



МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. ИВАН РИЛСКИ“

МИННОТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „ОБОГАТЯВАНЕ И РЕЦИКЛИРАНЕ НА СУРОВИНИ“

маг. инж. Михаил Димитров Петров

АЛТЕРНАТИВНИ ПОДХОДИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ
НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИ ПРЕРАБОТКАТА НА
ОЛОВНО-ЦИНКОВИ РУДИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за присъждане на
образователна и научна степен „ДОКТОР“

Научна област: 5. Технически науки
Професионално направление: 5.8. Проучване, добив и обработка на
полезни изкопаеми
Докторска програма: Обогастване и рециклиране на суровини

Научен ръководител: проф. дн Ирена Григорова

СОФИЯ, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от разширен катедрен съвет на катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини“, Миннотехнологичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“, София, на 18.12.2025 г., съгласно Ректорска заповед № РД-13-84 от 25.11.2025 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № РД-13-1 от 12.01.2026 г. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на 16.04.2026 г. от 10:00 часа, в зала 138 на Миннотехнологичен факултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Сектор „Студентска и преподавателска мобилност“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. Проф. д-р Маринела Иванова Панайотова – МГУ „Св. Иван Рилски“
2. Проф. д-р Емил Георгиев Михайлов – ХТМУ
3. Проф. д-р Райко Данаилов Станев – ХТМУ
4. Доц. д-р Георги Евгениев Чернев – ХТМУ
5. Доц. д-р Теодора Маврова Янкова – МГУ „Св. Иван Рилски“

Резервни членове:

1. Проф. д-р Иван Михайлов Нишков, МГУ „Св. Иван Рилски“
2. Доц. д-р инж. Веска Георгиева Лашева – ХТМУ

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1. Проф. д-р Емил Георгиев Михайлов – ХТМУ
2. Проф. д-р Маринела Иванова Панайотова – МГУ „Св. Иван Рилски“

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини“ на Миннотехнологичен факултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Автор: маг. инж. Михаил Димитров Петров

Заглавие: Алтернативни подходи за оптимизиране на технологичните показатели при преработката на оловно-цинкови руди

Тираж: 20 броя

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

СЪДЪРЖАНИЕ

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	5
Актуалност на проблема	5
Цел на дисертационния труд	6
Задачи на дисертационния труд	6
Научна новост	7
Практическа приложимост	7
Апробация	7
Публикации	7
Структура и обем на дисертационния труд	7
II. АНАЛИЗ НА ПРОБЛЕМА И ИЗВОДИ ОТ ЛИТЕРАТУРНИЯ ОБЗОР	9
III. МЕТОДОЛОГИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО	9
III.1. Материали и методи	9
IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ	10
IV.1. Повишаване ефективността на рудоподготовка, чрез оптимизиране процеса трошене в ОФ „Ерма река“, гр. Златоград	10
IV.1.1 Използвана стара трошачна инсталация	10
IV.1.2. Въведена нова трошачна инсталация	11
IV.1.3. Техничко-икономически показатели на новата и старата трошачни инсталации	13
IV.1.4. Изводи от оптимизирането на процеса трошене	14
IV.2. Повишаване ефективността на пресяване, чрез оптимизиране захранването на рудата в процеса на трошене в ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македония	14
IV.2.1. Дейност на трошачното отделение преди оптимизиране захранването на рудата в процеса на трошене	14
IV.2.2. Дейност на трошачното отделение след оптимизиране захранването на рудата в процеса на трошене	17
IV.2.3 Техничко-икономически показатели на трошачното отделение преди и след оптимизиране захранването на рудата в процеса на трошене	20
IV.2.4. Изводи от оптимизираното подаване на рудата	20
IV.3. Повишаване турбулентността на пулпа, чрез промяна на числото на Рейнолдс в ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македония	20
IV.3.1. Агитационен кондиционер, използван досега в ОФ „Тораница“	21
IV.3.2. Внедряване на усъвършенстван агитационен кондиционер в ОФ „Тораница“	22

IV.3.3. Изводи от оптимизирането на активацията на пулпа	24
IV.4. Оптимизиране на процесите в цикъла на оловна флотация в ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македония	24
IV.4.1. Удължаване времето на флотация, чрез въвеждане на предварителна флотация	27
IV.4.2. Удължаване времето на флотация на основна оловна флотация	28
IV.4.3. Удължаване времето на флотация на контролните оловни операции	28
IV.4.4. Изводи от въведените промени в цикъла на оловна флотация	30
IV.5. Оптимизиране разходите на използваните реагенти в технологичната флотационна схема на ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македония	30
IV.5.1. Разход на флотационните реагенти, използвани в ОФ „Тораница“, преди въведената оптимизация в реагентния режим	30
IV.5.2. Разход на флотационните реагенти, използвани в ОФ „Тораница“, след въведената оптимизация в реагентния режим	31
IV.5.3. Изводи от оптимизацията на разходите на флотационните реагенти	32
IV.6. Оптимизиране обезводняването на концентратите в ОФ „Ерма река“, гр. Златоград	32
IV.6.1. Определяне на основните физични свойства на концентратите в ОФ „Ерма река“	32
IV.6.2. Изводи за основните физични свойства на концентратите в ОФ „Ерма река“	35
IV.6.3. Обезводняване на цинковия концентрат чрез филтрация под налягане в ОФ „Ерма река“	35
IV.6.4. Изводи от обезводняването на цинковия концентрат чрез филтрация под налягане в ОФ „Ерма река“	38
V. ОБОБЩЕНИ ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ	38
VI. НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ	40
VII. НАУЧНИ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	40
SUMMARY	41

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Оловото и цинкът са ключови индустриални метали с широко приложение в различни сектори на икономиката, включително в производството на батерии, строителни материали, сплави и високотехнологични продукти, като техният принос за технологичния напредък и прехода към зелена икономика е от решаващо значение. Световното търсене на тези метали продължава да нараства, като според Международната група за изследване на оловото и цинка (ILZG), тенденцията за увеличаване на потреблението ще се запази и през следващите години.

В същото време ефективността на съществуващите обогатителни фабрики е ограничена от комплексния минерален състав на оловно-цинковите руди, наличието на сраснали агрегати и оксидни и несулфидни фази, което води до значителни загуби на ценни метали в отпадъка и до повишени производствени разходи. Стандартизирани технологични схеми, при които се прилагат класически методи за трошене, смилане, селективна флотация и обезводняване, не винаги позволяват постигане на оптимално качество на концентратите, високо извличане и рационално използване на природните ресурси.

В този контекст разработването на иновативни решения за оптимизация на технологичните процеси в обогатителните фабрики е изключително актуално. Оптимизацията на схемите на трошене, смилане и флотация, подобряването на енергийната ефективност, внедряването на нови реагенти и съвременни техники за предварителна сепарация, могат значително да подобрят качеството на концентратите, да намалят загубите на металите в отпадъка, да повишат производителността и да осигурят максимално устойчиво използване на наличните природни ресурси.

Следователно актуалността на настоящата дисертационна работа се определя както от икономическите и технологичните предизвикателства при преработката на оловно-цинкови руди, така и от необходимостта за устойчиво и ефективно оползотворяване на минералните ресурси, което е в съответствие с принципите за ефективно и екологично отговорно управление на минералните ресурси.

Обект на изследване в настоящата разработка са технологичните процеси в обогатителните фабрики „Ерма река“, гр. Златоград и „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македония, в които се извършва преработката на оловно-цинкови сулфидни руди.

Актуалността на разработката се определя от необходимостта за проектиране и внедряване на иновативни технологични решения, насочени към оптимизация на различните процеси в обогатителните фабрики, преработващи оловно-цинкови руди. Тези решения не само повишават ефективността на производството, но и осигуряват получаването на висококачествени концентрати с по-високо съдържание на олово и цинк, повишават производителността и намаляват разходите за електроенергия и реагенти. Освен това, чрез оптимизацията на технологичните процеси се постига максимално оползотворяване на наличните природни ресурси и значително намаляване на загубите на ценни метали в крайния отпадък, което е особено важно в контекста на глобалната тенденция за изчерпване на находищата с висококачествени руди.

Разработката има ключово значение за съвременното обогатително и металургично производство, като интегрира принципите на устойчивост, ефективност и рационално използване на ресурсите. Оптимизацията на отделните технологични процеси, включително рудоподготовка, флотация и обезводняване, се явява стратегическа необходимост за съвременните обогатителни фабрики, където се изисква съчетание на висока производителност, с минимизирани екологични и икономически рискове.

В рамките на настоящото изследване са разработени и приложени нови технологични решения за повишаване ефективността на рудоподготовката (процесите на трошене и смилане), в обогатителните фабрики „Ерма река“ и „Тораница“. Особено значение има проектирането и внедряването на оптимизирана флотационна схема в обогатителната фабрика „Тораница“, която

позволява по-ефективно селективно разделяне на галенита от сфалерита, както и повишаване извличането на металите.

Допълнително, за подобряване на процеса на обезводняване в обогатителната фабрика „Ерма река“ е проектирана и въведена в експлоатация съвременна филтрационна инсталация, която осигурява надеждно и икономично отделяне на концентрата от технологичната вода, като същевременно намалява загубите на металите и оптимизира използването на водните ресурси в производството.

По този начин настоящата разработка не само предлага практически приложими технологични решения, но и допринася за модернизацията на обогатителните фабрики, подобрявайки производствената ефективност, устойчивостта и качеството на продукцията, което от своя страна е в съответствие с глобалните тенденции за рационално и екологично отговорно използване на природните ресурси.

Предмет на изследванията е разработването на нови технологични решения за повишаване ефективността на обогатителните фабрики, чрез оптимизиране на ключовите технологични процеси – трошене, смилане и пресяване на рудите, флотация и обезводняване на получаваните концентрати.

Цел на дисертационния труд

Настоящият дисертационен труд има за цел разработването на иновативни решения за оптимизация на технологичните схеми в обогатителните фабрики, преработващи оловно-цинкови руди, с които се постига получаването на висококачествени концентрати, намаляване на производствените разходи и загубите на метали в отпадъка, повишаване на производителността и максимално ефективно оползотворяване на наличните природни ресурси.

Задачи на дисертационния труд

Постигането на поставената цел в настоящата разработка предопредели решаването на следните основни задачи:

1. Изучаване и обзорен преглед на суровинната база на металите Pb и Zn, анализ на генетичните типове и глобалното разпространение на сулфидните и несулфидни Pb-Zn находища, както и разпространението на Pb-Zn находища в Република България и Република Северна Македония.

2. Анализ на технологичните схеми в обогатителните фабрики, преработващи Pb-Zn руди и обзор на съществуващите технологии за преработка на оловно-цинкови руди в страната и чужбина.

3. Разработване и внедряване на ново технологично решение в трошачно отделение на ОФ „Ерма река“ – замяна на тристадиалната схема на трошене с двустадиална схема на трошене и пресяване на рудата чрез ново, иновативно, високопроизводително оборудване, осигуряващо подобрени технико-икономически показатели в последващите процеси на смилане и флотация в технологичната верига, при намалени производствени разходи.

4. Оптимизиране работата на трошачно отделение в ОФ „Тораница“, с внедряване на иновативна система за управление на подаваната руда в процеса трошене, в зависимост от нейната едрина и повишаване ефективността на процеса пресяване.

5. Оптимизация на агитацията и кондиционирането на пулпа в ОФ „Тораница“, чрез въвеждане на усъвършенстван агитационен кондиционер, за постигане повишена ефективност на процеса флотация, осигуряване на непрекъснато производство на висококачествени концентрати и работа в непрекъснат режим.

6. Проектиране и въвеждане на предварителна флотация в технологичната верига на ОФ „Тораница“, за повишаване съдържанието на Pb в пулпа, постъпващ на пречистна оловна флотация, с цел подобряване качеството на оловните концентрати.

7. Оптимизация на процесите в цикъла на оловната флотация, чрез удължаване времето на флотация в основната и контролните флотационни секции, чрез добавяне на допълнителни флотационни машини в ОФ „Тораница“, с цел повишаване качеството на оловните концентрати.

8. Редуциране разходът на флотационни реагенти в ОФ „Тораница“, оптимизация на реагентния режим и въвеждане на дозиране чрез мембранни помпи, за по-ефективно използване на регентите.

9. Проектиране на нова схема на филтрация в ОФ „Ерма река“ и замяна на остарялото производствено оборудване с автоматизирана филтрационна инсталация под налягане, осигуряваща ниска влажност на получаваните цинкови концентрати, в съответствие с изискванията за металургична преработка, при по-ниски производствени разходи.

10. Извеждане на обобщени изводи и заключения относно възможностите за повишаване ефективността на технологичните процеси в обогатителните фабрики, преработващи оловно-цинкови руди.

Научна новост

Научната новост на дисертационния труд се изразява в разработването на нови технологични решения, които могат да бъдат внедрявани в производствената практика на обогатителните фабрики, преработващи Pb-Zn руди, с цел оптимизация и повишаване ефективността на технологичните процеси, намалени производствени разходи, получаването на качествени концентрати и най-пълноценното оползотворяване на изчерпаемите природни ресурси.

Практическа приложимост

Практическата приложимост на дисертационния труд се състои в разработването на нови технологични решения при обогатяването на оловно-цинкови сулфидни руди. Преработката на рудите в обогатителните фабрики до получаването на крайните продукти – оловни и цинкови концентрати включва поредица от последователни технологични процеси – трошене, смилане, пресяване на рудите, флотация и обезводняване на концентратите. Повишената ефективност на всеки отделен технологичен процес способства за повишаване ефективността на последващия процес в технологичните вериги на обогатителните фабрики и има важно значение за производството на качествени оловни и цинкови концентрати

Апробация

Публичната апробация на научните резултати, представени в дисертационния труд е извършена при участието на докторанта в специализиран международен научен конгрес в Прищина, Косово и в ежегодната международна научна конференция на МГУ „Св. Иван Рилски“ в София.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани на български език в две научни специализирани издания и една на английски език в специализирано рецензирано международно научно издание.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 132 страници, включващи въведение, 5 части с 8 глави за решаване на основните формулирани задачи, списъци на основните научно-приложни приноси, на публикациите по дисертацията и използваната литература. Цитирани са общо 115 литературни източници, 8 от които са на кирилица, 92 на латиница и 15 от интернет източници. В дисертационната разработка са включени общо 68 фигури и 26 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

В *първата част (Глава I)* е направен детайлен литературен обзор, включващ сведения за световната суровинна база на металите Pb и Zn – производството на Pb и Zn по държави и световните цени на Pb и Zn, като са използвани данни на Международната група за изследване на оловото и цинка (International Lead and Zinc Study Group – ILZG) и Лондонската Метална Борса (London Metal Exchange – LME). Разгледани са основните свойства и приложения на металите Pb и Zn и рудните минерали на тези метали.

В литературния обзор е направен преглед на разпространението на оловно-цинковите (сулфидни и несулфидни) находища в света. Направена е кратка характеристика на генетичните типове сулфидни Pb-Zn находища, представени от Седиментно-ексхалативни Pb-Zn находища (Sedimentary exhalative deposits – SEDEX); Мисисипи тип Pb-Zn находища (Mississippi Valley type – MVT); Масивно-сулфидни Pb-Zn находища (Volcanogenic massive sulfide – VMS); Скарнови Pb-Zn находища; Жилни хидротермални Pb-Zn находища. Анализът на световните Pb-Zn находища показва, че в глобален мащаб най-значителните ресурси от Pb и Zn (над 80%) са съсредоточени в находищата тип SEDEX и MVT. В България единствено Pb-Zn находище Седмочисленици, разположено в Западна Стара планина е стратиформно, MVT тип, но с отдавна прекратена експлоатация, поради изчерпване на рудните запаси. В страната ни Pb-Zn находища са предимно жилни, хидротермални и са обособени главно в три рудни района – Централнородопски, Източнородопски и Осоговски, като в настоящия момент добив на Pb-Zn руди се извършва в някои от находищата в Централнородопския руден район.

Разгледани са несулфидните Zn-Pb находища ($Zn > Pb$), представени от два вида – супергенни и хипогенни. Характерно за тези находища е наличието на значителни запаси от Zn, отсъствие или ниско съдържание на S и други нежелани компоненти в рудите и ниски енергийни разходи за производството на Zn.

В литературния обзор е направена кратка геоложка характеристика на Pb-Zn находища в страната ни и в Република Северна Македония, като по-подробно са разгледани находищата в Маданското рудно поле и находище Тораница, в РСМ. Анализирани са технологичните схеми на няколко обогатителни фабрики в страната и чужбина, преработващи Pb-Zn руди – ОФ „Ерма река, ОФ „Рудозем“, ОФ „Саса“, ОФ „Тораница“ и ОФ „Злетово“ – Република Северна Македония; ОФ „Ред Дог“, САЩ; ОФ „Хуаншапинг“, ЮИ Китай. По-подробно са разгледани технологичните схеми на ОФ „Ерма река“, гр. Златоград и ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македония, чиято оптимизация е обект на изследване в настоящия труд. В заключение са направени изводи от извършения литературен обзор.

Във *втората част (Глава II)* на дисертационния труд са конкретизирани актуалността на проблема, целите които трябва да бъдат постигнати и задачите, които следва да бъдат решени.

В *третата част (Глава III)* е представена информация за използваната методология и материали на изследванията, проведени в две обогатителни фабрики – ОФ „Ерма река“, гр. Златоград и ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македония.

Четвъртата част (Глава IV) включва експерименталната част на дисертационната разработка, която е фокусирана върху резултатите от разработените и внедрени нови технологични решения в технологичните схеми на ОФ „Ерма река“, гр. Златоград и ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македония. Новите технологични решения са насочени към оптимизация и повишаване ефективността на процесите трошене, смилане, пресяване, флотация на рудите и обезводняване на концентратите в обогатителните фабрики, преработващи Pb-Zn руди.

В *Пета част (Глава V)* са представени обобщени изводи и заключения, въз основа на резултатите от проектираните и внедрени технологични решения в обогатителните фабрики. В същата пета част са описани и научно-приложните приноси на дисертанта (*Глава VI*). Научните публикации по дисертационния труд и използваните литературни източници са показани съответно в *Глава VII* и *Глава VIII* на дисертационния труд.

II. АНАЛИЗ НА ПРОБЛЕМА И ИЗВОДИ ОТ ЛИТЕРАТУРНИЯ ОБЗОР

Производството на металите олово и цинк включва процесите на обогатяване на Pb-Zn сулфидни руди до получаването на оловни (галенитови) и цинкови (сфалеритови) концентрати, от които чрез металургична преработка се извличат Pb и Zn. Ефективността на технологичните процеси при обогатяването на Pb-Zn руди има много важно значение, поради нарастващото потребление на металите, необходимостта от най-пълноценно оползотворяване на изчерпаемите природни ресурси и наличието на глобална тенденция за добив на все по-бедни или със сложен минерален състав руди.

Обогатяването на Pb-Zn сулфидни руди се извършва с прилагането на пенна флотация, която осигурява селективното разделяне на галенита от сфалерита и получаването на два отделни концентрата, от които с прилагането на пирометалургични методи се произвеждат металите Pb и Zn. Изборът на технологичната схема на обогатяване и флотационните реагенти зависи от множество фактори като: минерален и химичен състав и физични свойства на преработваната руда, наличие на оксиди, едрина на сулфидните агрегати, степен на сраствания на минералните фази в тях и др. Технологичните схеми в обогатителните фабрики включват процесите трошене, смилане, флотация и обезводняване. Pb-Zn руди съдържат агрегати от сраснали помежду си рудни и нерудни минерали, което налага финото смилане на рудите до оптимална големина, за разкриване и разделяне на отделните минерални фази. Влияние върху ефективността на процеса флотация освен степента на смилане на рудата оказват още редица показатели като: избор на подходящи реагенти и техния оптимален разход, съдържание на твърда фаза, аерация, интензивност на агитация на пулпа, плътност и рН, кинетика на флотацията, стабилност на пяната и др. Промяната в параметрите на всеки един от технологичните показатели оказва влияние върху ефективността на процеса флотация и качеството на получаваните концентрати.

Сравнението на технологичните схеми в няколко обогатителни фабрики в страната и чужбина – ОФ „Ерма река“, ОФ „Рудозем“, ОФ „Саса“, ОФ „Тораница“ и ОФ „Злетово“ – Република Северна Македония; ОФ „Ред Дог“, САЩ; ОФ „Хуаншапинг“, ЮИ Китай показва, че в повечето случаи се използват дву- до тристадиални схеми на трошене на рудата и двустадиално смилане. В почти всички обогатителни фабрики се прилага селективна схема на флотация, с изключение на ОФ „Ерма река“, в която се използва селективно-колективна флотация. При сравнението между технологичните схеми на обогатителните фабрики, преработващи Pb-Zn руди се установяват известни различия в извършваната зърнометрична подготовка на рудите, схемите на флотация, използваните флотационни машини и флотационни реагенти, свързани с различията в минералния състав и физичните свойства на преработваните руди.

Извършеният анализ на дейността на ОФ „Ерма река“, гр. Златоград и ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, РСМ, в които се преработват Pb-Zn сулфидни руди показва, че е наложително да се извърши оптимизация на отделните технологични процеси в двете фабрики, за да бъде повишена ефективността на обогатяване на рудите.

III. МЕТОДОЛОГИЯ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

III.1. Материали и методи

При проведените изследвания са използвани следните материали, оборудване и методи:

- 1) Изследвани материали: оловно-цинкови сулфидни руди, преработвани в ОФ „Ерма река“ и ОФ „Тораница“, произвеждани концентрати и краен отпадък; флотационни реагенти;
- 2) Производствено оборудване: челюстни и конусни трошачки, мелници, вибрационни пресевни уредби, честотни преобразуватели за регулиране на захранването на рудата в процеса на трошене, флотационни машини и агитатори за кондициониране на пулпа, системи за дозиране на реагенти с мембранни помпи, филтър преса под налягане за обезводняване;
- 3) Методи:

- За определяне зърнометричния състав на натрошена руда, преди и след въвеждането на нова трошачна инсталация в ОФ „Ерма река“ е извършен мокър ситов анализ с набор от лабораторни сита с размери на отворите 40, 25, 20, 12.5, 8.5 и 2 mm. Анализът е проведен в Лабораторията по зърнометрична подготовка на суровини, катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини“, МГУ „Св. Иван Рилски“.
- За определяне ефективността на пресяване преди и след оптимизацията на хранването на рудата в процеса трошене в ОФ „Тораница“ е извършен ситов анализ с набор от сита 60, 35, 15, 10, 6.7, 4.75 и 3.35 mm. Анализът е направен в технологичната лаборатория на ОФ „Тораница“.
- Съдържанията на металите Pb и Zn в изходната руда, концентратите и отпадъка, преди и след въведената промяна в схемата на оловна флотация в ОФ „Тораница“ са определени с атомно-абсорбционна спектроскопия, извършена с атомно-абсорбционен спектрометър PerkinElmer в технологичната лаборатория на ОФ „Тораница“.
- Основните физични свойства (зърнометричен състав, съдържание и плътност на твърдата фаза) на концентратите, произвеждани в ОФ „Ерма река“ са определени с помощта на следната апаратура: ситова машина (Retsch AS 200), лазерен дифракционен анализатор (Malvern Mastersizer 3000) и газов пикнометър (AccuPyc 1330 Pycnometer). Изследванията са проведени в Тестовия център на METSO в гр. Сала, Швеция.
- Експериментите за обезводняване на концентратите, произвеждани в ОФ „Ерма река“, са извършени с лабораторна VPA филтър преса в Тестовия център на METSO в гр. Сала, Швеция.

IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

IV.1. Повишаване ефективността на рудоподготовка, чрез оптимизиране процеса трошене в ОФ „Ерма река“, гр. Златоград

Ефективността на технологичните процеси трошене и смилане има важно значение за технико-икономическите показатели при обогатяването на рудите, поради високата консумация на електроенергия и високите производствени разходи. Ниската ефективност на тези процеси оказва неблагоприятно влияние върху последващите процеси на преработка и води до по-ниска ефективност на флотацията и загуба на метали в отпадъка.

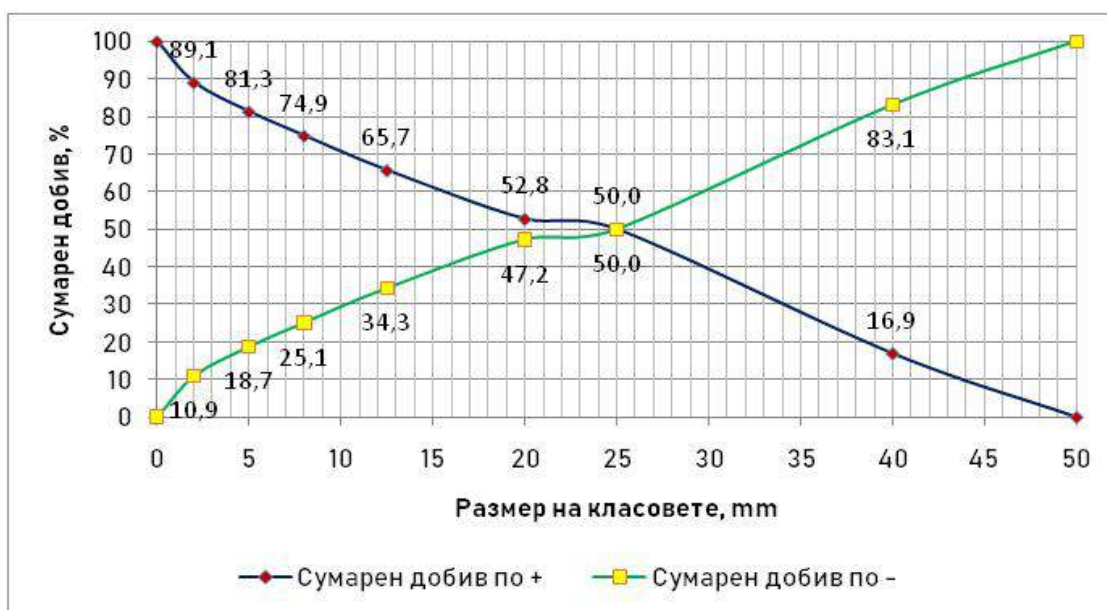
В обогатителната фабрика „Ерма река“, използваната тристадиална схема на трошене на рудата, с остаряло производствено оборудване е заменена с нова, двустадиална верига на трошене и пресяване на рудите, включваща съвременно оборудване с висока производителност и ниска енергоемкост.

IV.1.1. Използвана стара трошачна инсталация

В трошачното отделение на обогатителната фабрика оловно-цинковата руда е подлагана на три стадия на трошене – едро, средно и ситно, извършвани последователно с челюстна трошачка OM 35, конусна трошачка тип КСД – 1750 и конусна трошачка КМДТ 1750 Т. С остарялото производствено оборудване не е постигнат оптимален зърнометричен състав на преработваната руда, което води до загубата на метали и увеличени производствени разходи. Зърнометричният състав и зърнометричната характеристика на натрошената руда със старата трошачна инсталация са показани в табл. IV.1 и на фиг. IV.2.

Таблица IV.1 Зърнометричен състав на натрошена руда, стара трошачна инсталация, ОФ „Ерма река“

Клас, mm	Добив		Сумарен добив, %	
	g	%	По „+“	По „-“
+ 40.0	1015	16.9	16.9	100.0
- 40.0 + 25.0	1980	33.1	50.0	83.1
- 25.0 + 20.0	165	2.8	52.8	50.0
- 20.0 + 12.5	775	12.9	65.7	47.2
- 12.5 + 8.0	550	9.2	74.9	34.3
- 8.0 + 5.0	385	6.4	81.3	25.1
- 5.0 + 2.0	465	7.8	89.1	18.7
- 2.0	654	10.9	100.0	10.9
Общо	5989	100.0	-	-



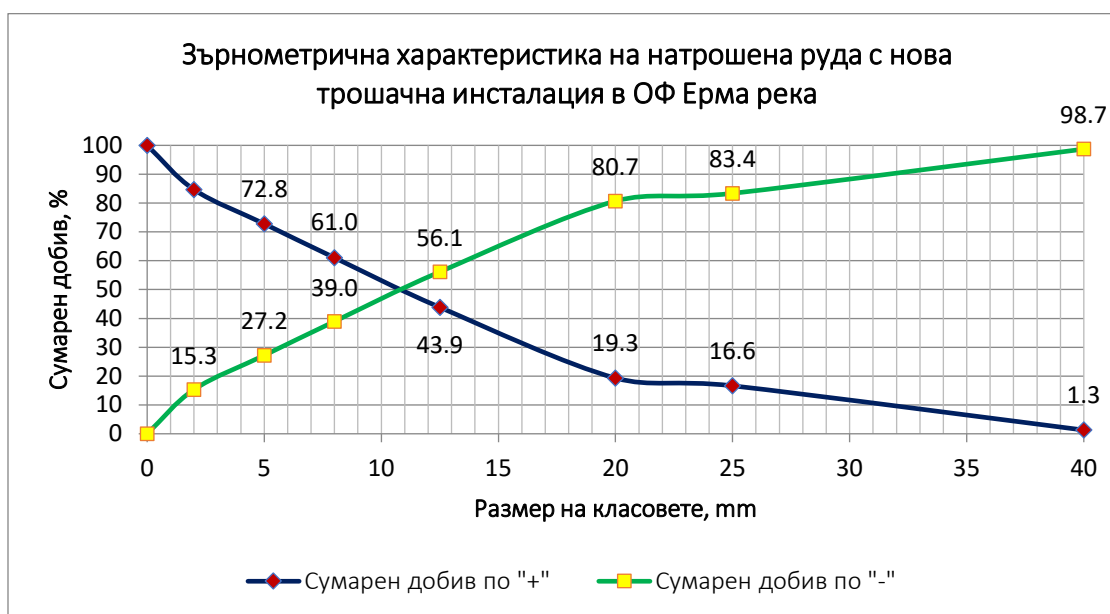
Фигура IV.2. Зърнометрична характеристика на натрошена руда, стара трошачна инсталация, ОФ „Ерма река“

IV.1.2. Въведена нова трошачна инсталация

За оптимизиране на технологичния режим на процеса трошене, в обогатителна фабрика „Ерма река“ е внедрена нова трошачна инсталация. Верижна схема на машините и съоръженията в новата трошачна инсталация са представени на фиг. IV.3.

Таблица IV.2. Зърнометричен състав на натрошена руда, нова трошачна инсталация

Клас, mm	Добив		Сумарен добив, %	
	g	%	По „+“	По „-“
+ 40.0	155	1.3	1.3	100.0
- 40.0 + 25.0	1845	15.3	16.6	98.7
- 25.0 + 20.0	323	2.7	19.3	83.4
- 20.0 + 12.5	2950	24.5	43.9	80.7
- 12.5 + 8.0	2067	17.2	61.0	56.1
- 8.0 + 5.0	1414	11.8	72.8	39.0
- 5.0 + 2.0	1425	11.9	84.7	27.2
- 2.0+0.0	1845	15.3	100.0	15.3
Общо	12024	100.0	-	-



Фигура IV.4. Зърнометрична характеристика на натрошена руда, нова трошачна инсталация, ОФ „Ерма река“

IV.1.3. Техничко-икономически показатели на новата и старата трошачни инсталации

Установено е, че новата трошачна инсталация демонстрира приблизително 39.7 % по-висока ефективност на процеса трошене на рудата, в сравнение със старата. При новата инсталация делът на клас „-16.0 + 0.0 mm“ е достигнал до 68 %, докато при старата е бил около 41 % (табл. IV.1, IV.2; фиг. IV.2, IV.4).

Чрез внедряването на новата, автоматизирана трошачна инсталация е постигнато увеличение на производителността с 35.7 %. Производителността на новото оборудване е 129.7 t/h, докато при старата инсталация тя е 83.3 t/h. При среднодневен обем на постъпващата за трошене руда от около 900 t, времето, необходимо за нейното преработване, е съкратено от 8 на 5.5 часа, с въвеждането на новата инсталация.

Новото оборудване се отличава със значително по-ниско електроенергийно потребление. Инсталираната мощност на новата трошачна инсталация е 451 kW, докато тази на старата – 718 kW, което представлява намаление на енергийната консумация с 37.2 %.

Повишената ефективност на трошене при новата трошачна схема е с положително въздействие върху последващите процеси – смилане и флотация. В резултат на по-високата

ефективност на трошене е постигнато увеличение на производителността на мелничното отделение, намаление на разхода на мелничен товар (стоманени топки с диаметър Ø100 mm), както и по-добро разкриване на рудните минерали.

IV.1.4. Изводи от оптимизирането на процеса трошене

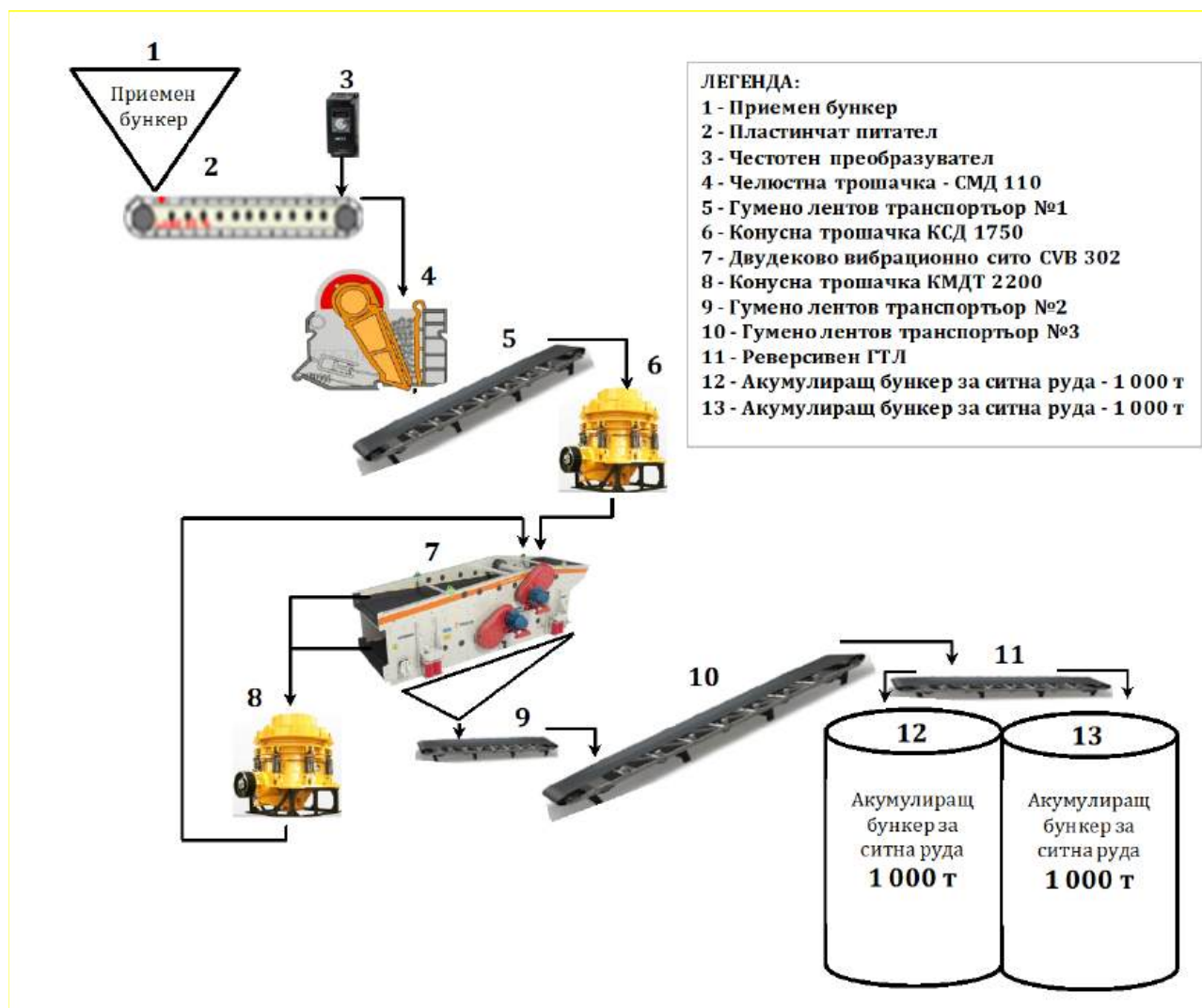
Оптимизирането на технологичния режим на трошене на рудите в обогатителната фабрика, с внедряването на ново, съвременно оборудване, води до по-висока ефективност и производителност на процесите смилане и флотация, с подобро извличане на металите, при по-ниски производствени разходи

IV.2. Повишаване ефективността на пресяване чрез оптимизиране захранването на рудата, в процеса на трошене в ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македония

IV.2.1. Дейност на трошачното отделение преди оптимизиране на захранването на рудата в процеса на трошене

В ОФ „Тораница“ се прилага тристадиална схема на трошене на рудата – едро, средно и ситно трошене, извършвани последователно с челюстна трошачка СМД 110, конусна трошачка КСД 1750 и конусна трошачка КМДТ 2200. Оловно-цинковата руда чрез пластинчат питател с равномерни обороти на подаване, постъпва за едро трошене в челюстна трошачка СМД 110 и след това натрошената руда се подава в конусна трошачка КСД 1750. Натрошената руда от средното трошене се подлага на пресяване с двудеково вибрационно сито CVB 302. Надситовият продукт, който се явява като циркуляционен товар, постъпва за ситно трошене в конусна трошачка КМДТ 2200, а подситовият продукт - в 2 броя междинни бункери за ситна руда. Тъй като оборотите на задвижване на питателя са равномерни, през продължителни периоди от дейността на трошачното отделение, подаваната руда е в по-голямо количество от необходимото, вибрационното сито и циркуляционният товар се претоварват и материалът, който се връща за ситно трошене също е в по-голямо количество. В този случай ефективността на пресяване с вибрационното сито се понижава. За да се разтовари ситото и циркуляционният товар, се налага спиране на пластинчатия питател и разтоварване на вибрационното сито, при което процесът на работа в трошачното отделение се нарушава и времето за работа на трошачното отделение се увеличава (около 7.5 часа на смяна).

За подобряване ефективността на пресяване на вибрационното сито в ОФ „Тораница“, бе монтиран честотен преобразувател NIETZ тип AT20, 380 V, 3.7 kW, с цел регулиране оборотите на пластинчатия питател при захранването на рудата в процеса трошене, в зависимост от нейната едрина. Верижната схема на машините и съоръженията в трошачно отделение в ОФ „Тораница“, след монтирането на честотния преобразувател е показана на фиг. IV.9.



Фигура IV.9. Верижна схема на машините и съоръженията в трошачно отделение в ОФ „Тораница“, след монтиране на честотен преобразувател NIETZ тип AT20, 380 V, 3.7 kW

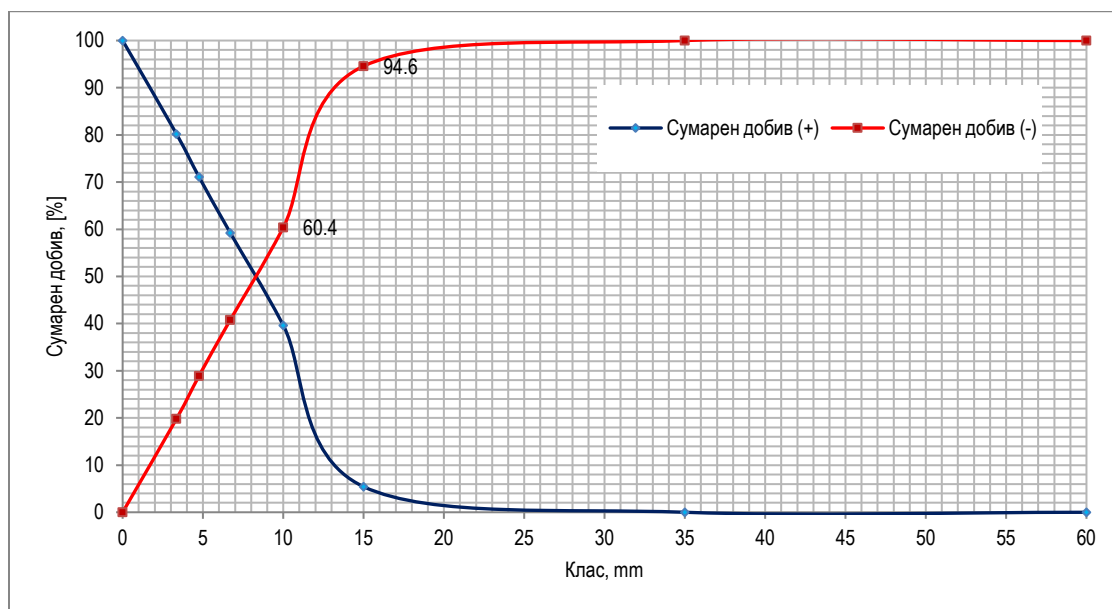
За определяне ефективността на пресяването преди и след оптимизацията на захранването на рудата в процеса на трошене бе проведено опробване на вибрационното сито и ситов анализ на трите продукта от пресяването – захранване на ситото, надситов продукт и подситов продукт,

Зърнометричният състав на трите продукта от пресяването, зърнометрична характеристика на подситовия продукт и криви на сумарните добиви на трите продукта от пресяването са показани в табл. IV.3 и на фиг. IV.7, IV.8.

Таблица IV.3. Зърнометричен състав на трите продукта от пресяването – захранване, надситов продукт и подситов продукт, ОФ „Тораница“

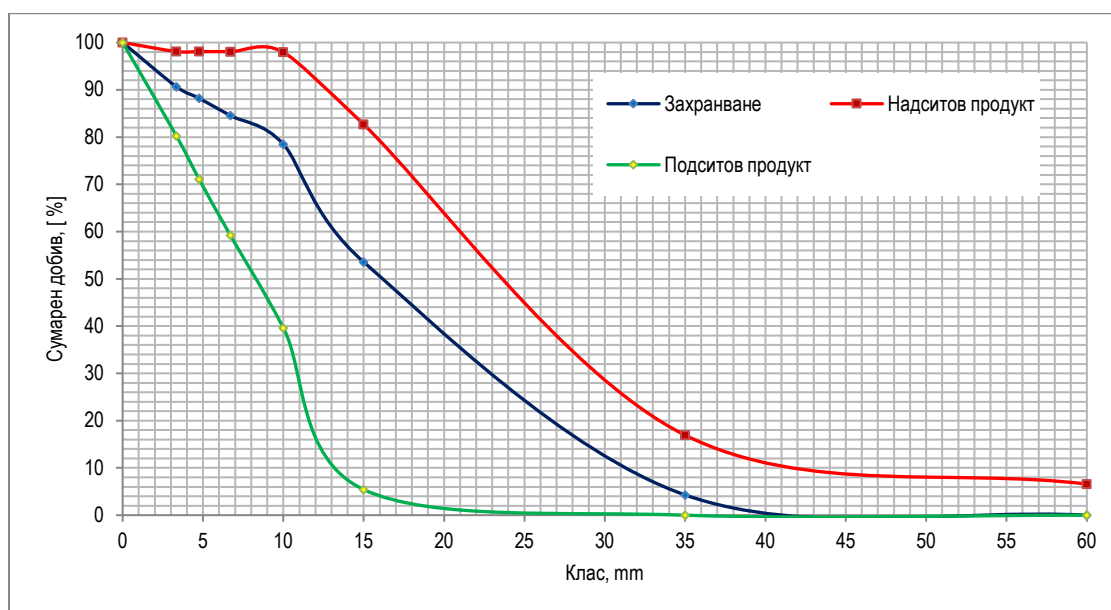
Клас, mm	Захранване	Надситов продукт	Подситов продукт
	Добив, %		
+60	0.0	6.6	0.0
- 60 + 35	4.2	10.4	0.0
- 35 + 15	49.3	65.7	5.4
- 15 + 10	24.9	15.3	34.2
- 10 + 6.7	6.1	0.1	19.6
- 6.7 + 4.75	3.7	0.0	11.9
- 4.75 + 3.35	2.4	0.0	9.1
- 3.35	9.4	1.9	19.8
Общо	100.0	100.0	100.0

Въз основа на получените данни от зърнометричния анализ е построена зърнометричната характеристика на подситовия продукт от пресяването, представена на фигура IV.7.



Фигура IV.7. Зърнометрична характеристика на подситов продукт от пресяването на вибрационното сито

На фиг.IV.7 са представени стойностите в класовете „-15 mm” и „-10 mm” в подситовия продукт, съответно 94.6 % и 60.4 %. Построени са криви на сумарните добиви „по +” на трите продукта от опробването на вибрационното сито – захранване, надситов продукт и подситов продукт (Фиг. IV.8).



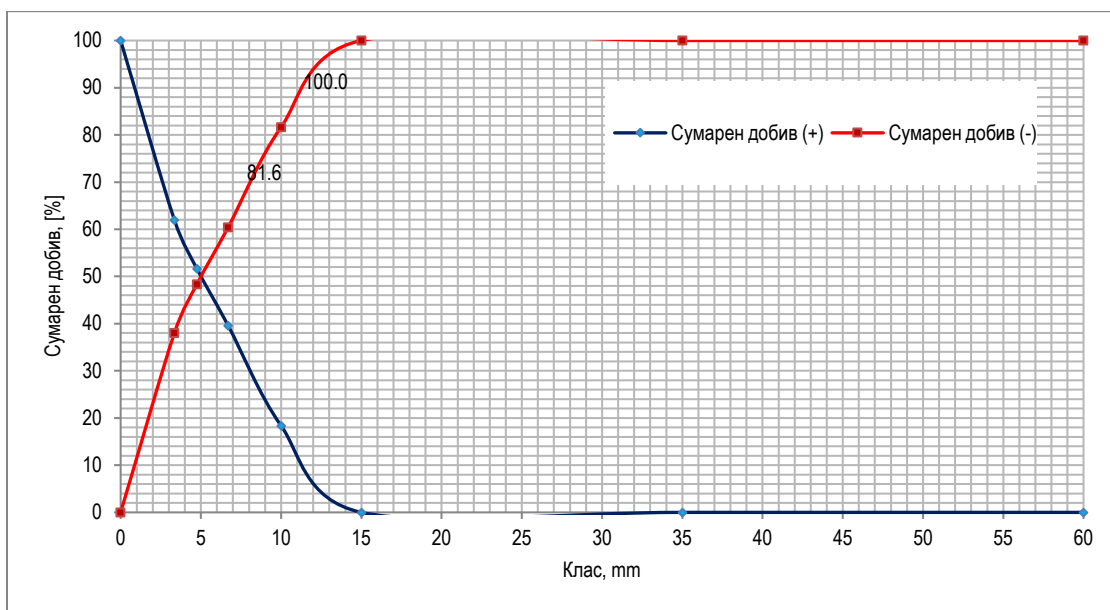
Фигура IV.8. Криви на сумарни добиви „по +“ на продуктите – захранване, надситов продукт и подситов продукт“

IV.2.2. Дейност на трошачното отделение след оптимизиране захранването на рудата в процеса на трошене

За определяне ефективността на пресяване, след внедрената оптимизация на захранването на рудата в процеса трошене, отново бе извършено опробване на продуктите от вибрационното сито – захранване, надситов продукт и подситов продукт. Данните от ситовия анализ са представени в таблица IV.4 Въз основа на получените данни е построена зърнометричната характеристика на подситовия продукт, след регулиране оборотите на пластинчатия питател (фиг. IV.10).

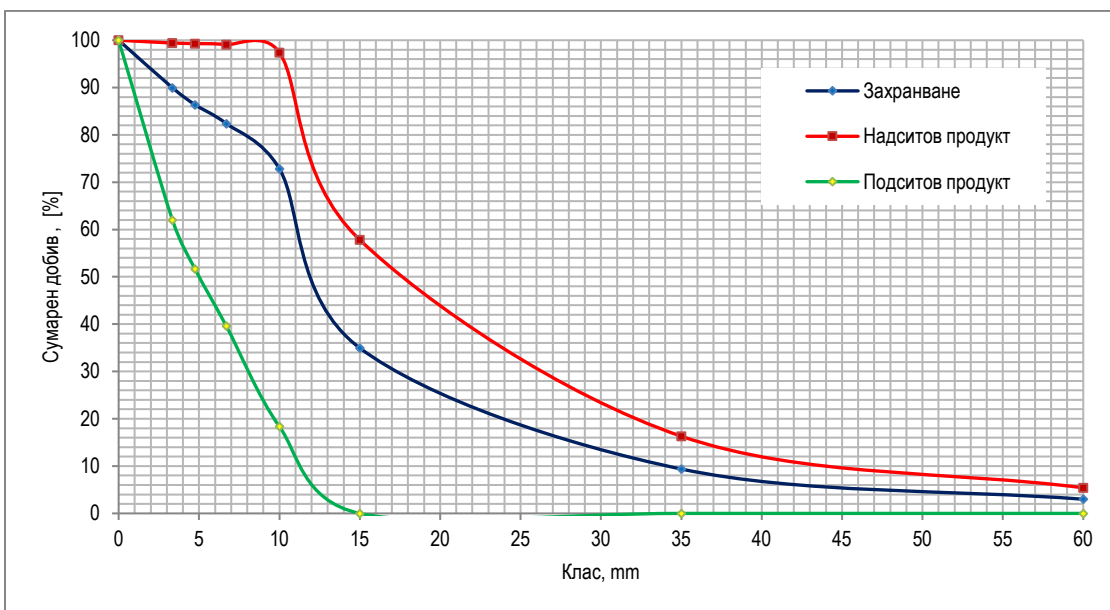
Таблица IV.4. Зърнометричен състав на трите продукта от пресяването след оптимизиране захранването на рудата в процеса на трошене, ОФ „Тораница“

Клас, mm	Захранване	Надситов продукт	Подситов продукт
	Добив, %		
+60	3.0	5.4	0.0
- 60 + 35	6.4	10.9	0.0
- 35 + 15	25.6	41.5	0.0
- 15 + 10	37.9	39.6	18.4
- 10 + 6.7	9.5	1.7	21.2
- 6.7 + 4.75	4.0	0.2	12.1
- 4.75 + 3.35	3.5	0.1	10.3
- 3.35	10.1	0.6	38.0
Общо	100.0	100.0	100.0



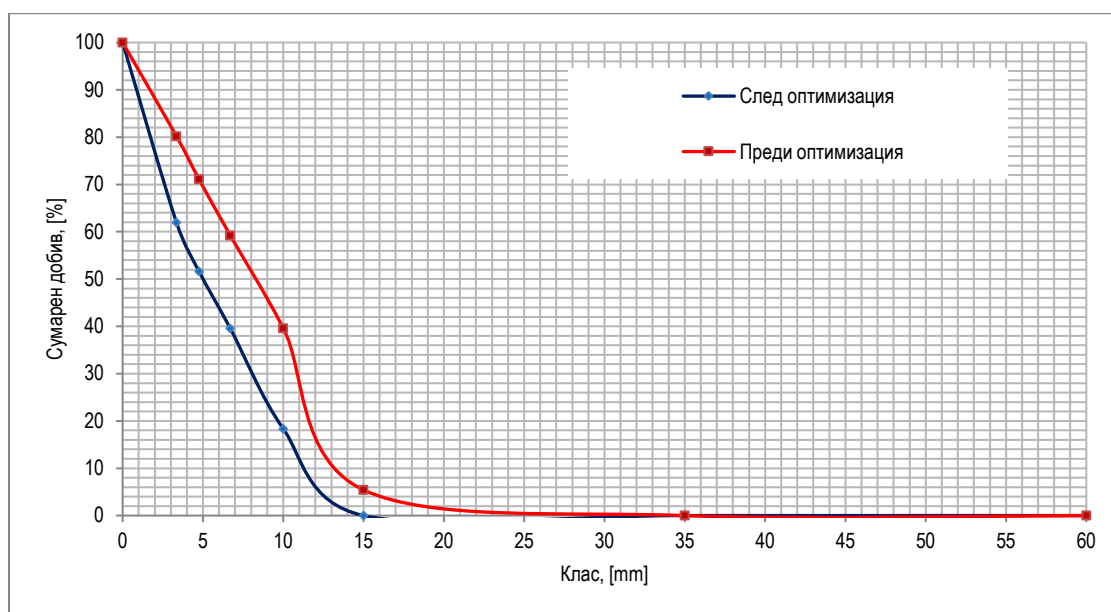
Фигура IV.10. Зърнометрична характеристика на подситов продукт от пресяването на вибрационното сито, след регулиране на оборотите на пластинчатия питател, ОФ „Тораница“

На фиг. IV.10 са показани стойностите на подситовия продукт в класовете „-15 mm“ и „-10 mm“, съответно 100.0 % и 81.6 %. Построени са криви на сумарните добиви „по +“ на трите продукта от пресяването – захранване, подситов продукт и надситов продукт (фиг. IV.11).



Фигура IV.11 Криви на сумарни добиви „по +“ в продуктите – захранване, надситов продукт и подситов продукт след регулиране на оборотите на пластинчат питател, ОФ „Тораница“

За сравнение на ефективността на пресяване на вибрационното сито, са построени двете криви на подситовите продукти, постъпващи за последваща преработка на рудата, преди и след оптимизиране захранването на рудата в процеса на трошене (фиг. IV.12).



Фигура IV.12. Ефективност на пресяване в подситовите продукти преди и след оптимизиране
захранването на руда в процеса на трошене, ОФ „Тораница“

От графиката се вижда, че след внедряване на честотния преобразувател за оптимизиране оборотите на пластинчатия питател, ефективността на пресяване е увеличена.

Ефективността на пресяване е изчислена по следната формула:

$$E = \frac{a - b}{a(100 - b)} 10^4, \%$$

където:

E – ефективност на пресяване, %

a – количество материал в изходната руда

b – количество материал в надситовия продукт

Получените резултати за ефективността на пресяването са представени в таблица IV.5.

Таблица IV.5. Ефективност на пресяване преди и след оптимизиране захранването на рудата в
процеса на трошене

Клас, mm	Ефективност на пресяване преди оптимизацията [%]	Ефективност на пресяване след оптимизацията [%]
-60 + 35	72.71	46.00
-35 + 15	69.14	46.89
-15 + 10	59.04	60.78
-10 + 6.7	88.77	92.84
-6.7 + 4.75	84.52	95.56
-4.75 + 3.35	79.21	95.47
-3.35	73.53	94.71

Получените данни показват, че ефективността на пресяване след оптимизиране захранването на рудата в класовете под 15 mm е повишена, като в класовете под 10 mm тя е над 90 % (табл. IV.5).

IV.2.3 Техничко-икономически показатели на трошачното отделение преди и след оптимизиране на хранването на рудата в процеса на трошене

Установено е, че ефективността на пресяване на рудата е повишена с около 41.5 %, вследствие на оптимизирането на работата на пластинчатия питател, в сравнение с показателите, преди извършената оптимизация. Делът на клас „-15.0 + 0.0 mm” при регулирани обороти на питателя е 100 %, докато преди регулиране на оборотите е 94.6 % (табл. IV.3, IV.4; фиг. IV.7, IV.10).

Делът на фракцията „-10.0 + 0.0 mm” натрошена руда, получавана при регулирани обороти на пластинчатия питател, възлиза на 81.6 %, докато преди оптимизацията (без регулиране на оборотите) той е 60.4 % (табл. IV.4, IV.5; фиг. IV.7, IV.10).

Времето за натрошаване на рудата при регулирани обороти на пластинчатия питател е съкратено от 7.5 на 5.5 часа на смяна, с което е намален разходът на електроенергия и е създадена възможност за извършване на текущи ремонти и отстраняване на възникнали дефекти или аварии в рамките на същата смяна.

Повишената ефективност на пресяване на рудата, постигната чрез въвеждане на оптимизацията посредством монтиране на честотен преобразувател на пластинчатия питател и регулиране на неговите обороти, оказва положително въздействие върху последващите технологични процеси – смилане и флотация. В резултат е увеличена производителността на мелничното отделение, намален е разходът на мелничния товар (стоманени топки с диаметър Ø90 и Ø80 mm), постигнато е по-пълно разкриване на рудните минерали.

Чрез внедряването на иновативната техника са реализирани няколко ключови технологични подобрения, а именно:

- Оптимизирано управление на подаването на руда, което позволява динамично регулиране на потока на материала, в зависимост от натоварването на ситото, с цел постигане на по-стабилен и равномерен режим на работа;
- Оптимизация на зърнометричния състав на хранения материал, водеща до намаляване на натоварването върху последващите процеси на обогатяване и до повишаване на общата технологична ефективност на производствения цикъл.

IV.2.4. Изводи от оптимизираното хранване на рудата

Внедряването на иновативни технологии в процесите на трошене и пресяване подобрява ефективността на обогатяване на минералните суровини. Постигнатите резултати показват, че оптимизацията на тези процеси повишава производителността на обогатителната фабрика, като в същото време редуцира производствените разходи, допринася за устойчивото управление на ресурсите и минимизира загубите на метали в технологичните отпадъци.

IV.3. Повишаване турбулентността на пулпа, чрез промяна на числото на Рейнолдс в ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македонија

Важно значение за постигането на ефективна флотация и по-пълното извличане на металите при преработката на рудите има процесът на агитация на пулпа, който предшества флотацията. С кондиционера за агитация на пулпа се извършва интензивно разбъркване на минералната суспензия, с цел равномерно разпределение на минералните частици и предотвратяване на тяхното утаяване на дъното на кондиционера, постига се равномерно разпределение на добавяните флотационни реагенти и се подобрява тяхната реактивност. Агитацията на пулпа способства за постигането на по-добри резултати при следващите етапи на флотация, подобро извличане на металите и намаляване на производствените разходи.

В обогатителна фабрика „Тораница“ използваният агитационен кондиционер е физически и морално остарял и с него не се осъществява равномерно разбъркване и смесване на пулпа с добавяните реагенти. Недостатъчната агитация на пулпа намалява ефективността на последващите процеси на флотация, в резултат на което в определени периоди от време,

произвежданите концентрати в ОФ „Тораница“, показват влошени технологични показатели и не отговарят на изискванията за металургична преработка.

С цел подобряване активацията на пулпа, оптимизиране на последващия процес на флотация и повишаване степента на извличане на металите, в ОФ „Тораница“ е внедрен усъвършенстван агитационен кондиционер

IV.3.1. Агитационен кондиционер, използван досега в ОФ „Тораница“

В ОФ „Тораница“ използваният досега агитационен кондиционер е физически остарял и в определени периоди от неговото действие, твърдата фаза се отлага по дъното на съда и работата на кондиционера се прекратява. Техническите характеристики на този агитационен кондиционер са следните:

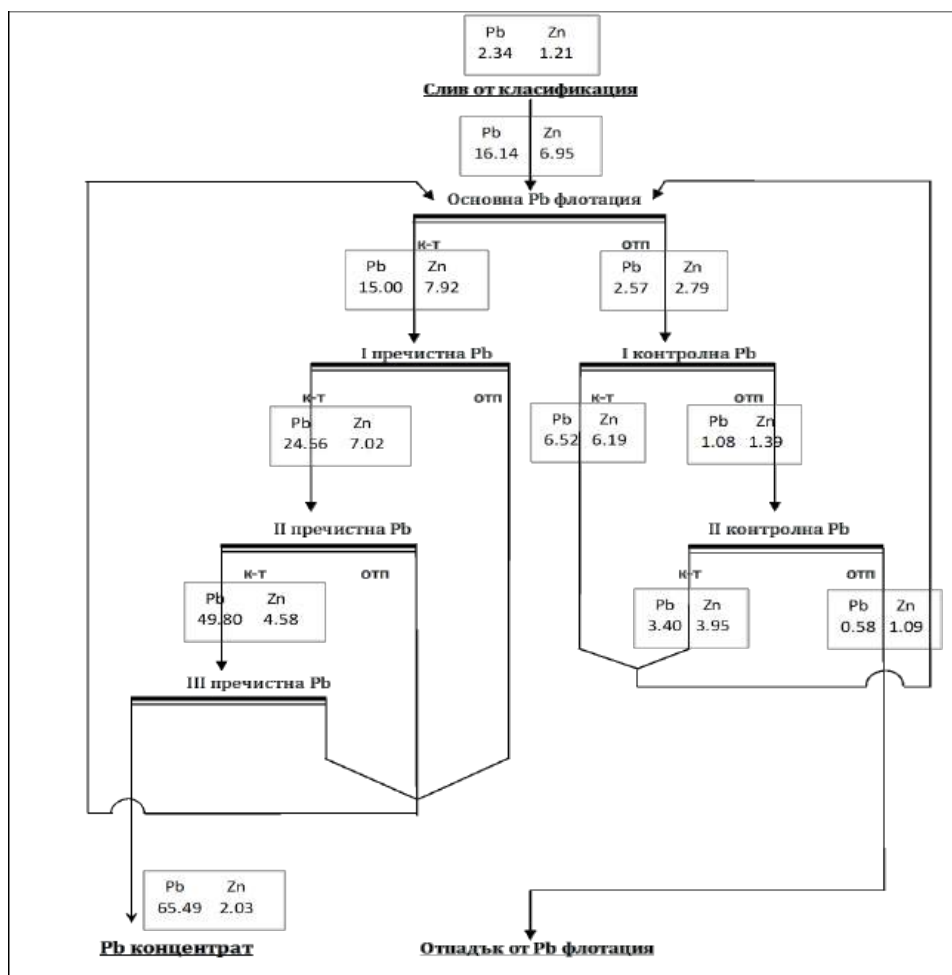
- ❖ обем на кондиционера 12.5 m³
- ❖ вътрешен диаметър на кондиционера – 2540 cm
- ❖ височина на кондиционера – 5000 mm
- ❖ ниво на пулп в кондиционера – 4000 mm
- ❖ диаметър на импелера – 440 mm;
- ❖ наклон на лопатките – 33°;
- ❖ мощност на електродвигателя – 15 kW ,
- ❖ честота на въртене на импелера –750 rpm
- ❖ диаметър на вала – 140 mm

В резултат на недостатъчната агитация и кондициониране на пулпа се получават влошени технологични показатели на произвежданите концентрати, с повишено съдържание на Pb в цинковия концентрат и загуби на метал Pb в отпадъка (табл. IV.6, фиг. IV.13). През периода юли - септември 2023 г. средномесечното съдържание на Pb в цинковия концентрат варира от 4.89 до 6.08 %, извличането на Pb варира от 78.8 до 80.95%, а загубата на Pb в отпадъка достига до 0.51 % (табл. IV.6).

Таблица IV.6. Средномесечни съдържания на Pb и Zn в рудата, концентратите и отпадъка през 2023 г., преди внедряването на усъвършенстван агитационен кондиционер в технологичната верига на ОФ „Тораница“

2023 г.	Руда		Pb концентрат		Zn концентрат		Отпадък		Добив (%)		Извличане (%)	
	Съдържание (%)											
	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
Април	2.25	1.50	69.49	2.42	3.67	48.94	0.39	0.19	2.57	2.57	79.30	83.99
Май	2.45	1.43	71.34	2.15	4.14	48.75	0.41	0.16	2.75	2.49	80.01	85.22
Юни	2.82	1.91	73.46	2.32	3.42	49.46	0.45	0.21	3.11	3.34	80.95	86.19
Юли	2.83	1.57	71.02	2.03	5.11	48.17	0.49	0.17	3.14	2.79	78.78	85.60
Август	3.07	1.46	68.43	2.69	6.08	47.54	0.51	0.18	3.55	2.51	79.28	81.92
Септември	2.77	1.38	69.61	2.11	4.89	48.05	0.44	0.16	3.22	2.42	80.90	83.98

Съдържанията на Pb и Zn във флотационните продукти, преди въвеждането на усъвършенстван агитационен кондиционер в технологичната верига на ОФ „Тораница“ са показани на фиг. IV.13.



Фигура IV.13. Съдържания на Pb и Zn във флотационните продукти в цикъла на оловна флотация, преди въвеждането на усъвършенстван агитационен кондиционер, ОФ „Тораница“

IV.3.2. Внедряване на усъвършенстван агитационен кондиционер в ОФ „Тораница“

В обогатителна фабрика „Тораница“ е внедрен усъвършенстван агитационен кондиционер, с оглед отстраняване на факторите, оказващи неблагоприятно влияние върху ефективността на процеса флотация. Към този кондиционер е монтирана инсталация за въздух от въздуходувката към импелера на агитатора, с което е предотвратено отлагането на пулп върху импелера. Увеличен е диаметърът на лопатките със 100 mm, като по този начин техният краен диаметър достига до 540 mm. Променен е ъгълът на лопатките с 4°, като в резултат на центробежната сила от въртенето на импелера, пулпът се изтласква в посока нагоре и не се извършва отлагането му на дъното на кондиционера. Увеличена е мощността на електродвигателя на 18 kW, 950 об/мин.

Въз основа на променените характеристики на импелера са изчислени стойностите на числото на Рейнолдс, за да бъде определен потокът на флуидите по следната формула:

$$Re = \frac{\rho N d^2}{\mu},$$

където:

Re – число на Рейнолдс;

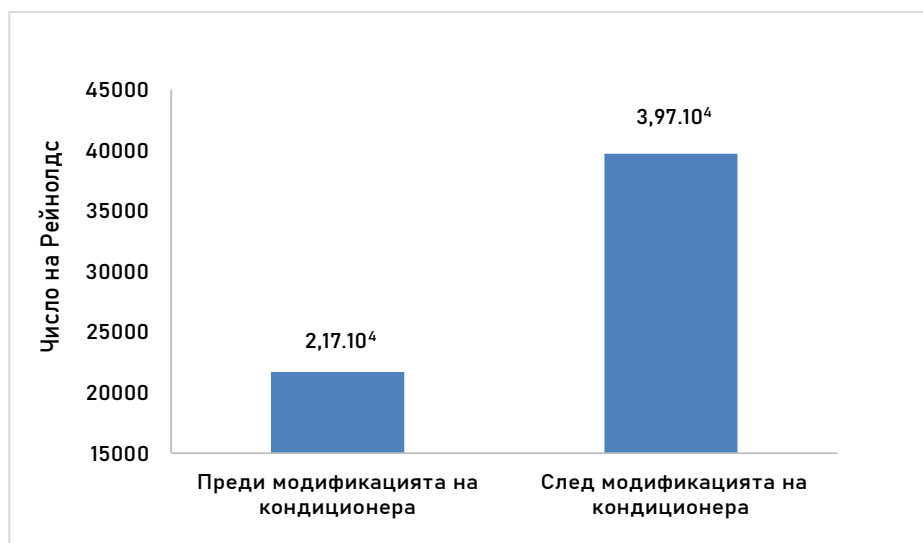
ρ – плътност на флуида, g/cm³;

N – скорост на въртене, sec⁻¹;

d – диаметър на импелера, mm;

μ – коефициент на динамичен вискозитет на флуида, Pa.s.

Изчисленото число на Рейнолдс преди промяната на диаметъра на импелера, наклона на лопатките и скоростта на въртене на вала е $R_e = 2,17 \cdot 10^4$. Стойността на числото на Рейнолдс след извършената промяна в характеристиките на импелера е $R_e = 3,97 \cdot 10^4$. Получените резултати показват, че преди и след промяната на диаметъра на импелера, наклона на лопатките и скоростта на въртене на вала, потокът е силно турбулентен, но при по-високата стойност на числото на Рейнолдс е създадена по-добра разбъркваща среда, по-подходяща за работата на агитационния кондиционер.



Фигура IV.14. Число на Рейнолдс преди и след промяната на диаметъра на работното колело, наклона на лопатките и скоростта на въртене на вала

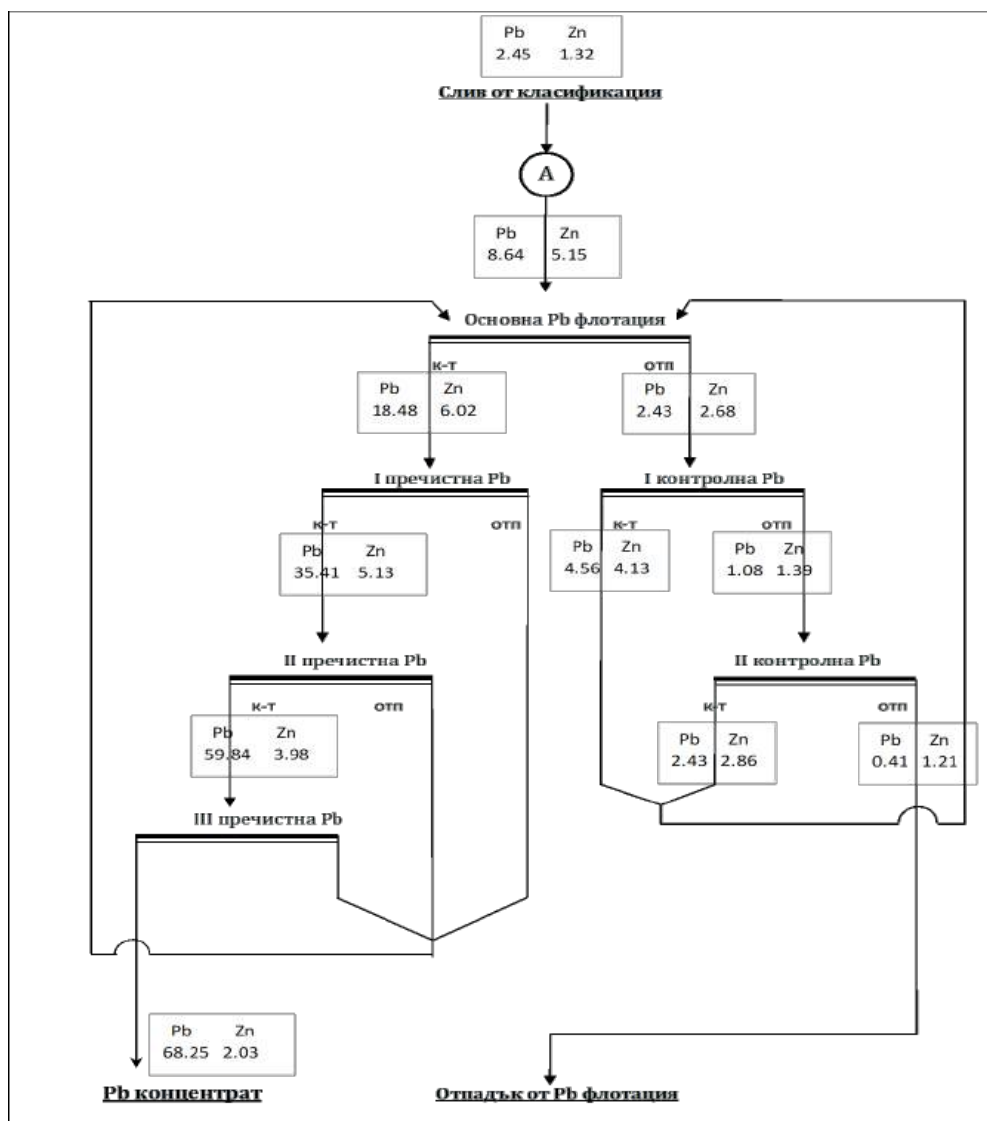
След промените в параметрите на бъркалката в кондициониращия резервоар бе постигната работа в непрекъснат режим. Осигурено е по-добро разбъркване на флотационните реагенти, добавяни към суспензията и е подобро качеството на произвежданите концентрати.

Средномесечните съдържания на Pb и Zn в изходната руда, концентратите и отпадъка за периода октомври - декември 2023 г., след внедряването на усъвършенствания агитационен кондиционер са представени в табл. IV.7.

Таблица IV.7. Средномесечни съдържания на Pb и Zn в рудата, концентратите и отпадъка през 2023 г., след внедряването на усъвършенствания агитационен кондиционер в технологичната верига на ОФ „Тораница“

2023 г.	Руда		Pb концентрат		Zn концентрат		Отпадък		Добив (%)		Извличане (%)	
	Съдържание (%)											
	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
Октомври	2.65	1.41	69.37	2.22	3.37	46.42	0.41	0.17	3.13	2.54	82.14	83.92
Ноември	3.04	1.17	69.95	2.70	2.96	49.85	0.44	0.13	3.68	1.91	84.50	81.22
Декември	2.92	1.43	69.76	2.73	2.98	49.08	0.39	0.17	3.56	2.40	85.09	82.27

Данните от извършените химични анализи на флотационните продукти показват, че е постигната по-добра селективност и по-висока степен на извличане на Pb, достигаща до 82.14 – 85.09 %. Не се установява значително намаляване на загубите на Pb в крайните флотационни отпадъци. В произвеждания цинков концентрат отсъстват повишени съдържания на Pb и той напълно отговаря на изискванията за металургична преработка (табл. IV.7, фиг. IV.15).



Фигура IV.15. Съдържания на Pb и Zn в %, във флотационните продукти в цикъла на оловна флотация, след внедряването на усъвършенстван агитационен кондиционер, ОФ „Тораница“

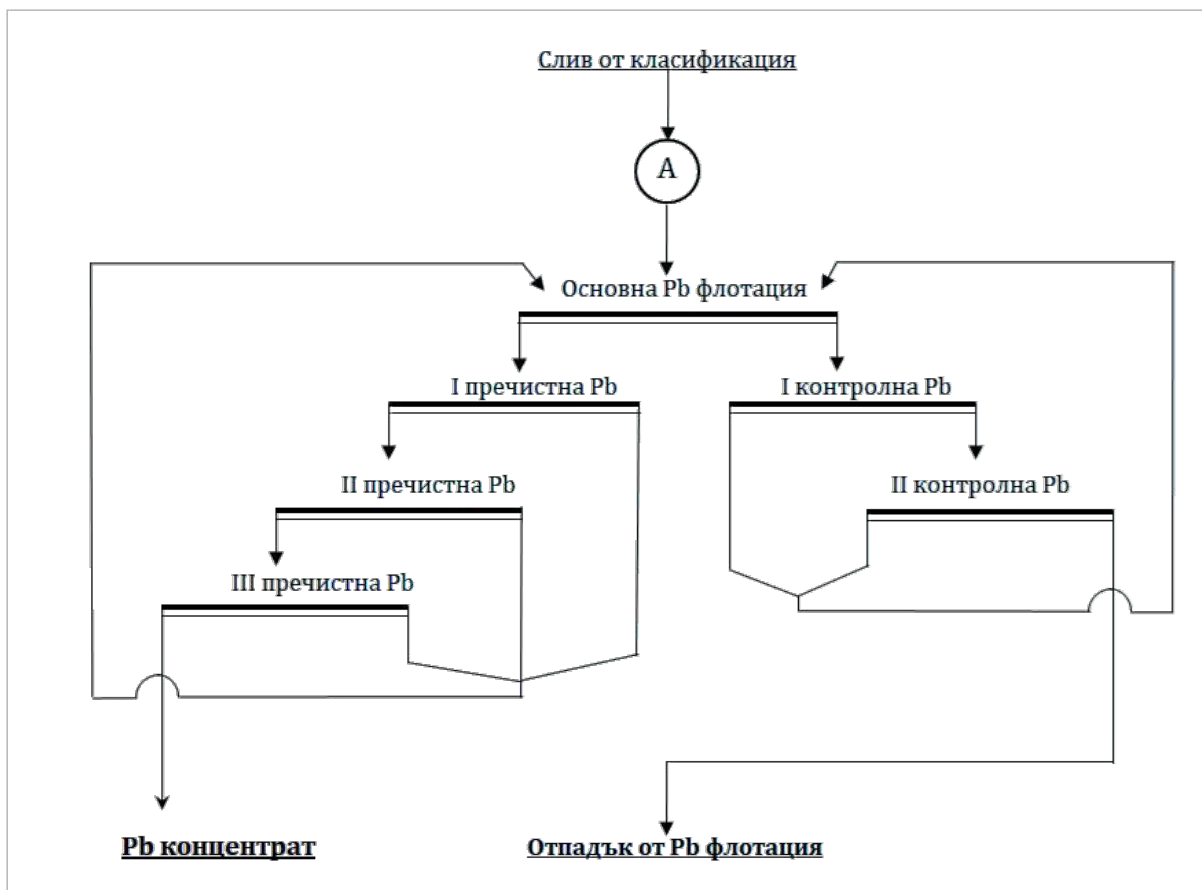
IV.3.3. Изводи от оптимизирането на активацията на пулпа

Данните от проведените изследвания показват, че недостатъчната агитация и кондициониране на пулпа води до неефективност на последващите процеси на флотация на Pb-Zn руда. С внедряването в обогатителна фабрика „Тораница“ на усъвършенстван агитационен кондиционер са постигнати следните резултати: по-добра агитация на пулпа с подаваните реагенти в технологичната верига на фабриката, по-добра селективност на произвежданите концентрати, по-добро извличане на металите от рудата и устойчиво и трайно производство на качествени концентрати, отговарящи напълно на изискванията за металургична преработка.

IV.4. Оптимизиране на процесите в цикъла на оловна флотация в ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македонија

В ОФ „Тораница“ Pb-Zn руда се подлага на обогатяване, с използването на пряка селективна схема на флотация. При тази технологична схема на обогатяване, първоначално се извършва флотация на оловния минерал галенит при депресия на сфалерита и след активация на депресирания сфалерит се извършва последващата цинкова флотация. Оловната и цинковата флотация се провеждат с механични флотационни машини тип „Механобър“. Оловният цикъл

включва една основна флотация, три пречистни и две контролни операции, които се извършват последователно с флотационните машини съответно „Механобър“ ФПМ 2.5, „Механобър“ ФМР 1.0 и „Механобър“ ФПМ 2.5. Цинковият цикъл включва също една основна, три пречистни и две контролни флотации, които се осъществяват с флотационни машини „Механобър“ ФПМ 2.5; „Механобър“ ФМР 3.2 и „Механобър“ ФПМ 2.5. Схемата на флотационния цикъл е показана на фиг. IV.16



Фигура IV.16. Верижна схема на оловна флотация, ОФ „Тораница“

При флотацията на Pb-Zn сулфидни руди в ОФ „Тораница“ се използват следните флотационни реагенти: калиев етилов ксантогенат ($C_2H_5OCS_2K$) и калиев амилов ксантогенат ($C_5H_{11}OCS_2K$) – като събиратели; цинков сулфат ($ZnSO_4$) и натриев цианид ($NaCN$) – депресори на сфалерита в оловния цикъл на флотация; меден сулфат ($CuSO_4$) – активатор на депресирания сфалерит; водно стъкло – депресор; флотационно масло Dowfroth 200 – пенообразувател и калциев хидроксид $Ca(OH)_2$ – регулатор на рН на средата (Петров и др., 2024).

Крайните продукти – оловен и цинков концентрат се получават след обезводняване, което се постига в два стадия – сгъстяване в радиални сгъстителни и филтрация на сгъстените продукти с помощта на вертикална филтърпреса.

Химичният състав на произвежданите концентрати е представен в табл. IV.8

Таблица IV.8. Химичен състав на оловен и цинков концентрат, ОФ „Тораница“

Елементи	Pb концентрат	Zn концентрат
	Съдържание (%)	
Pb	68 – 71	3 – 5
Zn	3 – 4.7	48.5 – 51.5
Fe	2 – 4	3 – 5
Ag (g/t)	240 – 400	30 – 50
Sb	0.005 – 0.015	< 0.10
Bi	0.06	0.008
Cd	0.25 – 0.31	0.35
Cu	0.3 – 1.4	0.8 – 1.4
Co	< 0.01	0.006
Ni	-	0.0025 – 0.005
As	0.05	< 0.10
Ge (g/t)	-	1 – 2
Hg	-	< 0.0005
S	15 – 18	28 – 30
Cl	-	0.001 – 0.004
F	-	0.0006
Mg	-	0.33
SiO ₂	1 – 2	2 – 2.7
Al ₂ O ₃	0.25	0.60
H ₂ O	6 – 8	7.91 – 9.10

През последните няколко години, в някои периоди от време, обогатителната фабрика произвежда концентрати с влошени технологични показатели, които не отговарят на изискванията за металургична преработка. В тези периоди средномесечното съдържание на Pb в цинковия концентрат достига до 7.2 %, а средномесечното съдържание на Zn в оловния концентрат – до 5.74 %, като се наблюдава и загуба на Pb в крайния флотационен отпадък. Установено е, че получаването на некачествени цинкови концентрати, с високо съдържание на примеси от Pb, достигащи до над 8 % и загуба на Pb в отпадъка се наблюдава при преработката на руда с повишено съдържание на Pb (над 3 %), в резултат на недостатъчно дългия фронт на основната оловна флотация. Данни за съдържанието на Pb и Zn в рудата, произвежданите концентрати и отпадъка в ОФ „Тораница“ през месец август 2023 г. са показани в табл. IV.9.

Табл. IV.9. Съдържание на Pb и Zn в рудата, концентратите и отпадъка в ОФ „Тораница“ през месец август 2023 г.

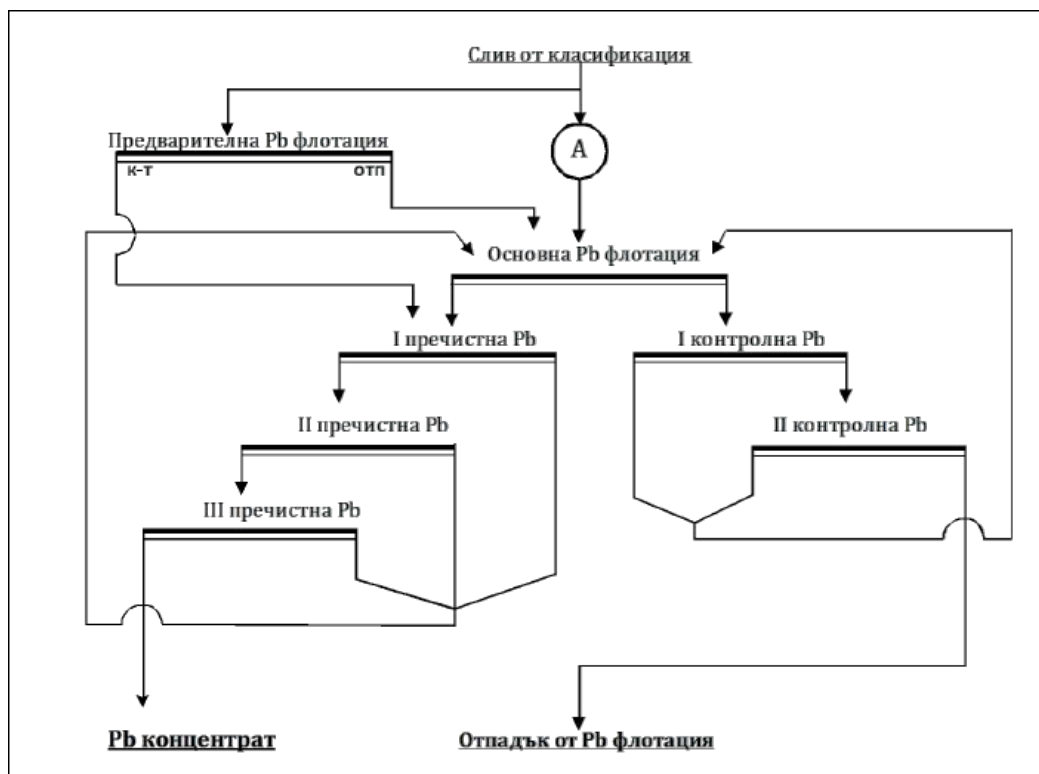
2023 г.	Руда		Pb концентрат		Zn концентрат		Отпадък		Добив (%)		Извличане (%)	
	Съдържание (%)											
	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
12.08.2023	3.52	1.81	72.10	1.71	5.08	48.23	0.47	0.19	4.05	3.24	82.94	86.44
13.08.2023	3.27	1.82	68.70	2.06	6.90	46.44	0.75	0.21	3.41	3.35	71.55	85.39
14.08.2023	3.36	1.69	71.53	2.13	8.55	46.39	0.52	0.21	3.65	3.05	77.79	83.80
15.08.2023	3.67	1.76	68.68	2.69	7.90	46.46	0.59	0.19	4.18	3.17	78.29	83.60
16.08.2023	3.34	1.53	65.34	2.79	6.21	48.08	0.71	0.25	3.86	2.47	75.49	77.66
17.08.2023	2.91	1.45	72.00	2.25	6.97	47.46	0.57	0.18	3.05	2.55	75.40	83.55
18.08.2023	3.07	1.39	65.12	4.14	3.76	49.73	0.46	0.14	3.92	2.20	83.23	78.86
19.08.2023	2.94	1.78	65.21	4.41	3.85	49.38	0.49	0.20	3.63	2.90	80.62	80.49

20.08.2023	2.99	1.59	66.56	3.33	7.24	46.71	0.50	0.23	3.49	2.69	77.79	79.11
21.08.2023	2.84	1.73	68.76	3.23	5.26	46.07	0.45	0.19	3.28	3.14	79.36	83.60
22.08.2023	3.04	1.36	66.75	2.86	4.09	47.17	0.42	0.12	3.82	2.41	83.80	83.70
23.08.2023	2.47	1.30	72.17	1.91	4.01	48.72	0.42	0.13	2.74	2.31	80.11	86.48
24.08.2023	2.61	1.11	61.34	3.10	7.71	49.21	0.66	0.16	3.01	1.76	70.73	77.87
25.08.2023	2.65	1.53	68.90	2.93	6.19	45.53	0.36	0.16	3.10	2.83	80.61	84.23
26.08.2023	3.34	1.03	70.24	2.37	7.32	47.03	0.43	0.11	3.99	1.77	83.99	80.75
27.08.2023	2.50	1.08	70.64	2.35	7.87	47.42	0.49	0.10	2.66	1.94	75.18	85.38

С цел повишаване ефективността на процесите на флотация, подобряване качеството на произвежданите концентрати и предотвратяване загубите на Pb в отпадъка, са разработени и внедрени определени технологични решения в цикъла на оловна флотация в ОФ „Тораница.“ Тези технологични решения включват промяна в схемата на флотация, въвеждането на предварителна оловна флотация, монтирането на допълнителни флотационни клетки и др.

IV.4.1. Удължаване времето на флотация чрез въвеждане на предварителна флотация

Първото технологично решение включва въвеждането на предварителна флотация, като са инсталирани четири броя флотационни клетки, преливът от които постъпва в първа пречистна оловна флотация. Целта на въвеждането на предварителната флотация е увеличаване съдържанието на оловни частици в пулпа, постъпващ към първа пречистна оловна операция. Това е постигнато чрез включването на четири флотационни клетки с обем 2.5 m³ с импелерни пневмомеханични флотационни машини тип „Механобър“ 5. Схемата на цикъла на оловна флотация с въведената предварителна флотация е показана на фиг. IV.17



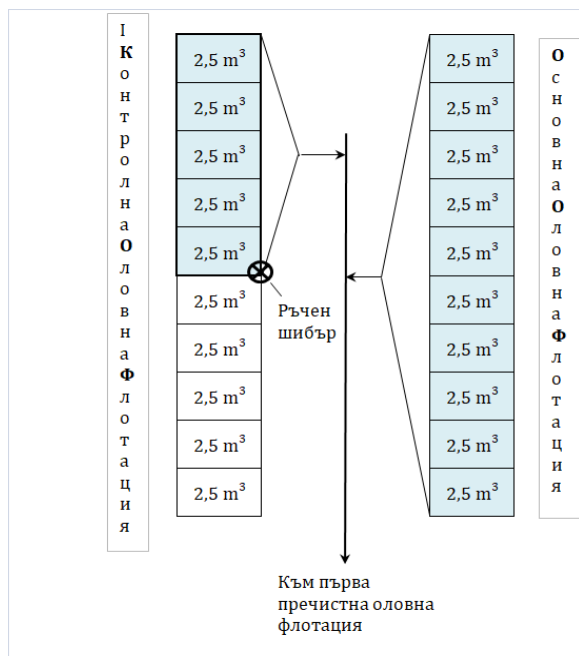
Фигура IV.17. Верижна схема на оловна флотация с въвеждане на предварителна флотация, ОФ „Тораница“

IV.4.2. Удължаване времето на основна оловна флотация

Секцията на основна оловна флотация включва 10 бр. флотационни клетки, разделени на две части. В първата част са монтирани една смукателна флотационна машина „Механобър“ 5 ФМР 2.5 m³ с мощност на електродвигателя 15 kW/rpm – 950 min⁻¹ и три броя импелерни флотационни машини „Механобър“ 5 ФПМ 2.5 m³ с мощност на електромотора 7.5 kW/rpm – 750 min⁻¹.

Във втората част са монтирани една смукателна флотационна машина „Механобър“ 5 ФМР 2.5 m³ с мощност на електродвигателя 15 kW/rpm – 950 min⁻¹ и пет броя импелерни флотационни машини „Механобър“ 5 ФПМ 2.5 m³ с мощност на електромотора 7.5 kW/rpm – 750 min⁻¹.

При преработката на Pb-Zn руда с повишено съдържание на Pb, в първите пет флотационни клетки на първа контролна оловна флотация се установява високо съдържание на Pb. С цел подобро извличане на оловото, бе монтиран шибър с ръчно задвижване след петата флотационна машина, като пенният продукт от петте флотационни машини (12.5 m³) се обединява заедно с пенния продукт на основна оловна флотация. Обединените продукти постъпват на първа пречистна оловна флотация. По този начин общият обем на флотационните клетки на основна флотация се увеличава от 25 m³ на 32.5 m³, без да се повишава разходът на електроенергия (фиг. IV.18)



Фигура IV.18. Верижна схема на удълженото време на основна оловна флотация с 12.5 m³,
ОФ „Тораница“

IV.4.3. Удължаване времето на контролните оловни операции

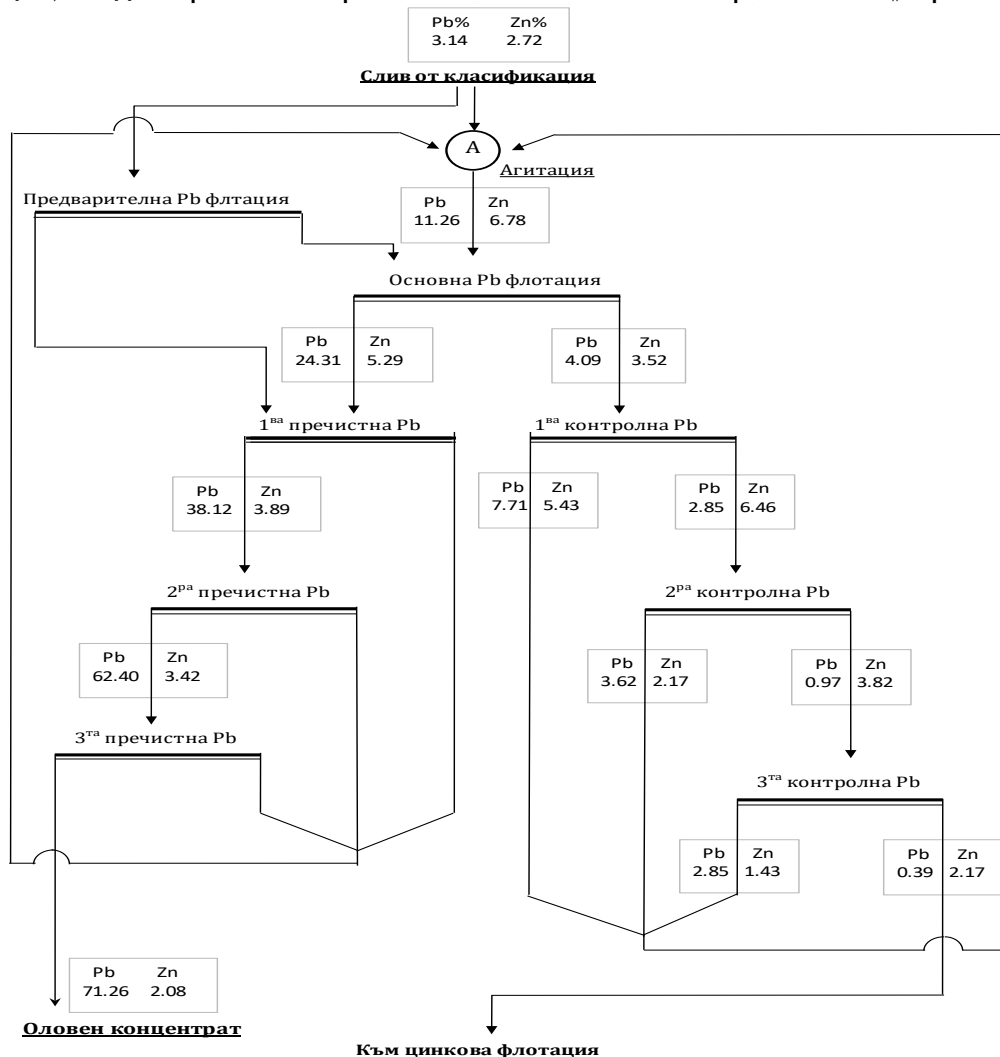
Поради повишаване плътността на пулпа в основна оловна флотация над 40-45 %, пониженото извличане на Pb и загубата му в крайния отпадък, бе удължено времето на контролните оловни операции, с въвеждането на нов ред с допълнителни 10 броя пневмомеханични флотационни машини „Механобър“ 2.5 m³. или с 25 m³. Първа и шеста флотационни машини „Механобър“ ФМР 2.5 m³ са смукателни и задвижването се извършва чрез електромотор с мощност 15 kW/rpm – 950 min⁻¹. Останалите от 2-5 и 7-10 машини са импелерни „Механобър“ ФМП 2.5 m³, като при тях задвижването се извършва чрез електромотор с мощност 7.5 kW/rpm – 750 min⁻¹.

Мониторингът на продуктите в цикъла на оловна флотация след направените промени в технологичната верига показва, че получаваните концентрати отговарят на изискванията за металургична преработка. Извличането на Pb в оловния концентрат достига до 86-89 %, а загубата на метали в отпадъка е сравнително ниска (табл. IV.10).

Таблица IV.10. Средномесечни съдържания на Pb и Zn в рудата, концентратите и отпадъка в ОФ „Тораница“ през 2024 г., след направените промени в технологичната верига на ОФ „Тораница“

2024 г.	Руда		Pb концентрат		Zn концентрат		Отпадък			Добив (%)		Извличане (%)	
	Съдържание (%)												
	Pb	Zn	Pb	Zn	Zn	Pb	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn	
Януари	3.17	1.54	69.87	2.38	3.11	48.30	0.30	0.15	4.02	2.70	88.52	84.71	
Февруари	2.66	1.56	70.87	2.37	2.68	47.99	0.30	0.16	3.25	2.78	86.60	85.42	
Март	2.93	1.18	71.10	2.22	2.72	47.64	0.28	0.12	3.67	2.07	89.07	83.51	

На фиг. IV.19. са представени резултатите от анализа на опробваните продукти в цикъла на оловна флотация, след направените промени в технологичната верига на ОФ „Тораница“.



Фигура IV.19. Съдържания (%) на Pb и Zn във флотационните продукти в цикъла на оловна флотация, след удължаване времето на контролната оловна флотация, ОФ „Тораница“

IV.4.4. Изводи от направените промени в цикъла на оловна флотация

В практиката на обогатителна фабрика „Тораница“ са внедрени следните нови технологични решения:

- Въведена е предварителна оловна флотация с монтирането на 4 бр. импелерни флотационни машини „Механобър“ 5 ФПМ 2.5 m³, като чрез тях е постигнато усвояване на флотиралото фино олово.

- Удължено е времето на основна оловна флотация с още 5 бр. флотационни машини ФПМ 2.5 m³ за по-добро извличане на Pb в основната оловна флотация.

- Удължено е времето на контролните оловни операции с въвеждането на нов ред с допълнителни 10 броя флотационни клетки (2 бр. смукателни флотационни машини „Механобър“ ФМР 2.5 m³ и 8 бр. импелерни флотационни машини ФПМ 2.5 m³). Секцията е разделена на две части, с цел дробно подаване на флотационните реагенти, чрез които е постигната по-ниска загуба на Pb във флотационния отпадък.

Резултатите постигнати от извършените промени в схемата на оловна флотация са следните:

- Повишено е извличането на Pb в оловния концентрат от 70 – 75 % до 88 – 89 %.
- Редуцирано е съдържанието на вреден примес от Pb в цинковия концентрат от 7 – 8 % до 2 – 3 %.
- Намалено е съдържанието на Pb в крайния технологичен отпадък от 0.50 – 0.70 % до 0.30 %.

С проведените изследвания е установено, че извършената промяна в схемата на оловна флотация обезпечава получаването на качествени крайни продукти – оловен и цинков концентрат без наличие на вредни примеси, отговарящи на изискванията за металургична преработка, като в същото време е предотвратена и загубата на метали в отпадъка.

IV.5. Оптимизиране разходите на използваните реагенти в технологичната флотационна схема на ОФ „Тораница“, гр. Крива Паланка, Република Северна Македония

IV.5.1. Разход на флотационните реагенти използвани в ОФ „Тораница“, преди въведената оптимизация на реагентния режим

Въведените промени в технологичната схема на флотация в ОФ „Тораница, включващи удължаване времето на флотация в основната оловна флотация и в контролните оловни операции, доведоха до промяна в реагентния режим на подаваните реагенти, както и на подаването им чрез внедряване на нови дозаторни мембранни помпи.

Разходите на използваните реагенти *преди* извършената промяна в оловния цикъл на технологичната схема са следните:

Разход на етилов ксантогенат (PEX):

- В началото на основна оловна флотация – 25 g/t
- В началото на първа контролна оловна флотация – 15 g/t
- В началото на втора контролна оловна флотация – 5 g/t

Разход на цинков сулфат (ZnSO₄):

- В началото на основна оловна флотация – 50 g/t
- Във втора пречистна оловна флотация – 26 g/t

Разход на натриев цианид (NaCN):

- В първа пречистна оловна флотация – 10 g/t
- Във втора пречистна оловна флотация – 12 g/t

Разход на пенообразувател (Dowfroth 200):

- В началото на основна оловна флотация – 61 g/t

В цинковия цикъл се използват следните реагенти: активатор – меден сулфат (CuSO_4), събирател – калиев амилов ксантогенат (PAX), регулатор на рН – варно мляко. Разходите на използваните реагенти са следните:

Разход на меден сулфат (CuSO_4):

- В началото на основна цинкова флотация – 100 g/t
- В средата на основна цинкова флотация – 65 g/t

Разход на калиев амилов ксантогенат (PAX):

- В началото на основна цинкова флотация – 20 g/t
- В началото на първа контролна цинкова флотация – 10 g/t
- В началото на втора контролна цинкова флотация – 5 g/t

Разход на варно мляко:

- В началото на основна цинкова флотация – 315 g/t
- В началото на трета пречистна цинкова флотация – 450 g/t

IV.5.2. Разход на флотационните реагенти използвани в ОФ „Тораница“, след въведената оптимизация на реагентния режим

След въвеждането на оптимизация в схемата на флотация са запазени същите използвани реагенти, като са променени само техните разходи. Подаването на реагентите е извършвано чрез мембранни дозаторни помпи. Разходът на реагентите след промяната е следният:

Разход на етилов ксантогенат (PEX):

- В агитационният кондиционер – 20 g/t
- Дробно подаване в средата на основна оловна флотация – 5 g/t
- В началото на първа контролна оловна флотация – 5 g/t
- Дробно подаване в средата на първа контролна оловна флотация – 5 g/t
- В началото на втора контролна оловна флотация – 3 g/t
- Дробно подаване в средата на втора контролна оловна флотация – 3 g/t

Разход на цинков сулфат (ZnSO_4):

- В агитационния кондиционер – 82 g/t
- Във втора пречистна оловна флотация – 40 g/t

Разход на натриев цианид (NaCN):

- В първа пречистна оловна флотация – 20 g/t
- Във втора пречистна оловна флотация – 9 g/t

Разход на пенообразувател (Dowfroth 200):

- В началото на основна оловна флотация – 46 g/t

В цинковия цикъл са използвани същите реагенти, както преди промяната в реагентния режим – меден сулфат (CuSO_4), калиев амилов ксантогенат (PAX), и варно мляко, но при различен разход. Подаването на използваните реагенти в цинковия цикъл на технологичната схема е извършвано чрез дозаторни мембранни помпи.

Разходът на меден сулфат (CuSO_4) е както следва:

- В началото на основна цинкова флотация – 100 g/t
- В средата на основна цинкова флотация – 61 g/t

Разход на калиев амилов ксантогенат (PAX):

- В началото на основна цинкова флотация – 20 g/t
- В началото на първа контролна цинкова флотация – 10 g/t
- В началото на втора контролна цинкова флотация – 4 g/t

Разход на варно мляко:

- В началото на основна цинкова флотация – 382 g/t

- В началото на трета пречистватна цинкова флотация – 500 g/t

Сравнение на разхода на реагентите, използвани в ОФ „Тораница“, преди и след извършената оптимизация в реагентния режим е представено в табл. IV.11.

Таблица IV.11. Разход на реагентите преди и след извършената оптимизация на реагентния режим в технологичната схема на флотация в ОФ „Тораница“

№	Реагент	Разходна норма (g/t)	Разход (g/t)	
			Преди оптимизацията на реагентния режим	След оптимизацията на реагентния режим
1	Калиев етилов ксантогенат (PEX)	40	45	41
2	Цинков сулфат ($ZnSO_4$)	300	76	122
3	Натриев цианид (NaCN)	40	22	29
4	Пенообразувател (Dowfroth 200)	60	61	46
5	Меден сулфат ($CuSO_4$)	250	165	161
6	Калиев амилов ксантогенат (PAX)	60	35	34
7	Регулатор на pH – Варно мляко	1500	765	882

IV.5.3. Изводи от оптимизацията на разходите на флотационни реагенти

Преди извършената промяна в технологичната верига на ОФ „Тораница“, разходът на калиев етилов ксантогенат (PEX) е 45 g/t, а след въведената промяна разходът на PEX е намален, вследствие на внедреното дробно подаване, като все още се провеждат експерименти за редуциране на разхода под разходната норма от 40 g/t (табл. IV.11). Разходът на един от най-скъпите реагенти – пенообразувателя Dowfroth 200 е намален значително с 24.6 %. С въведената промяна в реагентния режим, разходът на $CuSO_4$ е намален с 4 g/t или с 2.4 %, докато разходът на PAX остава почти непроменен (табл. IV.11). Установява се известно повишаване на разхода на депресорите натриев цианид (NaCN) и цинков сулфат ($ZnSO_4$) и на регулатора на средата варно мляко, като разходът остава значително по-нисък от разходните норми.

В резултат на въведените промени в технологичната схема на флотация, е редуциран разходът на една част от използваните реагенти. Постигнато е по-добро извличане на Pb в оловния концентрат и е повишено качеството на произвежданите концентрати.

IV.6. Оптимизиране обезводняването на концентратите в ОФ „Ерма река“, гр. Златоград

IV.6.1. Определяне на основните физични свойства на концентратите в ОФ „Ерма река“

Металургичната преработка на флотационните концентрати до получаването на крайните продукти от метали, поставя редица изисквания като високо съдържание на полезния компонент, ниско съдържание на вредни примеси и ниска влажност на концентратите. Обезводняването на флотационните концентрати се извършва с помощта на процесите сгъстяване, филтрация и сушене. Влияние върху ефективността на процеса филтрация оказват редица фактори като съдържание, зърнометричен и минерален състав на твърдата фаза, вискозитет и плътност на пулпа, физични свойства на филтърната тъкан и утайката, равномерност на прилаганото налягане и др.

Проведени са експериментални изследвания за определяне основните физични свойства на флотационните концентрати, произвеждани в ОФ „Ерма река“ и да бъде направена оценка на възможността за тяхното обезводняване, с внедряването на съвременна, автоматизирана VPA филтър преса.

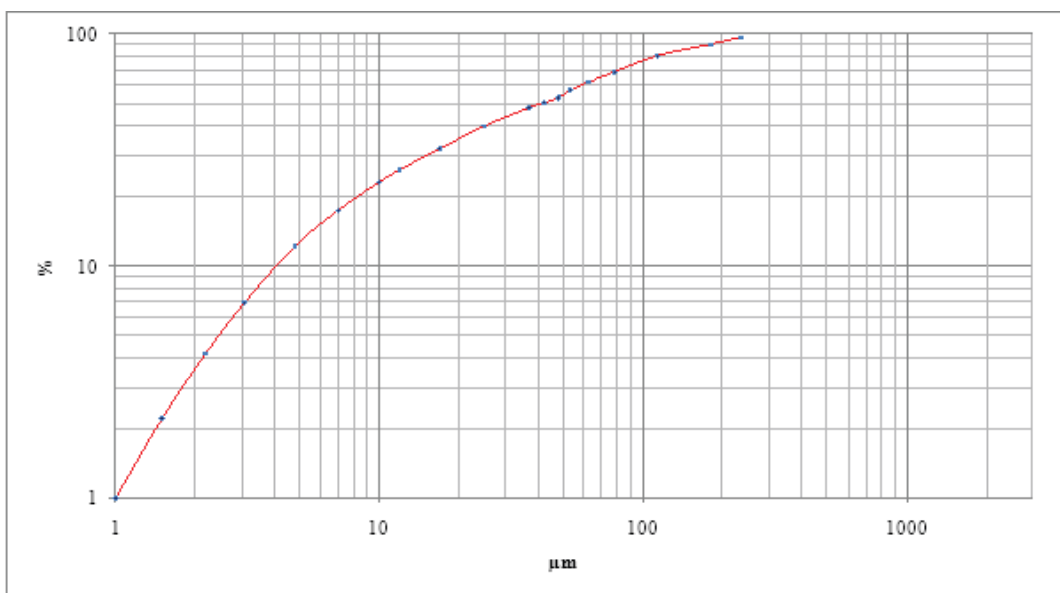
Химичният състав на концентратите, произведени в ОФ „Ерма река“ е представен в табл. IV.12.

Таблица IV.12. Химичен състав на оловен и цинков концентрат, ОФ „Ерма река“

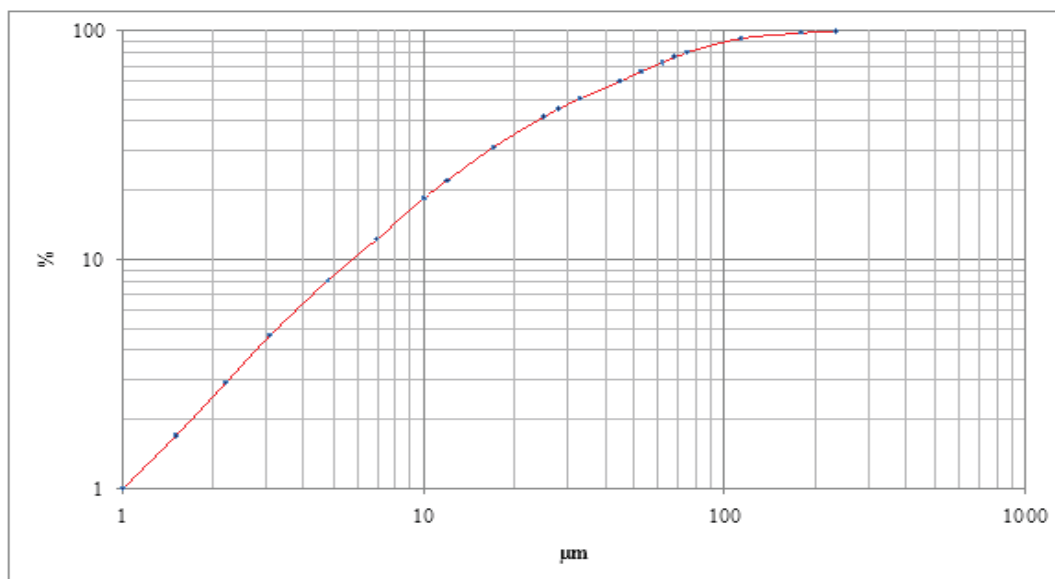
Компоненти	Съдържание (%)	
	Pb концентрат	Zn концентрат
Pb	68-72	2.867
Zn	4	51 - 53
Cu	3.52	1.031
Ag	390 g/t	-
As	0.015	0.0141
Sb	0.033	0.001
Fe	-	8.50
Cd	-	0.2629
Co	-	0.0274
Ni	-	0.0022
Bi	0.01	-
Cl	0.02	-
Se	10 g/t	-
Ge	10 g/t	4 g/t
SiO ₂	1.583	3.2 - 3.5
Al ₂ O ₃	0.367	0.4186
CaO	0.210	0.5243
MgO	0.367	0.130
S	16	3.0

За определяне основните физични свойства на сгъстените оловни и цинкови концентрати и на крайните концентрати е извършено опробване, като на осреднен материал от взетите проби са извършени лабораторни изследвания за определяне на следните основни физични характеристики: зърнометричен състав, съдържание и плътност на твърдото вещество; pH; остатъчна влага във филтърния кек.

Зърнометричният състав на сгъстения цинков концентрат е представен на фигура IV.22, а зърнометричният състав на сгъстеният оловен концентрат е показан на фиг. IV.23.



Фигура IV.22. Зърнометричен състав на сгъстен цинков концентрат, ОФ „Ерма река“



Фигура IV.23 Зърнометричен състав на сгъстен оловен концентрат, ОФ „Ерма река“

На фигурите IV.22. и IV.23. са показани комбинираните криви на разпределение на размера на частиците, в които кривата на лазерна дифракция е коригирана спрямо тази от механичния ситов анализ. Продуктите D_{80} и D_{50} на кривите заедно с други основни физични свойства на анализираните проби са показани в табл. IV.13. и табл. IV.14.

Таблица IV.13. Физични свойства на сгъстен цинков концентрат, ОФ „Ерма река“

Съдържание на твърда фаза (% w/w)	53.7
Плътност (g/cm ³)	3.97
pH	10.9
Зърнометричен състав:	
- D_{80} (μm)	113
- D_{50} (μm)	42
% < 10 μm	23

Таблица IV.14. Физични свойства на сгъстен оловен концентрат, ОФ „Ерма река“

Съдържание на твърда фаза (% w/w)	56.8
Плътност (g/cm ³)	6.81
pH	7.5
Зърнометричен състав:	
-D ₈₀ (µm)	75
-D ₅₀ (µm)	33
% < 10 µm	18.5

Съдържанието на остатъчна влага след сгъстяване и филтриране на анализираниите концентрати е показано в таблица IV.15.

Таблица IV.15. Съдържание на остатъчна влага във филтрирания оловен и цинков концентрат, ОФ „Ерма река“

Продукти	Влага (%)
Оловен концентрат	6-8
Цинков концентрат	9.5-12.5

IV.6.2. Изводи от направените изследвания за определяне основните физични свойства на концентратите в ОФ „Ерма река“

Данните от проведените лабораторни изследвания за определяне основните физични свойства на концентратите, произведени в ОФ „Ерма река“ показват високо ниво на остатъчна влага в крайния цинков концентрат, поради недостатъчната степен на обезводняване. За ефективно отстраняване на водното съдържание от цинковия концентрат са проведени експериментални изследвания за обезводняване с лабораторна VPA филтър преса.

IV.6.3. Обезводняване на цинков концентрат чрез филтрация под налягане в ОФ „Ерма река“

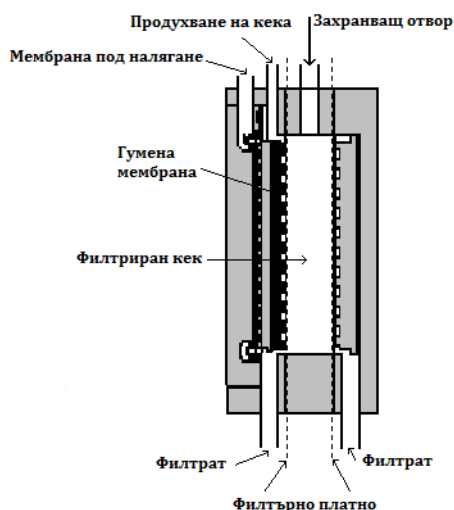
Експерименталните изследвания са извършени, за да бъде оценена възможността за обезводняване на флотационния цинков концентрат с помощта на съвременна, автоматизирана филтрационна инсталация под налягане – филтър преса VPA, и да бъдат определени параметрите за нейното оразмеряване.

Изследванията са проведени върху материал от суспензионна проба от цинков концентрат с тегло 35 kg, със съдържание на твърда фаза 53.7 %, от която е отделена осреднена, представителна проба за зърнометричен анализ, определяне съдържанието и специфичната плътност на твърдата фаза и провеждане на тестове за обезводняване. Представителната проба е разредена с вода до постигането на съдържание на твърдата фаза 50 %. Проведени са 4 експериментални теста за обезводняване на цинковия концентрат, с помощта на лабораторна VPA филтър преса на METSO.



Фигура IV.24. Лабораторна филтър преса METSO VPA

Лабораторната VPA филтър преса симулира основните операционни стъпки на индустриалните филтър преси – филтрация (захранване), компресия на мембраната (изцеждане) и въздушно продухване (изсушаване). Лабораторната VPA филтър преса включва една вертикална филтрационна камера, която е представена на фиг. IV.25



Фигура IV.25. Филтрационна камера

При проведените 4 теста по обезводняване на флотационен концентрат са използвани филтрационни камери с дълбочина 33 и 42 mm. Един от тестовете е проведен без въздушно продухване, при всички останали тестове е приложено въздушно продухване с продължителност 6 минути. Един от тестовете е извършен с повишено налягане на компресиране на мембраната и повишено налягане на продухвания въздух. Условиата на проведените експерименти са показани в табл. IV.16.

Таблица IV.16. Условия на извършените лабораторни тестове

Тест №	Тест 1	Тест 2	Тест 3	Тест 4
Твърда фаза (%)	50	50	50	50
Дълбочина на камерата (mm)	42	42	33	33
Температура (C °)	20	20	30	30
Налягане на филтрация (bar)	6	6	6	6
Компресионно налягане (bar)	8	8	8	10
Налягане на продухване (bar)	-	7	7	9

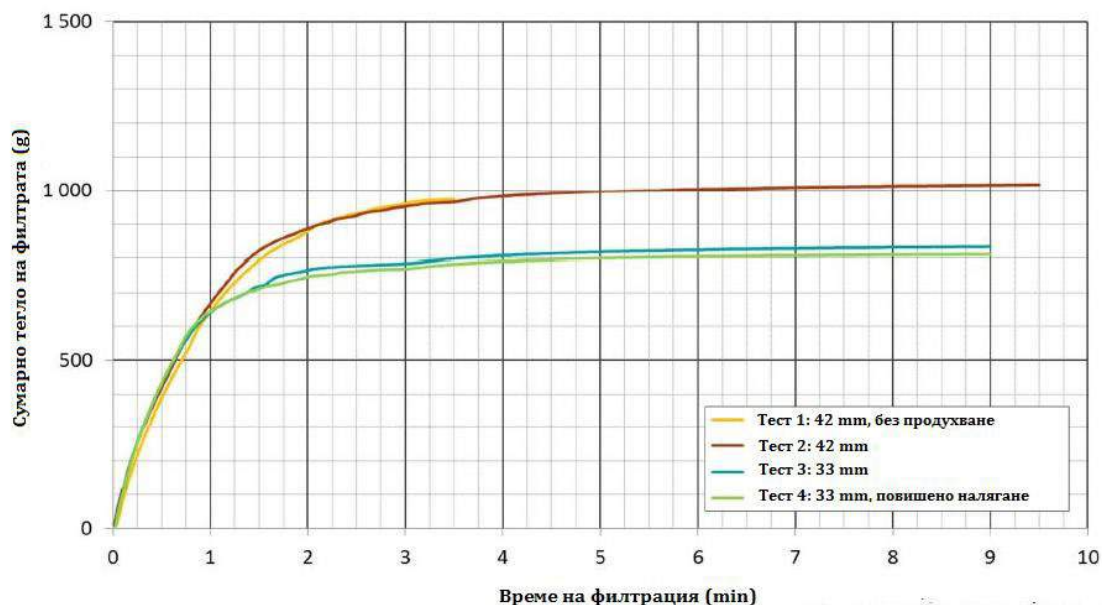
Данните от проведения зърнометричен анализ и определените стойности на D_{80} и D_{50} , както и специфичната плътност на твърдите частици са представени в табл. IV.17.

Таблица IV.17. Характеристика на флотационния концентрат, ОФ „Ерма река“

Изходна проба	
Съдържание на твърда фаза (%)	53.70
Специфична плътност на частиците (g/cm ³)	3.97
pH	6.0
Зърнометричен състав	
D_{80} (µm)	113
D_{50} (µm)	42
% < 10	23

Продължителността на захранване на филтър пресата с изходния пулп е 3 минути в камерата с дълбочина 42 mm (тест 1, 2) и 2 минути в камерата с дълбочина 33 mm (тест 3, 4). Кинетиката на филтрация при проведените четири теста за обезводняване е представена на фиг. IV.26. От графиката е очевидно, че ефективното време за запълване на филтър пресата за обезводнен кек с дебелина 42 и 33 mm е съответно 3 и 2 минути. След това налягането на помпата на изходния пулп, вече не способства за неговото обезводняване.

Характеристиките на получения кек (тегло, дебелина, плътност и влага) са показани в табл. IV.18.

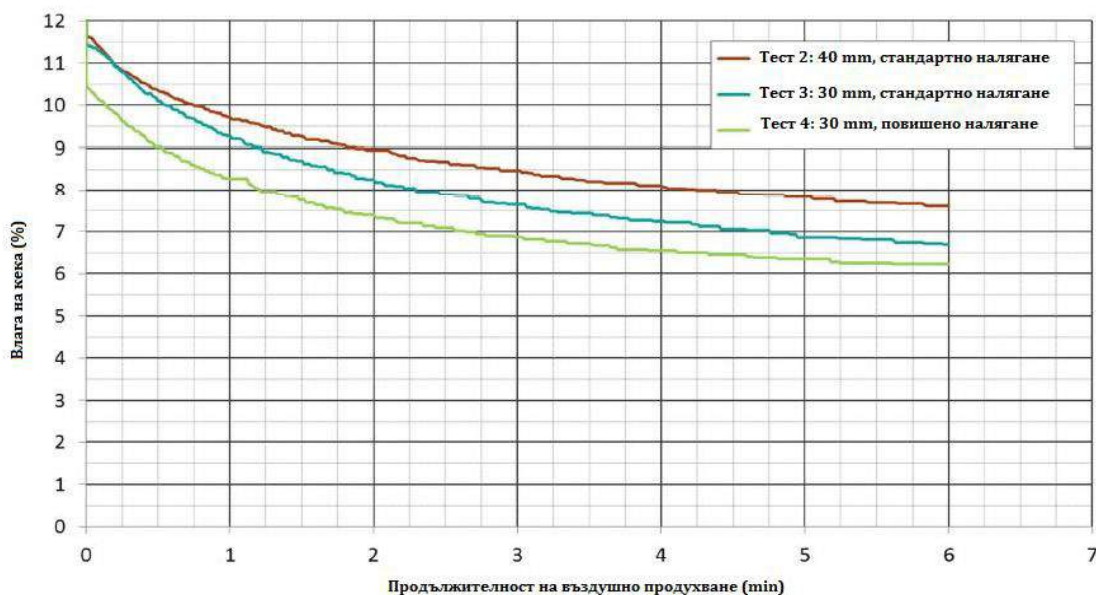


Фигура IV.26. VPA криви на филтрация при проведените тестове за обезводняване на флотационен концентрат, ОФ „Ерма река“

Таблица IV.18. Характеристики на кека, получен след обезводняването на флотационния концентрат, ОФ „Ерма река“

Тест №	Тест 1	Тест 2	Тест 3	Тест 4
Тегло на сухия кек (g)	1002	1046	836	829
Плътност на сухия кек (kg/l)	2.40	2.50	2.55	2.52
Влага на кека (%)	11.60	7.60	6.70	6.20
Дебелина на кека (mm)	42	42	33	33

Съдържанието на влага във филтърния кек, в зависимост от времето на въздушно продухване е представено графично на фиг. IV.27. При извършените експерименти е прилагано време на продухване 6 минути, като съдържанието на влага при по-краткотрайно продухване е изчислено въз основа на количеството на образувания филтрат. Най-ниско съдържание на влага – 6.2 % бе постигнато при тест № 4, с филтърна камера с дълбочина 33 mm и повишено налягане.



Фигура IV.27. Съдържание на влага в кека, в зависимост от времето на въздушно продухване, ОФ „Ерма река“

IV.6.4. Изводи от обезводняването на цинков концентрат в ОФ „Ерма река“ чрез филтрация под налягане

С извършените лабораторни изследвания е установено, че за получаването на обезводнен, висококачествен цинков концентрат е подходящо използването на филтър преса VPA. За обезводняването на 6 t/h цинков концентрат, със съдържание на твърда фаза в захранването 50 %, подходящо е прилагането на филтър преса VPA 1030-28, постигаща допустимата влажност от 7 % в крайния концентрат. Продължителността на цикъла на филтрация, както и съдържанието на влага в крайния концентрат могат да бъдат редуцирани, при съдържание на твърдата фаза над 50 % в изходния флотационен концентрат, постъпващ на филтрация.

V. ОБОБЩЕНИ ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Глобалната тенденция за изчерпване на находищата с висококачествени оловно-цинкови руди и нарастващото потребление и търсене на металите Pb и Zn, предопределят необходимостта от повишаване ефективността на технологиите за тяхното получаване и оптимално извличане на металите от наличните природни ресурси. Преработката на Pb-Zn руди в обогатителните фабрики включва поредица от последователни технологични процеси – трошене, смилане, пресяване на рудите, флотация и обезводняване на концентратите, до получаването на крайни продукти, които постъпват за металургична преработка и производство на металите. Ефективността на всеки отделен технологичен процес оказва пряко влияние върху ефективността на последващия процес в технологичните вериги на обогатителните фабрики и има съществено значение за качеството на получаваните концентрати и загубата на метали в отпадъка.

С цел оптимизиране на технологичните схеми в обогатителните фабрики, преработващи Pb-Zn руди, са разработени алтернативни, иновативни решения за отделните технологични процеси, осигуряващи получаването на висококачествени концентрати, повишена производителност, редуцирани производствени разходи и минимално негативно въздействие върху околната природна среда.

Въз основа на проектираните и разработени в дисертационния труд иновативни решения, могат да бъдат направени следните обобщени изводи:

1. Разработено и внедрено е ново технологично решение в трошачното отделение на ОФ „Ерма река“. Въведена е двустадиална схема на трошене и съвременно, високопроизводително производствено оборудване, на мястото на използваната неефективна тристадиална схема на трошене на рудата с остаряло оборудване. Новата, автоматизирана трошачна инсталация включва челюстна трошачка Nordberg C 116, конусна трошачка Nordberg GP 220 и двудекова вибрационна пресевна уредба Nordberg TS 4.2. С въведените промени в трошачното отделение на фабриката е постигната по-висока ефективност на процеса трошене с около 40 %, редуциран е разходът на електроенергия с 37.2 %. В резултат на намалената едрина на частиците натрошена руда е повишена ефективността на последващите процеси в технологичната верига – смилане и флотация, при намалено потребление на електроенергия и намалени производствени разходи.

2. В ОФ „Тораница“ е въведена иновативна техника за оптимизиране подаването на руда в процеса трошене и повишаване ефективността на пресяване. Монтиран е честотен преобразувател NIETZ тип AT20, 380 V, 3.7 kW, който дава възможност за регулиране оборотите на пластинчатия питател при храненето на рудата в процеса трошене, в зависимост от едрината на рудата. С въведената промяна е осигурено оптимизирано управление на подаването на руда, което регулира потока на материала, в зависимост от натоварването на ситото. Постигната е по-висока ефективност на пресяване на рудата с 41.5 %, редуцирано е времето на работа на трошачното отделение и е намален разходът на електроенергия. Повишената ефективност на пресяване на рудата води до подобрени технологични параметри на следващите процеси по веригата – смилане, флотация и обезводняване на концентратите.

3. Оптимизиран е процесът на агитация на пулпа в ОФ „Тораница“, в резултат на внедряването на усъвършенстван агитационен кондиционер. Усъвършенстваният кондиционер осигурява много по-интензивно разбъркване на пулпа с подаваните флотационни реагенти, поради получаваната по-висока турбулентна скорост на пулпа (по-висока стойност на числото на Рейнолдс). Вследствие на подобрената агитация и кондициониране на пулпа е повишена ефективността на процеса флотация, като е повишено и качеството на произвежданите концентрати.

4. Проектирана и въведена в действие е промяна в технологичната верига на ОФ „Тораница“, с внедряването на предварителна флотация, посредством монтирането на четири броя пневматични флотационни машини. Доказана е възможността за подобряване извличането на Pb и качеството на получаваните концентрати, чрез удължаване времето на флотация.

5. Оптимизирана е схемата на оловна флотация в ОФ „Тораница“, чрез удължаване времето на флотация в основната и в контролните оловни операции, посредством монтирането на допълнителни петнадесет броя флотационни машини и прилагането на дробно подаване на флотационните реагенти. Доказани са подобрените технологични параметри на произвежданите концентрати – увеличено извличане на Pb от 70 – 75 % на 88 – 89 % в крайния оловен концентрат, понижено съдържание на вреден примес от Pb от 7 – 8 % на 2 – 3 % в цинковия концентрат, намалено съдържание на метали в крайния технологичен отпадък. Чрез оптимизацията на процесите в цикъла на оловна флотация е обезпечено производството на качествени концентрати, отговарящи на изискванията за металургична преработка и е предотвратена загубата на метали в отпадъка.

6. Въведен е нов реагентен режим във флотационното отделение на ОФ „Тораница“ и е внедрено подаването на флотационните реагенти с помощта на дозаторни мембранни помпи. Постигнато е подобро качество на получаваните концентрати и намаляване на разходите за някои от най-скъпите използвани флотационни реагенти.

7. Проектирана и внедрена е нова схема на филтрация в ОФ „Ерма река“ и е оптимизиран процесът на филтрация, извършван преди това с барабанен вакуум филтър, с който е получаван цинков концентрат с висока остатъчна влага. При проведените лабораторни експерименти за обезводняване на концентрата е доказано, че с използването на новата филтрационна система под налягане – филтър преса VPA 1030 – 28 с производителност 6 t/h, получаваните концентрати

показват ниска влажност. С въвеждането в експлоатация на новата схема на филтрация е постигната по-висока производителност и по-кратка продължителност на процеса филтрация, по-ниски разходи на електроенергия, както и производството на концентрати, отговарящи на изискванията за металургична преработка.

VI. НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработена и приложена е методика за повишаване ефективността на рудоподготовката, флотацията и обезводняването на концентрати от преработката на оловно-цинкови сулфидни руди, базирана на систематичен подход за оценка и оптимизация на производството на оловни и цинкови концентрати, с минимални загуби на ценни метали и оптимално използване на природните ресурси.

2. Постигната е по-висока производителност и ефективност на натрошаване на рудата при намалено потребление на електроенергия с новата автоматизирана трошачна инсталация в ОФ „Ерма река”:

3. В ОФ „Тораница” е оптимизирано захранването на рудата в процеса трошене с монтирания честотен преобразувател NIETZ тип AT20, 380V, 3.7 kW.

4. Оптимизиран е процесът на агитация на пулпа в ОФ „Тораница”, с увеличаване числото на Рейнолдс, чрез нов усъвършенстван кондиционер.

5. Проектирана и въведена е предварителна флотация в технологичната верига на ОФ „Тораница”. Приложен е експериментален подход, чрез който е постигнато повишено съдържание на оловни частици в пулпа, постъпващ на пречистна оловна флотация и е подоброено качеството на получаваните оловни концентрати.

6. Разработена е оптимизирана схема на оловна флотация в ОФ „Тораница”, с удължаване времето на флотация в основната и в контролните оловни операции. Доказано е значително по-високо извличане на оловото в оловния концентрат, намалено съдържание на вредните примеси в концентратите и намалена загуба на метали в отпадъка.

7. Редуциран е разходът на флотационни реагенти, използвани в технологичната верига на ОФ „Тораница”, чрез въвеждането на дозаторни мембранни помпи.

8. Оптимизиран е процесът филтрация в ОФ „Ерма река”, чрез внедряването на нова филтрационна инсталация под налягане. Доказано е получаването на концентрати с ниско съдържанието на остатъчна влага.

VII. НАУЧНИ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Петров, М. 2024. Особенности на главните генетични типове промишлени оловно-цинкови находища, Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, 67, 69–74, ISSN 2738-8808 (print), ISSN 2738-8816 (online)

Петров, М., Т. Янкова, И. Григорова. 2024. Повишаване ефективността на рудоподготовка, чрез оптимизиране на процеса трошене на Pb-Zn руди, Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, 67, 75–79, ISSN 2738-8808 (print), ISSN 2738-8816 (online)

Petrov, M., I. Grigorova, I. Nishkov. 2023. Zinc and lead concentrates basic physical properties - Proceedings of XIX Balkan Mineral Processing Congress, Prishtine, Kosovo, 2023, pp.343–348, ISBN 978-9951-9138-0-5

SUMMARY

The dissertation entitled “Alternative Approaches for Optimizing Technological Parameters in the Processing of Lead-Zinc Ores” aims to develop innovative solutions for the technological flowsheets optimization in lead-zinc mineral processing plants. The proposed approaches enable the production of high-quality concentrates, operating costs reduction and metal losses to tailings, plant productivity improvement, and maximization of the efficient utilization of available natural resources.

This research examines on the technological processes at the Erma Reka concentrator in Zlatograd, Bulgaria, and the Toranica concentrator in Kriva Palanka, Republic of North Macedonia, where lead-zinc sulphide ores are processed.

The research is focused on the development of new technological solutions aimed at enhancing the efficiency of beneficiation plants through the key process operations optimization, including ore crushing, grinding and classification, flotation, and dewatering of the produced concentrates.

The relevance of the study stems from the need to design and implement innovative technological solutions aimed at optimizing the various processes in beneficiation plants processing lead-zinc ores. The study is of key importance to modern mineral processing and metallurgical production, as it integrates the principles of sustainability, efficiency, and the rational resources utilization.

The scientific novelty of the dissertation lies in the development of new technological solutions that can be implemented in the industrial practice of beneficiation plants processing Pb-Zn ores. These solutions are designed to optimize and enhance the efficiency of technological processes, reduce operating costs, ensure the production of high-quality concentrates, and enable the most effective finite natural resources utilization.

The practical applicability of the dissertation consists in the new technological solutions development for lead-zinc sulphide ores beneficiation. The processing of ores in concentrators, culminating in the production of lead and zinc concentrates, involves a sequence of successive technological operations, including ore crushing, grinding, classification/screening, flotation, and concentrate dewatering. Increasing the efficiency of each technological process enhances the performance of subsequent operations in concentrators and is essential for producing high-quality lead and zinc concentrates.

The public validation of the scientific results presented in the dissertation was carried out through the participation of specialized international scientific congress in Pristina, Kosovo, as well as in the annual international scientific conference of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” in Sofia.

The main achievements and results of the dissertation have been published in two peer-reviewed specialized scientific journals in Bulgarian and in one peer-reviewed international scientific journal in English.

The dissertation comprises 132 pages, including an introduction, five parts with eight chapters addressing the main research objectives, lists of the principal scientific and applied contributions, publications related to the dissertation, and references. A total of 115 literature sources are cited, of which 8 are in Cyrillic, 92 in Latin script, and 15 from internet sources. The dissertation includes a total of 68 figures and 26 tables.