изследваните продукти са разработени по модела на алгоритъма за изчисляване на зърнометричните характеристики.

На фигури VI. 7 са представени зърнометричните характеристики на продуктите след мокро (след средно трошене) и сухо (след ситно трошене) пресяване в корпус „Средно и ситно трошене“.



Фигура VI. 7. Зърнометрични характеристики на част от изследваните продукти в корпус „Средно и ситно трошене“

VI. 3. 2. Определяне на разделителната едрина на зърната за вибрационните пресевни уредби в корпус „Средно и ситно трошене“

Разделителната едрина на зърната при пресяване в инсталираните вибрационни пресевни уредби в корпус „Средно и ситно трошене“ е определена по модела на алгоритъма за изчисляване на разделителната едрина при процесите на пресяване и класиране.

В таблица VI. 3 са представени получените резултати за d_{min} , d_{max} и разделителната едрина (D_p) за пресевните повърхности на изследваните вибрационни пресевни уредби.

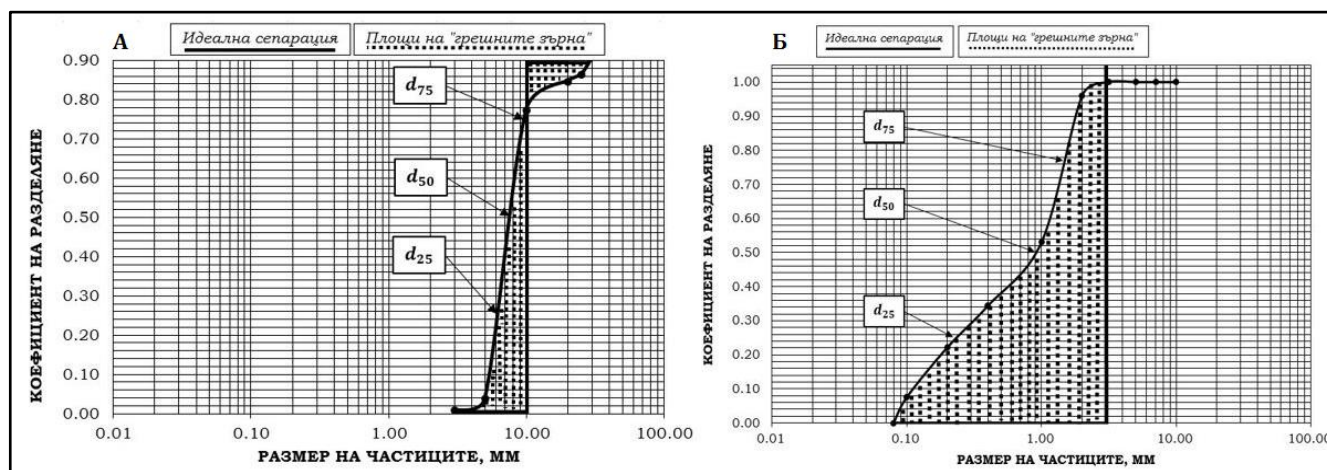
Таблица VI. 3. Резултати от извършените изчисления

Вибрационна пресевна уредба	Размер на отворите на пресевните повърхности, mm	Разделително зърно (D_p), mm	d_{min} в надситовия продукт, mm	d_{max} в подситовия продукт,
MF3073 – 2	10.00	8.75	5.00	12.50
	3.00	2.00	1.00	3.00
KS 1P 6.0 x 2.5	10.00	8.75	5.00	12.50

Данните, получени от ситовите анализи на трите продукта (захранване, надситов и подситов продукт) показват, невисоката ефективност на работата на вибрационната пресевна уредба KS 1P 6.0 x 2.5. По документация ситовата повърхност на пресевната уредба (контролно пресяване след ситно трошене) е с размер на отворите на ситото 10.00 mm. Същевременно ситовата характеристика на подситовия продукт завършва отгоре при 21.00% +10.00 mm, което би съответствало на максимален размер около d_{max} - 12.50 mm.

VI. 3. 3. Изчисляване на разделителните характеристики за вибрационните пресевни уредби в корпус „Средно и ситно трошене“

На база разработеният алгоритъм за изчисляване на разделителните характеристики при процесите на пресяване и сортиране на фигура VI. 8 (разделителни характеристики) и таблица VI. 4, са представени получените резултати (разделителна едрина и показатели на остротата на разделяне) за изследваните ситови повърхности на вибрационните пресевни уредби в корпус „Средно и ситно трошене“.



Фигура VI. 8. Разделителни криви за горната (А) и долната (Б) ситови повърхности на вибрационна уредба MF3073 – 2

Таблица VI. 4. Показатели на остротата на разделяне за ситовите повърхности на изследваните пресевни уредби

Вибрационна пресевна уредба	Размер на отворите, mm	ПАРАМЕТРИ			
		Разделителна едрина по d_{50}	Вероятност на Ecart (E_s)	Несъвършенство (I)	Разсейване на зърната (k)
MF3073 – 2	10.00	8.00	1.875	0.234	1.625
	3.00	0.900	0.635	0.705	6.522
KS 1P 6.0 x 2.5	10.00	11.00	4.30	0.391	2.16

Очевидно работата на долната пресевна повърхност е много „несъвършена“ и има прекалено голямо разсейване на зърната. Тези два синтезирани показателя отразяват недобрата работа на изследваната ситова повърхност (фигура VI. 8Б), при която разделителната крива е изнесена почти изцяло отляво на вертикалната линия $d_{3.00}$ mm. Силно наклонена и притежаваща три инфлексни точки в сравнение с фигура VI. 8А на която в преобладаващата част разделителната крива е права, стръмна и като се изключи изкривяването в дясно след точката $d_{10.00}$ mm, показва добра закономерност и задоволителна симетричност по отношение на разделителното зърно d_{50} .

За работата на горната пресевна повърхност (10.00 mm) е значително по-приемлива и е оправдан този вид на разделителна крива, в смисъл, че е спазено правилото висока производителност на пресевната повърхност, за сметка на по-ниска ефективност на пресяване. На практика разделителната едрина $d_{50}=8.00$ mm не е толкова далече от размера на отворите на ситото 10.00 mm. Очевидно лошите технологични показатели на долната пресевна повърхност (3.00 mm) показват, че ефективността ѝ на работа е далеч от приемливите стойности.

VI. 3. 4. Изчисляване ефективността на пресяване на вибрационните пресевни уредби в корпус „Средно и ситно трошене“

Ефективността на пресяване на работещите в корпус „Средно и ситно трошене“ вибрационни пресевни уредби, изчисляваме по алгоритъма за изчисляване ефективността на пресяване при процесите на пресяване и класиране, представен в точка V. 2. 4.

Получените резултати за ефективността на пресяване на изследваните вибрационни пресевни уредби са представени в таблица VI. 5.

Таблица VI. 5. Ефективност на пресяване за изследваните вибрационни пресевни уредби в корпус „Средно и ситно трошене“

Вибрационна пресевна уредба	Размер на отворите, mm	E_1	E_2	Обща ефективност - E	Коефициент на качеството на пресяване - E_{qs}
MF3073 – 2 (мокро пресяване)	10.00	0.6294	1.3257	83.44	86.20
	3.00	0.9998	0.572	57.19	57.20
KS 1P 6.0 x 2.5 (сухо пресяване)	10.00	0.6667	0.9805	65.37	64.74

Изчислената ниска ефективност на пресяване на долната ситова повърхност на вибрационното сито MF3073-2, се съгласува с коментарите по отношение на показателите несъвършенство и разсейване в таблица VI. 4, съответно разделителните криви (фигура VI. 8 А, Б) и може да се дължи на:

- ❖ Нарушения в целостта на горната пресевна повърхност (10.00 mm), водещо до високо съдържание на класа +10.00 mm (18.64 %) в надситовия продукт на долната пресевна повърхност (3.00 mm);
- ❖ Неефективно промиване и класиране на долната пресевна повърхност, за което говори високото съдържание в надситовия продукт на класа -3.00 mm – 20.12 %.

Определената невисока ефективност на пресяване на вибрационна пресевна уредба KS 1P 6.0 x 2.5, вероятно се дължи на нарушения в целостта на пресевните повърхности (фракция +10.00 mm в подситовия продукт е приблизително 21.0 %).

Ефективността на пресяване може да се дефинира като критерий за качеството на разделянето, което постига пресевната уредба (ситото). Проблемите, създавани от ситото при неефективна работа могат да бъдат систематизирани като претоварване на операциите на средно и ситно трошене при въведената схема на затворен цикъл. Ако ситото работи с ниска ефективност, то ще произвежда голям циркулиращ товар, част от готовия продукт ще се връща обратно в трошачката и ще снижава производителността на корпуса, ще претоварва транспортните устройства, самата пресевна уредба и спомагателното оборудване. Продуктите от пресяването няма да отговарят на поставените изисквания за 90 % съдържание на класа -10.00 в продукта, транспортиран към „Междинни бункери“.

VI. 3. 5. Анализ на резултатите от изследването на корпус „Средно и ситно трошене“

Извършените изследвания в корпус „Средно и ситно трошене“ показват, че производителността в корпуса е над средната заложена в работния проект на обогатителната фабрика. Получените резултати от разработените алгоритми за изчисляване на разделителни характеристики, едрина на разделяне и ефективност на пресяване за работещите вибрационни пресевни уредби показват, че:

Установената невисока ефективност на горната ситова повърхност (10.00 mm) на вибрационна пресевна уредба MF 3073 – 2 се дължи основно на нарушения в целостта на пресевната повърхност.

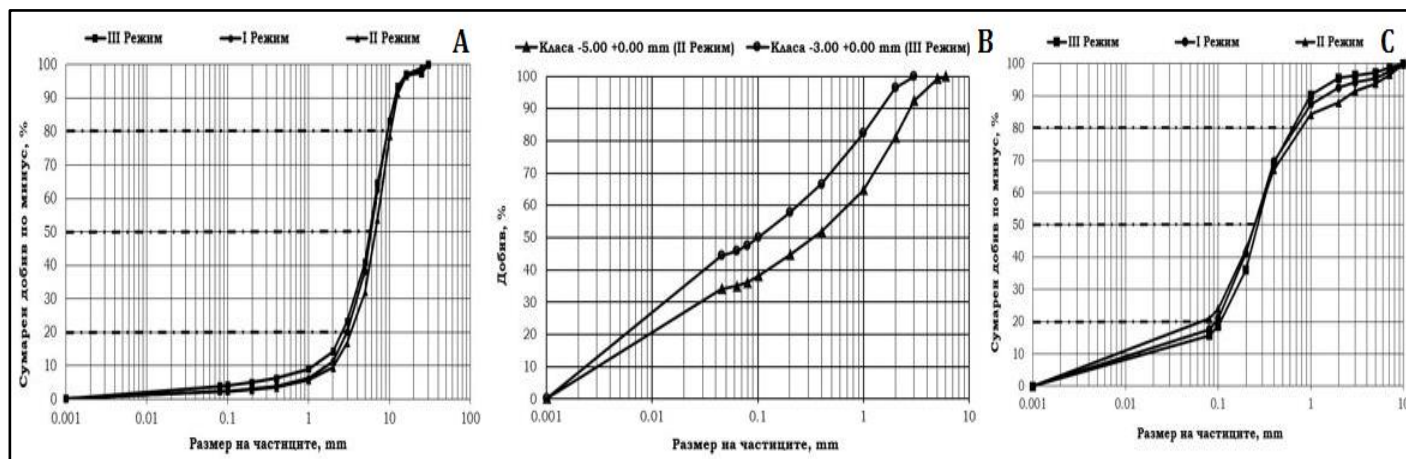
Долната ситова повърхност (3.00 mm) работи неефективно, като представената разделителна крива (фигура VI. 8Б) показва голямото разсейване на зърната, дължащо се основно на съдържанието на класи +10.00 mm (18.64 %) и -3.00 mm (20.12 %) в надситовия продукт на пресевната повърхност.

Вибрационна пресевна уредба KS 1P 6.0 x 2.5 преработваща рудата след ситно трошене, постига висока производителност по подситов продукт (-10.00 mm), постъпващ в „Междинни бункери“, но установеното 20.79 % съдържание на класа +10.00 mm в подситовия продукт е главната причина за сравнително ниската ефективност на пресяване.

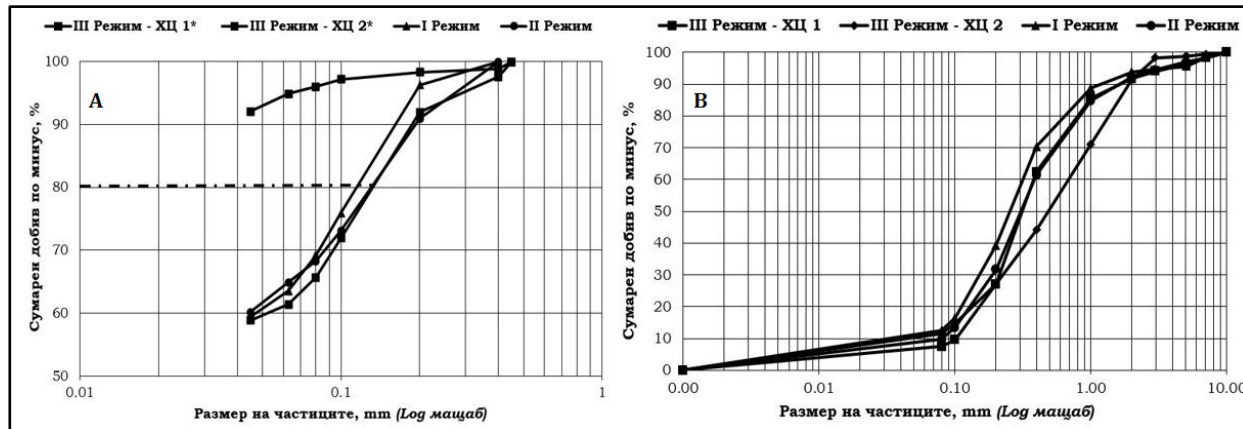
VI. 4. Изследване на отделение „Мелнично“

VI. 4. 1. Определяне на зърнометричните характеристики на изследваните продукти

Зърнометричните характеристики на изследваните продукти (фигури VI. 9 – VI. 10) са разработени по модела на алгоритъма за изчисляване на зърнометричните характеристики.



Фигура VI. 9. Зърнометрични характеристики на: изходната руда (A) от „Междинни бункери“, подситови продукти при II и III режим на работа (B) и смлени продукти от топковите мелница (C)



Фигура VI. 10. Зърнометрични характеристики на преливите (A) и пясъците (B) след класиране в батериите хидроциклони в отделение „Мелнично“

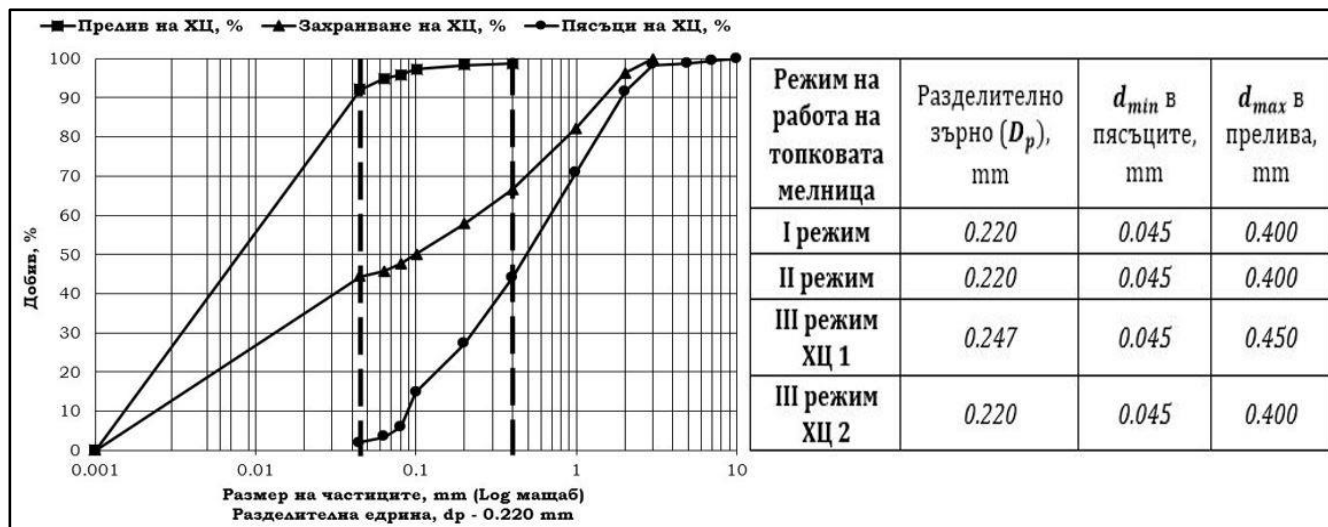
На показаните зърнометрични характеристики на рудата (фиг. VI. 9A), постъпваща на смилане в трите топкови мелници се забелязва наличието на зърна с едрина над 10.00 mm, като съдържанието им варира в границите на 16.50 – 22.00%, при различните режими на работа на мелниците. Количеството на зърната с подобна едрина, оказва съществено влияние върху производителността на смилачите апарати.

Установява се високо съдържание на разчетна класа (-100 μm) в двата подситови продукта – 38.04 и 50.03 %, съответно при II и III режим на работа на топковите мелници. Прави впечатление високото съдържание на класа -0.045 mm в подситовия продукт от корпус „Средно

и ситно трошене“.

VI. 4. 2. Определяне на разделителното зърно при класиране в цикъла на смилане

Разделителната едрина на зърната при класиране в цикъла на смилане е определена по модела на алгоритъма за изчисляване на разделителната едрина при процесите на пресяване и класиране.



Фигура VI. 11. Стойности на разделителните зърна за изследваните класиращи устройства

Интервалът на припокриване определяме, като разстоянието между $d_{0.045}$, съответно d_{min} за пясъците (фин шлам пренебрежимо количество, първата червена вертикална линия на фигура VI. 11, ляво) и $d_{0.400}$, съответно d_{max} за прелива (добив - 98.84 %, пренебрежимо количество до d_{max} , втората зелена вертикална линия на фигура VI. 11). Границите на интервала на припокриване са определени по този начин с презумпцията, че графиката на пясъците след $d_{0.045}$ към 0.00 mm следва асимптотично абсцисната ос и графика на прелива също се доближава до линията 100.00% добив. По този начин съответните участъци извън този интервал, „не оказват влияние“ на основната тенденция в зърнометричното разпределение и по тази причина могат да бъдат пренебрегнати.

VI. 4. 3. Определяне ефективността на класиране и добив на разчетна класа (-0.100 + 0.00 mm) в прелива на батериите хидроциклони

Ефективността на класиране за батериите хидроциклони изчисляваме по алгоритъма за изчисляване на ефективност на процесите пресяване и класиране. Ефективността на класиране в изследваните хидроциклони се изчислява по разликата в извличането на разчетната класа (-0.100 mm) в прелива и извличането на разчетната класа в пясъците на класиращото устройство.

Като обозначим с:

S_f - Съдържание на разчетен клас в захранването на хидроциклона;

S_o - Съдържание на разчетен клас в слива на хидроциклона;

S_u - Съдържание на разчетен клас в пясъците на хидроциклона

аналогично на показаното в точка V. 2. 4., за коефициента на качеството на разделяне E_{qs} за изследваните хидроциклони получаваме (Фигура VI. 12) следните резултати:



Фигура VI. 12. Ефективност на класиране и добив на разчетна класа за изследваните хидроциклони

VI. 4. 4. Определяне индекса на работата на Bond

Въз основа на разработения алгоритъм за определяне индекса на работата на Бонд (Bond Work Index), бяха проведени тестове по смилане с продукти от цикъла на „Зърнометрична подготовка на рудата“ в обогатителна фабрика „Асарел“.

Лабораторни тестове по смилане с топкова мелница на Бонд бяха извършени със следните продукти:

- ❖ Надситов продукт от външната пресевна повърхност на двойните барабанни сита в отделение „Дезинтеграция“. Продуктът с размер на зърната $-12.50 +5.00$ mm се транспортира към междинни бункери, където се складира и постъпва в работещите топкови мелници;
- ❖ Подситов продукт от външната пресевна повърхност на двойните барабанни сита с размер на зърната $-5.00 +0.00$ mm. Продуктът се транспортира към зумпфовете на топковите мелници, откъдето заедно със смления продукт, постъпва на класиране в батериите хидроциклони.

Резултатите за работния индекс на Бонд показват, че получените стойности (kWh/t) за подситовия продукт $-5.00 +0.00$ mm (Вж. фигура V. 10) са значително по-ниски в сравнение със стойностите за надситовия продукт ($+5.00$ mm), съответно **13.37** и **16.00 kWh/t**.

При процеса на дезинтеграция освен размиването на глинестата фракция, всъщност се оказва, че се извършва избирателно смилане, за което беше споменато в част I на дисертационния труд, при което по-лесно смиланите скални формации се концентрират в подситовата фракция $-5.00 +0.00$ mm, а по-трудно смиланите в надситовия продукт $+5.00$ mm. Чрез тестовите на Бонд получаваме една точна характеристика и количествена оценка за дробимостта и смилаността на материала, който в заложената схема на рудоподготовка се разделя на материал, постъпващ на „Средно и ситно трошене“ и продукт захранващ отделение „Мелнично“. Това на свой ред потвърждава тезата, че е много вероятно да си струва в дезинтеграторите да се засили елемента смилане, т.е. да се засили функцията им на автогенни мелници, което ще облекчи във висока степен последния стадий на зърнометричната подготовка – топково смилане в отделение „Мелнично“, където консумацията на електроенергия е най-висока.

VI. 4. 5. Изчисляване на баланса по зърнометрична класа (разчетна фракция) и по съдържание на твърда фаза за класиращите устройства

На база разработения алгоритъм за изчисляване на баланса по зърнометрична класа и съдържание на твърда фаза за класиращите устройства, представен в по-долу са представени получените резултати след извършените изчисления посредством вградените функции на Excel.

На фигура VI. 13 са показани получените резултати от извършените изчисления за баланса на масите в батерията хидроциклони при втори (руда от „Междинни бункери“ и подситов продукт от отделение „Дезинтеграция“) и трети (руда от „Междинни бункери“ и подситов продукт от корпус „Средно и ситно трошене“) режими на работа на топковите мелници. Балансът на масите за батерията хидроциклони при първи режим на работа (с руда от „Междинни бункери“) на топковата мелница е представен на фигура V. 10 по-горе.

Продукт	% тв. фаза	Степен на разреждане (Te/Tв)	β -100 µm, %
Захранване на ХЦ	57.29	0.746	26.55
Пясъци ХЦ	78.29	0.277	13.43
Предав ХЦ	29.35	2.407	73.11

Обща маса, отделена в долния продукт (пясъци)	
По разчетна фракция - 100 µm	78.02%
По съдържание на твърда фаза, %	78.02%

Продукт	% тв. фаза	Степен на разреждане (Te/Tв)	β -100 µm, %
Захранване на ХЦ	60.94	0.641	16.2
Пясъци ХЦ	73.87	0.354	9.61
Предав ХЦ	21.11	3.737	72.74

Обща маса, отделена в долния продукт (пясъци)	
По разчетна фракция - 100 µm	89.56%
По съдържание на твърда фаза, %	91.51%

Продукт	% тв. фаза	Степен на разреждане (Te/Tв)	β -100 µm, %
Захранване на ХЦ 2	8.66	10.547	50.03
Пясъци ХЦ 2	48.23	1.073	13.32
Предав ХЦ 2	4.12	23.272	99.12

Обща маса, отделена в долния продукт (пясъци)	
По разчетна фракция - 100 µm	57.21%
По съдържание на твърда фаза, %	57.32%

Фигура VI. 13. Резултати от извършените изчисления за баланса на масите на батериите хидроциклони при втори и трети режим на работа на топковите мелници

Изчислените баланси на масите за изследваните хидроциклони, базирани на получените зърнометрични данни (разчетна класа) и данните за съдържание на твърда фаза (% , тв.) потвърждават акуратността на получените данни от извършените експериментални изследвания.

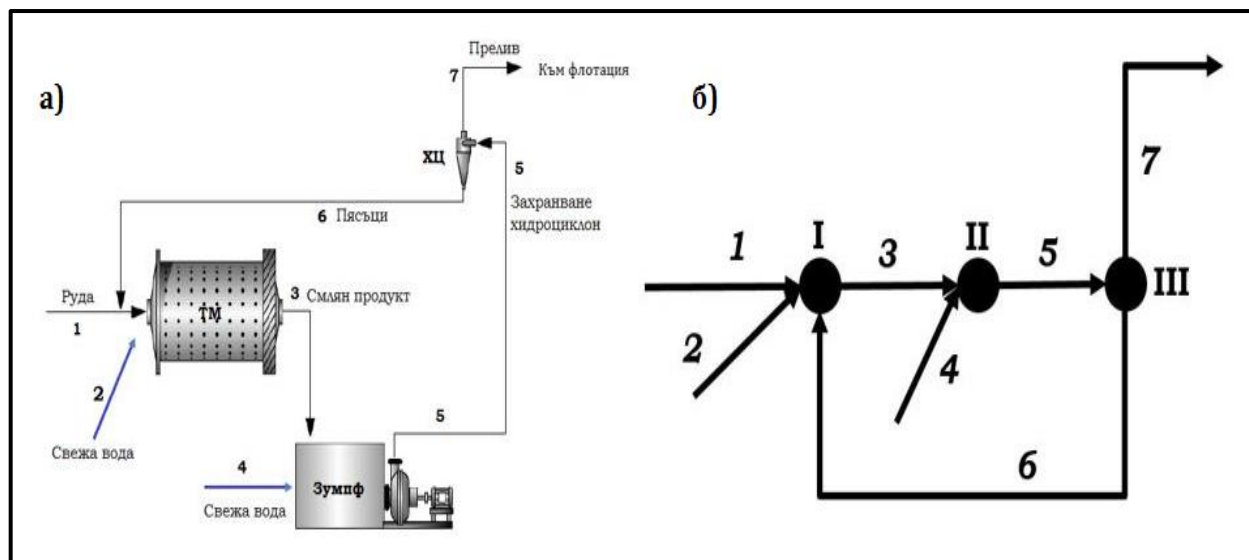
Представените на фигури V. 10 и VI. 13 резултати, показват относително високия добив на пясъците, връщани за досмилане в топковите мелници. Високият добив на пясъците, дължащ се основно на едрото смилане се потвърждава и от представените зърнометрични характеристики и съответно отчетените стойности на едрината на зърната в смлените продукти.

Както беше отбелязано в началото на дисертационния труд, събирането на данни за схемите на смилане обикновено включва в някаква степен излишък от данни, което позволява да се приложи кръстосана проверка на тези данни, по-специално на процента твърда фаза и зърнометричен състав. Ако се установи, че балансът на водите и балансът на зърнометриите не са в съгласие, малко вероятно е пробите да са представителни или се е появила някаква грешка.

VI. 4. 6. Балансови уравнения за схемата на смилане в затворен цикъл с хидроциклон

На база разработения алгоритъм за решаване на балансови уравнения за схемата на смилане в затворен цикъл с хидроциклон, представен в точка V. 2. 7, по-долу са показани получените резултати за изследваната топкова мелница, захранвана с руда от „Междинни бункери“ - I режим на работа на топковата мелница.

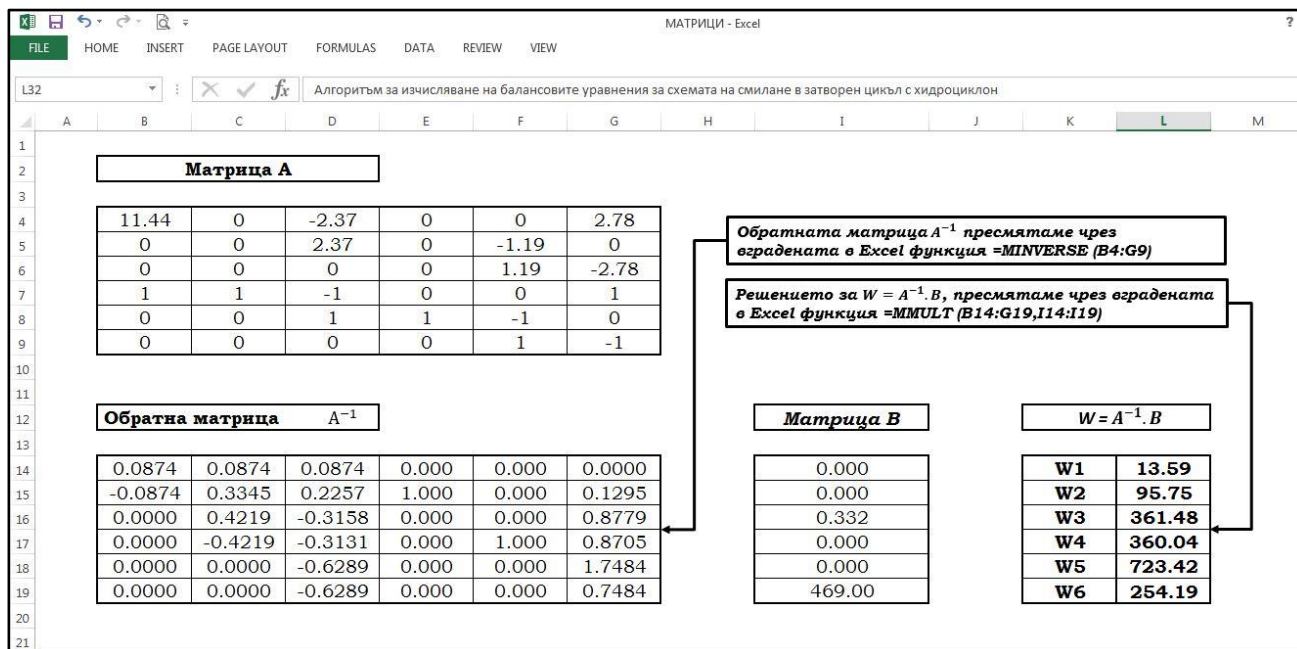
На фигура VI. 14а е представена схемата на смилане в затворен цикъл с хидроциклон (I режим на работа на топковата мелница)



Фигура VI. 14. Схема на смилане в затворен цикъл с хидроциклон (а); Граф на схемата на смилане в затворен цикъл с хидроциклон (б)

Алгоритъмът на решението в Excel с основна операция обръщане на матрицата A, за получаване на матрицата A^{-1} , използва инвертиращата, вградена в Excel функция *MINVERSE*, получаваме решението за $W=A^{-1} \cdot B$ (Вж. V. 2. 7. „Алгоритъм за решаване на балансовите уравнения за схемата на смилане в затворен цикъл с хидроциклон“)

Изчислителната процедура е показана на фигура VI. 15.



Фигура VI. 15. Решение на системата за водните количества в схемата на смилане в затворен цикъл с хидроциклон

Балансовите уравнения имат за база двупродуктовата формула и както беше показано в част I, „Литературен обзор“ на дисертационния труд, производните уравнения са много чувствителни към точността на стойностите на компонентите и оттам към степента на разделяне. При много ниски стойности на някои от компонентите в производните формули, просто казано се получават големи грешки в изчислените резултати. По тази причина изчисляването на извличането по съдържанията в материалните потоци при наличието на много ниски стойности на съдържанията в рудата и особено в крайния отпадък, се получават големи грешки при решението на задачата.

Известно е, че изчисляване на баланса посредством съдържанията в материалните потоци може да бъде прецизирано, като в двупродуктовата формула вместо съдържанията се използват добивите (отношенията на масите на твърдата фаза), с което силно се повишава точността на резултата. По аналогия с това твърдение за изчисляването на балансите на база разреждането в потоците, следва да се получава много добър резултат в точността на решенията. Това се потвърждава от получените посредством изчислителната процедура (фигура VI. 15) водни количества за изследваната схема, като грешката на резултата за решението (W) при сравняване с данни от действащата мелница се получава по-малка от 3.00 %. Тъй като това е задоволителен резултат, не се налага специално изследване за подбор на необходимия минимален брой линейно независими уравнения за основната матрица на схемата. Опитът да се направи паралелно изчисление за потоците пулп се оказва неуспешен, тъй като някои от коефициентите в алгебричните уравнения са неопределени числа (цяло делено на нула за потоците от свежа вода). В този случай изчисляването на схемата по такива показатели не позволява акуратно дефиниране на балансови уравнения за възлите, което ни принуждава да сравняваме резултатите по експериментални данни (опробвания) в действащата схема.

VI. 4. 7. Анализ на резултатите от изследването на отделение „Мелнично“

За периода на изследване на отделение „Мелнично“ средната производителност на топковите мелници е в съответствие със зададената в техническата характеристика на наличното оборудване. Анализът на зърнометричния състав и влагата на входящите и изходящите продукти в „Мелнично“ отделение показват, че рудата, постъпваща на смилане в опробваните топкови мелници е с близко до заложеното 90.00 % съдържание на класа -10.00 +0.00 mm.

Резултатите от графично представените зърнометрични характеристики на смлените продукти в изследваните топкови мелници показват, че се постига едро смилане при невисоко съдържание на класа -0.100 +0.00 mm в преливите на смилачите апарати.

Установеното непостоянство в зърнометричния състав на смления продукт, съдържание на твърда фаза и дебит, неминуемо води до влошаване и затруднения в последващата класификация в батериите хидроциклони. Непостоянството в технологичните параметри и различните режими на работа на мелниците, водят до постигане на различни степени на смилане за топковите мелници.

Установен е висок процент циркуляционен товар с завишено съдържание на разчетна класа (-0.100 +0.00 mm) над 16.00%, което затруднява смилането и води до намаляване ефективността на работа на смилачите апарати. Високото съдържание на разчетна класа в пясъците на хидроциклоните, които се явяват циркуляционен товар на топковите мелници, намалява ефективността на смилане поради редуцирането на едрината на частиците в общото хранване на мелниците и повишаване вискозитета на пулпа в нея. При съществуващото натоварване на мелниците, запълване с топков товар, честота на въртене на барабана, профил на облицовката, както и поддържаните технологични параметри се осигурява съдържание на разчетна класа -0.100 +0.00 mm в границите от 16.00 до 25.00 %, в мелниците с различен режим на работа. Практиката за подобни руди показва, че е възможно постигане на по-високо процентно съдържание на разчетна класа в продукта след смилане.

Изчислената на база разработеният алгоритъм ефективност на класиране в хидроциклоните варира в широки граници. За периода на изследване ефективността на класиране е в границите от 26.00 до 80.00%, при различните режими на работа на мелничните агрегати. Непостоянството в зърнометричния състав, дебитът, съдържанието на твърда фаза в продукта, хранващ батериите хидроциклони са основните причини за тази силно променлива ефективност на класиране.

Получените резултати от алгоритъма за изчисляване баланса на масите на класиращите устройства (ХЦ), потвърждават представителността на получените данни (% , тв. фаза, зърнометричен състав) от извършените експериментални опробвания, като същевременно се установява и невисокият добив на преливите, постъпващи на флотация.

Изчислените зърнометрични характеристики, обемът (m^3/h), количеството на готовия продукт и съдържанието на твърда фаза в преливите на хидроциклоните от трите режима на работа на мелничните агрегати са различни. Това неминуемо води до непостоянство в продукта, постъпващ във флотационно отделение, което от своя страна се отразява върху технологичните показатели на флотационния процес. Преливите на хидроциклоните, получавани и при трите режима на работа на мелничните агрегати са със съдържание на разчетна класа в границите от 72.00 до 76.00 %, при колебания в съдържанието на твърда фаза в тях от 21.00 до 30.00 %. Резултатите от алгоритъма за изчисляване на баланса по зърнометрична класа (разчетна фракция) и по съдържание на твърда фаза за класиращи устройства показват, че в конкретния случай добивът на прелива получава при различните режими на работа на изследваните топкови мелници, варира в много широки граници от 7.00 до 43.00%. Това води до непостоянство в дебита на пулпа, съдържание на твърда фаза и зърнометричен състав на

продукта, постъпващ на флотация. Мелничните агрегати, работещи в различните режими на хранване не осигуряват съдържание на разчетен клас в прелива от 80.00 % -0.100 +0.00 mm.

VII. Общи изводи

1. Изчислените зърнометрични характеристики на изследваните три типа руди показват, че късове с едрина +100.00 mm се съдържат основно във вторичните кварцити, а средните (-10.00 +0.00) и ситните (-1.00 +0.00 mm) класи преобладават в рудата от типа аргилизити. Основни носители на фините класи са аргилизитите и пропицитите. Химичният състав на ситните им фракции, показва значително по-високо от номиналното съдържание на мед, като в първите преобладава в пъти повече.
2. Установява се високо съдържание на ситни (-5.00 +0.00) и фини класи (-0.100 mm) в рудата, постъпваща в отделение „Дезинтеграция“. Резултатите от обработката на данните от изследването, посредством приложените алгоритми показват, че това високо съдържание на ситни и фини класи оказва влияние върху процеса автогенно смилане.
3. Резултатите от графично представените зърнометрични характеристики показват, че се постига висока ефективност на смилане по разчетни класи -80.00 +12.50 и -12.50 +5.00 mm. В изследваните автогенни мелници се реализира значителен прираст в добива на ситните класи -5.00 +0.00 mm.
4. Изчислените стойности на разделителните едрини на зърната, разделителни характеристики и ефективностите на разделяне за двойните барабанни сита на всеки от изследваните дезинтегратори показват, че ефективността на пресяване на сито с размер 12.50 mm (вътрешна пресевна повърхност) е значително по-висока от ефективността на пресяване на външната пресевна повърхност (5.00 mm). Ефективността на пресяване за външната пресевна повърхност за всички дезинтегратори очевидно е незадоволителна.
5. Установява се непостоянство в дебита и съдържанието на твърда фаза в подситовия продукт -5.00 +0.00 mm от дезинтеграторите. Този продукт, постъпва заедно с прелива от топковите мелници на класиране. Това естествено би довело до по-ниска ефективност на класиране в батериите хидроциклони на „Мелнично отделение“. Това допускане се потвърди, с резултатите получени посредством алгоритъма за изчисляване на ефективността на процесите пресяване и класиране при изследването на „Мелнично отделение“.
6. Изчислените стойности за ефективността на пресяване на двудековата пресевна уредба MF 3073 – 2 показват, че долната ситова повърхност (3.00 mm) работи неефективно. Това се потвърждава от характера на разделителната крива, показваща съществено разсейване на зърната, дължащо се основно на съдържанието на класи +10.00 mm и -3.00 mm в надситовия продукт на пресевната повърхност.
7. Вибрационна пресевна уредба KS 1P 6.0 x 2.5, преработваща рудата след ситно трошене, постига висока производителност по подситов продукт (-10.00 mm), постъпващ в „Междинни бункери“. Поддържаната висока производителност е главната причина за сравнително ниската ефективност на пресяване - 20.79 % съдържание на класа +10.00 mm в подситовия продукт.
8. Резултатите от графично представените зърнометрични характеристики на смлените продукти в изследваните топкови мелници в отделение „Мелнично“ показват, че се постига едро смилане при невисоко съдържание на разчетна класа (-0.100 +0.00 mm) в преливите на смилачите апарати. На практика се реализира недобро разкриване на рудните минерални

фази. Установява се непостоянство в зърнометричния състав, съдържанието на твърда фаза и дебита на смлените продукти.

9. Изчислената на база разработения алгоритъм ефективност на класиране в хидроциклоните варира в широки граници (26.00 - 80.00%). Непостоянството в зърнометричния състав, дебита, съдържанието на твърда фаза в продукта, захранващ батериите хидроциклони са основните причини за тази силно променлива ефективност на класиране.
10. Високият процент циркуляционен товар със завишено съдържание на разчетна класа (-0.100 +0.00 mm) води до затруднения в процеса смилане и намалява ефективността на работа на смилещите апарати. Преливите на хидроциклоните и при трите режима на работа на мелничните агрегати са със съдържание на разчетна класа в границите от 72.00 до 76.00 %, при колебания в съдържанието на твърда фаза в тях от 21.00 до 30.00 %. Резултатите от решаването на баланса чрез прилагане на алгоритъма за изчисляване по зърнометрична класа (разчетна фракция) и по съдържание на твърда фаза за класиращи устройства показват, че в конкретния случай добивът на прелива получаван при различните режими на работа на изследваните топкови мелници, варира в много широки граници от 7.00 до 43.00 %. Това води до непостоянство в дебита на пулпа, съдържание на твърда фаза и зърнометричен състав на продукта, постъпващ на флотация.
11. Получените решения при прилагане на алгоритъма за изчисляване на баланса на масите на класиращите устройства (ХЦ), потвърждават представителността на резултатите (% , тв. фаза, зърнометричен състав) от извършените изследвания в отделение „Мелнично“, като същевременно се установява и невисокият добив на преливите, постъпващи на флотация.

VIII. Технологични решения за оптимизиране ефективността на работата на цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“

Въз основа на направения анализ на резултатите от проведеното изследване на цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“, биха могли да се формулират следните технологични решения, с цел отстраняване на установените „тесни места“ и оптимизиране ефективността на работа на производственото оборудване и технологичните процеси:

1. Отделяне на класа -5.00 +0.00 mm от продукта -12.50 +5.00 mm, постъпващ в „Междинни бункери“, което ще доведе до повишаване с около 50.00 % тяхната вместимост по количество подаван готов продукт и ще повиши коефициента на движение на материала в автогенните мелници и производителността на топковите мелници. Това би могло да се реализира чрез подобряване ефективността на процесите промиване и пресяване в двойните барабанни сита в отделение „Дезинтеграция“. За това са необходими оптимизиране на разхода на подаваната вода и конструктивни промени на двойното барабанно сито (площ на пресевните повърхности, размери на отворите и др.).
2. Оптимизирането и контролирането на основните параметри на процеса автогенно смилане, а именно – разход на вода в автогенните мелници; натоварване (t/h) и зърнометричен състав на захранващата руда, както и съдържанието на твърда фаза в пулпа ще допринесат за подобряване ефективността на процеса автогенно смилане в отделение „Дезинтеграция“.
3. Ефективността на пресяване на горната ситова повърхност (10.00 mm) на вибрационна пресевна уредба MF 3073 – 2 в корпус „Средно и ситно трошене“ може да се повиши с оптимално поддържане и контрол на пресевната повърхност, което ще предотврати

замърсяването на подситовия продукт (-10.00 mm) с по-едри зърна. Оптимизирането и контролирането работата на горната пресевна повърхност (10.00 mm) ще допринесе за съществено намаляване на количеството материал, постъпващ за пресяване на долната ситова повърхност. Това ще доведе до повишаване ефективността на пресяване.

4. Ефективността на пресяване на вибрационна пресевна уредба KS 1P 6.0 x 2.5 в корпус „Средно и ситно трошене“, би могла да се повиши с оптимално поддържане и контрол на пресевната повърхност, което ще предотврати преминаването на по-едри частици в подситовия продукт.
5. Оптимизирането и контролирането посредством разработените алгоритми на технологичните параметри на затворения цикъл „средно трошене-контролно/предварително пресяване-ситно трошене-контролно пресяване“ на съществуващата технологична схема, ще доведе до осигуряване на натрошена руда със съдържание на класа -10.00 +0.00 mm от 90.00%, което от своя страна ще гарантира, повишаване на производителността на топковите мелници по разчетен клас - 0.100 +0.00 mm.
6. Включване на тестова инсталация „Derrick Stack Sizer™“ в технологичната верига на отделение „Мелнично“, с цел намаляване количеството на циркуляционния товар на една от топковите мелници;
7. Усъвършенстване режима на работа на топкова мелница, захранвана с руда от „Междинни бункери“ и подситов продукт от корпус „Средно и ситно трошене“. Въвеждане на обезводнителен хидроциклон, захранван с прелива след класиране на продукта „-3.00+0.00 mm“ от корпус „Средно и ситно трошене“, с цел повишаване на съдържанието на твърда фаза при обединяване на този продукт с прелива от класиране на смления продукт и оползотворяване на отделената вода в цикъла на смилане.
8. Усъвършенстване режима на работа на топкова мелница захранвана с руда от „Междинни бункери“ и подситов продукт (-5.00+0.00 mm) от отделение „Дезинтеграция“. Въвеждане на предварителна класификация на продукта, с цел намаляване на отрицателното влияние на променящите се параметри – дебит, съдържание на твърда фаза и зърнометричен състав. С внедряването на предварителна класификация ще се решат следните проблеми:
 - Заемане на полезен обем в топковата мелница чрез намаляване на голямото количество циркуляционен товар;
 - Пресмилане на разкрити минерални частици, водещо до проблеми в основна флотация;

IX. Заключение

Оптимизирането на процесите на зърнометрична подготовка (трошене, пресяване, смилане и класиране) и по този начин увеличаване съдържанието на зърната на разкритите рудни минерали, неминуемо води до повишаване извличането на ценните компоненти от преработваната изходна руда.

В резултат на разработените алгоритми и проведените изследвания на четирите основни отделения на цикъл „Зърнометрична подготовка“ в условията на ОФ „Асарел“ е постигната основната цел и са решени задачите на дисертационния труд.

Създадената методология за изследване на процесите, апаратите и продуктите в цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“ и получените резултати са една добра база за разработване на формулираните технологични решения за максимално разкриване на рудните

минерални фази, поддържането на постоянен зърнометричен състав и съдържание на твърда фаза в захранването на флотационния цикъл.

X. Научно – приложни приноси в дисертационния труд

1. Разработена е методология за изследване на процесите, апаратите и продуктите в цикъл „Зърнометрична подготовка на руда“. Методологията включва последователно следните дейности:
 1. 1. Анализ на производственото оборудване в основните технологични корпуси на цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“.
 1. 2. Разработване на алгоритми на характеристика на суровината, изследваните продукти и оценка на ефективната работа на технологичните процеси.
 1. 3. Изследване на четирите основни отделения на цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“ в условията на ОФ „Асарел“.
 1. 4. Цифрова и графична обработка на получените резултати от изследванията.
 1. 5. Анализ на установените „тесни места“.
 1. 6. Формулиране на технологични решения.
2. Разработени са алгоритми за изчисляване на зърнометрични и разделителни характеристики и алгоритми за изчисляване на разделителна едрина и ефективност при процесите пресяване и класиране и алгоритъм за определяне индекса на работата на Бонд (Bond Work Index - Wi).
3. Разработени са алгоритми за изчисляване на баланса по зърнометрична класа (разчетна фракция) и по съдържание на твърда фаза за класиращите устройства и алгоритъм за решаване на балансовите уравнения за схемата на смилане в затворен цикъл с хидроциклон.
4. Разработена е методика за изследване на четирите основни отделения в цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“ в обогатителна фабрика „Асарел“.
5. Формулирани са технологични решения с цел отстраняване на установените „тесни места“ в технологичната верига и оптимизиране ефективността на работа на съществуващото оборудване и процеси в цикъла на „Зърнометрична подготовка на рудата“ в ОФ „Асарел“.
6. Методиката за изследване на четирите основни отделения на цикъл „Зърнометрична подготовка на рудата“ е внедрена в производствената практика на обогатителна фабрика „Асарел“.
7. Част от получените данни са внедрени в предпроектните проучвания за избор на вариант за модернизация на ОФ „Асарел“, извършени от компаниите „Tetra Tech“ WEI Inc. и SGS Mineral Services Ltd., Великобритания.
8. Разработените алгоритми се прилагат в процеса на обучение на катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини“ в следните учебни дисциплини: „Проектиране на обогатителни фабрики“ ОКС „Бакалавър“ и „Моделиране и оптимизация на процесите на обогатяване“ ОКС „Магистър“.

XI. Публикации по дисертационния труд

M. Ranchev, I. Grigorova, V. Kovacheva, D. Mochev, I. Nishkov, D. Nikolov, A. Angelov, T. Pukov, 2015, Comminution Stage in Assarel Concentrator – Improvement Ways, Proceeding of XVI Balkan Mineral Processing Congress, Beograd, Serbia, pp. 147-152, ISBN: 978-86-82673-10-1 (MI).

M. Ranchev, I. Grigorova, V. Kovacheva, D. Mochev, I. Nishkov, D. Nikolov, A. Angelov, T. Pukov, 2015, Possibilities for Improvement the Disintegration Process in Assarel Concentrator, Proceeding of XVI Balkan Mineral Processing Congress, Beograd, Serbia, pp. 153-159, ISBN: 978-86-82673-10-1 (MI).

M. Ranchev, V. Kovacheva, I. Grigorova, I. Nishkov, D. Mochev, D. Nikolov, A. Angelov, T. Pukov, 2015, Technological Parameter Analysis in the Secondary-tertiary Crushing Stage in Assarel Concentrator, Proceeding of XVI Balkan Mineral Processing Congress, Beograd, Serbia, pp. 139-145, ISBN: 978-86-82673-10-1 (MI).

Ранчев, М., Технологични възможности за максимално разкриване на рудните минерални фази при зърнометричната подготовка на суровината в ОФ „Асарел“, Годишник на МГУ, том 59, свитък II, Добив и преработка на минерални суровини, София, октомври, приет за печат, 2016.

Литература, посочена в автореферата на дисертационния труд:

Мочев, Д., И. Григорова, Зърнометрична подготовка на суровините. Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София, с. 422, 2013

Strashimirov S., R. Petrunov, M. Kanazirski. Porphyry-copper mineralisation in the central Srednogorie zone, Bulgaria. Mineralium Deposita, 37: 587-598, 2002.