

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИ СЪЮЗ
ПО МИННО ДЕЛО, ГЕОЛОГИЯ
И МЕТАЛУРГИЯ



SCIENTIFIC AND TECHNICAL
UNION OF MINING, GEOLOGY
AND METALLURGY



МИНСТРОЙ ХОЛДИНГ АД
MINSTROY HOLDING JSCo

СБОРНИК С ДОКЛАДИ

Десета национална научно-техническа конференция
с международно участие

PROCEEDINGS

of

Tenth National Scientific and Technical Conference
with International Participation

Технологии и практики
при подземен добив и минно
строителство

Technologies and Practices
in Underground Mining and Mine
Construction

12–15 октомври 2026
СПА комплекс Орфей
гр. Девин

12–15 October 2026
Orpheus SPA Hotel
Devin, Bulgaria



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИ СЪЮЗ ПО МИННО ДЕЛО, ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛУРГИЯ



СБОРНИК С ДОКЛАДИ

**Десета национална научно-техническа конференция
с международно участие**

**„Технологии и практики при подземен добив
и минно строителство“**

PROCEEDINGS

of

**Tenth National Scientific and Technical Conference
with International Participation**

**“Technologies and Practices in Underground Mining
and Mine construction”**

ИЗДАТЕЛСКИ СЪВЕТ

**проф. д-р Николай Вълканов, доц. д-р Кремена Дедеянова,
проф. д-р Павел Павлов, проф. д-р Димитър Анастасов,
проф. д-р Кръстю Дерменджиев, проф. д-р Валентин Велев,
инж. Георги Лисев, проф. д-р Георги Михайлов,
доц. д-р Захари Динчев, проф. д-р Станислав Топалов,
проф. д-р Чавдар Колев, д-р инж. Живко Илиев**

Научно-технически съюз по минно дело, геология и металургия

ISSN: 1314-7056



140
ГОДИНИ

ФЕДЕРАЦИЯ
НА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИТЕ
СЪЮЗИ В БЪЛГАРИЯ



Уважаеми дами и господа,

Уважаеми колеги,

От името на Организационния комитет ви поздравяваме с вашето участие в **Десетата национална научно-техническа конференция с международно участие** на тема **“Технологии и практики при подземен добив и минно строителство”**, 12 - 15 октомври 2026 г., гр. Девин.

Провеждането на този традиционен научен форум вече над 18 години доказва важността и значението му за минерално-суровинната индустрия.

По време на конференцията ще имате възможност да се запознаете с постиженията в науката и с иновативни практически решения, приложени в индустрията.

Надяваме се тематичните направления да предизвикат Вашия интерес и представените доклади да имат научно-практическа значимост и да провокират дискусии за намиране на подходящи решения в подземния добив и минното строителство.

Вашето участие ще допринесе за успеха на **Десетата национална научно-техническа конференция с международно участие “Технологии и практики при подземен добив и минно строителство”**, а вие ще създадете нови бизнес и лични контакти, полезни за вас.

Желаем ви здраве и бъдещи професионални и лични успехи!

Председатели на Организационния комитет:

проф. д-тн инж. Николай Вълканов

доц. д-р инж. Кремена Дедеянова



ГЛАВНИ ОРГАНИЗАТОРИ

НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКИ СЪЮЗ ПО МИННО ДЕЛО, ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛУРГИЯ



„МИНСТРОЙ ХОЛДИНГ“ АД

СЪОРГАНИЗАТОРИ



Федерация на научно-техническите съюзи в България
Българска минно-геоложка камара
Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски”
Сдружение на взривните инженери в България

Министерство на енергетиката

Министерство на икономиката и индустрията

Министерство на околната среда и водите

“Асарел-Медет” АД

„Брезник Минералс“ ЕООД

“Геотехмин” ООД

“Гипс” АД

“Горубсо – Мадан” АД

“ДПМ Челопеч” ЕАД

“ДПМ Крумовград” ЕАД

“Елаците-Мед” АД

„Ескана Инвест 96” АД

“Лъки Инвест” АД

“Метрополитен” ЕАД

“Мини Марица-изток” ЕАД

“Минпроект” ЕАД

“Нипроруда” АД

“Орика Мед България” АД

“Родопи еко проджектс” ЕООД

“Рудметал” АД

“Табов инженеринг” ООД

“Холдинг КЦМ 2000” АД

С МЕДИЙНОТО ПАРТНЬОРСТВО НА

сп. “Минно дело и геология”

сп. „Геология и минерални ресурси”

в-к „Наука и общество”

ОРГАНИЗАЦИОНЕН КОМИТЕТ

Председатели:	доц. д-р инж. Кремена Дедеянова проф. д-р инж. Николай Вълканов
Почетен председател:	проф. д-р инж. Цоло Вутов
Зам. председатели:	д-р инж. Владимир Вутов проф. д-р Ивайло Копрев проф. д-р Славейко Господинов проф. д-р Илия Гърков
Научен секретар:	д-р инж. Живко Илиев

ЧЛЕНОВЕ

инж. Борис Гиздов	"Брезник Минералс" ЕООД
проф. д-р Валери Митков	Сдружение на взривните инженери в България
инж. Велислав Калчев	"Булекспортконсулт" ЕООД
Георги Вълканов	"Минстрой холдинг" АД
инж. Георги Петров	"Елаците-Мед" АД
проф. д-р Георги Стоянчев	"Рокшал-Н" ЕООД
инж. Данчо Тодоров	"Нипроруда" АД
инж. Делчо Николов	"Асарел-Медет" АД
инж. Драгомир Драганов	Българска минно-геоложка камара
инж. Елена Филипова	"Ескана инвест 96" АД
инж. Иван Богданов	МДЗ "Балша" АД
инж. Иван Кожухаров	"Евротест-контрол" ЕАД
доц. д-р Иван Митев	Българска минно-геоложка камара
инж. Иван Табов	"Табов инженеринг" ООД
инж. Илия Горанов	"Мини Марица Изток" ЕАД
инж. Костадин Христов	"Минпроект" ЕАД
инж. Красимир Паскалев	"Пневматика - Серта" АД
инж. Митко Младенов	"Рудметал" АД
инж. Нейчо Нейчев	"Лъки Инвест" АД
доц. д-р Никола Добрев	"КЦМ" АД
инж. Николай Пелтеков	"Асарел-Медет" АД
инж. Румен Цонев	"Холдинг КЦМ 2000" АД
инж. Светлозар Пехливанов	"Родопи Еко Проджектс" ЕООД
инж. Сергей Атанасов	"Горубсо - Мадан" АД
проф. д-р Стоян Братоев	"Метрополитен" ЕАД

КОНСУЛТАТИВЕН СЪВЕТ

проф. д-р Павел Павлов	– Председател
проф. д-р Димитър Анастасов	– Зам. председател
проф. д-р Кръстю Дерменджиев	– Зам. председател
проф. д-р Валентин Велев	– България
инж. Георги Лисев	– България
проф. д-р Георги Михайлов	– България
доц. д-р Захари Динчев	– България
проф. д-р Станислав Топалов	– България
проф. д-р Чавдар Колев	– България
проф. д-р Яни Бакалбаши	– Албания
проф. д-р Зоран Десподов	– С. Македония
проф. д-р Ристо Дамбов	– С. Македония
проф. д-р Владимир Павлович	– Сърбия
проф. д-р Тургай Онарған	– Турция
доц. д-р Сергей Чухарев	– Украйна

ТЕМАТИЧНИ НАПРАВЛЕНИЯ

1. Иновативни технологии и практики при подземния добив и минното строителство. Руднична геология.
2. Подземно, тунелно и метро строителство.
3. Маркшайдерско и геомеханично осигуряване при подземния добив, подземното, тунелно и метро строителството.
4. Механизация и автоматизация при подземни минно-добивни и строителни дейности.
5. Технологии и практики при взривните работи.
6. Безопасност на труда. Вентилация и климатизация.
7. Минерални технологии, рециклиране на минерални суровини и опазване на околната среда. Кръгова икономика.
8. Икономически, управленски и социални аспекти при подземни, минно-добивни, преработвателни и строителни дейности.

СЪДЪРЖАНИЕ

1	ПРИЛОЖЕНИЕ НА БЕЗЖИЧНА СИСТЕМА ЗА ИНИЦИИРАНЕ WEBGEN 200 В УСЛОВИЯТА НА РУДНИК „ЧЕЛОПЕЧ“	1
	Стефан Попов, Стилиян Минкин	
2	ВАЛОВО ИЛИ СЕЛЕКТИВНО РАЗРАБОТВАНЕ НА ПОДЗЕМНИ ПРИРОДНИ БОГАТСТВА	9
	Кр. Дерменджиев, Г. Стоянчев	
3	ТЕХНОЛОГИИТЕ С ОБРУШАВАНЕ - МИТ ИЛИ РЕАЛНОСТ ПРИ РАЗРАБОТВАНЕ НА РУДНИ НАХОДИЩА НА ГОЛЯМА ДЪЛБОЧИНА	14
	Георги Михайлов	
4	IMPROVEMENT OF THE MINING SYSTEM WITH ORE BREAKING FROM SUBLEVEL DRIFTS THROUGH UPWARD MINING SEQUENCE AND WASTE-ROCK BACKFILLING	21
	H. A. Armaghanyan	
5	АСПЕКТИ НА РАЗВИТИЕ И ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА ПРИ СТРОИТЕЛСТВОТО НА МЕТРОТО В СОФИЯ	28
	Стоян Братоев	
6	ИЗПОЛЗВАНЕ НА ИЗКОПАНИТЕ МАСИ ОТ ТУНЕЛНО-ПРОБИВНИ МАШИНИ В КОНТЕКСТА НА УТВЪРДЕНИТЕ ПРАКТИКИ НА СОФИЙСКОТО МЕТРО	36
	Борислав Борисов, Веселин Балев, Павел Павлов	
7	ПРЕРАЗГЛЕЖДАНЕ НА СТАТИЧНОТО ПРЕДАВАНЕ НА НАТОВАРВАНЕ ПРИ ДВУСЛОЙНИ ТУНЕЛНИ ОБЛИЦОВКИ, ИЗГРАДЕНИ ПО НАТМ – ПОСЛЕДИЦИ ЗА ОПРОСТЕНИЯ СЕИЗМИЧЕН МЕТОД (МЕТОД 2)	45
	Николай Жечев	
8	КОНТАКТНО ИНЖЕКТИРАНЕ МЕЖДУ СКАЛЕН МАСИВ И ПЪРВИЧНА ТУНЕЛНА ОБЛИЦОВКА. АНАЛИЗ НА НЕОБХОДИМОСТТА, ЧИСЛЕНИ МОДЕЛИ И ПРАКТИЧЕСКИ АСПЕКТИ	52
	Николай Жечев, Рафаил Рафаилов	
9	ТЕХНОЛОГИЯ, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ НА СТРОИТЕЛСТВОТО НА НОВАТА МЕТРОСТАНЦИЯ „ПАНЧО ВЛАДИГЕРОВ“, ЧАСТ ОТ ПЪРВИЯ ИНТЕРМОДАЛЕН ТРАНСПОРТЕН ХЪБ В ЗАПАДНАТА ЧАСТ НА ГР. СОФИЯ	59
	Борис Василев	
10	ПРАКТИЧЕСКИ ПОДХОД ЗА ДИСТАНЦИОННА ИНСПЕКЦИЯ И МОНИТОРИНГ В ТЕСНИ ПОДЗЕМНИ МИННИ ИЗРАБОТКИ ЧРЕЗ КОМПАКТНИ СИСТЕМИ ЗА ЛАЗЕРНО СКАНИРАНЕ	67
	Марко Марков	

11	ПРИЛОЖЕНИЕ НА LIDAR-ТЕХНОЛОГИЯТА ПРИ ПРОУЧВАНЕ НА ПОДЗЕМНА ТРАНСПОРТНА ИНФРАСТРУКТУРА Александър Постолевски, Славейко Господинов	74
12	ГЕОДИНАМИКА И ГЕОДЕЗИЯ: ГЕОДИНАМИЧНИ ПРОЦЕСИ И ЯВЛЕНИЯ – ГЕОДЕЗИЧЕСКИ МЕТОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ Ивелина Колева	83
13	СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА МЕХАНИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ДВУЕТАЖНА КЛЕТКА И СКИПО – КЛЕТКА ЗА ИЗВОЗ НА РУДА Живко Илиев, Димитър Анастасов	90
14	КОМПЮТЪРНО МОДЕЛИРАНЕ И ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ИНЕРЦИОННИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПОДЕМЕН СЪД ЗА РУДНИЧНА СКИПОВА УРЕДБА Живко Илиев	98
15	СЕИЗМИЧНО ПРОЕКТИРАНЕ НА ПОДЗЕМНИ СЪОРЪЖЕНИЯ В СКАЛНИ МАСИВИ – НОРМАТИВНА РАМКА И ПРАКТИЧЕСКИ ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА Владимир Вутов	106
16	КИСЕЛИННИЯТ МИНЕН ДРЕНАЖ КАТО ИКОНОМИЧЕСКИ РЕСУРС. МЕТОДИКА ЗА ПРЕДВАРИТЕЛНА ТЕХНИКО-ИКОНОМИЧЕСКА ОЦЕНКА НА ИЗВЛИЧАНЕ НА МЕД Георги Савов, Иван Гюров	114
17	МИННАТА ТЕРМИНОЛОГИЯ И НЕЙНОТО ИЗПОЛЗВАНЕ В ПРАКТИКАТА НА ПОДЗЕМНИЯ ДОБИВ И ПОДЗЕМНОТО МИННО СТРОИТЕЛСТВО Кр. Дерменджиев, Г. Стоянчев	121
18	ОРГАНИЗАЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ, ПОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМИ ПРИ СТРОИТЕЛСТВОТО НА „ВЕНТИЛАЦИОННА ШАХТА № 5“ – ПОСЛЕДНАТА ШАХТА В МИНИ „БОБОВ ДОЛ“ Евтим Кърцелин, Станислав Топалов, Венцислав Гълъбов	128
19	ПОДЗЕМНИЯТ ДОБИВ НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ ПРИ УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ НА МИНЕРАЛНО СУРОВИННАТА БАЗА НА Р. БЪЛГАРИЯ Георги Дачев, К. Куцаров	141
20	ДЕФОРМАЦИОННО РАЙОНИРАНЕ И СТРОИТЕЛЕН КОНТРОЛ НА ЗЕМНАТА ОСНОВА ПРИ ПЛОЩНИ ИНЖЕНЕРНИ ОБЕКТИ Веселин Балев	147

ПРИЛОЖЕНИЕ НА БЕЗЖИЧНА СИСТЕМА ЗА ИНИЦИИРАНЕ WEBGEN 200 В УСЛОВИЯТА НА РУДНИК „ЧЕЛОПЕЧ“

Стефан Попов, Stefan.Popov@dpmmetals.com
инж.Стилиан Минкин, Stilian.Minkin@orica.com

ABSTRACT

This paper presents the main features and capabilities of the Orica WebGen™ 200 wireless initiation system and its application in the underground operations of DPM Metals' Chelopech Mine. WebGen™ is an innovative blasting technology that uses magnetic induction signals to wirelessly initiate blast holes, eliminating the need for physical connections between explosive charges and the firing point. The paper outlines the system's operating principles, key advantages over conventional initiation methods, and its contribution to improved safety and production efficiency. It also examines the results achieved at Chelopech Mine and the technology's potential to enhance productivity and ore recovery.

Увод

Разположен в България, рудник „Челопеч“ е водещото предприятие на DPM Metals. Подземният медно-златен рудник е преобразен от DPM Metals в един от най-утвърдените и технологично развити рудници, отличаващ се с високи стандарти в областта на опазването на околната среда и устойчивото минно дело.

Като лидер в областта на иновациите, рудникът постига значителни подобрения в оперативната ефективност, екологичните показатели и безопасността на работа. Подземните изработки разполагат със 100% надеждно Wi-Fi покритие на 600 метра от повърхността, което осигурява надеждна комуникация и внедряване на съвременни технологии в целия производствен процес.

Подземният добив се осъществява чрез камерна система на разработване с последващо запълнение на иззетите пространства. Добитата руда постъпва в трошачен комплекс, разположен в самия рудник и след като бъде натрошена се извозва до повърхността по гумено-транспортни ленти. Рудник „Челопеч“ произвежда два вида концентрат - медно-златен и златно-пиритен, които се изнасят за преработка в металургични заводи в чужбина.

Изземването на добивните камери се осъществява чрез пробиване и взривяване на добивни сондажи с диаметър 89мм и дължина до 40м. За зареждането на сондажите се използва емулсионно взривно вещество и се инициира с пълния набор от инициращи средства на Орика, които включва системите Nonel, I-kon и WebGen.

Водеща причина за внедряването на WebGen, като допълнителен инструмент към системите за инициране в рудник Челопеч е безопасността. В допълнение използването ѝ дава възможност за оптимизация на планирането и производствените процеси. Динамичното производство на рудник „Челопеч“ изисква нови и нестандартни инженерни решения, за решаване на оперативните задачи в предизвикателните производствени условия и дългия експлоатационен период на находището.

Описание на системата

Идеята за създаване на безжична система за инициране на взривни вещества възниква от необходимостта да се преодолеят съществени ограничения на класическите методи - свързани с безопасността, нуждата от физическа свързаност и риска от неволни детонации. Развитието на WebGen™ е пряк резултат от дългогодишната изследователска и развойна дейност на австралийската компания Orica Limited, която започва работа по концепцията за дистанционно инициране още в началото на 2000-та година, използвайки своя опит с електронни системи като i-kon™. Основна цел е създаване на напълно автономен капсул-детонатор който може да бъде програмиран и активиран без

физическа връзка с други елементи от взривната верига. Така възниква системата WebGen™, която комбинира:

- боевик с вграден електронен детонатор
- предварително зададени времеви закъснения
- радиочестотна активация чрез криптиран сигнал

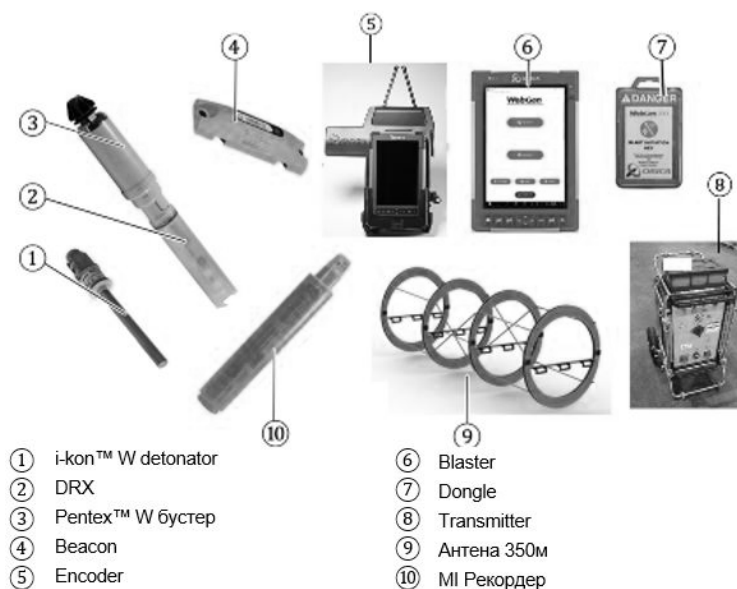
През 2017 г. Orica представя първото поколение на WebGen™ - т.нар. wireless innovation, предназначено основно за подземен добив при системи с подетажно обрушаване. Системата бързо намира приложение в реални условия благодарение на:

- възможността за безопасно зареждане на експлозиви с отложено инициране
- намаляване на престоя при минните цикли
- редуциране на метрите при прокарване на подземните минни галерии.

След успешното внедряване на първата генерация, Orica пуска на пазара WebGen™ 200 през 2022 г. - система от второ поколение, която поддържа няколко версии за различни приложения и по-голям потенциал за автоматизация на процесите.

Технически характеристики на системата

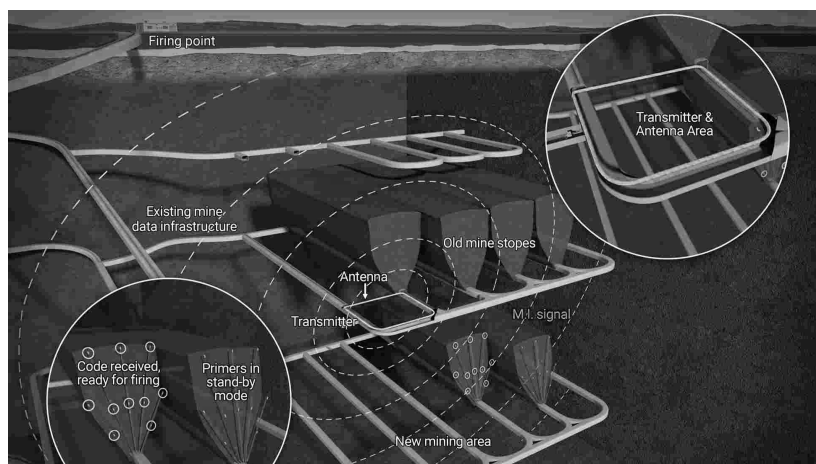
WebGen™ е иновативна безжична система за инициране, предназначена да елиминира необходимостта от физически връзки (проводници или вълноводи) между устройствата, които подават импулсите за инициране на електронните детонатори. Това повишава безопасността, продуктивността и гъвкавостта при взривни работи. На фигура 1 е представена обща схема на компонентите.



Фиг. 1 Обща схема на WebGen компонентите

На фигура 2 е визуализиран принципа за предаване на криптираните сигнали посредством антена WebGen™, където командите се разпространяват директно през скална маса, вода и въздух. Тази технология използва ултра нискочестотни (ULF) магнитни вълни, които имат способността да проникват през твърди среди, за да достигнат до заредените боевици в дълбочина.

Процесът стартира с така наречената точка на излъчване, където е разположена антена, излъчваща ULF сигнал до 700м в зависимост от модела. Концентричните линии на изображението визуализират как този сигнал се разпространява през средата, преминавайки през скали и други прегради. Спецификата на тези вълни позволява сигналът да достигне до боевиците, разположени в сондажите, без да е необходимо каквато и да била физическа връзка.



Фиг. 2 Принцип на предаване на сигнала

Всеки бустер предварително е програмиран с уникален код, който е специфичен за конкретния рудник и конкретното взривно поле. Единствено в случай че получения сигнал съдържа правилния код, боевика ще се детонира. Това осигурява високо ниво на сигурност и контрол, като елиминира риска от неволни или погрешни взривявания.

Обикновено в зоните за взривяване се намират боевици, които са в режим на изчакване и такива, които са готови за взривяване след като са получили съответния код. Финалната команда за инициране на взривяването идва от контролирана точка, която се намира извън зоната на пряка опасност.

Международни стандарти и сертификация

WebGen™ 200 е единствената гражданска взривна технология в света, която притежава сертификация SIL3 / IEC 61508 - най-високо ниво на безопасност за електронни системи. Това означава, че:

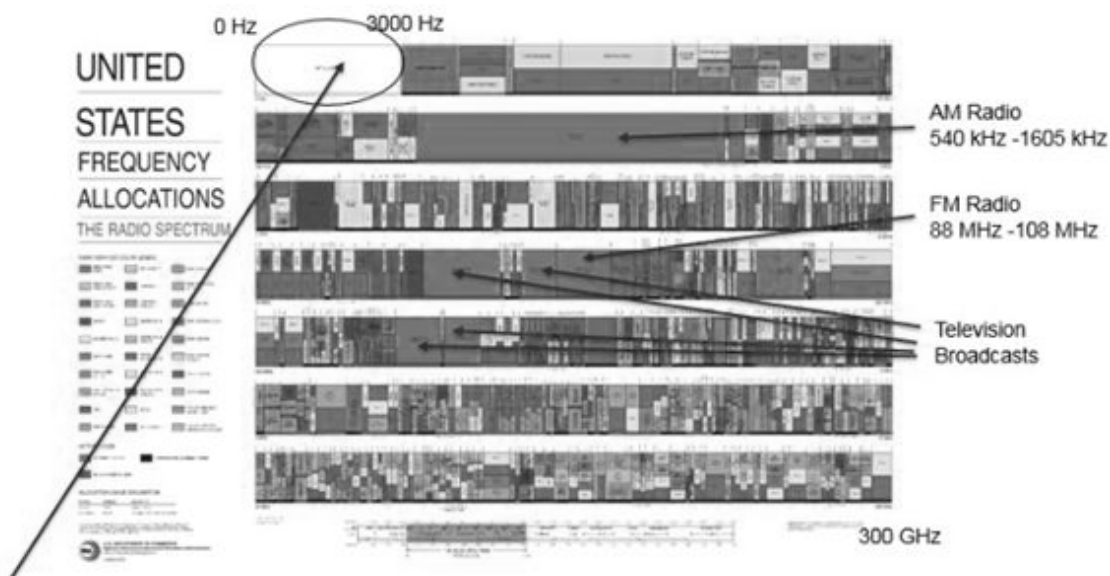
- Системата автоматично остава в безопасен режим, ако не са изпълнени всички условия за взривяване.
- Всяка партида се тества на 100%, а над 240 000 индивидуални теста са извършени за покриване на критериите на сертифициращата организация TÜV Rheinland, фигура 3
- Вероятността от отказ на системата се оценява на 1 на 100 милиарда (1×10^{-11}).
- Системата притежава и европейски сертификат за съответствие CE.



Фиг. 3 TUV сертификат за WebGen системата

Работна честота

WebGen™ 200 използва ултра ниска честота (ULF) - между 0 и 3000 Hz - за предаване на сигнали фигура 4. Този честотен диапазон не се припокрива с друго минно оборудване, което елиминира риска от нежелани смущения и прави комуникацията между компонентите изключително надеждна.



Фиг. 4 Работна честота за предаване на сигнали

Изисквания на системата WebGen

Преди системата да бъде одобрена и внедрена от Orica в дадено минно предприятие, независимо дали то е подземно или открито, се извършват редица процедури и изпитвания, насочени към гарантиране на безопасността на персонала. На първо място се оценява способността на предприятието да изпълни всички изисквания за безопасност и да осигури необходимата инфраструктура и системи за използване на технологията. При положителна оценка се пристъпва към съвместен анализ на риска, в който участват експерти от двете страни, като резултатите се документират в официален доклад. Провеждат се тестове за реактивността на скалния масив спрямо емулсионното взривно вещество (EBV), чрез които се определят безопасният период на престой на EBV във взривните сондажи. Допълнително се определя минималното безопасно разстояние, на което могат да бъдат разполагани WebGen боевиците спрямо съседни взривни сондажи, без да възниква риск от повреда вследствие на сеизмичното въздействие. Извършват се измервания на проводимостта на скалния масив по отношение на нискочестотните сигнали, използвани от системата за инициране. На база на получените резултати се определя максималното допустимо разстояние между антената и съответния WebGen боевик. Целият производствен персонал преминава обучение за работа със системата и за спазване на изискванията за безопасност, като всички етапи от процеса се документират. Едва след изпълнението на посочените дейности може да се пристъпи към разработване на проект за потвърждаване на концепцията.

WebGen в рудник „Челопеч“ РОС

Първата употреба на WebGen в DPM Metals „Челопеч“ цели да се приложи възможно най-широк спектър от функционалности в рамките на една добивна камера, така че да бъдат оценени максималните производствени и икономически ползи от нейното използване. Също така е възприет подход, при който WebGen не се разглежда единствено като средство за инициране, а като цялостна

технологична система, създаваща предпоставки за колаборация между специалистите на Orica и DPM Metals. Изграждането на съвместен експертен екип позволи обединяване на знания, опит и ресурси при решаването на предизвикателствата, свързани с модерните производствени процеси в условията на подземен рудник.

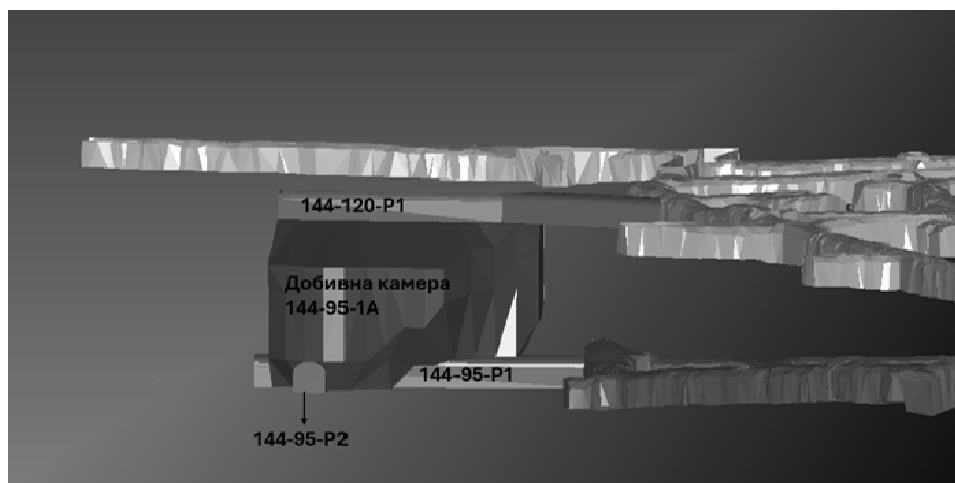
Основни параметри, с потенциал за подобрене при употребата на WebGen:

- Подработка
- Надрработка
- Време за приключване на добивна камера
- Редуциране на проходката
- Намаляване на прокарване на сондажи

Основни проектни решения разработени от екипа:

- Елиминиране на Т-разсечки (отрезни);
- Редуциране на проходката на горното ниво на камерата
- Взривна доставка на руда
- Проектна геометрична форма, която позволява на материала да се източва към една точка на извозване
- Оптимизация на сондажите в добивните ветрила
- Временен целик
- Елиминиране на прокарването на вече пробити сондажи;

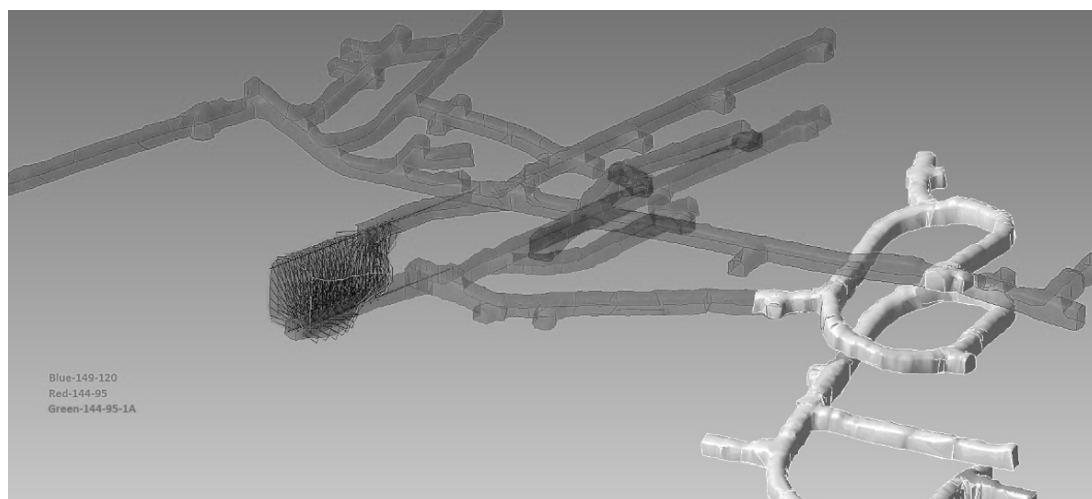
За потвърждаване на проектните решения е избрана добивна камера 144-95-1А, поради възможността да се комбинират пет от изброените параметри.



Фиг. 5. Първоначален дизайн на добивна камера 144-95-1А

На Фиг. 5. е представен дизайна на добивна камера 144-95-1А. На хор. 144-95 са проектирани две изработки, 144-95-Р2 е така наречената „Т“ изработка, използвана за създаване на първоначалното отбивно пространство. Също така се вижда, че изработката на горното ниво е проектирана до края на добивната камерата.

На фиг. 6 е представен финалният проект на добивната камера след проектирането ѝ предвиждайки използването на технологията WebGen. На пръв поглед промените в дизайна може да изглеждат незначителни, но всъщност те показват една много важна промяна. За първи път инженерите могат да проектират начина на добив според това, кое е най-ефективно и най-безопасно, а не според ограниченията на взривната система.

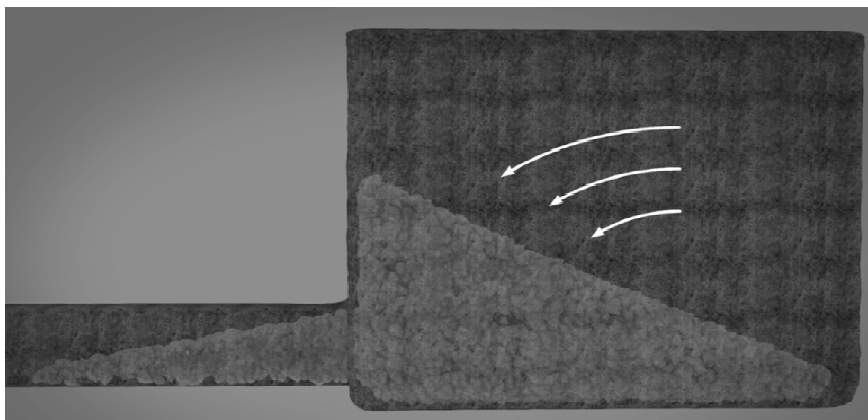


Фиг. 6. Финален дизайн след имплементиране на WebGen

При традиционните системи, след зареждане, често се налага повторен достъп до взривните сондажи за свързване, проверки или допълнителни операции. Това поставя ограничения върху последователността на работа и изисква персонала да се връща в зони с повишен риск. WebGen елиминира тази необходимост. След като сондажите бъдат заредени и боевиците програмирани, не се изисква повторен физически достъп до тях до момента на взривяването.

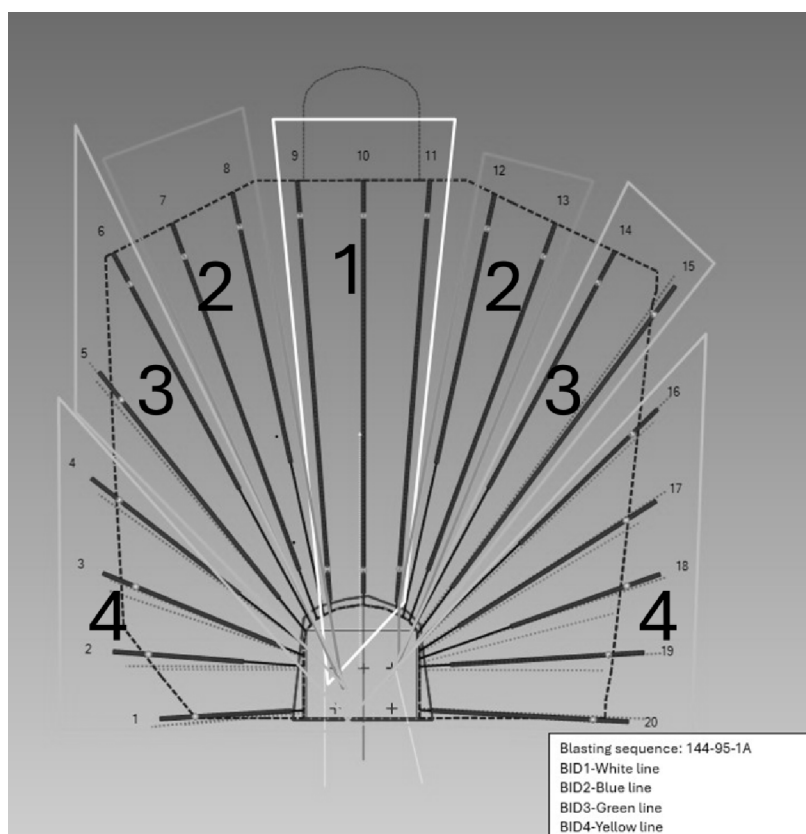
В конкретния случай отрезният комин е преместен в задната част на камерата, което позволява рудата да се добива поетапно към подхода на камерата (фигура. 7). Едновременно с това отпада необходимостта от изграждане на минни галерии и на двата работни хоризонта, което допълнително води до оптимизация на разходите и опростява организацията на добива.

Чрез намаляването на необходимостта от допълнителни операции след зареждането, работният процес става по-предвидим, а оперативният персонал оптимизира работните си смени. По този начин безопасността и производителността се подобряват едновременно, без едното да бъде за сметка на другото.



Фиг.7 Управление на посоката на взривяване

Системата WebGen не е просто безжична система за взривяване. Тя променя начина, по който се проектират, планират и изпълняват взривните работи. Вместо инженерите да се съобразяват с ограниченията на технологията, технологията започва да работи в полза на инженерните решения, които до скоро са били трудно приложими или изцяло невъзможни.



Фиг. 8. Добивно ветрило разделено на BIDs, които се взривяват независимо

Визуализация на различните взривявания (BID- Blast Identification) е представена на фигура 8, като последователността е от 1 към 4. Адаптивността на WebGen елиминира почти всички ограничения, които инженерите трябва да съобразяват при употребата на системи като Nonel и I-kon. Това създава огромна свобода и нови методи за взривявно отбиване на рудата.

Постигнати резултати

В таблица 1, са представени резултатите от употребата на WebGen в DPM „Челопеч“ до този момент. Тези резултати са сбор от използването на системата в 9 броя добивни камери. Въпреки резултата от 16% на показателя за надработка. Трябва да имаме предвид, че голяма част от рудата, която е добита със системата, е в непосредствена близост до иззети камери, силно компроментирани зони, разломи и геоложки структури, в които добива би бил труден без WebGen. Също така в тези зони, вероятността сондажите да останат здрави и да не е необходимо прокарване е изключително малка, а в този случай са постигнати едва 3%, средно за всички 9 броя добивни камери. С помощта на WebGen значително е намалена подработката, респективно загубите, като е постигнал целевия резултат дефиниран в самото начало на употреба. Времето е един от най-ценните ресурси при производството. Както се вижда, използването на WebGen спомага за ускоряване на добива конкретните камери с почти 4 месеца. Този резултат е функция от два основни фактора: Първо - спестените метри от прокарване на изработки, и Второ - не е необходимо изчакване на времето за втвърдяване на запълнението в предходната камера, тъй като системата позволява оставянето на предварително зареден временен целик и незабавно стартиране на добива от следващата в реда камера.

Таблица 1

	Мерна единица	План без WebGen	Исторически данни	Цел с WebGen	Резултат	Разлика
Надработка	%	15	16	8	11	-3.0
Подработка	%	10	13	8	8	0.0
Спестена изработка	m				217	-217
Спестено време	days				113	-113.0
Re-drill	%	10	17	7	3	4.0

За какво се използва WebGen в момента в рудник „Челопеч“

Към настоящия момент се използват всички приложения изброени в настоящия доклад, като се взима предвид предимствата и икономическата оценка на конкретния обект. Всяко от приложенията допринася за повишаване на гъвкавостта на производствените процеси чрез оптимизация на технологичното време, разширяване на възможностите за планиране, взривяване, извозване на рудата и най-вече безопасността на производствения персонал. Натрупаният до момента опит показва, че възможностите на WebGen не се изчерпват с утвърдените към момента приложения. Развитието на технологията и спецификите на различните обекти създават предпоставки за разработването на нови подходи за нейното приложение, което допълнително разширява потенциала ѝ за оптимизация на производствените процеси в подземния добив.

ВАЛОВО ИЛИ СЕЛЕКТИВНО РАЗРАБОТВАНЕ НА ПОДЗЕМНИ ПРИРОДНИ БОГАТСТВА

Кр. Дерменджиев, e-mail: knderm45@gmail.com

Г. Стоянчев, e-mail: g.stoyanchev@mail.bg

РЕЗЮМЕ

Проблемът относно валово или селективно разработване на подземни природни богатства, винаги се поставя за разглеждане при изземване на много тънки, тънки и дори на средномощни залежи. Разрешаването му е свързано с използването на системи на разработване със запълване на иззетото пространство, балансът на минната маса, добита и за запълване и съпоставката на съпътстващите разходи за комплекса от дейности свързани с минните работи. В докладът е представен един по-разширен подход за оценка и избор на валов или селективен добив на полезни изкопаеми.

Увод

По проблемът валово или селективно разработване на подземни природни богатства, залягащи под формата на пластове, жилни и пластообразни залежи, щокове, лещи и други природни образования има много изследвания. Той винаги е поставян като проблем за разрешаване при предварителни и основни оценъчни и проектни проучвания, а в някои случаи и в действащи практики.

Най-често той се появява при разработване на пластови и жилни залежи с дебелина от 0,1-0,3 и 0,5-1,2 m., а при пластови залежи и повече. В тези случаи необходимостта от оценка и избор на начин на разработване е свързан не само с дебелината и наклонът на залежа, но и от: количеството на запасите „Z“; годишната производствена мощност „Ag“; препоръчаните и използвани технически средства за механизация; степента на механизация и автоматизация; системата на разработване; еколожките изисквания и др.

Във връзка със сегашното състояние на минната техника и технологии, обществено-икономическите основи на обществото и екологическите изисквания към минните решения, по-нататък ще направим опит за рационализиране на подхода за оценка, анализ и избор на начин за отработване на залежите на подземни природни богатства.

Комплексна оценка и избор на начин на отработване на залежите

Комплексната оценка на начините на отработване на залежите се основава на относително постоянните минно-геоложки и миннотехнически условия и променливите техника и технологии, икономически, социални и екологически изисквания и ограничения. Тя трябва да включва три основни етапа, които не е задължително да се разглеждат последователно.

На първият етап се разглеждат възможните решения за система на разработване, техника и добивна технология за валово и селективно изземване на залежите. На вторият етап се разглежда възможната архитектура на рудника: разкриване, подготовка, транспорт и вентилация, обвързано със системата и начина на отработване - валово или селективно. На третият етап се разглеждат техниката и технологиите за първична и дълбока преработка на добития ресурс.

При оценката на валовият добив освен разходите за преработка трябва да се отчетат и възможните странични приходи от използването на отпадни продукти след преработката: трошен камък, пясъци и др., които може да бъдат използвани за строителни, иригационни и селско-стопански цели. При наличие на извлектаеми редкоземни елементи, те могат да се окажат, като основно предимство при сравнителната оценка за избора на валовия или селективният добив. Затова при тези оценки е необходимо да се използват знанията и насоките свързани с материалознанието и бъдещото техническо и технологично развитие на света.

Първоначалната оценка на валовия и селективният добив следва да се направи по присъщите предимства и недостатъци за двата начина. Без да се претендира за изчерпателност, по-долу са представени предимствата и недостатъците на двата начина на добив в рамките на рудничната и преработвателната технологични схеми.

Валово изземване на залежа

Предимства	Недостатъци
1. Възможност за използване на високопроизводителна механизация	1. Високи първоначални капитални разходи за механизация
2. Постигане на висока производителност	2. Ангажиране на много средства за оперативни разходи
3. Намален брой работници	3. Повишени площи и обеми за Технически и концесионни нужди
4. Повишена безопасност на труда	4. Повишен отпечатък върху околната среда
5. Реализиране на голямо производство	5. Повишени разходи за опазване и възстановяване на околната среда
6. Намалени относителни разходи	6. Повишено въздействие върху социалната среда
7. Възможност за комплексно извличане на основни и допълнителни суровини	7. Усложнени преработвателни процеси и повишено въздействие върху околната среда

Селективно изземване на залежа

Предимства	Недостатъци
1. Относително ниски капиталови разходи	1. Ниска степен на механизация
2. Високо качество на добив и ниско обедняване	2. Постигане на голямо производство
3. По-малки общи и оперативни разходи за добив и преработка	3. Ниска производителност на труда
4. По-прости схеми на преработка	4. Сравнително по-ниска безопасност на труда
5. По-малък отпечатък върху околната среда	5. По-малка гъвкавост на производството и преработката
6. По-малко разходи за опазване и възстановяване на околната среда	

Въпреки, че съществуват случаи на директен избор на начин на отработване на базата на комплексна оценка по качествени критерии, /предимства и недостатъци/, най-често оценката и изборът на ефективния начин на отработване става след икономическо изследване по съвкупен икономически ефект.

Изборът на валов или селективен начин на отработване на залежите винаги е свързан с начина на управление на скалния натиск: с обрушване; със запълване; с предпазни целици. С това е свързана и съответната технологична схема на работа и системата на разработване.

При системите със запълване в рамките на рудника винаги се прави баланс на общото количество материал за запълване - Q_z , количествата материали за запълване от подземните минни работи - Q_m и материал от повърхността - Q_f :

$$Q_z = Q_m + Q_f \quad /1/$$

Запълването е сложен и скъп процес, но създава възможности за удовлетворяване на много проблеми свързани с минната дейност като:

- Облекчава управлението на скалния натиск;
- Облекчава крепенето и управлението на състоянието на минните изработки;
- Спазване на изискванията за опазване на повърхността, геоложката и хидроложката среда;
- Удовлетворяване на екологичните изисквания към скални насипища на повърхността, концесионната площ, отпадъците при преработка и др.

При валовото разработване относителните общи разходи за изземване R_o , се представят с израза:

$$R_o = R_d + R_t + R_{tc} + R_{sc}, \text{ лв/т} \quad /2/$$

Където: R_d са разходите за добив; R_t – разходите за транспорт; R_{tc} – разходите за преработка и обогатяване; R_{sc} – разходи за съхранение и контрол.

При селективен добив видът на формула 1 се запазва, но формулата за баланса на минната маса се променя и е:

$$Q_s = Q_v \cdot K_c, \quad /3/$$

Където: Q_s е количеството минна маса при селективен добив;

Q_v - количество на минната маса при валов добив;

K_c - коефициент на селективност при добива. Представлява отношението на селективно изземваната минна маса M_s , към валово изземват M_v ;

$$K_c = M_s / M_v, \text{ и е около } 0,5 - 0,9.$$

В ситуациите, при които в минната практика има осезаеми трудности с работната ръка единственият изход е прилагане на строителни и добивни минни технологии наситени с механизация. Поради тежките условия на работа същата най-често е с голяма енерговъоръженост и сравнително големи габарити и тежина. Тези размери предопределят прокарването и използването на минни пространства – минни изработки /разкриващи, подготвителни, нарезни и добивни изработки с големи сечения/. Тези условия и предпоставки налагат априори да се използват, почти без изследвания технологии за валов добив.

По-сериозното отношение и изследване на предимствата и недостатъците на двете алтернативи, и особено на икономическите предимства може да промени посоченото по-горе мнение.

При сравнителните анализи и оценки трябва да се вземат предвид всички възможни разходи за реализацията на цялостната технологична схема или до определен елемент от нея, след който разлики между сравняваните схеми не съществуват.

Най-общо трябва да се детайлизират технологичните схеми и се определят всички възможни разходни елементи, които я съпътстват. Например, при съпоставяне на валов със селективен добив най-често се отчитат само разходите в рамките на добивния участък. Сега, когато е възможно детайлното отчитане на отделните разходни единици е необходимо това да се прави за цялостната схема. Детайлизирането трябва да обхваща цялата руднична верига, включително първичната преработка до търговски продукт с определени качества и цени. В тази връзка трябва да се отчитат възможните екологични въздействия и общественно-социални ограничения. При сегашното състояние на обществата значително се увеличават изискванията и ограниченията при осъществяването на миннодобивни и преработвателни дейности. Израз на това са многобройните протести и реакции за

забрана на посочените по-горе дейности, въпреки многобройните положителни ефекти за обществото от тях.

Нека анализираме възможните ефекти и разходи при реализацията на руднична технологична схема с валов и селективен добив в добивен забой със сухо запълване на иззетото пространство със смесен запълвачен материал, съответно от подземни минни работи и внесен от повърхността, както и транспорт на минната маса до обогатителна фабрика, обогатяване и продажба на концентрат.

Основните дейности при реализация на описаната по-горе технологична схема за двата варианта включва процеси и дейности, които се припокриват, но се различават като обеми, относителни стойности и въздействия. Тези дейности са: пробивно-взривни работи; натоварване на добитата минна маса; транспорт в рамките на участъка; транспорт на запълвачен материал и запълване на иззетото пространство; добив на повърхността и доставка на запълвачен материал до участъка; транспорт /подем/ на рудата до ЦОФ; преработка; складиране, разполагане и мониторинг на отпадъка /хвоста/; експедиция.

При качествена съпоставителна оценка на двата варианта, с експертни оценки от 5 до 10 на всички изброени по-горе елементи от технологичната схема, се установи, че варианта със селективен добив е с 20% по добър от валовият, въпреки някои много силни аргумента в полза на валовият добив. При него има възможност за прилагане на механизация с висока производителност и избягване на тежък труд в опасни условия, както и намаляване броя на работниците за работа и дейности, за които няма търсене.

За категоричното доказване на това твърдение е необходимо да се направи и съответната икономическа оценка на вариантите по разходите за тяхната реализация. Тези разходи, общи или относителни, детайлно се определят по описаните компоненти на съответната технологична схема. По-долу са представени съответните компоненти като дейности и относителни разходи:

$$R_o = \sum R_i, \text{ €/t}, \quad /4/$$

Където: R_o са сумарните относителни разходи за реализация на схемата;

R_i – отделните разходни елементи от съответната технологична схема. Най-общо те включват:

R_1 - относителен разход за отбиване с ПБР; R_2 - относителен разход за натоварване и транспорт в участъка; R_3 – относителен разход за общорудничен транспорт/подем/ на руда до ЦОФ;

R_4 – относителен разход за добив, транспорт и разполагане на запълвачен материал в иззетите пространства; R_5 – относителен разход за прием и преработка на рудната маса в ЦОФ; R_6 – Разходи за разполагане на отпадъчните материали след обогатяване, мониторинг и контрол; R_7 – относителни разходи свързани с наказателни въздействия чрез ограничения и законодателство. Такива могат да бъдат плащания свързани с концесионните такси за качество и количество.

Крайното решение за предпочитания вариант по икономически критерии се взема въз основа на израза: $R_v \geq R_o \leq R_s$, където: R_v са общите относителни разходи за реализацията на варианта с валов добив; R_o – относителните общи разходи на предпочитания вариант; R_s – относителните общи разходи за реализацията на варианта със селективен добив.

Изводи и заключение

Вида на полезното изкопаемо, формата на залягане, структурата на залежа и елементите на залягане влияят силно върху решенията за начина на разработване, техниката и технологията на работа. От последното, взаимнообвързано с преработвателните процеси се определят технологията и параметрите на работа за получаване на търговски продукт с определени качества и цена.

В случаите, когато обект на разработване са рудни жили и пластообразни тела с малка дебелина и ценни полезни компоненти, винаги е необходимо да се оценяват и съпоставят две възможни добивни технологични схеми за добив: валова и селективна.

При оценката, съпоставянето и изборът на рационалната технологична схема трябва да се използва комплексната качествено-количествена процедура с много критерии. За реализацията ѝ може с успех да се използва подходът представен по-горе. Работата по него може лесно да се осъществи с използване на съвременните комуникационни и изчислителни средства.

Литература

1. ДЕРМЕНДЖИЕВ, Кр. Върху някои аспекти на запълването на иззети пространства и начина на тяхното отчитане.// Год. на МГУ, 47, 2004, №2, с. 23-25.
2. ДЕРМЕНДЖИЕВ, Кр. Определяне на необходимо и достатъчно количество запаси за ефективен добив на минерални ресурси.// Сб.трудове на науч.конференция, Охрид, Македония, 2006
3. ДЕРМЕНДЖИЕВ, Кр. Съвременни минни практики при подземния добив и минното строителство.// Технологии и практики при подземен добив и минно строителство : Докл. от Нац.научно-техническа конф. Девин, 7-10.11.2010, с.3-8.
4. СТОЯНЧЕВ, Г. и др.. Съвременни минни технологии – настояще и бъдеще./ Г. Стоянчев, Кр.Дерменджиев// Сб.докл. на III Нац.науч.техн. конф. с международно участие, Девин 8-11.10.2012, с.65-69.
5. МИЛЧЕВ,М., Кр. Дерменджиев. Очаквани прояви на скалния натиск при слоева система с възходящ ред на изземване и запълване. Сб.докл. от X Международна конференция по Геомеханика, 19–23 септември 2022.,Варна, България, с.74–82

ТЕХНОЛОГИИТЕ С ОБРУШАВАНЕ - МИТ ИЛИ РЕАЛНОСТ ПРИ РАЗРАБОТВАНЕ НА РУДНИ НАХОДИЩА НА ГОЛЯМА ДЪЛБОЧИНА

проф. Георги Михайлов
МГУ Св.Ив.Рилски e-mail: mihayg@mgu.bg

РЕЗЮМЕ

Условно тази статия може да се раздели на две части. В първата част са представени практики на най-ефективно приложение на блоково обрушаване и подетажно обрушаване. Посочва се значението на механичните свойства на рудата и страничните скали, както и класификационната характеристика на Laubscher при избор на подходящ начин на подсичане и развитие на процеса самообрушаване. Изтъква се ролята и значението на съвременната механизация: пробивна, товаро- транспортна, спомагателна за оптимизиране на височината на подетажа и формата на напречното сечение на равнината, в която се разполагат сондажните ветрила при система с подетажно обрушаване. Във втората част е представено иновативно решение на камерна система с изземване на първични и вторични камери и последващо обрушаване на скалите в горнището. Представен е подход за генериране на множество варианти при определяне на оптимално технологично решение.

Ключови думи: блоково обрушаване, подетажно обрушаване, изземване на първични и вторични камери и последващо обрушаване.

CAVE MINING-MYTH OR REALITY FOR ORE EXPLOITATION IN GREAT DEPTHS?

ABSTRACT

This paper consists two parts. The first part presents best practices for the application of block caving (BC) and sublevel caving (SLC). It highlights the importance of the mechanical rock mass properties as well as Laubscher's classification system, in selecting the appropriate undercutting method and initiating the self-caving process. The role of contemporary mechanization including drilling, loading-hauling-dump and auxiliary equipment is emphasized regarding the optimization of sublevel height and the cross sectional shape of the plane where drilling fans are positioned in SLC. The second part presents an innovative solution involving a large scale Primary and Secondary stopes followed by the caving of the overlying rocks. An approach for generating multiple alternatives to determine the optimal technological solution is also presented.

Keywords: Block caving, Sublevel caving, large Scale stopes with primary and secondary rooms and next caving.

1. Въведение

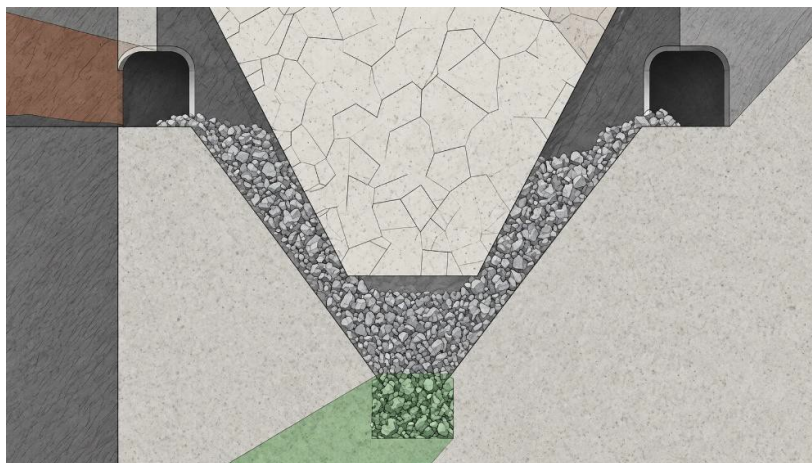
Технологиите с обрушаване заемат особено място в списъка на системите за подземно разработване на рудни находища. Това се дължи на обстоятелството, че при прокарване и експлоатиране на всяка подземна минна изработка осигуряването на устойчивост и безопасна работа е първото и най-важно условие, докато при технологиите с обрушаване именно стремежът към самообрушаване на масива се превръща в своеобразен „съюзник“ при проектиране и добивно изземване. За да се постигнат положителни резултати е необходимо отлично познаване на поведението на масива като геотехнологична среда: структурна нарушеност, якостни показатели на рудата и страничните скали, пространствена ориентация на най-голямата подвижност с оглед ефективно развитие на процеса „обрушаване“. Технологиите с обрушаване заемат достатъчно широко място на разпространение в световната практика. Те се прилагат в подземни рудници с голяма и много голяма производствена мощност. У нас през 70^{те} и 80^{те} години на миналия век системата с подетажно обрушаване намираше широко приложение. Като се изключи рудник „Челопеч“, където се прилагаше сондажно отбиване и доставка със самоходни товаро-транспортни машини (макар и с пневматично задвижване), другите рудници не постигнаха забележими технико-икономически резултати. Закрепването с традиционен рамков крепеж (дървени или метални стойки), както и повсеместно

използване на скреперна доставка, не осигуряват необходимата интензивност на добива, с което да се компенсират основните недостатъци: голямо обедняване и влияние на минните работи върху земната повърхност. От гледна точка на настоящето детайлите с прилагане на технология с обрушаване коренно са се променили. За закрепване на подготвителните изработки се използват различни конструкции анкери вкл.железо-бетонни и въжени. В съчетание с торкрет бетон се използват мрежи и стоманени укрепващи ленти. За отбиване на рудата се използват сондажи с дължина над 15-20 m. За тяхното пробиване се използват сондажни агрегати тип *ТН* и *ІТН*. Натоварването на рудата се извършва с челни товари с вместимост на кофата 7-10 m³. Различните системи за взривяване разполагат с широк диапазон на интервали на закъснение, при което ефективно се управлява взривното разрушаване както в едновременно взривяваните ветрила, така и в сондажите на отделно ветрило. Технологиите с обрушаване намират приложение в Европа и в частност на Балканите. Достатъчно е да се спомене мина Бор в Сърбия и Саса в Северна Македония, за да се търсят аргументи за бъдещо развитие и усъвършенстване на технологиите с обрушаване, вкл. и в нашата страна. В настоящата статия са разгледани три различни по своята същност технологии с обрушаване. Те са приложими за различни природни условия и морфологични особености на рудните тела, което идва да покаже, че възможностите за прилагане и усъвършенстване съвсем не са изчерпани.

2.Система на разработване с блоково обрушаване

Тази система на разработване намира широко приложение в световната практика на подземния рудодобив. Достатъчно е да се отбележи, че тя се прилага за условията на мощни и свръх мощни рудници с годишна производствена програма над 10 мил.т. За прилагане на блоково обрушаване споменава В.Р.Именитов в [1]. Той посочва рудник „Klimax“ в Колорадо – САЩ като най-мощен рудник в света за подземен добив на молибден – 15 мил.т/год. През лятото на 2026 год. в рамките на Международната конференция по геомеханика „Caving’26“, организирана от Australian Center for Geomechanics, авторът има възможност да посети един от най-мощните съвременни рудници Оуу Tolgoi в Монголия, собственост на Rio Tinto. Рудникът разработва медно-златно находище по подземен начин и има годишна производствена мощност 11.250 мил.т с тенденция за нарастване.

Към технологията с блоково обрушаване последните години се забелязва повишен интерес. Това се дължи на факта, че машините за пробиване на сондажите, машините за товарене и доставка (LHD), както и изучаването на процеса „обрушаване“ се развиват много динамично с една единствена цел-увеличаване на ефективността на разработване. Графичното представяне на системата с етажно блоково обрушаване е показано на фиг.1.



Фиг. 1 Система на разработване с блоково обрушаване.

За основа е използван опитът на New Gold в Canada [2], където по мнение на автора са приложени най-големи усъвършенствания на производствените процеси. За нормално функциониране на системата с блоково обрушаване е необходимо да се развият подготвителни работи на четири нива:

- Intercut level;
- Extraction level;
- Haulage level;
- Vent level.

Важно условие, гарантиращо ефективността на добивната технология, е определянето на apex level. С него се ограничава пространството, в което трябва да се развие процесът на обрушаване във височина. Така се достига до критичния момент в конструкцията на добивния блок: определяне на площта на подсичане и посока на развитие на самообрушаването. По-конкретно се налага решаването на две оптимизационни задачи. **Първата:** Определяне на начина на подсичане и изграждане на оптимална мрежа от събирателни пунктове за формиращите се товаропотоци. **Втората:** Определяне на формата и големината на елипсоида на източване.

2.1 Начин на подсичане и посока на развитие на минните работи

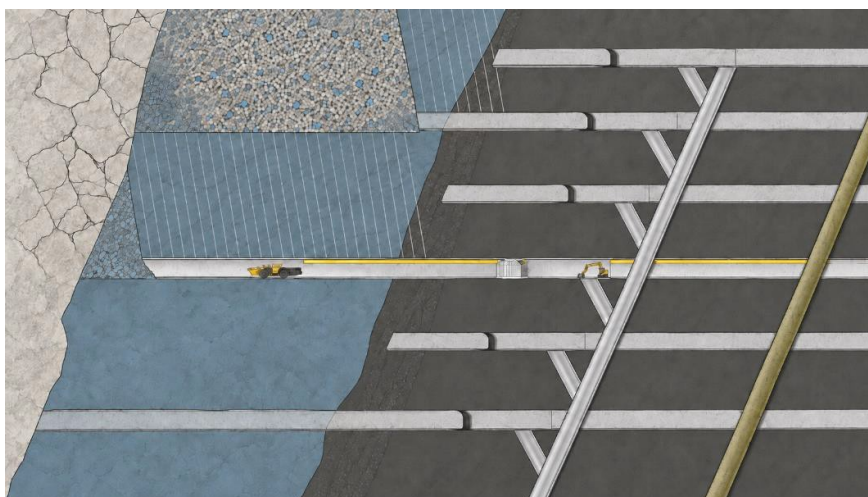
В основата на избора на начин на подсичане и посока на развитие на обрушаването стои определянето на качеството на масива като природна среда. Bieniawski [3] умело разработва Rock Mass Rating (RMR), която отчита влиянието на седем фактора. Въпреки последващите подобрения, RMR не може да се впише коректно при избора на оптимални размери на подсичане. Ясно се очертава преходна зона, в която са приложими както системи с открито добивно пространство, така и с обрушаване. Laubscher [4] успява да създаде Modified Rock Mass Rating (MRMR), която въз основа на натрупания опит във водещи предприятия с използване на технология с обрушаване: North Parks Mines, De Beers, Rio Tinto, PT Freeport Indonesia, Noranda Inc, TVXGold, CODELCO, Newcrest mining, представя необходимата зависимост между MRMR и Hydraulic radius (HR).

2.2 Определяне на формата и големината на елипсоида на източване

Като елемент на технологичната схема елипсоидите на източване притежават широки възможности за управление на качеството и формиране на крайните технико-икономически показатели. Техните параметри: големина на напречното сечение, височина, ъгъл на наклона на стените съществуват обективно. Те са предмет на моделни изследвания още от времето, когато са започнали наблюдения на процесите, свързани с източване при наличие на контакт с обрушени скали. Елипсоидът е геометрично място на точки, движещи се с еднаква скорост под действие на гравитационните сили. Следователно по неговата главна ос скоростта е най-голяма. Формират се още два конструктивни параметъра: фуния на внедряване и елипсоид на разбухване. В зависимост от разстоянието между изработките за източване елипсоидите могат взаимно да си влияят или обратно-между тях остават т.н. „мъртви зони“, в които рудните късове са в относителен покой. В това е същността на оптимизационната задача. При развитие на процеса във височина се оформя стълб от минна маса, който прогресивно увеличава натоварването върху крепежа на изработките за товарене и това може да доведе до аварии. За това от съществено значение е изборът на оптимална височина на блока, подлежащ на обрушаване, респ. apex level. В съвременните технологични схеми се използва челно източване със самоходни товаро-транспортни машини тип LHD. Обемът на кофата на челния товарач е производствената единица, въз основа на която се формира количеството добита руда в рамките час, работна смяна, денонощие при строго спазване на ограничаващите условия за средно съдържание на рудата, развитие на елипсоида на източване и формиране на фронт за движение на обрушената маса във височина. Анализът на зърнометричния състав при първично и вторично раздробяване дава възможност да се оцени какъв да бъде размерът на кондиционния къс. Изборът на подходящ оптимизационен показател позволява да се определи делът на механичната енергия (енергопоглъщаемостта) при оценка на ефективността на формирация се товаропоток от мястото на изкопаване до приемните бункери на обогатителната фабрика.

3. Система на разработване с подетажно обрушаване

Системата с подетажно обрушаване е една от най-разпространените минни технологии в световната практика. Тази констатация беше в сила и за България, където през 60-70 години на миналия век тя се прилагаше в някои от рудниците на Горубсо. Безспорен връх се постигна в рудник „Челопеч“, където благодарение на прилагане на подетажно обрушаване рудникът беше с най-голяма производствена мощност 500000t/год. Следва да се отбележи, че техническото ръководство на рудника приложи някои свои иновативни решения като челното товарене се извършваше най-малко от две страни, благодарение на взаимно-перпендикулярното разположение на изработките за товарене. Така се оформяха целици с правоъгълно напречно сечение, които също възприемаха формирания се опорен натиск. Тенденцията към увеличаване на височината на подетажа, както и оформянето на подходяща форма на напречното сечение, в което се разполагат ветрилообразно сондажите, са две от предпоставките за увеличаване на ефективността на системата с подетажно обрушаване. На фиг.2 е показано графичното представяне на системата.



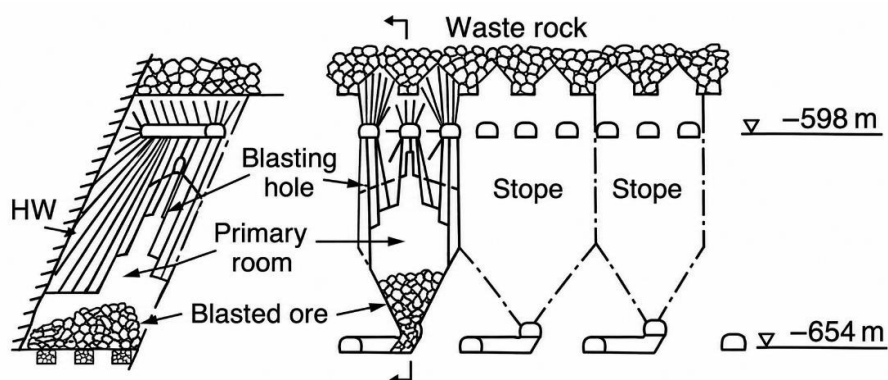
Фиг. 2 Система на разработване с подетажно обрушаване.

В скалата на Laubscher по обрушаемост рудата се характеризира с по-високи показатели, докато страничните скали следва да притежават определена склонност към първично и вторично самораздробяване. В тези условия обемът на пробивно-взривните работи значително превишава този при блоково обрушаване. Освен ветрилообразното разположение на сондажите, тенденцията към увеличаване на височината на подетажа, както и увеличаване на диаметъра на сондажа, са двата технологични параметъра, които най-съществено влияят върху ефективността на добивната технология. Показаното графично представяне на системата на фиг.2 дава основание да се заключи, че изборът на подходящ тип на механизация (пробивна и товаро-транспортна) изисква задълбочен технико-икономически анализ при определяне на оптималните условия за експлоатация вкл. и при малка дебелина на рудните тела. В стремежа за прилагане на висока интензивност на добива особена актуалност придобива въпросът за управление на качеството на добитата руда. На първо място това означава отлично познаване на законите, по които се извършва източването на рудата при наличие на контакт с обрушени скали. Използването на експрес-анализатори, както и маркери, следящи траекторията на рудата към изработките за източване, позволяват съдържанието на фактически добитата руда да се контролира в реално време и от там да се определят оперативните показатели за загубите a_e обедняването b .

4. Камерна система с изземване на първични и вторични камери и последващо обрушаване

Тази система може да се разглежда като алтернатива на камерно-целикова система на

разработване (КЦС), когато запълването на иззетото пространство се заменя с последващо обрушаване. Същността на системата изисква прилагане при средно устойчиви до устойчиви руди, които са в състояние да поддържат открити добивни пространства в достатъчно дълъг период от време. Следователно по скалата на Rock Mass Rating (RMR) респ. Geological Strength Index (GSI) се изискват значително по-високи стойности в сравнение със случаите, разгледани в предишните параграфи. Това налага значително по-голям обем на пробивно-взривни работи, като тенденциите за прилагане на сондажи с голям диаметър и управление на процеса на взривяване както в рамките на отделните ветрила, така и в самото ветрило са неизбежни. Може да се каже, че тази система има своя история на приложение в България, когато в 60-70 години на миналия век се приложи технология с двустадийно изземване в рудник „Плакалница“. Като значително техническо постижение се отбелязва едновременното взривяване на около 70 t взривно вещество (ВВ)-факт, който и до днес остава непостижим за условията на подземния рудодобив. На фиг.3 е показано графично представяне на системата.



Фиг. 3 Камерна система с изземване на първични и вторични камери и последващо обрушаване.

Основни конструктивни елементи са височината на етаж H_{em} , ширината на първичните и вторични камери, съответно B_1 и B_2 . Условието $B_1 \neq B_2$ има важно практическо значение, тъй като чрез неговата вариация може да се влияе върху загубите a_e и обедняването b , които са основни технологични показатели при оценка на ефективността. Камерите са ориентирани перпендикулярно на линията на разпространение. Прилага се скална подготовка, като етажните галерии са разположени в скалите от долнището на достатъчно разстояние, за да се осигури нормално движение на машините за натоварване и доставка. Взривните сондажи се пробиват от ортове-обикновено три на брой, като ветрилообразното им разположение трябва да осигури прилагането на Vertical Crater Retreat (VCR)-една технология, която следва да се стреми към максимална безопасност на работа в добивното пространство. В основата на блока (респ. на етаж) се оформят фунии за източване, като техният брой зависи от дебелината на рудното тяло, тъй като са разположени напречно на линията на разпространение. За всяка камера се използва съответно един орт за товарене. Фуниите за източване трябва да се оформят така, че в основата на добивното пространство да бъде осигурено пълно подсичане на блока. Организацията на работа с Vertical Crater Retreat трябва да бъде изпълнена така, че да позволява формирането на сводообразна форма на откритото добивно пространство. Така се осигурява безопасна работа и по-конкретно изключване на аварии особено, когато линията на отбиване приближава нивото, на което са разположени изработките за зареждане на сондажите. В съвременни условия състоянието на откритото добивно пространство се контролира от различни по вид радарни системи, вкл. и дроневи. Последният етап от разработването на добивния блок включва взривяване на целика над ортовете за пробиване на сондажите, с което се създава възможност отгорележащите обрушени скали да навлязат в иззетото пространство. Разделянето на първични и вторични камери определя реда за тяхното изземване. Именно в зависимост от геометричните размери B_1 и B_2 се определя количеството на „чисто“ отбитата руда (без смесване с обрушени скали), където се „крие“ възможността за ефективно изземване - с минимални загуби или обедняване. Като типичен представител на многостадийните добивни технологии

системата предразполага за формиране на множество варианти. За определяне на възможния им брой се съставя алтернативен граф G[5]. В конкретния случай се предвижда неговата конструкция да се състои от четири нива, а именно:

$G \rightarrow \text{ниво}A \rightarrow \text{ниво}B \rightarrow \text{ниво}C \rightarrow \text{ниво}D,$

където: нивоА е ред на изземване на първичните камери с две алтернативи: едновременно A_1 , последователно изземване A_2 ;

нивоВ – ред на запълване на първичните камери с обрушени скали с три алтернативи: непосредствено след всяка камера B_1 , наведнъж след всички иззети първични камери B_2 , друга комбинация B_3 ;

нивоС – ред на изземване на вторичните камери с две алтернативи: при открити първични камери C_1 , при запълнени с обрушени скали първични камери C_2 ;

нивоD – посока на развитие на минните работи във вторичните камери с две алтернативи: от горнище (HW) към долнище (FW) D_1 , обратно от долнище (FW) към горнище (HW) D_2 .

Така се осигурява възможност за формиране на общо 24 варианта, които изцяло се покриват с изискванията за комплексност на анализа при спазване на ограничаващите условия на класификационната характеристика MRMR на Laubscher.

5. Заключение

Представените три случая на системи с обрушаване са малък щрих от големите възможности за приложение на тази технология в подземния рудодобив. Големото предимство е, че се осигурява висока производствена мощност, която е в състояние да компенсира основните недостатъци загуби и обедняване над средно установените норми. Възможността за ефективно приложение зависи от детайлно познаване на природните фактори и в частност определяне на степента на обрушаемост, използвайки универсалната класификационна характеристика MRMR на Laubscher. Технологиите с обрушаване изискват приложение на едрогабаритни машини за пробиване на взривните сондажи и челно източване, натоварване и доставка на отбитата руда. За целта се налага използване на подготвителни изработки с голямо напречно сечение, които да компенсират необходимостта за ефективно проветряване и безаварийно функциониране на машините. Съвременните средства за монтаж и експлоатация на анкери и мрежи в съчетание с торкрет бетон осигуряват възможност за ефективна и безопасна работа в подготвителните изработки. Утвърждават се съвременни средства за съставяне на подходящи модели на базата на линейно и динамично програмиране, с което се постига управление на качеството на добитата руда в реално време. Технологиите с принудително обрушаване изискват огромен обем на ПВР. Тяхната ефективност зависи от управлението на взривните процеси както във взривяваните ветрила, така и в отделните сондажи на ветрилото. Като относителен дял все повече нараства използването на VCR. Без неговото прилагане е немислимо отбиването на рудата в първичните и вторични камери с оглед последващото принудително обрушаване и ликвидиране на съществуващите открити добивни пространства. Критерият за ефективност на всяка технология с обрушаване е успешното интерпретиране на целевата функция, включваща разходите за ПНР, производствените разходи по процеси, както и щетите от загубите и обедняването.

ЛИТЕРАТУРА

1. Именитов, В.Р. (1978) Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождения. Москва, Недра.
2. Kamp, C (2026) Managing selected production level complexities and outcomes in block caving, in A van As, D Cumming-Potvin, & J Wesseloo (eds) *Caving'2026: Proceedings of the Sixth International Conference on Block and Sublevel Caving*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp 1-35, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2645-0.03
3. Ives Potvin & John Hadjigeorgiou (2025) Ground support for underground mines. Australian Centre for

Geomechanics. University Western Australia 2025 ISBN 978-0-9876389-5-3

4. Laubscher. D (2000) A practical manual on Block Caving, October 2000 for the International Caving study (1997-2000)
5. Михайлов, Г.А. (2007) Научно-методологични основи на процедура за избор на оптимално технологично решение при подземно разработване на рудни находища. Хабилитационен труд за получаване на научно звание „Професор“. Минно-геоложки университет "Св.Иван Рилски"

IMPROVEMENT OF THE MINING SYSTEM WITH ORE BREAKING FROM SUBLEVEL DRIFTS THROUGH UPWARD MINING SEQUENCE AND WASTE-ROCK BACKFILLING

H. A. Armaghanyan

Armaghanyan Hrant Aramaisi - Assistant to the Chief Engineer at “Kapan Mining and Processing Plant” CJSC;

Lecturer at the Department of Subsurface Management and Construction, Kapan Branch of the National Polytechnic University of Armenia;

Postgraduate Student at the Department of Mining and Environmental Protection, National Polytechnic University of Armenia;

Kapan, Republic of Armenia; Tel.: +374 77 00 99 39; E-mail: armaghanyanhrant@gmail.com

РЕЗЮМЕ

В статье представлено совершенствование системы разработки, применяемой на Шаумянском золото-полиметаллическом месторождении, эксплуатируемом Капанским горно-обогатительным комбинатом. Предлагается изменить последовательность очистных работ в подэтажах с нисходящей на восходящую с последовательной закладкой выработанного пространства пустой породой. Предлагаемое решение позволяет снизить вторичное разубоживание и потери руды, а также риск обрушения вмещающих пород, одновременно повышая условное содержание золота (Au_{eq}) в добываемой руде. Технические и экономические преимущества предлагаемой системы разработки оценены на основе сравнительных производственных данных.

Keywords: underground mining, sublevel drifts, upward mining sequence, ore dilution, ore losses, waste-rock backfilling.

INTRODUCTION

It is well known that many operating, developing, and prospective non-ferrous and precious-metal deposits are characterized by complex geological and mining conditions, which affect the technical applicability of various underground mining systems. The choice of mining system has a significant impact on the technical and economic performance of a mining and processing operation, since it directly affects mining productivity and material consumption, ore extraction and processing costs, ore losses and dilution, the quantity and cost of the final product, as well as the cut-off grades of valuable components.

The more complex the geological and mining conditions, the more limited the range of technically applicable underground mining systems. Moreover, such systems may be characterized by high extraction costs, high ore losses and dilution, or, under certain conditions, a combination of these factors.

In this regard, the Shahumyan gold-polymetallic deposit is of particular interest. The deposit comprises 83 ore bodies represented by mineralized veins and vein zones. These two morphological types of ore bodies alternate spatially. The vein zones consist of a series of parallel or sinuous thin veins and veinlets of variable thickness, while the rocks adjacent to the contacts of the vein zones are characterized by pronounced disseminated mineralization.

The ore bodies generally have a strike azimuth ranging from 260° to 300° and dip predominantly southward at angles of 70°–80°.

Their strike lengths range from several tens of metres to 600 m, while their vertical extent ranges from 150 to 450 m.

According to the mine development project, two underground mining systems were adopted: shrinkage stoping for ore bodies, or individual sections thereof, with a thickness of up to 3.0 m, and sublevel stoping for ore bodies, or individual sections thereof, with a thickness greater than 3.0 m. In both systems, subsequent backfilling of the mined-out space with processing tailings was provided [1].

A distinguishing feature of the shrinkage stoping system applied at the mine is the draw of broken ore from the stope through drawpoints (Fig. 1).

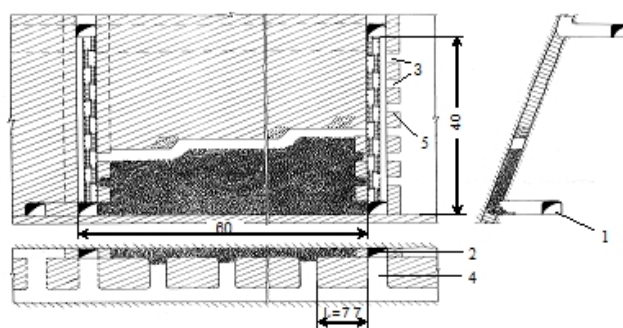


Fig. 1. Shrinkage stoping system: 1 – field haulage drift; 2 – raise with ore-pass and manway compartments; 3 – access drifts; 4 – short loading crosscuts; 5 – inter-stope pillars.

After complete ore draw from the stope, hanging-wall collapses were recorded in several mining blocks, necessitating the installation of cable bolts in specially drilled boreholes. In addition, cases of hang-up of broken ore due to arching were observed during ore drawing.

In 2010, a new mine development project was prepared, according to which the annual production capacity of the underground mine was set at 600,000 t/year. The adopted mining system involved ore breaking from sublevel drifts in a downward sequence, followed by backfilling of the mined-out space with waste rock. This mining system has remained in use to the present day (Fig. 2) [1].

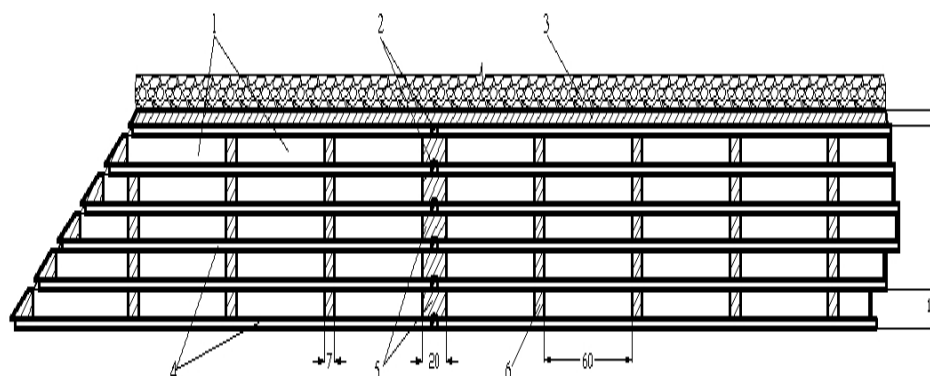


Fig. 2. Mining system with ore breaking from sublevel drifts in a downward sequence and waste-rock backfilling of the mined-out space: 1 - stopes; 2 - crosscuts; 3 - roof rock mass; 4 - sublevel drifts; 5 - protective pillars; 6 - inter-stope pillars.

PROBLEM STATEMENT AND RESEARCH METHODS

Improving the efficiency of underground mining of steeply dipping thin ore bodies has long been the focus of numerous studies [2–10].

The main features of the currently applied mining system are as follows:

- the ore bodies are accessed through the main spiral decline and sublevel crosscuts, with a vertical spacing of approximately 13 m between adjacent sublevels, conventionally considered as the sublevel height;
- ore haulage is carried out through sublevel drifts and crosscuts; the interval between adjacent levels essentially constitutes a mining level of relatively small height;
- stoping operations are carried out in a downward sequence, following the development of each individual sublevel, rather than after completion of the decline along the entire height of the mining level.

Considering these features, the applied system may conventionally be referred to as a mining system with ore breaking from sublevel drifts.

The currently applied mining system is characterized by relatively high mining costs, considerable ore dilution, and ore losses. These disadvantages are associated with both the structural features of the mining system and the small thickness of the ore bodies, as well as the relatively low height of the mining level.

Improving and developing underground mining systems remains important for increasing the economic efficiency of underground ore extraction. One of the key tasks in the conceptual approach to this problem [11]

is to identify the main technological shortcomings and develop appropriate measures for their complete or partial elimination.

In this regard, the main shortcomings of the mining system with sublevel drifts applied at the Shahumyan deposit, which affect the qualitative and quantitative indicators of the extracted ore, are considered below. Technological improvement of mining methods is particularly relevant for steeply dipping ore deposits [12].

1. Effect of ore-breaking parameters on dilution.

Ore breaking is carried out using blast holes drilled with drill rods more than 10 m long. Under these conditions, the minimum actual stope width after blasting is approximately 2.2 m, due to the unavoidable breaking of waste rock from the hanging wall and footwall of the ore body. The minimum thickness of waste rock broken from each side may reach approximately 0.8 m.

The use of small-diameter blast holes, together with cable bolting of the hanging wall through specially drilled boreholes, has made it possible to significantly reduce ore dilution. However, in extremely thin ore bodies or individual sections thereof, dilution may reach 80%.

Stoping operations are carried out in a downward sequence, starting from the upper sublevel and subsequently progressing to the middle and lower sublevels. As mining progresses downward, the exposed surface area of the hanging wall and footwall gradually increases, thereby increasing the risk of wall-rock instability and collapse. The collapsed wall rock mixes with the broken ore, resulting in increased secondary ore dilution in the middle (second) and lower (third) sublevels (Fig. 3).

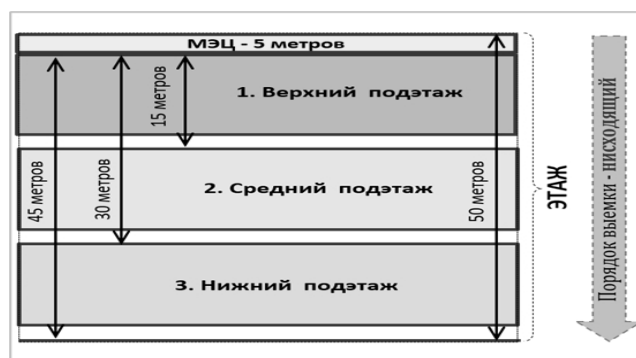


Fig. 3. Downward sequence of sublevel mining in the currently applied mining system.

2. The currently applied method is characterized by a significant proportion of ore reserves left in interlevel and inter-stope pillars; this proportion naturally increases with increasing ore-body thickness.

RESEARCH RESULTS

In the proposed variant of the mining system with ore breaking from sublevel drifts and backfilling of the mined-out space with waste rock, stoping operations are carried out in an upward sequence in order to reduce secondary ore dilution.

For implementation of the upward mining sequence, the decline is first developed along the entire height of the mining level. During this stage, preparatory development, including the driving of sublevel drifts in the middle and upper sublevels, is also carried out.

Ore extraction then begins from the first (lower) sublevel. Figure 4 shows the drilling-and-blasting operations for ore extraction in the lower sublevel under the proposed mining system with an upward sequence and subsequent backfilling of the mined-out space with waste rock.

After completion of stoping operations in the lower sublevel, the mined-out space is backfilled with waste rock from the middle sublevel using a loading machine. After completion of backfilling, drilling-and-blasting operations are carried out in the middle sublevel. The broken ore is then extracted and loaded using a loading machine.

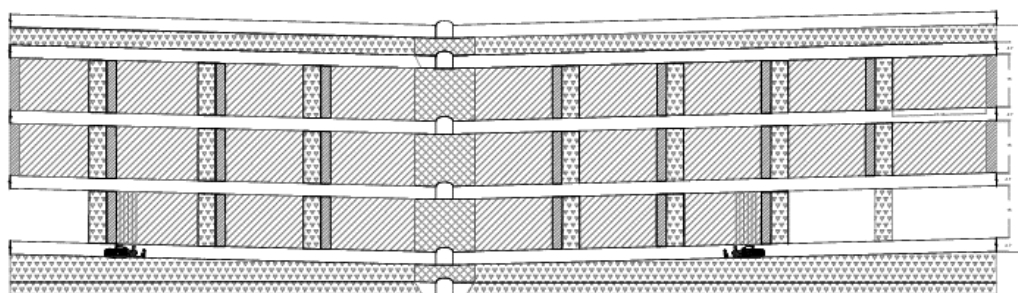


Fig. 4. Drilling-and-blasting operations for ore extraction in the first (lower) sublevel under the proposed mining system with an upward sequence and subsequent waste-rock backfilling.

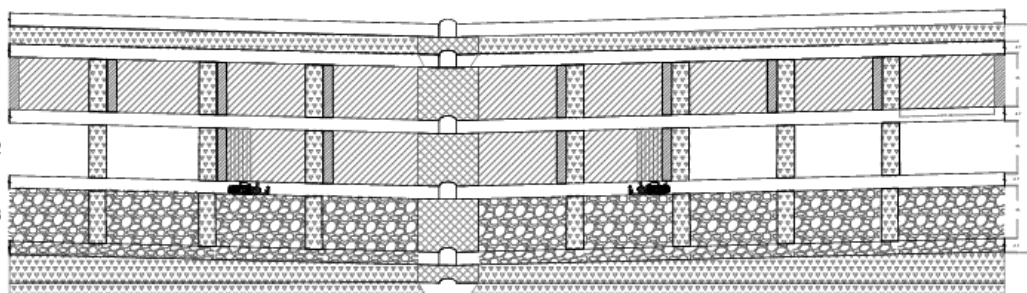


Fig. 5. Drilling-and-blasting operations for ore extraction in the second (middle) sublevel under the proposed mining system with an upward sequence and subsequent waste-rock backfilling.

After the middle sublevel has been mined, its mined-out space is backfilled with waste rock using a loading machine. After completion of backfilling, drilling-and-blasting operations are carried out in the upper sublevel, followed by extraction and loading of the broken ore using the same type of loading machine.

After completion of stopeing operations in the upper sublevel, the remaining mined-out space is backfilled with waste rock, thereby completing the successive bottom-up mining and backfilling of the entire mining level (Fig. 6).

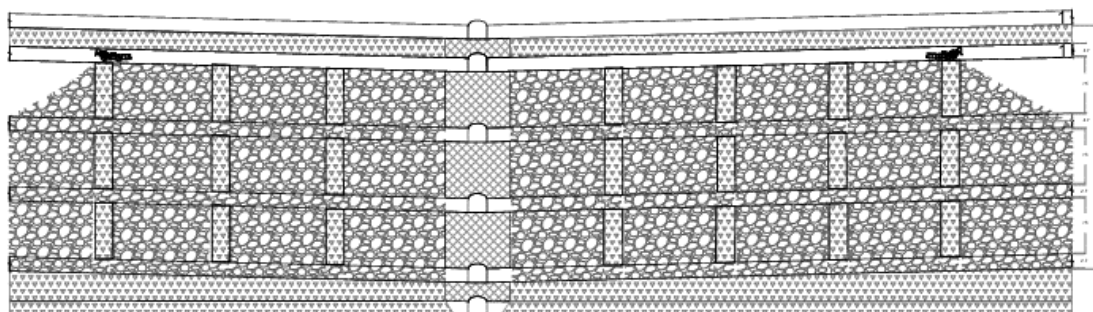


Fig. 6. Waste-rock backfilling of the mined-out space in the upper sublevel.

Stability calculations performed by the Geomechanical Service for the currently applied mining system were based on a sublevel height of 15.2 m and a mining level height of 47 m.

The analysis showed that the number of joint sets increases with depth, thereby increasing the risk of wall-rock instability and collapse and the need for cable-bolt support. According to the geomechanical recommendations, a section of up to 10 m can be mined without cable-bolt support. Beyond this length, cable-bolt support is required. However, even with cable-bolt support, once the mined section reaches a length of 30 m, an inter-stope pillar must be left in place to maintain stability before mining can continue.

The ore remaining in these inter-stope pillars constitutes an additional source of ore losses.

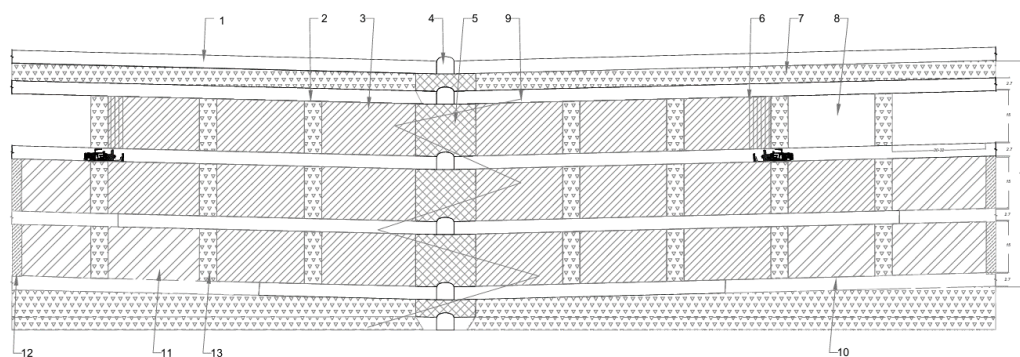


Fig. 7. Mining system with ore breaking from sublevel drifts in a downward sequence and waste-rock backfilling of the mined-out space: 1 – sublevel drift; 2 – inter-stope pillar, irrecoverable ore loss; 3 – stopes; 4 – crosscuts; 5 – protective pillar; 6 – longhole drilling; 7 – interlevel pillar; 8 – actual mined-out opening; 9 – decline; 10 – planned vein drift; 11 – planned stopes; 12 – planned upward slot raise; 13 – planned inter-stope pillar.

Table 1 presents the calculated commercial ore and metal content for one mining level using the currently applied downward-sequence mining system.

Table 1. Commercial ore and metal content calculated for one mining level using the currently applied downward-sequence mining system

	Commercial ore and grade						Metal				
	T	Au, g/t	Ag, g/t	Cu, %	Zn, %	Au _{eq} , g/t	Au, kg	Ag, kg	Cu, t	Zn, t	Au _{eq} , kg
Grand Total	49294	2.45	115	0.65	1.96	4.77	120.7	5668.8	320	966	235.2

The production data for the currently applied mining system with a downward stoping sequence show that secondary ore dilution in the middle and lower sublevels reaches 20–30%. This is mainly associated with the progressive increase in the exposed surface area of the hanging wall and footwall as mining proceeds downward, which increases the risk of wall-rock collapse. The collapsed wall rock mixes with the broken ore, resulting in increased secondary ore dilution. According to the calculated production data, the amount of commercial ore obtained from one mining level is 49,294 t, with an equivalent gold grade (Au_{eq}) of 4.77 g/t. The proper selection of the mining sequence can be considered as a means of reducing dilution in narrow-vein deposits, since extraction sequencing and filling are among the strategies used for dilution minimisation [13]. In the proposed upward-sequence mining system, natural inter-stope pillars are replaced by artificial inter-stope pillars formed with cement–sand backfill. Similarly, the natural interlevel pillar is replaced by an artificial interlevel pillar formed with the same cement–sand backfill.

This makes it possible to extract ore that would otherwise remain in the natural pillars, thereby reducing ore losses.

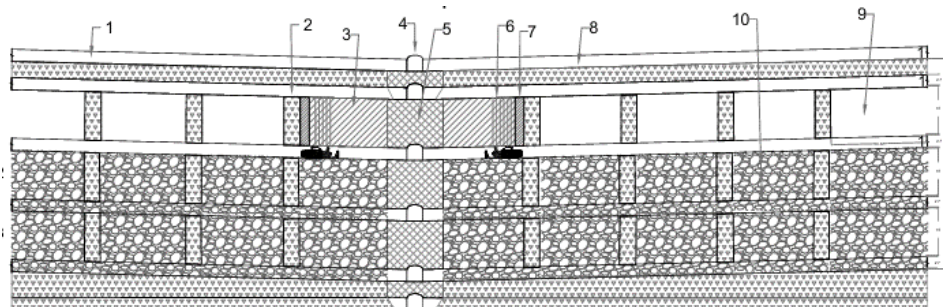


Fig. 8. Mining system with ore breaking from sublevel drifts in an upward sequence and subsequent waste-rock backfilling: 1 – sublevel drift; 2 – artificial inter-stope pillar formed with cement–sand backfill; 3 – stopes; 4 – crosscuts; 5 – protective artificial pillar; 6 – longhole drilling; 7 – slot raises; 8 – artificial interlevel pillar formed with cement–sand backfill; 9 – actual mined-out opening; 10 – mined-out space backfilled with waste rock.

Table 2. Commercial ore and metal content calculated for one mining level using the proposed upward-sequence mining system

Commercial ore and grade						Metal					
	T	Au, g/t	Ag, g/t	Cu, %	Zn, %	Au _{eq} , g/t	Au, kg	Ag, kg	Cu, t	Zn, t	Au _{eq} , kg
Grand Total	61717	3.15	129	0.77	2.25	5.8	194.4	7961	475	1388	358.2

The production indicators calculated for the proposed mining system with an upward stoping sequence show that the amount of commercial ore increases to 61,717 t, while the equivalent gold grade (Au_{eq}) increases to 5.8 g/t. At the same time, secondary ore dilution is reduced to approximately 10%.

In the proposed upward mining sequence, there is no previously mined-out open sublevel above the active mining area from which wall-rock collapse could occur. The mined-out space below the active sublevel is successively backfilled with waste rock. Consequently, the risk of collapsed wall rock mixing with the broken ore is reduced, resulting in a decrease in secondary ore dilution to approximately 10%.

The reduction in secondary dilution increases the equivalent gold grade (Au_{eq}), while replacement of natural ore pillars with artificial pillars reduces ore losses and contributes to the increase in the amount of commercial ore.

The main advantages of the proposed mining system are as follows:

- the upward stoping sequence, combined with successive waste-rock backfilling, reduces the extent of exposed wall-rock surfaces and eliminates the presence of a previously mined-out open sublevel above the active mining area;
- the risk of wall-rock collapse and mixing of collapsed wall rock with the broken ore is reduced, resulting in lower secondary ore dilution and a higher equivalent gold grade (Au_{eq});
- replacing natural inter-stope and interlevel pillars with artificial pillars formed with cement–sand backfill makes it possible to extract ore that would otherwise remain in the natural pillars, thereby reducing ore losses;
- successive waste-rock backfilling contributes to improved wall-rock stability conditions;
- the extent of cable-bolt support required is reduced, thereby reducing cable-bolting costs.

The main disadvantage of the proposed system is that preparatory development must be completed throughout the entire mining level before stoping operations begin, whereas in the currently applied downward sequence, development and stoping can be carried out successively by individual sublevels.

CONCLUSION

The proposed improvement of the mining system, based on changing the stoping sequence from downward to upward and successive backfilling of the mined-out space with waste rock, reduces secondary ore dilution and ore losses. In the upward mining sequence, there is no previously mined-out open sublevel above the active mining area from which wall-rock collapse could occur. At the same time, the mined-out space below the active sublevel is successively backfilled with waste rock. This reduces the risk of collapsed wall rock mixing with the broken ore and decreases secondary ore dilution from 20–30% to approximately 10%.

As a result of reduced dilution, the equivalent gold grade (Au_{eq}) of the commercial ore increases from 4.77 to 5.8 g/t. Replacing natural inter-stope and interlevel pillars with artificial pillars formed with cement–sand backfill makes it possible to extract ore that would otherwise remain in the natural pillars, thereby reducing ore losses. Successive waste-rock backfilling also contributes to improved wall-rock stability conditions and reduces the extent of cable-bolt support required, thereby reducing cable-bolting costs. The use of waste rock as backfill additionally reduces the amount of waste rock that must be transported and stored on the surface.

Thus, the proposed mining system reduces ore dilution and losses, increases the quality and quantity of commercial ore, and provides technical and economic advantages compared with the currently applied downward mining sequence.

REFERENCES

1. Armaghanyan H.A. Improvement of the Development System with Underground Drifts Used at the Kapan Mine // Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Metallurgy, Material Science, Mining Engineering. – 2024. – DOI: 10.53297/18293395-2024.1-54.
2. Agabalyan Yu.A., Oganessian A.G., Alaverdyan A.A., Agabalyan Yu.A. Criteria for Selecting an Underground Mining System for a Gold-Polymetallic Deposit // Mining Journal. – Moscow, 2013. – No. 2. – P. 105–108.
3. Aghabalyan Yu.A., Hovhannisyan A.H., Muradyan H.Kh. Main Ways to Increase the Efficiency of Developing Vein Deposits // Economics. – Yerevan, 1996. – No. 10–12. – P. 25–29. [in Armenian]
4. Agabalyan Yu.A., Oganessian A.G. Mining System with Downward Layered Ore Extraction Using a Reinforced-Concrete Protective Interlayer // Mining Journal. – Moscow, 1997. – No. 10. – P. 48–50. [in Russian]
5. Agabalyan Yu.A., Oganessian A.G., Nadjaryan A.M. Selection of an Optimal Mining System for Low-Power Ore Bodies under the Conditions of the Meghradzor Gold Deposit // Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia. Earth Sciences. – Yerevan, 2001. – Vol. LIV, No. 1–2. – P. 50–53. [in Russian]
6. Agoshkov M.I., Mukhin M.E., Nazarchik A.F. et al. Mining Systems for Vein Deposits. – Moscow: Gosgortekhzdat, 1960. – 376 p. [in Russian]
7. Agabalyan Yu.A., Oganessian A.G., Sargsyan A.G. Optimization of the Mining of Very Thin Ore Bodies // Mining Journal. – Moscow, 2005. – No. 1. – P. 13–16. [in Russian]
8. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V. Technology of Upward Mining of a Gold Ore Deposit Using Dry Backfill // Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – Moscow, 2015. – No. 9. – P. 14–19. [in Russian]
9. Pavlov A.M., Vasilyev D.S. Increasing the Efficiency of Underground Mining of Thin Steeply Dipping Veins // Mining Industry. – Moscow, 2017. – No. 1 (131). – P. 86–87. [in Russian]
10. Hovhannisyan A.H., Baghdasaryan A.T., Sahakyan N.H., Barseghyan A.G. Selecting an Optimal Development System of Low-Capacity Ore Bodies // Proceedings of the NAS RA and SEUA: Technical Sciences. – Yerevan, 2022. – Vol. LXXV, No. 4. – P. 490–497. [in Armenian]
11. Oganessian A.G., Malyan L.S., Sahakyan N.G. Substantiation of the Fields of Application of Rational Underground Mining Systems for Low-Power Steeply Dipping Ore Bodies in Metal Deposits of Armenia // Bulletin of National Polytechnic University of Armenia. – Yerevan, 2003. – No. 2. – P. 61–67. [in Russian]
12. Agabalyan Yu.A., Nadjaryan A.M., Oganessian A.G. Increasing the Efficiency of Mining Steeply Dipping Ore Deposits // Industry, Construction and Architecture of Armenia. – 1988. – No. 9. – P. 21–23. [in Russian]
13. Stewart P.C., Trueman R. Strategies for Minimising and Predicting Dilution in Narrow Vein Mines – The Narrow Vein Dilution Method // Proceedings of the Narrow Vein Mining Conference 2008. – Ballarat, Victoria, Australia, 14–15 October 2008. – Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2008. – P. 153–164.

АСПЕКТИ НА РАЗВИТИЕ И ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА ПРИ СТРОИТЕЛСТВОТО НА МЕТРОТО В СОФИЯ

проф. д-р инж. Стоян Братоев

РЕЗЮМЕ

Хронологично е разгледана схемата на линиите на метрото в София от първоначалната идея и последващите актуализации до одобрената с Общия Устройствен План на града перспективна схема на развитие на линиите.

Поотделно за трите метродиаметъра са посочени параметрите на етапите на извършеното строителство, изпълняваното и предстоящото разширение, проектирането и проучванията за перспективните разширения на линиите на метрото.

Строителството на метрото в слаби водонаситени почви, каквито са преобладаващо почвите в София, е сложно предизвикателство. При него, много често, след започването на строителните работи, се появяват непредвидени обстоятелства изискващи прилагането на сложни индивидуални технически решения, някои от които имат уникален характер. Представени са някои подобни предизвикателства и решения при строителство на тунели и метростанции по открит способ, Нов австрийски тунелен метод и щитов метод с тунелопробивни машини/ТБМ/.

ASPECTS OF DEVELOPMENT AND CHALLENGES IN THE CONSTRUCTION OF THE METRO IN SOFIA

Prof. Ph.D. Eng. Stoyan Bratoev

ABSTRACT

The layout of the Sofia metro lines is reviewed chronologically, from the initial idea and subsequent updates to the prospective network development plan approved by the city's General Master Plan.

The parameters of the completed construction stages, ongoing and upcoming extensions, as well as the design and studies for prospective metro line extensions, are outlined individually for all three metro diameters.

Metro construction in weak, water-saturated soils—which are predominant in Sofia—presents a complex challenge. Very often, after construction work begins, unforeseen circumstances arise that require the implementation of complex, tailored technical solutions, some of which are unique in nature. This presentation outlines several such challenges and solutions encountered during the construction of tunnels and metro stations using the Cut-and-Cover Method, the New Austrian Tunnelling Method (NATM), and the Shield Method using tunnel boring machines (TBM).

1. Схема на линиите на метрото в София.

За решаване на транспортните и екологични проблеми на **града** и поради необходимостта от ефективен обществен транспорт по направление на най-големите пътнически потоци в София, **през 1968г е започнато проучване за строителство на т.н. „подпаважен трамвай“**. Тогава населението на града е било около 650 хил.души. През 1970 г. населението на града се доближава до 750 хил. души, с тенденция през 1980 г. да надхвърли 1 млн. жители, което впоследствие е потвърдено. **Това е наложило през 1972 г. това проучване да продължи като проучване за изграждането на метро в София**. Освен градоустройствените перспективи за развитие на града, при това проучване са взети предвид и скоростите на придвижване, респективно времепътуванията с различните видове транспорт при нарастването на града и на разстоянията между отделните му части /Табл.1/.

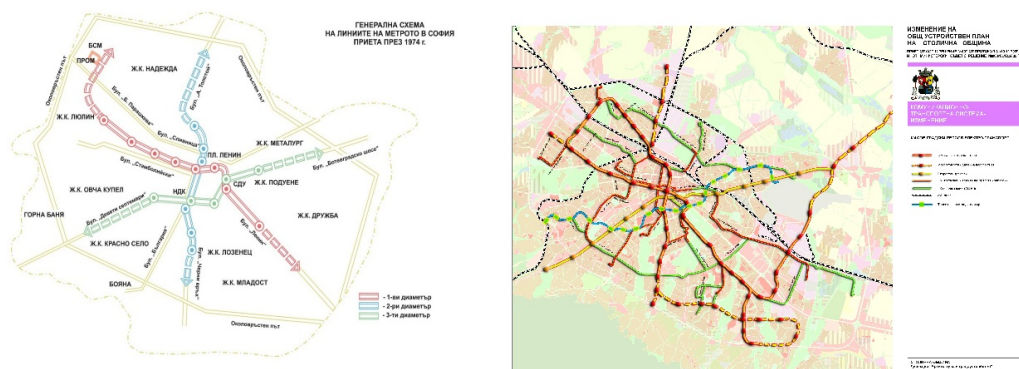
Табл.1.Превозна способност и скорости на пътуване по линиите на различните видове транспорт

Видове транспорт	Превозна способност	Средна скорост на пътуване
Автобусен и тролейбусен транспорт	4-5 хил.пътн./час	16-18 км/ч
Трамваен транспорт)	6-10 хил.пътн./час	12-16 км/час
Скоростен трамвай на обособено платно	10-18 хил.п.в. час	20-25км/ч
Метро	над 50-80 хил.пътн.час	34-41км/ч
(в зависимост от дължината на пероните и броя на вагоните / 5-8 ваг/.		при максим. скорост 80км/ч

Направен е подробен технико-икономически анализ, на чиято база е взето решение за изграждането на метро по най-натоварените направления в столицата на Р България. За целта със специално Решение на Министерския съвет на Р България от 1974 г., е одобрен Технико-икономически доклад (ТИД) за строителството на метро в София. С този доклад е приета и принципна схема за развитие на линиите на метрото. /Фиг.1/

Основните параметри на метрото за града с прогнозно население тогава от 1 млн. жители, съгласно приетия ТИД са: брой линии – 3 диаметрално пресичащи се в триъгълник в ЦГЧ, средно разстояние между метростанциите – 1100 м; минимален интервал на движение на влаковете – 90 сек.; максимална скорост на движение с пътници – 80км/ч; захранване на контактна релса – 825 в. прав ток. През 1979 г. с ПМС № 119 е одобрен Техническият проект за първия метрорадиус –ж.к.Люлин - ЦТЧ.

Впоследствие, във връзка с разрастването на града, с население през последните десетилетия, заедно с временно пребиваващите над 1,6 млн. жители, и на основание редица решения на МС, СОС, СО и общински Експертни съвети за развитие на територията на града като част от Общия устройствен план (ОУП) на града, е приета перспективна схема за развитие на линиите на метрото. Тази схема е допълвана с процедирани изменения за по-нататъшно развитие на линиите с оглед обхващане на по-големите новоизградени жилищни комплекси на града. В резултат е формирана актуалната схема за изграждане линиите на метрото в София. Съгласно нея, от първоначалните три метродиаметра в далечна перспектива могат да се формират 6 линии – по две на метродиаметър. В централната част на града тези линии могат да имат споделени трасета, а в периферните части – разклонения към отделни райони извън центъра на града.



Фиг.1. Принципна схема на развитие на линиите на метрото от ТИД от 1974г. и схема съгласно ОУП от 2009г.

В източната част на първия метродиаметър това е реализирано чрез разклоненията от ж.к. Младост 1 към Бизнес парка в ж.к. Младост 4, от една страна и от друга – към ж.к. Дружба и летището. В западната част на диаметъра е съществуващото трасе към ж.к. Обеля и продължението от МС Люлин по бул. Ц. Йоанна до Околовръстното шосе. По същия начин, на втория метродиаметър в ОУП

е предвидено продължение в северна посока от надлез Надежда към кв. Илиенци, а в южна посока – към Студентски град и Околовръстното шосе. На третия метродиаметър са предвидени изпълняваните разклонения в източна посока към ж.к.Левски и към кв.Слатина – бул. Цариградско шосе. В западната част на диаметъра е предвидено възможно бъдещо отклонение след метростанция „Цар Борис III“, в югозападна посока /фиг.2/.

2.Развитие на линиите на метрото в София.

2.1.Развитие на първия метродиаметър

Първият метродиаметър включва два маршрута /Линии - М1 и М4/, обслужващи съответно направленията: М1: МС Сливница – МС Сердика – МС Младост 1 – Бизнес парк, с дължина 19 км и 16 метростанции; М4: МС Обеля – МС Сердика – МС Младост 1 – МС Дружба – МС Летище, с дължина 25 км и 20 метростанции /Фиг.2./. Общата дължина на двата маршрута възлиза на 44 км. Двата маршрута в централната градска част от МС Сливница до МС Младост 1 имат 16 км споделено трасе, а извън тази част влаковете се движат през един, съответно по Линия 1 от МС Младост 1 до МС Бизнеспарк и по Линия 4 – от МС Младост 1 до МС Летище в източна посока и МС Сливница-МС Обеля за Линия 4, и бъдещо продължение под бул. Ц. Йоанна до Околовръстното шосе – Линия 1. в западната част на диаметъра.

Прогнозно далекоперспективно натоварване след реализацията на двете линии от метродиаметъра – над 380 х.п. Реализацията на диаметъра е извършена на етапи, както следва:

Табл. 2. Обобщени етапи на строителство на първия метродиаметър /Линии М1 и М4/ на метрото в София

Етапи	-Участък	Дължина и брой станции	Период на строителство
Етап 1	МС „Сливница-МС „К.Величков“	6,4 км и 5 ст.	1979-1998г
Етап2	МС „К.Величков“- МС „Опълченска“	0,8 км и 1 ст.	1986-1999г
Етап 3	МС „Опълченска“ - МС „Сердика“	0,8 км и 1 ст.	1987-2000г
Етап 4	МС „Сливница“ - МС „Обеля“	2,0 км и 1 ст.	2001-2003г
Етап 5	МС „Стадион В.Левски-МС „Младост I“	5,6 км с 4 ст.	2004-2009г
Етап 6	МС „Сердика“ – МС „Стадион В.Левски“	2,4 км с 1 ст.	2004-2009г
Етап 7	МС „Младост I“ - МС „Цариградско шосе“	2,2 км с 2 ст.	2009-2012г
Етап 8	МС „Цариградско шосе- МС „Летище“	5 км с 4 ст.	2012-2015г
Етап 9	МС „Младост I“ -МС „Бизнес Парк ”	3 км с 3 ст.	2012-2015г
<i>Предстоящо бъдещо разширение МС „Люлин“ Околовръстен път /под бул. Ц. Йоанна“/</i>		<i>2 км с 2 ст.</i>	<i>2026-2029г</i>



Фиг.2. Развитие на линиите на метрото в София в т.ч. извършвани разширения /дебел пунктир/, проучвания за средносрочни и възможни бъдещи разширения съгласно ОУП – с тънък пунктир.

2.2. Развитие на втория метродиаметър

Втората линия на метрото в София свързва жилищните комплекси „Обеля“ и „Надежда“ в северозападната част на столицата с Централната ж. п. гара, Централната градска част и южните квартали на града „Лозенец“ и „Хладилника“. В местата на пресичане с първия- до МС Сердика и третия метродиаметър-до МС „НДК 2“ линията прави връзка с другите линии на Софийското метро. Общата дължина на построената част от линията е 12км с 12 метростанции.

В перспектива, с възможните по-нататъшни разширения съгласно ОУП, в северна посока с отклонение от надлез Надежда по направление на бул. Рожен с дължина 5 кмч и 5 станции и в южна посока по бул. Черни връх до Студентски град и нов Интермодален хъб с лифт на Околовръстното шосе, съответно с 8км и 8 станции, за които са започнати съответни проектни проучвания, общата дължина на линията може да достигне 25 км с 25 метростанции. Прогнозно далекоперспективно натоварване след реализацията на цялата линия – 260 х.п. ден.

Табл.3. Обобщени етапи на строителство на Втория метродиаметър /Линии 2/ на метрото в София

Етапи на строителство	Участък	Дължина и брой станции	Период на строителство
Етап 10	МС „ж.к.Обеля- МС „Хан Кубрат“	4 км с 4 ст.	2010-2012г.
Етап 11	МС „Хан Кубрат- МС „Дж.Баучер“	7 км с 7 ст.	2009-2012г
Етап 12	МС „ДжеймсБаучер“-МС „Витоша“	1,3 км с 1 ст.	2014-2026г
Бъдещо разширение:	- Бул.Черни връх-Студентски град	5 км с 5 ст.	Проектира се
	- Бул.Симеоновско шосе-Транспортен хъб с лифт на Околовръстно шосе	3 км с 3 ст.	Предпроектни проучвания
	Надлез Надежда-к.Илиенци – възможно бъдещо разширение по ОУП		

2.3. Развитие на третия метродиаметър

Третият метродиаметър /Линия 3/ на метрото в София е разположен в направление югозапад-североизток: бул. Ботевградско шосе- ж.к.Левски - ЦГЧ – кв.Красно село – ж.к.Овча Купел с отклонение на ул. Шипка в направление кв. Гео Милев - ж.к.Слатина - Зала Арена Армеец - бул.Цариградско шосе. В зоната на обслужване на линията попадат източните квартали ж.к. Левски, кв. Герена, ж.к. Хаджи Димитър и Слатина, Централната градска част. В западната част кварталите – кв. Хиподрума, кв. Бели Брези, кв. Красно село и ж.к. Овча Купел и долната част на квартал Горна Баня до Околовръстното шосе със съвместна ж.п. спирка на последната метростанция с ж.п. линията София-Перник. След завършване на тези разширения, общата дължина на линията ще е 21 км с 21

метростанции. Прогнозното далекоперспективно натоварване след реализацията отделните етапи, на които е разделено строителството на цялата линия, е 220 хил.пътника дневно. Общо за цялото метро, след реализацията на трите митродиаметъра в пълен обем, прогнозната дължина на линиите може да достигне 81 км с 73 станции с прогнозно натоварване с пътници около 840 хил. пътн. дневно или почти 60% от пътниците на МГТ.

Табл.4. Етапи на строителство на третия митродиаметър на метрото в София

Етапи на строителство	Участък	Дължина и брой станции	Период на строителство
Етап 13 фиг.5.1/	МС „Хаджи Димитър-МС.”Красно село”	8 км с 8 ст.	2016-2020г.
Етап 14 /фиг. 5.1./	МС „Красно село –МС Горна Баня“	4 км с 4 ст.	2017-2021
Извършвани разширения: ж.к.Хаджи Димитър-ж.к.Левски		3 км с 3 ст.	2022-2026г
	-ул.Шипка-кв.Слатина - Цар. шосе	6 км 6 ст.	2023-2027г
Извършвано проектиране: МС“Витоша”-Студентски град		5 км с 5 ст.	2027г-готов проект

3. Някой предизвикателства при строителството на метрото в София

При строителството на горните участъци от метрото в София се наложи да се преодоляват редица предизвикателства свързани с разнообразието на почвените условия- от почви със средна плътност до слаби и меки, обилни подземни води и при висок процент на филтрации на почвите, преминаване в близост и непосредствено под сгради, реки, големи канализационни колектори и инженерни мрежи, строителство на подземни метростанции с големи напречни сечения и др.

3.1.Проблеми, свързани с устойчивостта на укрепванията на изкопите

- При строителство по открит способ или при строителство по т.н.“Топ даун“ метод, вследствие промяна на хидрогеоложките условия покрай изкопите, по време на строителството има случай на компроментиране на част от укрепвията, което е наложило тяхното преукрепване или усиляване. В частност поради пруювлажняване на почвите покрай изкоп с откоси между МС „Люлин“ и МС „Западен парк“, вследствие повреден канал на 8-9м от него, са променени характеристиките на почвите, формирана е нова много по-полегата хлъзгателна повърхнина и в резултат се е получило свличане на иначе правилно проектирания откос. След ремонта на градската канализация се е наложило да се изгребе свлечената земна маса и да се изпълни оформяне на новия откос.

-При строителство на МС“Балан“ в ж.к.Младост отново вследствие компроментиран магистрален канал и промяна на характеристиките на преувлажнените почви натискът върху укрепването тип „Берлинска стена“ е нараснал над проектния и укрепването е поддало към изкопа. В този участък за удилване на укрепването се е наложило изграждане на дълги анкери закотвени зад компроментираната част от почвите.

- При строителство в укрепен изкоп с шлицова стена по Бул.Ломско шосе отново вследствие повреден канал при строителство сгради в района са променени характеристиките на почвите и натоварването, вследствие на което е претоварена подпорната шлицова стена на укрепването. Прието е решение за монтиране на временни разпънки от стоманени тръби ф600 над габарита на бъдещия тунел. След изграждането на конструкцията му и изпълнението на обратните засипки те са премахнати и е продължено изграждането на тунела и засипването над него до нивото на пътната основа на бул. Ломско шосе над трасето на метрото.

3.2.Строителство по „Топ даун“ метод и открит способ в почви с обилни подземни води

Поради редица предимства при изграждане на конструкции на тунелите, „Топ даун“ методът на строителство на плитко заложени тунели и метростанции, се е наложил като предпочитан метод за много от участъците на трите линии на метрото в София. При лоши геоложки условия, предимно вследствие обилни подземни води, този метод е изисквал специални технически решения, за

осигуряване или възстановяване на целостта на шлицовите стени. Част от тях са: изграждане на отделните шлицови стени с фугови тръби; ремонти на участъците с пробиви чрез заздравяване на повредените участъци от почвите и стените. Има няколко примера за преодоляване на подобни участъци:

- При строителството на МС“България“ на едноименния булевард откъм корекцията на перловската река, независимо от това, че реката е на около 20м от станцията в един сравнително малък изтеглен към станцията участък от старото русло има силно оводнени почви. След изграждане на шлицовите стени и изкопаване на почвите под покривната плоча се получава воден пробив в стената. Наложил се зад нея да се изградят неармирани пилоти, с което достъпът на слъбни почви и частично на вода се е ограничил значително. Зад стената през сондажи образуваното пространство е запълнено с бетон и едва тогава през този участък е преминала тунелопробивната машина, с която е построен двупътния тунел в участъка.

- Подобен пробив на вода през изградените шлицови стени имаше и на бул. Вл.Вазов на едноименната метростанция. Причината - обилни подземни води на места с воден поток и прослойки от слаби силно наводнени пясъци, които са спомогнали за разпространение на бетона встрани от шлицовите стени и поради това образуване на участъци от тях с недостатъчно бетон. В тези места при разработване на почвите под „Миланска плоча“, при достигане в близост до дъното на изкопа, вследствие големия воден напор, са получени пробиви през шлицовите стени през които в изкопа започват да постъпват обилни количества вода премесена с пясък. На места извлечения пясък с тези води достига над 10м³. Прието е решение да се направи надлъжен дренаж към временна шахта за временна помпена станция през която са изпомпвани постъпващите води. След почистване на почвите в зоната армировката и изпълнение на временен кофраж върху образувания отвор по стената е нагнетен на бетон зад кофража с които е запълвана както образуваната хралупа в почвата зад стената така и зоната от стената с оголена армировка. Тези шлицови стени имат временен укрепващ характер до изграждане на основните стени на вътрешната конструкция на станцията и тунелите. Предвид единичния характер на повредите, заложените коефициенти на сигурност и съдействието на съседните на повредените участъци не е нарушена носещата способност на стените.

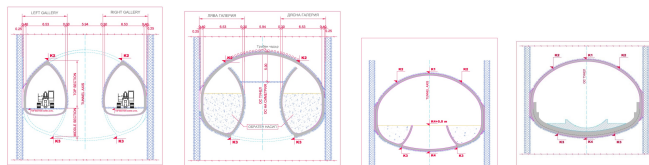
3.3. Строителство на тунели по Нов австрийски тунелен метод/НАТМ/ в слаби почви с обилни подземни води.

В участъка между МС“Х.Димитър“ и МС“Вл.Вазов“ тунелите между МС“Х.Димитър“ и МС“Бесарабия“ се построиха по Нов австрийски тунелен метод в изключително сложни инженерно-геоложки и хидрогеоложки условия-слаби пясъкливи почви с прослойки от меки глини и обилни количества вода. За целта първоначално се наложи изпреварващо водопонижаване с водопонизителни колонки през 50м от двете страни на бъдещия тунел. Това донякъде позволи да се работи с по-малък приток на води в забоя на тунела, но въпреки това поради слоестата структура на почвите по време на строителството между отделните пластове имаше непрекъснат приток на значителни подземни води.

За да могат да се извършват строителните работи се наложи прилагането на няколко специални метода на строителство, както следва: изпълнение на непрекъснато с изпреварващо укрепване на забоя с дълги 6-8м анкери; изпълнение защитен чадър от 4 м пики по контура на забоя; изпреварващи инжекции на няколко метра пред забоя и около него. Вследствие неустойчивия забой и протичане на почвите в него, напредъкът се извършваше с отваряне на малки участъци от запечатвания на всеки етап забой с армиран торкрет. Армировъчната мрежа се закрепваше към изпреварващите анкери, забити в масива пред тунела. Всичко това повлия на темповете на напредък на тунелите, но гарантира в значителна част безопасност на работите. Най-бавният елемент от тези специални работи се яви инжектирането на десетки тонове циментен разтвор пред и около забоя и разчленяването му на малки участъци за напредък на изкопните работи.

Въпреки горното при преминаване под канализационни колектори на две места, поради лошото състояние на същите, се образуваха комини и се наложи разкриване на колекторите и изграждането наново на повредените им участъци.

При строителството на две от станциите МС“Сердика 2“ и ВС“Орлов мост“ съответно от Линия 2 и от Линия 3 с отвори 19-21в и височина на свода 15-16м.се наложи разработването на проект и изпълнението на Модифициран НАТМ чрез поетапно разработване на сечението на части- първоначално по две опорни пиедритни галерии, след това сводовата част между тях, опорната част и последно обратния свод до затвяране на прървичната облицовка от послойно нанасяне на армиран торкрет с дебелина още 60см. Вътрешната облицовка с дебелина също 60 см се изпълни, след полагане на двойна хидроизолация от усилено ПВЦ, на първата станция с преместваем сводов кофраж, а на втората с армиран торкрет нанасян на пластове.



Фиг.3. Етапи на изграждане на сводовата конструкция на МС“Сердика 2“.

3.4. Строителство на тунели в слаби почви с тунелопробивни машини с противоналягане в забоя /ТПМ/ с диаметър 5,8 м /еднопътни тунели/ и 93 м /двупътни тунели/.

Поради високата стойност на ТПМ и потребността от значителна логистика за производството и транспорта на сегментите на тунелната конструкция и територия за на базата около стартовата шахта за транспортиране на сегментите по готовия тунел и временна шахта за отцеждане преди извозване на разработената почви този метод е приложим при по-големи дължина на тунелите- обикновено над 4-5км. Той е използван на няколко места на Линия 1, 2 и 3 на метрото в София.

3.4.1. Строителство на еднопътни тунели с ТПМ в участъка МС„Сердика“ и МС„Стадион В.Левски“

За първи път подобна машина се използва за строителство на двата еднопътни тунела между МС „Сердика“ и МС „Стадион В.Левски“ от Линия 1 с обща дължина 4,6 м. Последователно се изградиха двата тунела в участъка, като на пл.Независимост се изгради ротационна шахта, където след построяване на първия тунел машината се завъртя върху специална платформа и започна изграждането на втория тунел. Поради работа на значителна дълбочина и поддържане на подходящо налягане в забоя по-високо от почвеното налягане и налягането на подземните води строителството се извърши без особени проблеми. На едно място, поради наличие на голям гранитен блок пред машината при строителството на първия тунел, се наложи спиране на машината. Тъй като гранитния блок беше с голяма якост съществуваше опасност от счупване на резците на работния орган който срязва почвите. Наложено се изпомпване на суспензията от забойната камера, отварянето на същата и при постоянно водочерпене от камерата ръчно разбиване на гранитния блок, като машината постепенно се пробутваше през него докато се премине изцяло през тази част от трасето.

Препятствие имаше и при преминаване под подлеза пред СУ Кл.Охридски, където се наложи преминаване през две съществуващи колони от пилоти с диаметър 1,00 м, носещи покривната конструкция на подлеза пред СУ Кл.Охридски. Наложено се разработване и изпълнение на следното техническо решение за всяка от колоните: предварително, от двете страни на всяка колона, се наложи изграждане на две пилотни полета от ибo анкери поради обилни напорни подземни води на дълбочина 10-12 м.; изпълнение на мощни обединяващи стоманобетонни греди върху тях, с разкриване на армировката на колоните и свързването им с армировката на обединяващите греди; след набиране на якост на бетона на гредите, се прехвърли натоварването от колоните върху гредите и пилотите. След това се премахнаха частите от всяка от колоните под гредите и ТПМ премина през участъка под подлеза без проблеми.

3.4.2. Строителство на двупътни тунели в централните участъци от Линии 2 и 3 с ТПМ.

Поради обилните подземни води на централния участък на Линия 2 от надлез Надежда до бул. П. Евтимий с дължина 4 км и 4 метростанции, на централния участък на Линия 3 .от МС „Театрална“ до

МС „Цар Борис III“ в кв. Красно село, с дължина 8 км и 7 метростанции, и на участъка от ул. Шипка през кв. Слатина до бул. Цариградско шосе, с дължина 6 км и 6 станции, строителството е извършено с ТПМ, с херметична забойна камера с противоналягане в забоя. Станциите се изграждат с основна носеща конструкция преди влизането на ТПМ в тях, а през тях машината се пробутва чрез запъване на наредени дъгообразни сегменти в долната част на дъното.

Вследствие обилните подземни води, на няколко места, за херметизиране на машината при излизане от станциите, се наложи да се изпълни стоманобетонов кожух около машината с дължина от 12 м. Подобни кожуси са правени при излизането от МС „Лъвов мост“ и МС „Сердика“ на Линия 2, МС „Бул. България“ и МС „НДК 2“ на Линия 3, както и на три станции от участъка от изпълняваното разширение на Линия 3 през кв. Слатина. На повечето места, където условията позволяват, херметизацията е извършвана като предварително е извършвано заздравяване с инжектиране на циментови разтвори в масива на 12 м пред съответната станция, а на единични места – и със бетонови пилоти. Армирането на напречните шлицови стени на станциите се извърши с фибро съглена армировка с голяма носеща способност на опън и лесно се срязва от резците на работния орган на машината при срязване на бетона на напречните стени.

Налягането в забойната камера се поддържа с компютъра за управление на машината да бъде не по-малко от налягането на почвите и на подземните води пред машината. Поради това при строителството на тунелите и преминаването под сгради и съоръжения не са допускани слягания на масива от почви около и над тунела без каквито и да е последици за разположените сгради и съоръжения над тунелите. Поради това, където на единични места имаше участъци на 4-5 м под основи на сгради, няма никакви деформации и последици за сградите при преминаване машината под тях. Прилагането на виброизолиран релсов път на метрото в София не позволява да има последици за подобни сгради и съоръжения и при експлоатацията на тунелите.

При преминаване под двата тунела на действащата първа линия източно, в близост до МС „СУ Кл.Охридски“, чрез контрол на оптимално налягане в забойната камера, двупътният тунел на Линия 3 се изгради с ТПМ на разстояние 1,43 м под тези тунели. Преминаването под тунелите, разположени на разстояние 12 м осово, се извърши при правилно управление на ТПМ, което показва, че този метод е безопасен дори при преминаването на много малка дълбочина под такива отговорни съоръжения, каквито са действащите тунели на метрото.

На единични места при строителство на тунели с ТПМ се случи излизане на сиспунзия от забойната камера през почвите до терена. Например, при строителството на тунела между МС „Орлов мост“ и МС „Театрална“, при преминаването под източното пътно платно на бул. Евл.Георгиев, обаче, през оставен незапълнен проучвателен геоложки сондаж, когато е правен този булевард суспенцията излезе по него на пътното платно на булеварда. Наложил се запълване на сондажа с бетон, едва след което работата на машината продължи.

Проблеми възникнаха и при преминаване под повредени канализационни колектори в южното локално платно на бул. Цариградско шосе. Повредените колектори предизвикаха пропадане на почвите над тях. След преминаване на машината се разкриха колекторите и се ремонтираха в обхвата на повредения участък.



Фиг.4.Общ изглед от ТПМ

Литература: Ст.Братоев Метрото в София-Аспекти на развитие. 432стр.. Изд.Тем Дизайн. 2026 г.

ИЗПОЛЗВАНЕ НА ИЗКОПАНИТЕ МАСИ ОТ ТУНЕЛНО-ПРОБИВНИ МАШИНИ В КОНТЕКСТА НА УТВЪРДЕНИТЕ ПРАКТИКИ НА СОФИЙСКОТО МЕТРО

Борислав Борисов, Веселин Балев, Павел Павлов
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ

Тунелнопробивните машини с баланс на земното налягане генерират значителни обеми кондициониран изкопен материал, чието управление, депониране и възможна повторна употреба са съществени за устойчивостта на градското метростроителство. В настоящата публикация се разглежда актуалната българска практика при управлението на изкопаните маси от ТПМ на Линии 2 и 3 на Софийското метро и се сравнява с утвърдени подходи от Crossrail, Grand Paris Express и Brenner Base Tunnel. Геоложките и хидрогеоложките условия на Софийската котловина обуславят прилагането на ЕРВ-машини. В публично достъпната проектна и административна информация не се установява ясно документирано прилагане на режим на страничен продукт за изкопаните маси от ТПМ на Софийското метро. Съответно по публично достъпната информация материалът се управлява основно в рамките на режима за строителни отпадъци под код 17 05 04. Анализът идентифицира четири основни насоки с потенциал за подобрене: ограничени публични лабораторни данни за кондициониращите агенти, липса на документираните зони за биоразграждане на остатъчни повърхностноактивни вещества, отсъствие на структуриран план за повторна употреба и ограничена прозрачност в мониторинга и отчетността. Предложени са препоръки за бъдещите разширения на Софийското метро с цел по-добра проследимост, по-висока степен на повторна употреба и съответствие с принципите на кръговата икономика.

Ключови думи: ТПМ, кондициониране, ЕРВ, изкопани маси, Софийско метро.

USAGE OF EXCAVATED MATERIAL FROM TUNNEL-BORING MACHINES IN THE CONTEXT OF ESTABLISHED PRACTICES FROM SOFIA METRO

Borislav Borisov, Veselin Balev, Pavel Pavlov
University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia. E-mail: b.borisov@mgu.bg
Corresponding authors: b.borisov@mgu.bg; veselinbalev@mgu.bg; pavel.pavlov@mgu.bg

ABSTRACT

Earth Pressure Balance tunnel boring machines generate large volumes of conditioned excavated material, whose handling, disposal and potential reuse are increasingly important for the sustainability of urban metro construction. This paper examines the current Bulgarian practice in the management of TBM spoil from Sofia Metro Lines 2 and 3 and compares it with established approaches from Crossrail, Grand Paris Express and the Brenner Base Tunnel. The geological and hydrogeological conditions of the Sofia Basin are shown to favour EPB tunnelling. Based on publicly available project and administrative information, the application of by-product and end-of-waste regimes to TBM-excavated material from the Sofia Metro is not clearly documented. The material therefore appears to be managed primarily within the construction-waste framework under EWC code 17 05 04. The analysis identifies four main areas for improvement: limited public laboratory data on conditioning agents, lack of documented temporary storage or controlled biodegradation areas for surfactant residues, absence of a structured reuse plan, and limited transparency in monitoring and reporting. Recommendations are proposed for future Sofia Metro extensions, with the aim of improving regulatory traceability, material reuse and alignment with circular-economy principles.

Key words: TBM, soil conditioning, EPB, spoil management, Sofia Metro.

Въведение

Механизираното строителство с тунелнопробивни машини от типа с баланс на земния натиск (Earth Pressure Balance - ЕРВ) се е утвърдило като стандартна технология за изграждане на плитко заложени тунели в слаби и оводнени почви в плътно застроена градска среда. Наред с безспорните технологични

предимства, този метод генерира значителни обеми кондициониран изкопен материал, чието управление има пряко значение за екологичната, икономическата и регулаторната устойчивост на проекта.

Необходимо е да се систематизира достъпната информация за управлението на изкопаните маси от тунелнопробивната машина (ТПМ) на Софийското метро и да се постави в сравнителен контекст спрямо утвърдени международни практики. Значимостта на изследването произтича от три обстоятелства - предстоящото завършване и развитие на нови участъци на Софийското метро, които ще генерират значителни количества изкопан материал; засилващият се европейски фокус върху повторната употреба, ресурсната ефективност и кръговата икономика, както и липсата на систематизиран преглед на практиката при управление на изкопани маси от ТПМ в България.

Прилага се сравнителен и аналитичен подход, основан на публично достъпни данни на Метрополитен ЕАД, изпълнители и специализирани издания, европейски технически ръководства и стандарти, научни публикации и др.

Материали и методи

Докладът съчетава четири взаимно допълващи се методически подхода. На първо място, нормативно-аналитичен преглед на действащите европейски и национални актове, регламентиращи управлението на изкопаните маси – от Директива 2008/98/ЕО до общинските наредби на Столична община. Второ, преглед на техническата литература и индустриалните стандарти за кондициониране на земните маси при EPB-TBM – основно EFNARC [1], ITA-AITES [2], DAUB [3] и научни публикации в Geomechanics and Tunneling, Tunnels & Tunneling International и Journal of Cleaner Production за периода 2008–2025 г.

Трето, систематизация на оперативните параметри и обемите изкопи от софийските проходки с щитови машини на базата на публични съобщения на Метрополитен ЕАД, протоколи от приемо-предавателни процедури, изявления на изпълнителите и специализирани секторни издания (Railway Gazette, Tunneling Journal, Railway Pro). Поради липсата на пълна публична статистика част от обемите за по-ранните периоди (2005–2009 и 2010–2011) са оценени по формулата $V = L \times \pi \times D^2/4$, докато за Лот 4 „Слатина“ са използвани публично оповестените данни на изпълнителя. Четвърто, извършена е ориентиловъчна оценка на възможни подходи за управление на изкопания материал, използваща принципите на оценката на жизнения цикъл и литературни коефициенти за категорията изменение на климата. Оценката има сравнителен и ориентиловъчен характер и не представлява оценка на жизнения цикъл за конкретния проект по смисъла на ISO 14040/14044.

Кондициониране на изкопания материал при ТПМ тип EPB

Кондиционирането на земната маса представлява целенасочена модификация на физико-механичните и реологичните свойства на изкопания материал чрез инжектиране на технологични добавки в зоната на режещата глава, работната камера и шнековия транспортър на ТПМ. При EPB-режим кондициониращият материал изпълнява функцията на поддържаща среда срещу земния и хидростатичния натиск на забоя, като формира хомогенна пластична маса с контролирано противоналягане в забойната камера [1, 4, 5].

Основните цели на кондиционирането са контрол на налягането на забоя, ограничаване на повърхностните слягания, редукция на водопропускливостта на сместа в работната камера, намаляване на триенето, износването на режещите инструменти, както и предотвратяване на залепване и запушване при преминаване през кохезионни почви. Като ориентиловъчен референтен критерий в литературата често се използва водопропускливост от порядъка под 10^{-5} m/s.

Използваните добавки обикновено включват пенообразуватели на базата на повърхностноактивни вещества, полимери, бентонити и вода. Един от широко използваните компоненти в търговските пенообразуващи агенти е sodium lauryl ether sulfate (SLES). Дозирането се описва чрез параметри като концентрация на разтвора, коефициент на разширение на пяната (FER), коефициент на инжектиране на пяна (FIR) и коефициент на инжектиране на вода (WIR). Подборът на диапазоните следва да се обвърже със зърнометричния състав, водното съдържание, пластичността и абразивността на пресичаните инженерно-геоложки разновидности [6, 7].

Геоложки и хидрогеоложки контекст на Софийската котловина

Софийската котловина е тектонски грабен, изпълнен с неоген-кватернерни седименти. По централните метротрасета инженерно-геоложкият разрез е изключително хетерогенен, с типична последователност от: антропогенни/насипни пластове (1–4 m); делувиялно-пролувиални глини и пясъчливи глини; алувиални наслаги от притоците на Искър – чакъли, пясъци, валуни с пясъчлива матрица; плиоценски глини с прослойки от пясъчливи фракции; скална основа на голяма дълбочина [8].

Подземните води формират плитък водоносен хоризонт с пиезометрични нива на 2–8 m от повърхността, в директна хидрогеоложка връзка с речните корита на Боянска, Перловска и Владайска река. Това обуславя необходимостта ТПМ да работи под нивото на подземните води при по-голямата част от трасетата в централната градска част. Зоните на пресичане под речни корекции и под съществуващи железопътни линии (например преходът между МС 5 и МС 6 на Линия 3) се характеризират с плитко заложение (<5 m), оводнени пясъци и непосредствена близост до съществуващи съоръжения – критични условия, успешно преодолені в практиката [9].

Инженерно-геоложкият профил е преобладаващо подходящ за ЕРВ-тунелно строителство: меки до средно плътни почви, плитки подземни води, силно неравномерна зърнометрия и локални прослойки от абразивни пясъци.

Строителство с механизирани щитове по Софийското метро

Хронологията на ТПМ-операциите в София обхваща три основни етапа. Първият (2005–2009) включва участъци от Линия 1 (пл. Независимост – Стадион В. Левски), изпълнени от японската фирма Taisei Corporation с щитова тунелнопробивна машина с диаметър 5,82 m в два еднопътни тунела. Вторият етап (2010–2011) обхваща централните 3,8 km на Линия 2 (Надежда – Патриарх Евтимий), изпълнени с тунелнопробивната машина наречена „Витоша“ – Herrenknecht ЕРВ-ТВМ с диаметър на изкопния профил 9,36 m, вътрешен 8,43 m, дължина 85 m и тегло 1600 t, създадена за работа в слаб и силно оводнен масив [10].

Третият етап (2017–2019) обхваща централните 7 km на Линия 3 (Красно село – Хаджи Димитър), изпълнени отново с машината „Витоша“ след извършена рехабилитация. През този период са изкопани 420 000 m³ материал, монтирани са 4000 тунелни пръстена по 7 сегмента, машината е преминала последователно през 6 бъдещи метростанции и две междинни шахти. Едно от техническите предизвикателства е шесткратната подмяна на режещите инструменти поради слоеве от абразивни пясъци от Боянската река [11].

Текущата фаза обхваща Лот 4 „Слатина“ на Линия 3, с обща дължина на участъка около 5,4 km и шест нови подземни метростанции. По публично оповестените данни на изпълнителя ТПМ-изкопът включва тунелни работи с дължина 4 440 m, диаметър на изкопа 9,39 m и отчетен обем на ТПМ-изкопа около 306 360 m³, както и допълнителен изкоп за шахти около 55 520 m³ [12]. Предвидено е стартирането на експлоатацията през 2027 г. [13].

Таблица 1. ТПМ-операциите на Софийското метро по периоди
(систематизирано от автора по публични източници).

Период	Линия/Лот	ТПМ (тип, диаметър)	Обем изкоп, m ³
2005–2009	Линия 1 ЦГЧ	JEF ЕРВ, 5,82 m	~110 000*
2010–2011	Линия 2 Лот 1	Herrenknecht ЕРВ, 9,36 m	~265 000*
2017–2019	Линия 3 ЦГЧ	Herrenknecht ЕРВ, 9,36 m	420 000
2023–2026	Линия 3 Лот 4	Herrenknecht ЕРВ, 9,39 m	~306 360 (ТПМ) + ~55 520 (шахти)

*Обемите за периодите 2005-2009 и 2010-2011 са приблизителни оценки въз основа на данните за дължина и диаметър на изкопа, без отчитане на надизкопаване, кондициониращи добавки и коефициент на разбухване, поради което следва да се разглеждат като ориентировъчни. За периода 2017-2019 е използвана официално оповестената стойност на Метрополитен ЕАД. За Лот 4 „Слатина“ са посочени публично оповестените стойности на изпълнителя.

Правна рамка за управление на изкопаните земни маси в България

Нормативните актове, регламентиращи управлението на изкопания материал, обхващат европейско, национално и общинско ниво. На европейско ниво основният акт е Директива 2008/98/ЕО за отпадъците (Waste Framework Directive), която дефинира йерархията: превенция, подготовка за повторна употреба, рециклиране, друго оползотворяване, депониране. Член 5 регламентира страничните продукти (by-products), а член 6 – статуса end-of-waste. При изпълнение на условията по член 5 страничният продукт изобщо не придобива статут на отпадък, докато статусът „край на отпадъка“ по член 6 се придобива след операция по оползотворяване [14].

Националното законодателство в България транспонира Директивата чрез Закона за управление на отпадъците (ЗУО) и съответните подзаконови актове: Наредба за управление на строителните отпадъци и за влагане на рециклирани строителни материали (ПМС № 267/2017 г.), която задължава Възложителя да изготви План за управление на строителните отпадъци (ПУСО) като интегрална част от инвестиционния проект; Наредба № 6/2013 г. за условията за изграждане и експлоатация на депа; Наредба № 2/2014 г. за класификация на отпадъците. Изкопаните маси от метростроителството обикновено се класифицират в код 17 05 04 (почва и камъни, различни от тези в 17 05 03).

На общинско ниво се прилага Наредбата за управление на отпадъците на Столична община (Решение № 364 от 25.06.2015 г., с изменения), включително режимът за направления за извозване на строителни отпадъци и земни маси, утвърдени от Столичен инспекторат. Публично се посочват няколко общински и регионални депа и приемни площадки за изкопни маси и строителни отпадъци на територията на София, като конкретните направления за всеки договор се определят с индивидуални разрешителни, чиито номера и валидност следва да се проверяват в публичните регистри на РИОСВ – София и Столична община към момента на изпълнението и утвърдени маршрути. В публичната информация за изкопаните маси от ТПМ на Софийското метро не се установява ясно документирано прилагане на режим на страничен продукт или end-of-waste. По достъпната публична информация може да се предположи, че материалът преимуществено се управлява в рамките на режима за строителни отпадъци и земни маси, най-често под код 17 05 04, без това да представлява окончателен извод за действителния договорен и административен режим.

Утвърдени международни практики

Проектът Crossrail (Лондон) е един от най-цитираните европейски примери за управление на изкопан материал от голям градски тунелен проект. Централната секция включва около 42 km тунелни изработки и генерира над 7 млн. тона изкопен материал, от който над 98% е насочен към полезна повторна употреба. Значителна част от материала е използвана при създаването на природозащитната зона Wallasea Island, като окончателно доставените количества към Wallasea са малко над 3 млн. тона. Основният извод от проекта е предварителното планиране на приемните обекти, логистиката и договорните задължения за управление на материала, включително приоритетно използване на железопътен и воден транспорт [7, 15].

Grand Paris Express (Франция) е най-мощният европейски метропроект в изпълнение, с приблизително 200 km нова железопътна инфраструктура и значителен обем тунелни работи. Очакваното количество изкопан материал е от порядъка на 47 млн. тона, основно от тунелнопробивни работи. Проектната стратегия поставя цел за рециклиране и материално оползотворяване на най-малко 70% от този материал, като се прилагат различни направления: директна повторна употреба на подходящи инертни почви, рекултивация на кариери, възстановяване на нарушени терени, използване в строителни материали и транспорт с намалено участие на автомобилния превоз [16].

Проектът Brenner Base Tunnel (железопътен тунел под Алпите, свързващ Австрия и Италия) е пример не за управление на кондиционирани ЕРВ-изкопани почви, а за проектно интегрирано рециклиране на скален материал от тунелни изкопни работи. Проектът генерира около 21,5 млн. m³ изкопен материал, който в зависимост от качеството си се депонира или рециклира. Подходящите скални фракции могат да се използват за производство на бетон за вътрешни облицовки, фундаментни плочи, пръскан бетон

и други проектни приложения след необходимата преработка, лабораторно изпитване и производствен контрол. Този тунел е пример за ресурсно ефективно управление на скален материал, а не като пряк аналог на ЕРВ-кондиционирани почви [17, 18].

Общите практики, приложими към ЕРВ-кондиционирани изкопани маси, включват предварително лабораторно изпитване на кондициониращите агенти, документиране на диапазоните на FIR/FER/WIR по инженерно-геоложки участъци, оценка на биоразградимостта на използваните повърхностноактивни кондициониращи вещества, контрол на остатъчните концентрации в изкопания материал и, когато е необходимо, осигуряване на зони за временно складиране и биоразграждане. За по-широкия клас изкопани материали добрите практики включват предварително дефинирани приемни обекти, проследимост на материалните потоци, разделяне по качество и зърнометрия, логистично планиране и публична отчетност.

При SLES-съдържащи пенообразуващи агенти въпросът за остатъчните повърхностноактивни вещества е съществен за възможността за безопасна повторна употреба. Rolando et al. [19] показват, че биологичното обогатяване с подходящ бактериален консорциум, известно в специализираната литература като биоаугментация, може съществено да ускори разграждането на SLES в реален ЕРВ-изкопен материал, като редуцира DT50 от около 6 дни при естествено разграждане до около 1 ден.

Сравнителен анализ

Прилагането в София на изброените практики е частично. От една страна подходът е съпоставим с утвърдената международна практика на ниво избор на машина, режим на работа и оперативни параметри. Машините са персонализирани конструирани за софийската геология, като изпълнителите са с доказан опит в работата с ТПМ с баланс на земното налягане.

От друга страна на ниво управление на изкопания материал се установяват някои потенциални дефицити. Таблица 2 систематизира сравнението по ключови индикатори.

Таблица 2. Сравнителна оценка по ключови индикатори за управление на изкопаните маси от ТПМ (систематизирано от авторите).

Индикатор	София	Crossrail	Grand Paris	Brenner
Публични данни за кондициониращи агенти	ограничени	налични за ЕРВ ¹	налични ²	неприложимо (скална маса) ³
Документирани FIR/FER/WIR	не са публично установени	докладвани ¹	докладвани ²	неприложимо ³
Зони за складиране и биоразграждане на ПАВ	не са публично установени	приложимо ¹	приложимо ²	неприложимо ³
Стратегия за повторна употреба / оползотворяване	не е публично формализирана	управлявана от възложителя, >98% ¹	цел ≥ 70% ²	рециклиране по литология ³
Режим „страничен продукт“ / „край на отпадъка“	не е ясно документиран	не е публично документиран в цялост ¹	докладвана проследимост ²	докладвано в проектната документация ³
Публична отчетност и проследимост	ограничена	развита ¹	развита ²	за отделни аспекти ³

¹ Crossrail Learning Legacy [7]; ASCE [15]. ² Официални материали на Grand Paris Express [20]. ³ BBT SE [18]. Оценките за София са по публично достъпната информация към средата на 2026 г.

На базата на публично достъпната информация се идентифицират четири основни области с потенциал за подобрене. Първо, не се установяват публично достъпни технически спецификации на кондициониращите агенти, включително биоразградимост, сертификати и допустими диапазони на приложение по инженерно-геоложки участъци. Второ, няма публични резултати от систематична програма за излужване, изпитвания за екоотоксичност и анализ на остатъчни повърхностноактивни вещества в изкопания материал. Трето, не се установяват публично документирувани зони за временно складиране и биоразграждане на остатъчни повърхностноактивни вещества, каквито биха били необходими при определени подходи за повторна употреба. Четвърто, не се открива систематично публично отчитане на количествата, направленията, степента на оползотворяване и крайното предназначение на изкопания материал.

Ориентировъчна оценка на екологичния ефект

Изборът на алтернативните сценарии за управление на изкопания материал от ТПМ се извършва като ориентировъчна сценарийна оценка, основана на принципите на оценката на жизнения цикъл (ОЖЦ/LCA), с функционална единица 1 тон изкопан материал и обхват за категорията изменение на климата (GWP100, kg CO₂eq) [21]. Поради ограничения достъп до специфични за проекта входни данни за транспорт, енергия, реални приемни обекти и третиране на материала, оценката има ориентировъчен характер и не представлява пълна оценка на жизнения цикъл за конкретния проект по смисъла на ISO 14040/14044. За софийската практика общият обем изкопан материал от Линии 2 и 3 (включително Лот 4) се оценява на около 1 млн. m³ (вж. Таблица 1). При условно прието допускане за средна обемна плътност на кондиционирания материал $\rho \approx 1,8 \text{ t/m}^3$ (чувствителност на резултата в диапазона 1,6–2,0 t/m³) общата маса е приблизително 1,8 млн. тона.

Разгледани са три условни сценария: S1 - преобладаващо депониране в общинско депо с транспорт до 15 km; S2 - смесен сценарий с приблизително 50% повторна употреба за насипи и 50% депониране; S3 - високоефективен сценарий с приблизително 90% повторна употреба или оползотворяване. Обобщените стойности са представени в Таблица 3.

Таблица 3. Числен пример за сравнение на сценарии за управление на изкопания материал от ТПМ на Софийското метро (на база ~1,8 млн. t материал, по изчисление с изрично посочени допускания и емисионни фактори (вж. Приложението), а не оценка за конкретния проект).

Показател	S1 депо	S2 смесен	S3 повт. употреба
Дял повторна употреба, %	0	50	90
Емисии, kg CO ₂ eq/t (ориент.)	≈3,4	≈2,8	≈1,7
Общо, хил. t CO ₂ eq	≈6,1	≈5,0	≈3,0
Относителна редукция спрямо S1	–	≈18%	≈51%

При използваните ориентировъчни допускания сценарият с висок дял повторна употреба показва съществен потенциал за намаляване на въглеродния отпечатък спрямо преобладаващото депониране. Изчисленияте стойности представляват числен пример при условни коефициенти и следва да се използват само за илюстрация на порядъка, а не като количествена оценка. За такава оценка са необходими специфични данни за транспорт, третиране, реални приемни обекти, енергийни разходи, водно съдържание, коефициент на разбухване, степен на замърсяване и пазарна реализация на подходящите фракции.

Заклучение и препоръки

Кондиционирането на изкопания материал при ТПМ-операциите на Софийското метро се прилага в технически сложна геоложка и хидрогеоложка среда и е свързано с доказано успешна реализация на значими тунелни участъци. На ниво управление на изкопания материал обаче публичната информация показва ограничена проследимост по отношение на кондициониращите агенти, остатъчните повърхностноактивни вещества, лабораторния контрол, планираната повторна употреба и крайните направления на материала. Това ограничава възможността за независимо сравнение с утвърдени европейски практики и показва необходимост от по-структуриран подход при бъдещите етапи на метростроителството.

За бъдещите етапи на Софийското метро могат да бъдат формулирани следните препоръки:

- (1) Въвеждане на специфичен за проекта План за управление на изкопания материал, който да определя класификацията, изпитванията, проследимостта, временните площадки, възможните направления за повторна употреба и отговорностите на участниците.
 - (2) Изготвяне на предварителна лабораторна програма за подбор на кондициониращите агенти, включително документиране на диапазоните на FIR, FER и WIR по инженерно-геоложки участъци.
 - (3) Документиране на биоразградимостта и екологичната характеристика на пенообразуващите и полимерните агенти, включително сертификати и технически листове, приложени към проектната документация.
 - (4) Провеждане на лабораторен контрол на изкопания материал, включително изпитвания за излужване, остатъчни повърхностноактивни вещества и при необходимост изпитвания за екоотоксичност с подходящи биоиндикатори.
 - (5) Осигуряване на временно складиране или контролирано третиране на материала, когато остатъчните концентрации на повърхностноактивни вещества или други показатели ограничават непосредствената повторна употреба.
 - (6) Разработване на транспортно-логистична схема за извозване на материала. Схемата следва да обхваща очаквания обем и състав на превозите, габаритите и маневреността на транспортните средства, организацията на движението, временните маршрути, местата за разминаване и почвено-хидрогеоложките условия на площадката. Планирането на временните и вътрешноплощадковите пътища представлява самостоятелен елемент от организацията на строителството и влияе върху непрекъсваемостта, безопасността и разходите на транспортните операции [22].
- Конструкцията на временните пътища следва да се избира според срока на използване, интензивността и осовите натоварвания, наличните местни материали и климатичните и хидрогеоложките условия. При продължително и тежко натоварване могат да се разглеждат трайни покрития или сглобяеми инвентарни стоманобетонни плочи, включително с възможност за повторна употреба след приключване на съответния строителен етап [23].
- Прилагането на тези мерки би подобрило проследимостта, би ограничило зависимостта от депониране и би създавало по-добри условия за въвеждане на кръгово-икономически подход при бъдещото развитие на Софийското метро.
- В по-широк европейски контекст разгледаните примери показват, че високата степен на повторна употреба не е резултат единствено от характеристиките на изкопания материал, а от ранното планиране, регулаторна яснота, договорни изисквания, логистика и публична отчетност.

Литература

1. EFNARC. (2005). Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanized tunnelling (TBM) in soft ground and hard rock. European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures, Surrey, UK.
2. ITA-AITES Working Group 14. (2016). Mechanized tunnelling – Recommendations and guidelines for tunnel boring machines (TBMs). International Tunnelling and Underground Space Association, Paris.
3. DAUB (Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen). (2021). Recommendations for the selection of tunnel boring machines. <https://www.daub-ita.de>
4. Thewes, M., & Budach, C. (2010). Soil conditioning with foam during EPB tunnelling. Geomechanics and Tunnelling, 3(3), 256–267. <https://doi.org/10.1002/geot.201000023>
5. Borghi, F. X., & Mair, R. J. (2006). Soil conditioning for EPB tunnelling machines in London ground conditions. Tunnels & Tunnelling International, September 2006, 18–20.
6. Bezuijen, A., & Talmon, A. M. (2014). Soil pressures at the cutting wheel and the pressure bulkhead of an EPB-shield. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, 7, 67–73. <https://doi.org/10.1201/b17240>
7. Crossrail Learning Legacy. (2017). Excavated Materials Story. Crossrail Ltd. <https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/excavated-materials-story/>

8. Братоев, С. (2004). Софийски метрополитен / Sofia Metropolitan. Нота бене, София.
9. Trace Group Hold PLC. (2020, August 27). Metro stations “Hadzhi Dimitar”, “Teatralna” and “Orlov most” from Sofia’s third metro line are already a part of Trace Group metro construction history. <https://www.tracebg.com>
10. Railway Gazette. (2010, April 6). Metro Line 2 tunnelling starts in Sofia. Railway Gazette International. <https://www.railwaygazette.com>
11. Метрополитен ЕАД. (2019). Приключи работата по изграждане на метротунела с помощта на тунелопробивната машина „Витоша“. <https://www.metropolitan.bg>
12. Doğuş İnşaat ve Ticaret. (2024). Sofia Metro Extension Project, Line III Lot 4 – Slatina. <https://www.dogusinsaat.com.tr/en/sofia-metro-extension-project-line-iii-lot-4-slatina>
13. Railway Pro. (2025, July 21). Tunnelling completed on Sofia Metro Line 3, Lot 4. Railway Pro Magazine. <https://www.railwaypro.com/wp/tunnelling-completed-on-sofia-metro-line-3-lot-4/>
14. European Commission. (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union, L 312, 3–30.
15. ASCE. (2022). Excavated Crossrail soil creates nature reserve. Civil Engineering Magazine, June 2022. American Society of Civil Engineers. <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/article/2022/06/excavated-crossrail-soil-creates-nature-reserve>
16. Société des grands projets. (2025). 2024 Green Bond Report. Société des grands projets, Paris. <https://media-mediatheque.sgp.fr/>
17. Voit, K., Murr, R., Cordes, T., Zeman, O., & Bergmeister, K. (2020). Tunnel spoil recycling for concrete production at the Brenner Base tunnel in Austria. Structural Concrete, 21(6), 2795–2809. <https://doi.org/10.1002/suco.202000434>
18. BBT SE (Brenner Basistunnel SE). (2021). The Brenner Base Tunnel. Brenner Basistunnel SE. <https://www.bbt-se.com/fileadmin/broschueren/2021/allgemeine-broschuere-en/41/>
19. Rolando, L., Barra Caracciolo, A., Grenni, P., Mariani, L., Rauseo, J., Spataro, F., Garbini, G. L., Visca, A., & Patrolecco, L. (2021). Bioaugmentation with a consortium of bacterial sodium lauryl ether sulfate-degraders for remediation of contaminated soils. Frontiers in Microbiology, 12, 740118. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.740118>
20. Grand Paris Express. (2024). Worksites and environment – Excavated materials management. Société du Grand Paris. <https://www.grandparisexpress.fr/worksites/environment>
21. Magnusson, S., Lundberg, K., Svedberg, B., & Knutsson, S. (2015). Sustainable management of excavated soil and rock in urban areas – A literature review. Journal of Cleaner Production, 93, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.010>
22. Стаменов, Х. Г. (2026a). Временни автомобилни пътища на строителни площадки. Планиране и проектиране. Технически характеристики (Част I). Механика Транспорт Комуникации, 24(1), статия № 2767, XIV-1–XIV-11.
23. Стаменов, Х. Г. (2026b). Временни автомобилни пътища на строителни площадки. Пътни конструкции (Част II). Механика Транспорт Комуникации, 24(1), статия № 2768, XIV-12–XIV-19.
24. DEFRA. (2024). Greenhouse gas reporting: Conversion factors 2024. UK Department for Environment, Food & Rural Affairs. <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2024>
25. ISO. (2006a). ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva.
26. ISO. (2006b). ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva.
27. Закон за управление на отпадъците. (2012). Обн. ДВ, бр. 53 от 13.07.2012 г., с послед. изм. и доп.
28. Наредба № 2 от 23.07.2014 г. за класификация на отпадъците. (2014). Обн. ДВ, бр. 66 от 08.08.2014 г., с послед. изм. и доп.

29. Наредба № 6 от 27.08.2013 г. за условията и изискванията за изграждане и експлоатация на депа и други съоръжения и инсталации за оползотворяване и обезвреждане на отпадъци. (2013). Обн. ДВ, бр. 80 от 13.09.2013 г., с послед. изм. и доп.
30. Наредба за управление на строителните отпадъци и за влагане на рециклирани строителни материали. (2017). Приета с ПМС № 267/05.12.2017 г., обн. ДВ, бр. 98 от 08.12.2017 г.
31. Столична община. (2015). Наредба за управление на отпадъците на територията на Столична община. Приета с Решение № 364 на Столичния общински съвет от 25.06.2015 г., с послед. изм. и доп.

Приложение. Изчисление на ориентировъчните емисионни стойности в Таблица 3

П.1. Емисионни фактори и разходни норми, с изричен произход на всяко допускане. Дизелово гориво: 3,1 kg CO₂eq/l – литературен фактор по DEFRA [24], категория Fuels – Diesel (average biofuel blend), сума от директния фактор на изгаряне и WTT компонента (пълен жизнен цикъл на горивото). Товарене и обработка на площадката: 0,15 l/t – производствено допускане по типови характеристики на хидравличен багер от класа 25 t (разход около 20 l/h при производителност около 130 t/h). Транспорт: самосвал 8×4 с полезен товар 18 t и разход 45 l/100 km в натоварено и 35 l/100 km в празно направление, с отчетен празен обратен курс – производствено допускане по типови експлоатационни данни. Операции на депото или на насипната площадка (разриване и уплътняване): 0,10 l/t – производствено допускане. Амортизирана инфраструктурна добавка на депото: 0,55 kg CO₂eq/t – авторско сценарийно допускане.

П.2. Изчисление по сценарии (kg CO₂eq/t). Транспорт до депо на 15 km: гориво на курс 15×0,45 + 15×0,35 = 12,0 l за 18 t, т.е. 0,67 l/t, или 2,07 kg CO₂eq/t. Сценарий S1 (100% депониране): 0,47 (товарене) + 2,07 (транспорт) + 0,31 (операции на депото) + 0,55 (инфраструктурна добавка) ≈ 3,4. Направление за повторна употреба при 10 km: 0,47 + 1,38 + 0,31 ≈ 2,2, а при 5 km: 0,47 + 0,69 + 0,31 ≈ 1,5. Сценарий S2 (50/50): 0,5×3,4 + 0,5×2,2 ≈ 2,8. Сценарий S3 (90% повторна употреба при 5 km, 10% депониране): 0,9×1,5 + 0,1×3,4 ≈ 1,7.

П.3. Системна граница и ограничения. Изчислението обхваща операциите от временното складиране на площадката до крайното направление на материала. Не са включени производството на кондициониращите агенти, строителството на депото извън посочената амортизирана добавка, административните дейности, както и избегнатите емисии от заместване на първични инертни материали при повторна употреба, което прави сравнението консервативно спрямо сценариите с оползотворяване. Чувствителността е проверена числено чрез пълна комбинация от вариации на разстоянията (±50%), полезния товар (14–22 t) и разхода на гориво (±20%): S1 варира в диапазона 2,0–6,1, S2 в 1,6–5,0, а S3 в 1,1–2,7 kg CO₂eq/t, като класирането S3 < S2 < S1 се запазва във всичките 27 комбинации; при дял на повторната употреба 80–95% S3 остава в диапазона 1,6–1,9 kg CO₂eq/t. Стойностите служат за сравнителна илюстрация и не заместват оценка на жизнения цикъл за конкретния проект по ISO 14040/14044 (ISO, 2006a; 2006b).

ПРЕРАЗГЛЕЖДАНЕ НА СТАТИЧНОТО ПРЕДАВАНЕ НА НАТОВАРВАНЕ ПРИ ДВУСЛОЙНИ ТУНЕЛНИ ОБЛИЦОВКИ, ИЗГРАДЕНИ ПО НАТМ – ПОСЛЕДИЦИ ЗА ОПРОСТЕНИЯ СЕИЗМИЧЕН МЕТОД (МЕТОД 2)

Николай Жечев n_rafailov@abv.bg

РЕЗЮМЕ

В настоящия доклад се анализира критично допускането за предаване на статично радиално налягане от първичната към вторичната облицовка при тунели, изградени по Новоавстрийския метод (НАТМ). Въз основа на реалната строителна последователност се обосновава, че коефициентът на предаване на статична нормална сила η_{stat} следва да бъде нула, тъй като първичната облицовка поема целия статичен товар още преди полагането на вторичната. Това коригира по-ранното допускане ($\eta_{stat} = 0,3$) и води до значително опростяване на сеизмичния анализ. Установено е, че при $\eta_{stat} = 0$ опростеният динамичен метод (Метод 2), който редуцира инерционната маса на скалата до 25%, е точен за всички категории скали (RMR от 10 до 100), докато при $\eta_{stat} = 0,3$ той е приложим само за скали с $RMR \geq 41$. Резултатите са потвърдени чрез параметрични проучвания и сравнение с референтен контактен модел (Метод 1). Препоръчва се Метод 2 с $\eta_{stat} = 0$ да бъде основният инженерен метод за рутинно проектиране на вторични облицовки при земетресение.

Ключови думи: НАТМ, двуслойна облицовка, статично предаване, сеизмично натоварване, Метод 2, RMR, дренажна хидроизолация.

ABSTRACT

This paper critically re-examines the assumption of static radial load transfer from the primary to the secondary lining in tunnels built by the New Austrian Tunneling Method (NATM). Based on the actual construction sequence, it is substantiated that the static normal-force transfer coefficient η_{stat} should be zero, since the primary lining carries the entire static load before the secondary lining is cast. This correction significantly simplifies the seismic analysis. With $\eta_{stat} = 0$ the simplified dynamic method (Method 2), which reduces the inertial mass of the rock to 25%, is accurate for all rock categories (RMR from 10 to 100), whereas with $\eta_{stat} = 0.25$ it is applicable only to rock with $RMR \geq 41$. The results are confirmed through parametric studies and comparison with a reference contact model (Method 1). Method 2 with $\eta_{stat} = 0$ is recommended as the primary engineering method for the routine seismic design of secondary linings.

Keywords: NATM, double-layer lining, static load transfer, seismic loading, Method 2, RMR, drained waterproofing.

1. Въведение

При тунелите, изпълнени по Новоавстрийския метод (НАТМ), първичната облицовка (торкрет) поема основните статични натоварвания от скалния масив, а вторичната облицовка (стоманобетон) служи главно за хидроизолация и като резерв за динамични въздействия (Rabcewicz, 1964). Съвременните изисквания налагат проверка на вторичната облицовка и за сеизмични натоварвания (EN 1998-4, 2006). В практиката често се прибегва до опростени методи, сред които особено място заема т.нар. **Метод 2**, който симулира динамичния отклик чрез редуциране на обемната маса на скалата до 25% или чрез мащабиране на акселерограмата.

Въпреки че Метод 2 е значително по-прост от пълните контактни крайноелементни модели (Метод 1), неговата точност зависи съществено от начина, по който се отчита статичната компонента на натоварването. В множество изследвания (Wang, 1993; Penzien, 2000) се приема, че статичното радиално налягане се предава от първичната към вторичната облицовка с коефициент $\eta_{stat} = 0,3$, съответстващ на недренажна хидроизолация. Това допускане обаче не отчита реалната строителна последователност и механизма на работа на хидроизолационния слой при НАТМ.

Настоящият доклад преразглежда тези предпоставки, като се базира на принципите на НАТМ и на съвременни изследвания (Lorenz & Galler, 2015; Salehi et al., 2025; Liu et al., 2022), и извежда ясни препоръки за приложимостта на Метод 2 в инженерната практика.

2. Преглед на методите за анализ на двуслойни облицовки

В изследването са дефинирани пет метода за определяне на усилията във вторичната облицовка при земетресение. Те са обобщени в Таблица 1.

Таблица 1. Сравнение на петте метода за сеизмичен анализ на вторична облицовка.

№	Метод	Тип	Особености
1	Коригиран контактен МКЕ	числен	Отчита реалния контакт (хлабина, коравина, триене); референтен
2	Динамичен с 25% маса	числен	Редуцирана плътност ($\rho=675 \text{ kg/m}^3$) или мащабирана акселерограма
3	Асиметричен аналитичен	аналитичен	Симулира овална деформация; неприемлив (нулева статична сила)
4	Класически (Wang/Penzien)	аналитичен	Твърда връзка; силно консервативен
5	Псевдостатичен (EN 1998-4)	аналитичен	Коефициент на взаимодействие K; умерено консервативен

Параметричното проучване обхваща всички категории скали по RMR (I до V, като се използват най-ниските стойности – 81, 61, 41, 21, 10) и дълбочини 20, 40, 60 и 80 m. Прието е, че първичната облицовка има дебелина 0,25 m (C25/30), вторичната – 0,40 m (C30/37), хлабина 0,002 m, а сеизмичното ускорение е $a_g = 0,25g$. Статичното радиално налягане върху първичната облицовка се определя чрез разхлабваща височина по Bieniawski (1989).

3. Преразглеждане на допусканията за статично предаване на сили

3.1. Оригинално допускане ($\eta_{stat} = 0,3$)

В първоначалното изложение се приема, че статичната нормална сила се предава от първичната към вторичната облицовка с коефициент $\eta_{stat} = 0,3$, съответстващ на недренажна хидроизолация. Това допускане води до следните процедури (уравнения 1–4):

1. Статичен анализ на самостоятелна първична облицовка → определяне на N_{prim} .

2. Статична компонента за вторичната облицовка:

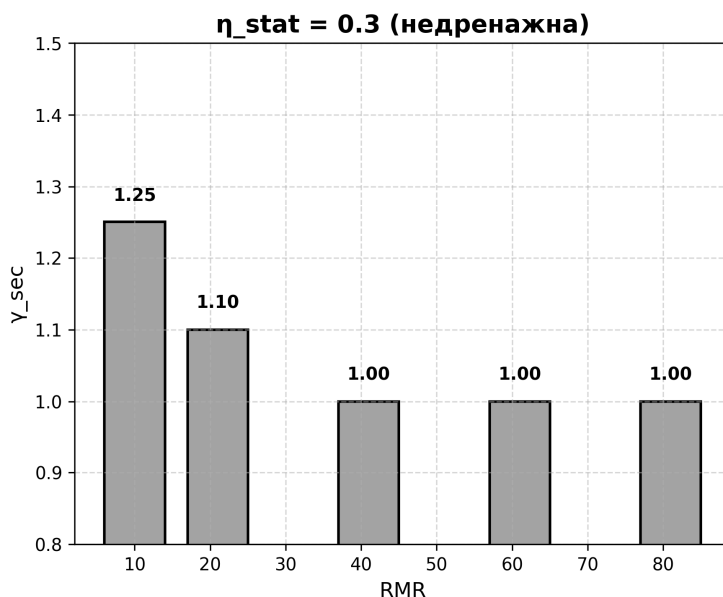
$$N_{stat,sec} = \eta_{stat} \cdot N_{prim} \quad (1)$$

3. Динамичен анализ с пълна плътност на скалата ($\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, $a_g = 0,25g$) → получаване на динамичните усилия N_{dyn} и M_{dyn} .

4. Пълни усилия:

$$N_{tot} = N_{stat,sec} + N_{dyn}, \quad M_{tot} = M_{dyn} \quad (2)$$

При това допускане, параметричното проучване показва, че Метод 2 е точен само за скали с $RMR \geq 41$ (коефициент на сигурност $\gamma_{sec} = A_{s,prov,1} / A_{s,prov,2} \approx 1,00$). За $RMR \leq 40$ (лоши и много лоши скали), Метод 2 подценява армировката ($\gamma_{sec} > 1$) и става неконсервативен. Това е илюстрирано на Фигура 1а.



Фигура 1а. Сравнение на коефициента на сигурност γ_{sec} за Метод 2 при $\eta_{stat} = 0,3$ (недренажна хидроизолация). За $RMR \leq 40$ коефициентът на сигурност надвишава 1,0, което означава, че Метод 2 подценява армировката. Стойностите са дадени за дълбочина $H = 80$ m.

3.2. Критика на допускането въз основа на реалната HATM последователност

Реалният процес при HATM е следният (Lorenz & Galler, 2015):

1. Изкоп $\rightarrow$ незабавно нанасяне на първичната облицовка (торкрет, анкери, стоманена мрежа).
2. Първичната облицовка е проектирана да бъде самостоятелно стабилна и да поеме цялото статично натоварване от разхлабената зона около тунела (Terzaghi, 1946; Bieniawski, 1989).
3. Едва след стабилизиране на деформациите на първичната облицовка се поставя хидроизолацията (с хлабина 5–10 mm) и се бетонира вторичната облицовка.
4. Поради тази последователност, вторичната облицовка не получава статични напрежения от скалния масив, тъй като те вече са поети от първичната конструкция. Хидроизолационният слой (особено дренажният тип) не може да предаде съществени статични сили.

Следователно, за коректно оразмеряване на вторичната облицовка при земетресение, коефициентът на предаване на статичната нормална сила е $\eta_{stat} = 0$. Вторичната облицовка следва да се оразмерява само за динамичната компонента, причинена от инерционните сили по време на земетресение.

Това заключение е в пълно съответствие с принципите на HATM и с наблюденията на Lorenz & Galler (2015), според които предаването на статичен товар към вторичната облицовка се забавя значително (често с години) и в практиката се пренебрегва.

4. Резултати при $\eta_{stat} = 0$

Параметричното проучване от раздел 2 е повторено за същите категории скали и дълбочини, но без добавяне на статична компонента ($\eta_{stat} = 0$). Динамичните усилия се получават от Метод 1 и

Метод 2 по процедурите, описани в раздел 3. Резултатите са обобщени в Таблица 2 за илюстративния случай $RMR = 41$, $H = 80$ m.

Таблица 2. Сравнение на усилията и армировката при $\eta_{stat} = 0$ за $RMR=41$, $H=80$ m.

Метод	M (kN·m/m)	N (kN/m)	$A_{s,prov}$ (cm ² /m)
1	82	115	7,5 (минимум)
2	21	28	7,5 (минимум)
4	175	130	7,5 (минимум)
5	85	60	7,5 (минимум)

За всички RMR и дълбочини се наблюдава, че:

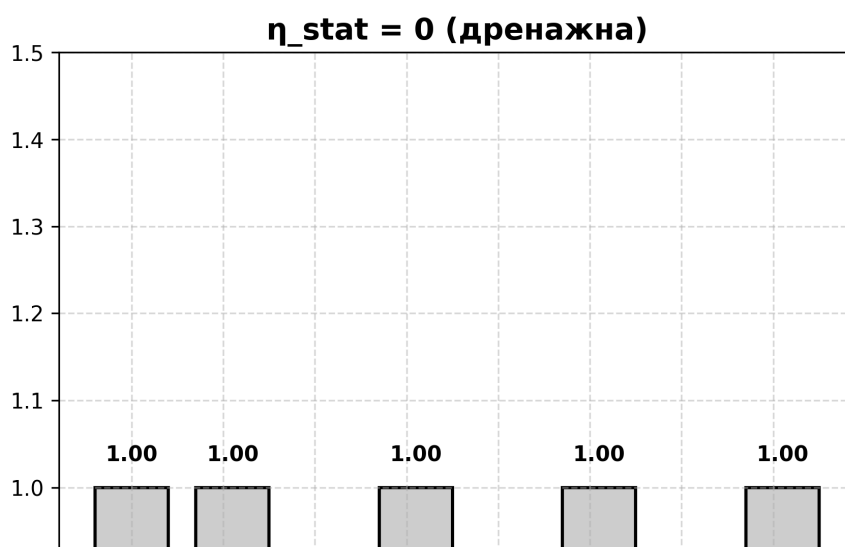
- Динамичните нормални сили N_{dyn} са значително по-ниски от статичните (които отпадат).
- Изчислената необходима армировка винаги е под или равна на минималната конструктивна ($A_{s,min} = 7,5 \text{ cm}^2 / \text{m}$, съответстваща на $\varnothing 12/15$ cm).
- Следователно армировката на вторичната облицовка се определя от конструктивния минимум, независимо от RMR и дълбочината.

Коефициент на сигурност за Метод 2:

Тъй като и двата метода (1 и 2) водят до една и съща конструктивна армировка ($A_{s,prov,1} = A_{s,prov,2} = A_{s,min}$), коефициентът на сигурност е:

$$\gamma_{sec} = \frac{A_{s,prov,2}}{A_{s,prov,1}} = 1,00 \quad (3)$$

за всички RMR (10–100) и за всички дълбочини (20–80 m). Това означава, че Метод 2 е точен и надежден за всякакви геоложки условия, когато се приложи корекцията $\eta_{stat} = 0$. Това е визуализирано на Фигура 1b.



Фигура 1b. Сравнение на коефициента на сигурност γ_{sec} за Метод 2 при $\eta_{stat} = 0$ (дренажна хидроизолация). За всички RMR коефициентът на сигурност е равен на 1,00, което потвърждава универсалната приложимост на Метод 2

5. Сравнение с оригиналното допускане и дискусия

5.1. Сравнителен анализ

В Таблица 3 е дадено сравнение на коефициента на сигурност γ_{secsec} при двете допускания за η_{stat} .

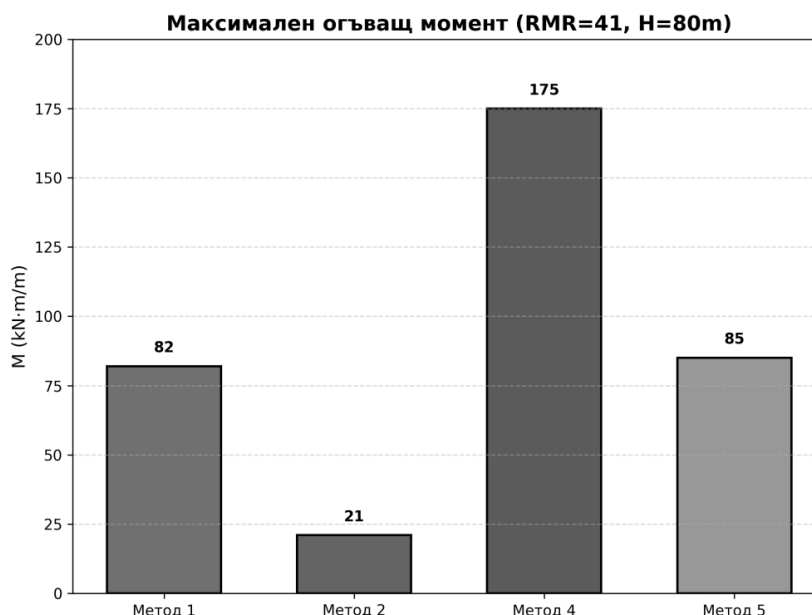
Таблица 3. Коефициент на сигурност γ_{sec} за Метод 2 при различни допускания за η_{stat} .

RMR	$\eta_{\text{stat}} = 0,3$ (недренажна)	$\eta_{\text{stat}} = 0$ (дренажна)
81	1,00	1,00
61	1,00	1,00
41	1,00	1,00
21	1,07 – 1,15 (в зависимост от H)	1,00
10	1,06 – 1,43 (в зависимост от H)	1,00

Вижда се, че при $\eta_{\text{stat}} = 0,3$ Метод 2 е неточен за лоши скали ($\text{RMR} \leq 40$), докато при $\eta_{\text{stat}} = 0$ той е универсално приложим.

5.2. Съпоставка на резултатите от различните методи

За илюстративния случай $\text{RMR} = 41$, $H = 80$ m, Фигура 2 показва максималните огъващи моменти M (kN·m/m) във вторичната облицовка, получени по четирите метода. Разликите са значителни (Таблица 2): аналитичният Метод 4 (Wang/Penzien) е силно консервативен, а псевдостатичният Метод 5 – умерено; Метод 2 дава най-ниските усилия, оставяйки точен спрямо референтния Метод 1.



Фигура 2. Максимален огъващ момент M (kN·m/m) за $\text{RMR}=41$, $H=80$ m според различните методи при $\eta_{\text{stat}} = 0$.

5.3. Съответствие със световни изследвания

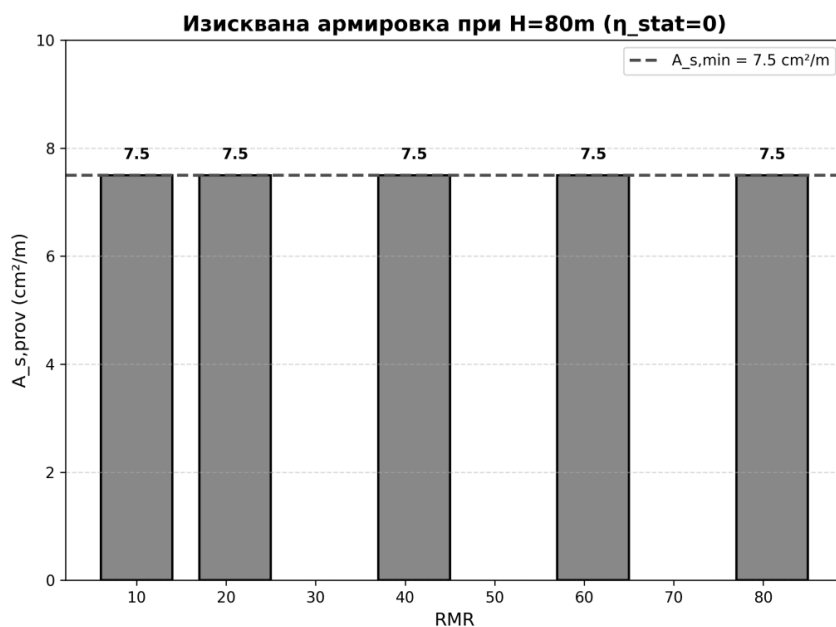
Преразгледаното допускане $\eta_{stat} = 0$ е в пълно съответствие с принципите на NATM (Rabcewicz, 1964) и с наблюденията на Lorenz & Galler (2015). Salehi et al. (2025) установяват, че интерфейсите условия значително влияят върху преноса на натоварване, като плъзгането намалява вътрешните сили. Приетият тук консервативен случай (плъзгане без триене) води до по-икономични решения.

Liu et al. (2022) отчитат влияние на първичната облицовка върху сеизмичния отклик от 5–35% — ефект, който Метод 2 отразява косвено чрез редуцираната маса.

Аналитичните методи на Wang (1993) и Penzien (2000) (Метод 4) дават силно консервативни резултати за двуслойни облицовки, понеже не отчитат хлабината. При $\eta_{stat} = 0$ разликата между Метод 4 и Метод 2 намалява, но Метод 4 остава консервативен.

5.4. Икономически последици

Прилагането на $\eta_{stat} = 0$ вместо $\eta_{stat} = 0,25$ намалява нормалната сила във вторичната облицовка с около 30–50% в зависимост от RMR и дълбочината, а при лоши скали ($RMR \leq 40$) икономията на армировка достига до 50% без компромис със сигурността. Както показва Фигура 3, при $\eta_{stat} = 0$ изискваната армировка за всички RMR ($H = 80$ m) съвпада с конструктивния минимум от 7,5 cm^2/m — оразмеряването се определя единствено от конструктивните изисквания, независимо от качеството на скалата.



Фигура 3. Изисквана армировка $A_{s,prov}$ (cm^2/m) при $H=80$ m и $\eta_{stat} = 0$. За всички RMR стойността е равна на конструктивния минимум от 7,5 cm^2/m .

6. Изводи и препоръки

Въз основа на преразгледания анализ за дренажен тип хидроизолация с $\eta_{stat} = 0$ се установяват следните ключови изводи:

1. Метод 2 (динамичен модел с 25% от масата на скалата) е точен и надежден за всички категории скали (RMR от 10 до 100), при условие че се приеме $\eta_{stat} = 0$. Коефициентът на сигурност спрямо референтния контактен модел (Метод 1) е $\gamma_{sec} = 1$ за всички разгледани случаи.
2. При $\eta_{stat} = 0$, армировката на вторичната облицовка се определя от конструктивния минимум ($A_{s,min} = 7,5 \text{ cm}^2 / \text{m}$ за $\varnothing 12/15$ cm) за стандартни сеизмични ускорения ($a_g \leq 0,25g$), независимо от качеството на скалата.

3. Оригинално допускане $\eta_{stat} = 0,3$ (недренажна хидроизолация) ограничава приложимостта на Метод 2 само до скали с $RMR \geq 41$. За $RMR \leq 40$ Метод 2 става неконсервативен и изисква използването на Метод 1 или на консервативния Метод 4.
4. Препоръки за инженерната практика:
 - За всички рутинни тунелни проекти (независимо от RMR), при наличие на дренажна хидроизолация, да се използва Метод 2 с $\eta_{stat} = 0$ като основен метод за сеизмично оразмеряване на вторични облицовки.
 - Метод 1 (контактен МКЕ) да се запази само за верификация при особено взискателни проекти или екстремни ускорения ($a_g > 0,5g$).
 - Аналитичните методи на Wang (1993) и Penzien (2000) да се използват само за предварителни консервативни оценки.
 - При наличие на данни от мониторинг (обратен анализ), икономии от 30–50% в армировката са постижими без компромис със сигурността.

Библиография

- [1] Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classifications. Wiley.
- [2] CEN (2006). EN 1998-4: Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines.
- [3] Liu, X., et al. (2022). Influence of primary lining on seismic response of double-layer tunnel linings. Tunnelling and Underground Space Technology, 120, 104290.
- [4] Lorenz, G., & Galler, R. (2015). Long-term behaviour of double-shell tunnel linings. Geomechanics and Tunnelling, 8(5), 456–467.
- [5] Penzien, J. (2000). Seismically induced racking of tunnel linings. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29(5), 683–691.
- [6] Rabcewicz, L. (1964). The New Austrian Tunnelling Method. Water Power, 16(11), 453–457.
- [7] Salehi, M., et al. (2025). Interface effects on load transfer in double-shell tunnel linings under seismic loading. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 178, 108432.
- [8] Terzaghi, K. (1946). Rock defects and loads on tunnel supports. In Rock Tunneling with Steel Supports. Commercial Shearing & Stamping Co.
- [9] Wang, J.N. (1993). Seismic Design of Tunnels. Parsons Brinckerhoff Inc.

КОНТАКТНО ИНЖЕКТИРАНЕ МЕЖДУ СКАЛЕН МАСИВ И ПЪРВИЧНА ТУНЕЛНА ОБЛИЦОВКА АНАЛИЗ НА НЕОБХОДИМОСТТА, ЧИСЛЕНИ МОДЕЛИ И ПРАКТИЧЕСКИ АСПЕКТИ

Николай Жечев n_rafailov@abv.bg
Рафаил Рафаилов r_rafailov@mgu.bg

РЕЗЮМЕ

Докладът представя анализ на необходимостта от контактно инжектиране между скалния масив и първичната облицовка при тунели, изградени по NATM (Rabcewicz, 1964). Разгледани са теоретичните основи на взаимодействието, механизмите на образуване на кухини в контактната зона и тяхното влияние върху конструкцията (Yang & Xue, 2020; Lee et al., 2025). Представени са резултати от съвременни числени изследвания (Liu et al., 2022; Salehi et al., 2025) и е направена връзка с международната практика (FHWA, 2025; USACE, 2024). Акцентът е поставен върху конкретен казус от железопътното строителство в България — тунели №11, №12 и №13 в участъка Костенец–Септември, където на базата на актуализирани геоложки проучвания се обосновава техническата необходимост от радиално контактно инжектиране преди полагането на вторичната облицовка.

Ключови думи: контактно инжектиране, NATM, първична облицовка, кухини зад облицовката, числено моделиране

ABSTRACT

This paper analyses the need for contact grouting between the rock mass and the primary lining of tunnels built by the New Austrian Tunnelling Method (NATM) (Rabcewicz, 1964). The theoretical basis of the rock–lining interaction, the mechanisms of void formation in the contact zone and their effect on the structure are examined (Yang & Xue, 2020; Lee et al., 2025). Results from recent numerical studies are presented (Liu et al., 2022; Salehi et al., 2025) and related to international practice (FHWA, 2025; USACE, 2024). The study focuses on a specific case from railway construction in Bulgaria — tunnels No. 11, No. 12 and No. 13 in the Kostenets–Septemvri section — where, based on updated geological surveys, the technical need for radial contact grouting prior to the secondary lining is substantiated.

Keywords: contact grouting, NATM, primary lining, voids behind the lining, numerical modelling

1. Въведение

Тунелното строителство е неразделна част от транспортната, водоснабдителната и енергийната инфраструктура, а Новоавстрийският тунелен метод (NATM) се утвърждава като един от водещите подходи за изграждане на подземни съоръжения (Rabcewicz, 1964). Съгласно принципа на NATM околният скален масив е основният носещ елемент, което изисква прецизно инженерно познание и контрол (Илов, 2009). Критичен проблем при тези тунели е образуването на кухини в контактната зона между скалния масив и първичната облицовка (Yang & Xue, 2020) — вследствие на недостатъчно запълване, технологичните особености на пръскания бетон, водната ерозия и геоложките условия (Lee et al., 2025); кухините водят до преразпределение на напреженията, локални концентрации и напукване (Kim & Yoon, 2016).

Настоящият доклад анализира теоретичните основи на взаимодействието скала–облицовка, механизмите на образуване на кухини, съвременните числени методи, международната практика и конкретен казус от железопътното строителство в България.

2. Теоретични основи

2.1. Принципи на NATM и ролята на първичната облицовка

Основните принципи на NATM са: мобилизиране на носимоспособността на скалния масив, контролирани деформации, навременна и гъвкава облицовка, мониторинг (Rabcewicz, 1964). Първичната облицовка от пръскан бетон осигурява начална носимоспособност, но не прониква дълбоко във всички пукнатини (Lorenz & Galler, 2015).

2.2. Механика на взаимодействието скала–облицовка

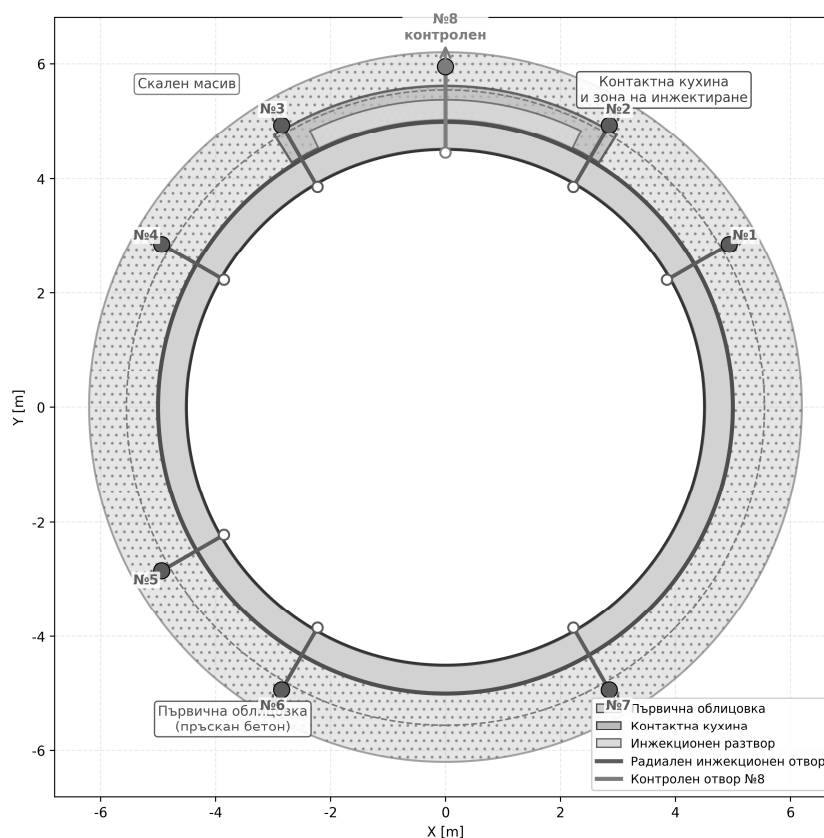
При идеални условия натоварванията се предават равномерно. При наличие на кухини настъпват: загуба на локален контакт, преразпределение на напреженията, промяна от аксиален натиск към огъващи моменти и локални концентрации (Yang & Xue, 2020; Lee et al., 2025).

2.3. Формиране на кухини — механизми и фактори

Образуването на кухини се обуславя от няколко групи фактори. Технологичните включват неравностите по изкопния контур, ограничената проникваща способност на пръскания бетон и недостатъчната дебелина на облицовката. Геоложките са свързани с пукнатините, кавернозността и разхлабените зони (Bieniawski, 1989), а хидрогеоложките — с водната ерозия, хидростатичното налягане и дренажния ефект (Костов, 2015). В дългосрочен план се добавят деградацията на материалите, цикличното натоварване и промените в хидрогеоложките условия.

2.4. Роля и механизъм на контактното инжектиране

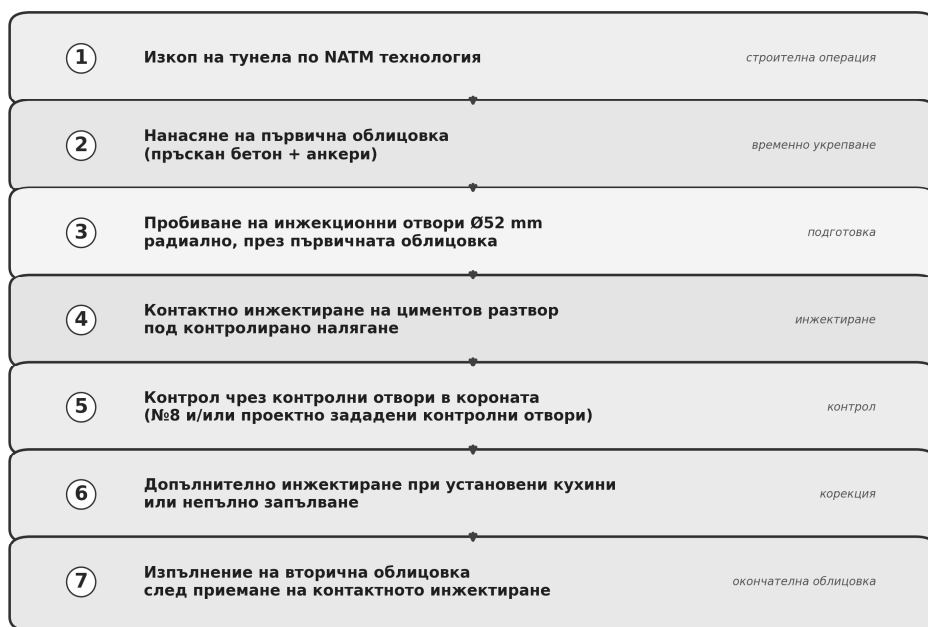
Контактното инжектиране запълва кухините между облицовката и скалния масив (Henn, 2003; FHWA, 2025). Изпълнява се **преди** полагането на вторичната облицовка (Lorenz & Galler, 2015).



Фигура 1. Радиално разположение на инжекционните отвори (напречен разрез)

Фигура 1 представя радиалното разположение на инжекционните отвори в напречно сечение на тунела съгласно проектната документация. Отворите №1–№7 са разположени радиално по периферията, а контролният отвор №8 — в горната част на свода (ъгъл 90°). Диаметърът на отворите е 52 mm.

Фигура 2 илюстрира технологичната последователност на контактното инжектиране в седем етапа: (1) изкоп по NATM, (2) нанасяне на първична облицовка, (3) пробиване на инжекционни отвори Ø52 mm радиално, (4) инжектиране под налягане, (5) контрол на качеството чрез контролни отвори, (6) допълнително инжектиране при необходимост, (7) изпълнение на вторична облицовка.

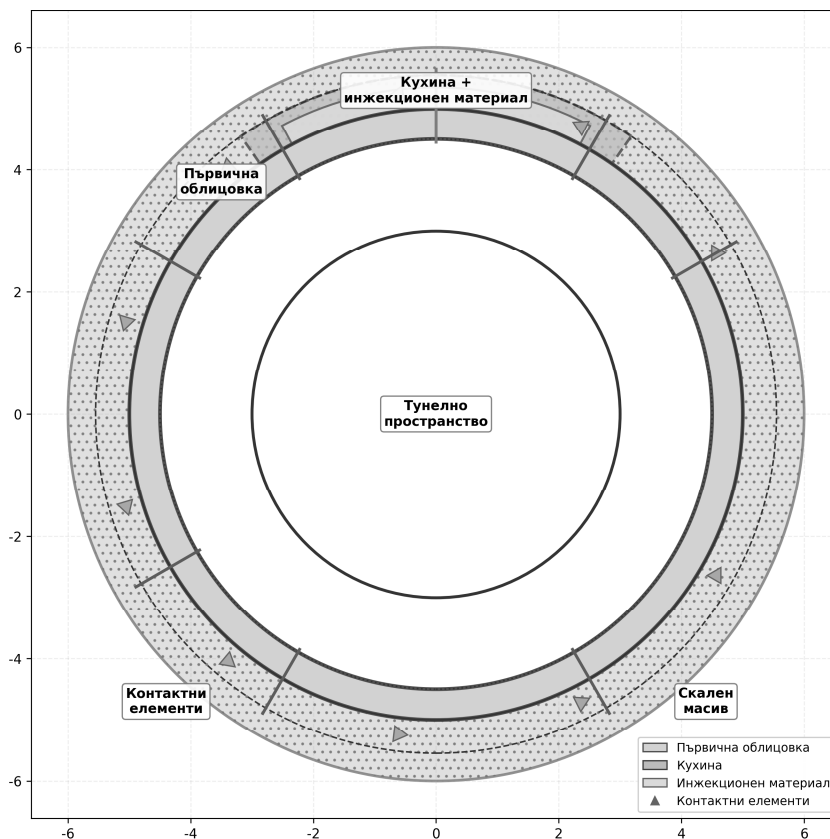


Фигура 2. Технологична последователност на контактното инжектиране

3. Числени модели и анализ

3.1. Значение на численото моделиране

Числените методи позволяват количествена оценка на влиянието на кухините, оптимизация на параметрите на инжектирането, прогнозиране на дългосрочното поведение (Liu et al., 2022; Salehi et al., 2025).



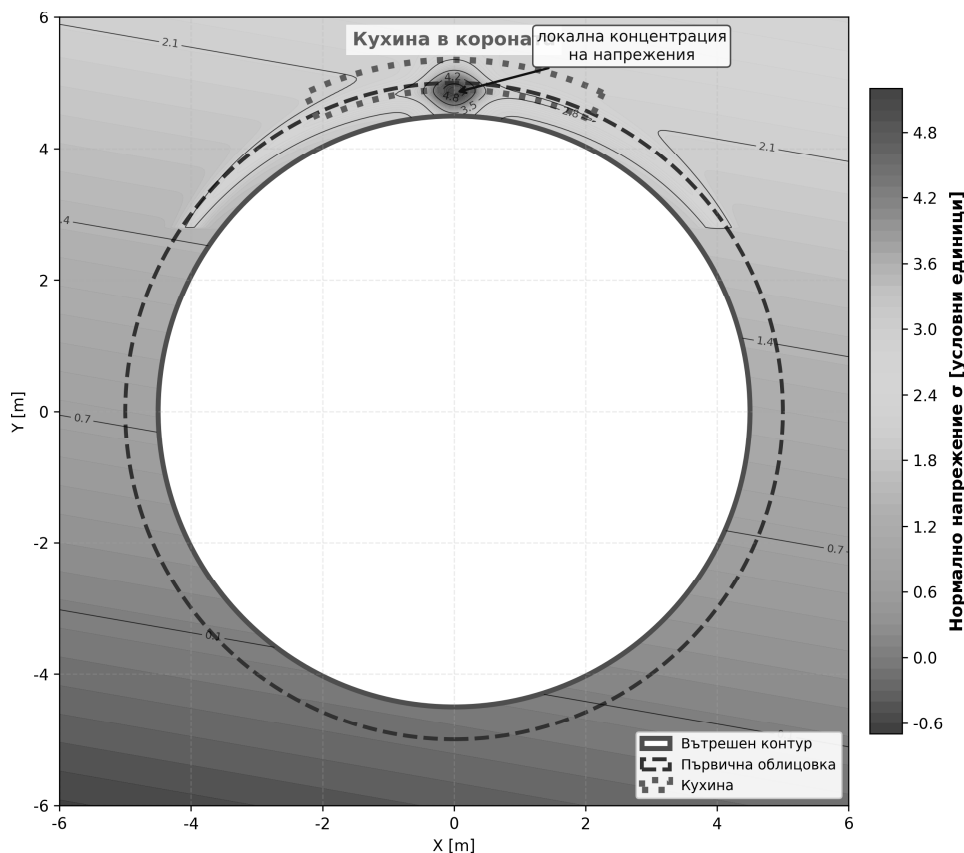
Фигура 3. Схема на числения модел за анализ на кухини зад облицовката

Фигура 3 представя схема на числения модел с концентричните слоеве: тунелно пространство, първична облицовка, зона на инжектиране и скален масив. В горната част на свода е маркирана кухина, а по периферията са разположени контактни елементи (Liu et al., 2022; Salehi et al., 2025).

3.2. Методология на числения анализ

Методологията включва: разработване на модели за различни класове скала, свързани хидро-механични анализи, симулиране на NATM строителство, моделиране на кухини и дългосрочно поведение (Lee et al., 2025; Liu et al., 2022).

3.3. Резултати от числени изследвания



Фигура 4. Разпределение на напреженията около кухина в горната част на свода (симулация)

Фигура 4 показва разпределението на напреженията около кухина в горната част на свода (Yang & Xue, 2020). Наблюдава се концентрация на напрежения в зоните около кухината.

Кухините водят до: промяна от аксиален натиск към огъващи моменти, концентрация на напрежения, намаляване на носимоспособността до 62% (Lee et al., 2025). Критични параметри: периферна дължина над 60° води до съществено увеличение на усилията; кухините в свода са най-критични.

Обратното инжектиране значително подобрява поведението (Salehi et al., 2025; Liu et al., 2022).

4. Анализ на международната практика

Контактното инжектиране е утвърдена стандартна процедура в международната практика. В австрийската школа, където възниква NATM, ранните приложения регистрират деформации в участъци с филити и милонити (Rabcewicz, 1964), а последващото запълване на кухините значително подобрява работата на носещата система (Lorenz & Galler, 2015). В САЩ FHWA и USACE регламентират

контактното инжектиране като стандартна процедура, ограничавайки максималното налягане до около 0,21 MPa над хидростатичното и изисквайки минимална якост на разтвора от 500 psi на 28-ия ден (FHWA, 2025; USACE, 2024; AUA, 2003).

В корейската практика кухините се разглеждат като основна причина за деформации, поради което действащите указания препоръчват плътното им запълване (Kim & Yoon, 2016; Lee et al., 2025; KEC, 2020; KR, 2021); в Япония, където кухините водят до разхлабване на терена и слягания, инжектирането се изпълнява системно (JSCE, 2016). Отечественият опит потвърждава актуалността на проблема: при обследване на тунел „Витиня“ (1985) са установени каверни между скалата и облицовката (Жечев, 2018), което подчертава значението на превантивните мерки, включително контактното инжектиране.

5. Конкретен казус — тунели №11, №12 и №13 в участъка костенец–септември

5.1. Обща характеристика

Тунелите са част от модернизацията на жп линия София–Пловдив, участък Костенец–Септември (км 75+840 до км 88+258). Изградени са по NATM с първична облицовка от пръскан бетон, подсилен с анкери и стоманени елементи. Вторичната облицовка е монолитна бетонова.

5.2. Геоложки условия

Актуализираните проучвания разкриват участъци със значителна напуканост, повишена водонаситеност и локална кухинност (Bieniawski, 1989). Подземните води могат да поддържат кухини или да предизвикват ерозия (Lee et al., 2025).

5.3. Технология на контактното инжектиране

Предвидено е контактното инжектиране чрез система от инжекционни отвори с диаметър 52 mm (Фигура 1). Отворите се пробиват радиално през първичната облицовка, а контролният отвор се разполага в горната част на свода (чертеж KS-DD-2-T11-CS-0032-R0).

5.4. Инженерна обосновка

Необходимостта произтича от: актуализирани геоложки данни, технологични ограничения на пръскания бетон, наличие на подземни води, изисквания за дългосрочна надеждност и международна практика (Lee et al., 2025; Yang & Xue, 2020; Henn, 2003; FHWA, 2025).

5.5. Изчислителни параметри

5.5.1. Инжекционно налягане

Максималното инжекционно налягане се определя от носимоспособността на първичната облицовка (Илов, 2009). Съгласно методиката за проектиране на тунелни облицовки при локален натиск на инжектирания разтвор, максималното налягане се определя от условието:

$$P_{max} = \frac{2 \cdot f_{ct} \cdot t}{D} \quad (1)$$

където:

- f_{ct} – якост на опън на пръскания бетон ($\approx 2\text{--}3$ MPa)
- t – дебелина на облицовката ($\approx 0.25\text{--}0.30$ m)
- D – диаметър на тунела (≈ 10 m)

Това дава $P_{max} \approx 0.12 - 0.18 \text{ MPa}$ за този случай. На практика обаче, съгласно американските стандарти, налягането се поддържа в диапазона 0.5–0.8 MPa, контролирано от дебита и обратната връзка от контролния отвор, като не надвишава 30 psi ($\approx 0.21 \text{ MPa}$) над хидростатичното налягане.

5.5.2. Обем на инжектиране

За тунел с диаметър $D=10 \text{ m}$ и дължина на участъка $L=12 \text{ m}$ (една кампада), при средна дебелина на кухината $t=0.05 \text{ m}$, ориентировъчният обем на инжектиране се определя като:

$$V = \pi \cdot D \cdot L \cdot t = \pi \cdot 10 \cdot 12 \cdot 0.05 \approx 18.85 \text{ m}^3 \quad (2)$$

Този обем служи за базова оценка, като реалният разход зависи от степента на напуканост и кухинност на скалния масив.

6. Аналитични изводи

Таблица 1

Параметър	Влияние върху конструкцията	Количествена оценка
Кухина с периферна дължина $> 60^\circ$	Съществено увеличение на усилията	Увеличение до 62% (Lee et al., 2025)
Кухина в сводовата част	Най-критично местоположение	Най-голямо влияние (Yang & Xue, 2020)
Липса на обратно инжектиране	Намалена носимоспособност	Значително влошаване (Salehi et al., 2025)
Наличие на подземни води	Ускорена деградация	Изисква свързан анализ (Liu et al., 2022)

Икономически съображения: Превантивното инжектиране е икономически обосновано. 80% от тунелите с традиционни методи проявяват дефекти, особено кухини (Lee et al., 2025). Опитът от тунел „Витиня“ потвърждава това (Жечев, 2018).

7. Изводи и препоръки

7.1. Основни изводи

1. Кухините зад тунелната облицовка са идентифициран фактор за намаляване на стабилността (Yang & Xue, 2020; Lee et al., 2025).
2. Контактното инжектиране е утвърдена мярка за запълване на кухините (Henn, 2003; FHWA, 2025).
3. Международните стандарти препоръчват контактното инжектиране при неблагоприятни условия (Rabcewicz, 1964; FHWA, 2025; JSCE, 2016; KEC, 2020).
4. За поддържане на стабилността, плътността на инжектирането следва да е над 80% (Lee et al., 2025).
5. Контактното инжектиране се изпълнява преди вторичната облицовка, с отвори радиално през първичната, контролен отвор в горната част на свода (Lorenz & Galler, 2015; Henn, 2003).

7.2. Препоръки

1. Контактното инжектиране да се разглежда като стандартна мярка при NATM в сложни условия (FHWA, 2025; USACE, 2024).
2. Проектирането да се базира на актуализирани геоложки данни и числени анализи (Lee et al., 2025; Salehi et al., 2025).
3. Качеството да се контролира чрез контролни отвори и геофизични методи (Henn, 2003; FHWA, 2025).
4. Изпълнението да се документира и включи в мониторинга през целия експлоатационен живот (Костов, 2015).
5. При наличие на подземни води — инжектиране с нарастващо налягане и контрол на изтичането (Liu et al., 2022).
6. Ранно планиране на инжектирането в проектната документация.

7.3. Насоки за бъдещи изследвания

1. Разработване на нови инжекционни материали.
2. Приложение на изкуствения интелект за прогнозиране на поведението на системата.
3. Подобряване на числените модели за дългосрочни процеси (Salehi et al., 2025; Liu et al., 2022).
4. Разработване на стандартизирани методи за оценка на качеството на инжектирането.

Библиография

- [1] AUA (2003). *Backfill and Contact Grouting of Tunnels and Shafts*. Ed. R.W. Henn.
- [2] Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley.
- [3] FHWA (2025). *NHI-10-034 — Civil Road Tunnel Design*. USA.
- [4] JSCE (2016). *Japanese Tunnel Standard Specification — Shield Method*.
- [5] KEC (2020). *Road Design Guidelines — Tunnel Section*.
- [6] Kim, S.H., & Yoon, J.S. (2016). *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*.
- [7] KR (2021). *KRC-12040 Concrete Lining Standard*.
- [8] Lee, H.J., et al. (2025). *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 27(1), 23-43.
- [9] Liu, X., et al. (2022). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 120, 104290.
- [10] Lorenz, G., & Galler, R. (2015). *Geomechanics and Tunnelling*, 8(5), 456-467.
- [11] Rabcewicz, L. (1964). *Water Power*, 16(11), 453-457.
- [12] Salehi, M., et al. (2025). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 178, 108432.
- [13] USACE (2024). *EM 1110-2-2901 — Tunnels and Shafts in Rock*.
- [14] Yang, Y., & Xue, Y. (2020). *Symmetry*, 12(10), 1733.
- [15] Жечев, Н. (2018). *Int. Geomechanics Conference, Varna 2018*.
- [16] Илов, Г. (2009). *Тунелно строителство*. Техника.
- [17] Костов, М. (2015). *Експлоатация на тунели*. Техника.

ТЕХНОЛОГИЯ, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ НА СТРОИТЕЛСТВОТО НА НОВАТА МЕТРОСТАНЦИЯ „ПАНЧО ВЛАДИГЕРОВ“, ЧАСТ ОТ ПЪРВИЯ ИНТЕРМОДАЛЕН ТРАНСПОРТЕН ХЪБ В ЗАПАДНАТА ЧАСТ НА ГР. СОФИЯ

гл. ас. д-р инж. Борис Василев
e-mail: radamant@abv.bg

РЕЗЮМЕ

Първият истински Интермодален Транспортен Хъб в гр. София се планира да бъде изграден в западната част на града и да включва изграждането на нови метростанция, ж.п. спирка и автогара. Тази статия има за цел да представи конкретните проектни решения, технология, организация и методи за управление при изграждането на новата Метростанция „Панчо Владигеров“, като част от Интермодалния Хъб. Ще бъдат представени предизвикателствата, проблемите и решенията при изграждането на трасето и станцията, без спиране на движението на влакове по Първи и Втори Метродиаметър, както и перспективите за цялостно завършване на Интермодалния Транспортен Хъб.

Ключови думи: Интермодален Транспортен Хъб; Гр. София; Метростанция „Панчо Владигеров“;

TECHNOLOGY, STRUCTURING AND MANAGEMENT OF THE CONSTRUCTION OF THE NEW “PANCHE VLADIGEROV” METRO STATION, PART OF THE FIRST INTERMODAL TRANSPORT HUB IN THE WESTERN PART OF SOFIA

Snr. Asst. Prof. Eng. Boris Vasilev, PhD

ABSTRACT

The first real Intermodal Transport Hub in Sofia is planned to be built in the western part of the city and to include the construction of a new metro station, railway station and bus station. This article aims to present the specific design solutions, technology, structuring and management methods for the construction of the new “Pancho Vladigerov” Metro Station, as part of the Intermodal Hub. The challenges, problems and solutions for the construction of the metro tunnel and the metro station, without stopping the working of metro trains on the First and Second Metro Diameter, as well as the prospects for the final completion of the Intermodal Transport Hub will be presented.

Keywords: Intermodal Transport Hub; Sofia; “Pancho Vladigerov” Metro Station;

Изграждането на новата метростанция „Панчо Владигеров“ е един от ключовите инфраструктурни проекти в развитието на Софийското метро. Станцията се изгражда между съществуващите метростанции „Сливница“ и „Обеля“ по линиите М2 и М4 и има за цел да подобри транспортното обслужване на жителите на кварталите „Обеля“, „Модерно предградие“ и западните входи на столицата (Фиг. 1). Строителството започва в края на 2023 г. като част от програмата за разширяване на метрото. Проектът предвижда изграждането на модерна подземна станция, която ще бъде интегрирана с железопътния транспорт и автобусните линии. По този начин метростанция „Панчо Владигеров“ ще се превърне в четвъртата интермодална метростанция в София и част от първия Интермодален хъб в западната част на града, осигуряваща удобна връзка между различните видове обществен транспорт.

Една от основните цели на проекта е да улесни придвижването на жителите в северозападната част на града и да намали автомобилния трафик по входно-изходните артерии на София. Очаква се новата станция да обслужва около 12 000 жители на кварталите „Обеля“ и „Модерно предградие“, като същевременно ще предостави удобна връзка с железопътните линии към Волюяк, Драгоман,

Кюстендил и Божурище. Според прогнозите проектът ще допринесе за намаляване на автомобилния поток към центъра на града с няколко хиляди автомобила дневно.

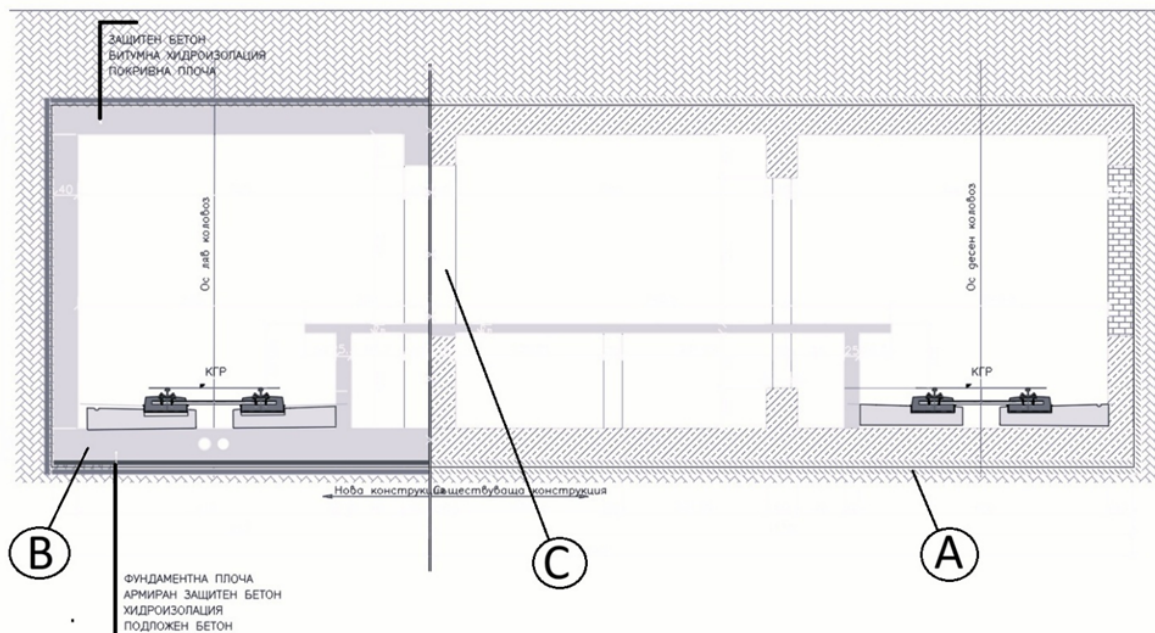


Фигура 1 – Карта на района
„А“ – Служебна връзка с Депо „Обеля“;
„В“ – Съществуващ двупътен тунел престроен в метростанция;

Успоредно с изграждането на новата интермодална метростанция Столична община обмисля и изграждането на Автогара която да поеме междуселищния автобусен трафик в направление запад.

Метротрасето започва от съществуващ глух коловоз в метродепо „Обеля“. Следва покрит наземен участък – коловоз на безбаластов релсов път върху стоманобетонова плоча. Трасето продължава с покритата рампа, изградена от три типа конструкция Тип 1А със стени с варираща височина изградена в открит котлован с откоси. Тип 1Б със стени с варираща височина изградена в укрепен котлован с укрепване от пилоти с обединяващи греди и разпонки. Тип 1В със стени с варираща височина изградена също в укрепен котлован с укрепване от пилоти с обединяващи греди и разпонки. Трасето продължава с тунел, изграждан по открит способ (Тип 2), изграждан в укрепен котлован с укрепване от пилоти с обединяващи греди и разпонки. След това трасето продължава с тунел по „Милански“ метод (Тип 3), дебелината на миланската (покривната) плоча е 60 см, укрепването се извършва със шлицови стени с дебелина 60 см и дълбочина около 10 м. Тунелът по Милански способ се изгражда под съществуващата линия София – Кюстендил на БДЖ, като не се предвижда спиране на движението на влаковете. Затова е предвидена етапност в строителството, като укрепването в напречно направление между етапите ще се осъществи посредством пилоти (Фиг. 2).

посока МС „Обеля“ и касова зала и подходи в посока МС „Сливница“. Подходите към метростанцията са ситуирани в отделна конструкция: до тунела по открит способ; под жп. линията, до тунела по „Милански“ метод и в края на метростанцията в посока МС „Сливница“. Подходите осигуряват връзката на метростанцията с новопроектирана жп. спирка (по друг проект). Предвидени са три входа/изхода със стълбища и асансьори, като на два от тях има и ескалатори, съответно от северната и южната страна на жп. спирката, както и един аварийен изход. Новата метростанция е с РЗП 4 100м².



Фигура 3 – Напречен разрез през новата метростанция;
„А“ – Съществуващ двупътен тунел;
„В“ – Нова конструкция на служебната връзка;
„С“ – Зид подлежащ на разбиване;

Новата метростанция е с подземна стоманобетонна конструкция. Разделена е на общо 10 секции с различна технология на изпълнение. В участък А1 и А2, се предвижда премахването на съществуващата междинна стена. Поради недостатъчната носимоспособност на съществуващата покривна конструкция е необходимо тя също да се премахне. Предвижда се изграждането на нова покривна плоча с дебелина 60см, която да стъпва върху съществуващите ограждащи стени (Фиг. 4). В участък А3 е преминаването под жп линията. Съществуващата конструкция представлява стоманобетонни шлицови стени, върху които стъпва покривната плоча. В проектното решение се предвижда изграждането на перонна плоча, която стъпва върху съществуващата стоманобетонна фундаментна плоча посредством насадени стени и колони. Предвижда се и направата на отвор към новоизградения южен изход през шлицовата стена. В участъка Блок 1 – Блок 4 се предвижда запазването на съществуващата метроконструкция. Съществуващата конструкция представлява двуколовозов метротунел. Сечението на конструкцията е кутиообразно, като надлъжните стени са съставени от носещи стоманобетонни греди и колони. В този участък в съществуващата конструкция се предвижда изграждането на нова перонна плоча, която ще бъде подпряна върху насадени колони и стени. Те ще бъдат захванати към съществуващата стоманобетонна фундаментна плоча, като предварително ще бъдат заложили фусови армировъчни пръти посредством химически анкери в съществуващата конструкция. Левият коловоз се предвижда да бъде разположен в самостоятелен едноколовозов тунел. Новата стоманобетонна конструкция от дясната страна ще бъде подпряна на

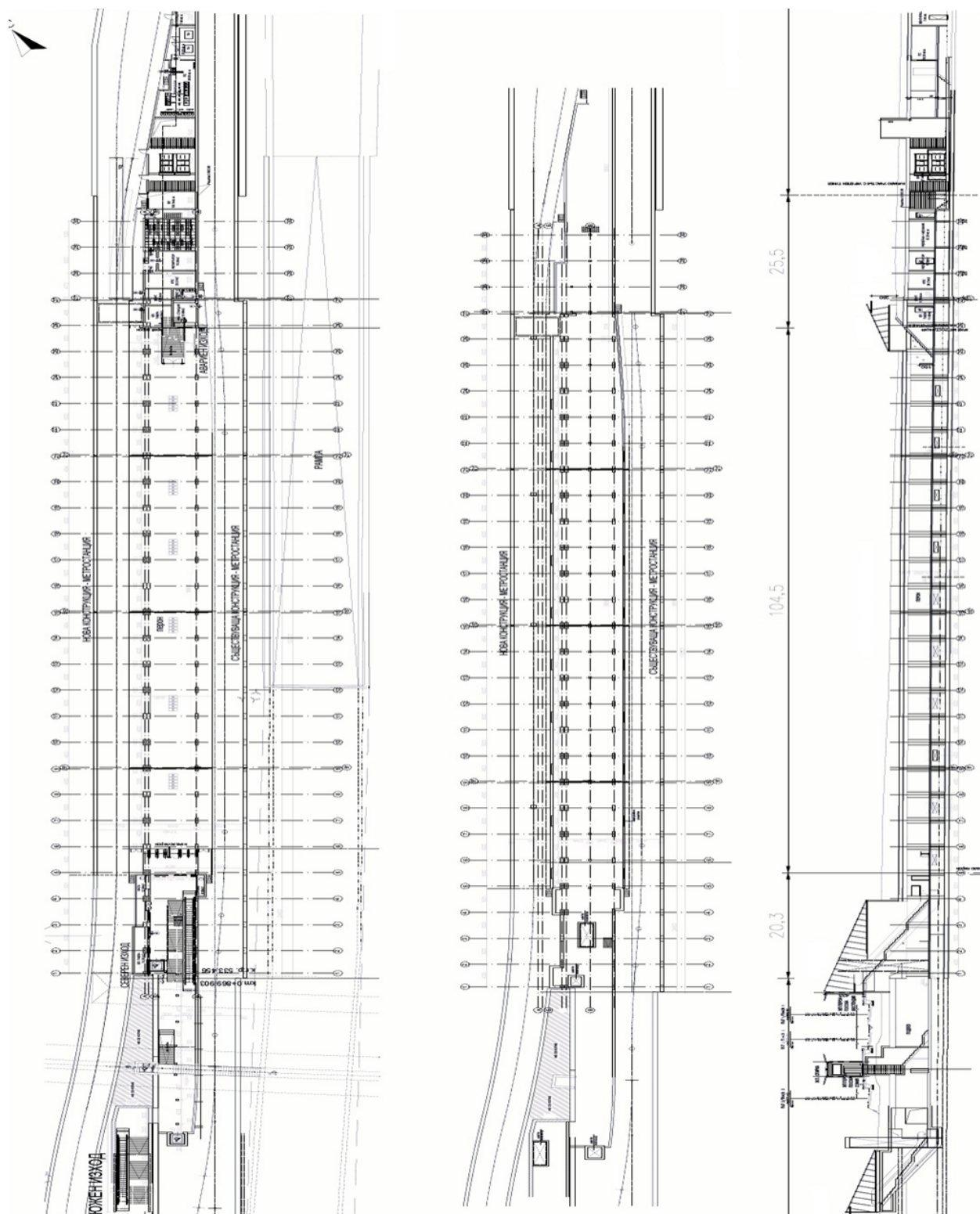
стоманобетонни колони, а от другата страна - на стоманобетонна непрекъсната контурна стена. В тази конструкция ще бъде изградена и частична перонна плоча.

В участъкът на Блок 5, Блок 6, В1 и В2 се предвижда премахването на цялостната покривна конструкция на съществуващия двуколовозов метротунел, както и премахването на вътрешните стоманобетонни стени в някои участъци. Върху конструкцията се изгражда нова покривна плоча с дебелина 70см, която ще стъпва върху съществуващата крайна стоманобетонна стена от страната на десния коловоз, както и върху новоизградената стена, която е разположена на разстояние от 50см от съществуващия метротунел. От страната на левия коловоз се предвижда и разширяването на съществуващата фундаментна плоча, като армировъчните пръти от новата част ще бъдат свързани със съществуващите посредством фусови армировъчни пръти, заложили посредством система за химически анкери в съществуващата конструкция. От страната на левия коловоз се предвижда изграждането на вътрешна конструкция (външна стоманобетонна контурна стена от страната на левия коловоз, която ще бъде разположена до новоизградената шлицова стена). Новата покривна плоча ще бъде изградената над нивото на съществуващата покривна плоча. След метростанцията се изгражда участък за връзка със съществуващия метротунел, чрез значителни реконструкции на съществуващите тунелни участъци и тяхното разширяване. В участъка се предвижда премахването на някои места на междинните стени на тунела, както и на крайната външна стена от страната на левия коловоз, а в зоната на десния коловоз се запазва стената на съществуващия тунел. Предвижда се изграждането на обща покривна плоча която да стъпва върху част от съществуващите стени и новоизградените стени.

Още с подготовката на тръжната документация стана ясно, че реализацията на този проект ще бъде истинско предизвикателство. Строителството на служебната връзка и реконструкцията на съществуващия двупътен тунел в метростанция с островен перон се явява „кръпка“ в съществуващата метромережа.

Респективно тук не могат да бъдат използвани утвърдените организационни и технологични модели, наложени при строителството на новите метро участъци, защото всички те се отнасят за изграждането на продължения на метротрасе, а не за реконструкция на съществуващата инфраструктура. Основно изискване в тръжната процедура беше строителството да не прекъсва движението на влаковете по I-ви и II-ри метродиа метър. Всичко това доведе до нуждата на разделяне на строителството на фази, всяка от които със собствена специфика, като финалът на всяка фаза дава старт на следващата. Друга основна особеност на Проекта беше наличието на над 20 различни електрически системи за хранване, сигнализация и диспечерски връзки, които се налага да бъдат преработвани до степен на пълна подмяна през всяка от фазите на реализация на строителството. От мениджърска гледна точка допълнително усложнение при реализация на строителството беше и обвързаността на проекта с изграждането на новата спирка на влаковете по направление София – Волуяк, преминаването на конструкциите под съществуващите коловози на НКЖИ без да се спира движението на влаковете и съвместяването на строителството на двете съоръжения, менажирани от различни Възложители. Сложността на Проекта и нуждата от вземане на комплексни технологично – организационни решения наложи привличането на широк кръг от наложени проектант по всички проектни части, работели пряко при разширенията на I-ви и II-ри метродиа метър, включително и участвали в проектирането на съществуващия участък подлежащ на реконструкция.

Тези проектант Изпълнителят на строителството включи в екипа си по проектиране. Сформира се един мултидисциплинарен Екип за реализация на Проекта от опитни инженери и проектант с представители на Възложителя, Инженер – Консултант и Изпълнителя, който да разработи подробна организация на строителство, така че да минимизира очакваните проблеми и да гарантира успешното завършване на Проекта в срок и с изискваното качество.



Фигура 4 – План и разрез на новоизгражданата метростанция „Владимир Вазов“;

В следващите редове накратко ще бъдат описани организационно – технологичните процеси изпълнявани през всяка фаза на реализация.

Фаза 1 – може би най-важната и сложна фаза на реализация започва с преместване и укрепване на съществуващите инженерни мрежи. Ключов момент е преминаването на конструкцията на служебната

връзка под коловозите на НЮЖИ. Това преминаване беше изпълнено по „Милански“ („Топ-Даун“) метод с вертикално укрепване чрез шлицови стени и покривна плоча. Чрез работа на технологични „прозорци“ бе осигурена непрекъснатата работа на ж.п. инфраструктурата. Успоредно с това бяха изградени и конструкции на откритата рампа и тунела в укрепен котлован на служебната връзка с Депо „Обеля“. Поради заложеното в търга условие ул. „Обелско шосе“ да не бъде спирана по време на строителството, част от тунела се наложи да бъде препроектиран като „Милански“ („Топ-Даун“). След това бе реализиран строежът на новата конструкция на Блокове 1 – 4 на новата метростанция (Фиг. 3).

Фазата продължи с прекъсването на движението на метроваковете по западния коловоз на съществуващия метротунел и преустройството и премахването на системите свързани със захранването и движението на влакове по този коловоз. Продължи се с разбиването на западната стена на съществуващия тунел и разрушаването и извозването на конструкциите на релсовия път. Ключов момент се оказа изграждането на новата конструкция на Блокове 5 -7 на новата метростанция защото съществуващата конструкция трябваше да бъде осигурена против завъртане и хлъзгане, чрез използването на изливни пилоти крепящи дъното на съществуващия тунел.

Успоредно със завършването на конструкцията, започна полагането на релсовия път и по-специално два броя стрелки, осигуряващи включването на новата служебна връзка в основното трасе на метрото. Успоредно с това се изпълни метална пасерелка за движение на машинистите в участъка на тунела непосредствено преди МС „Обеля“, като той започна да играе ролята на линеен пункт за престой на влаковете обслужващи II-ри метро диаметър, за да може да се ограничи движението им по съществуващия релсов път между МС „Сливница“ и МС „Обеля“ (зареждането им от и за Депо „Обеля“) само през ноща. След това поетапно се изпълни целия релсов път, контактна релса, покритието на откритите участъци и прокарването и оживяването на всички системи за захранване, движение и диспечерски връзки касаещи работата на новата служебна връзка.

В обхвата на новата метростанция се реализираха по-голямата част от перонната плоча, конструкциите на входовете, изграждането на служебните помещения, както и голяма част от архитектурно – довършителните работи.

Тук е мястото да се отбележи, че ключов момент за целия проект се оказа осигуряването на изпреварваща проектна готовност, особено по частите касаещи автоматиката и телемеханиката и диспечерските връзки. Това се оказа ключово за поръчката и реализирането на доставките на много материали и изделия произвеждани в заводи в Украйна, което до последно бе проблематично заради войната там.

Фазата приключва с пускането в експлоатация на новата служебна връзка с Депо „Обеля“ и зареждането на влаковете по II-ри метродиапетър изцяло оттам. Очакваното ѝ приключване е планирано за края на месец октомври 2026 г.

Фаза 2 – през тази фаза предстои да се спре движението на влаковете по съществуващия релсов път между МС „Сливница“ и МС „Обеля“, като същевременно се разруши съществуващия коловоз и се изпълни оставащата част от конструкциите на перонната плоча.

През тази фаза е планирано изграждането на новия релсов път в съществуващия тунел, вкл. стрелката свързваща го със оставащия западен коловоз по посока МС „Сливница“, преустройствата на всички системи в този тунел, вкл. контактна релса и пр. Осигуряването на постоянно захранване към ПС – то (Понизителната Станция) на новата МС „Панчо Владигеров“ ще се осигури от МС „Сливница“, МС „Обеля“ и ТПС 18 (Тягова Понизителната Станция) в Депо „Обеля“.

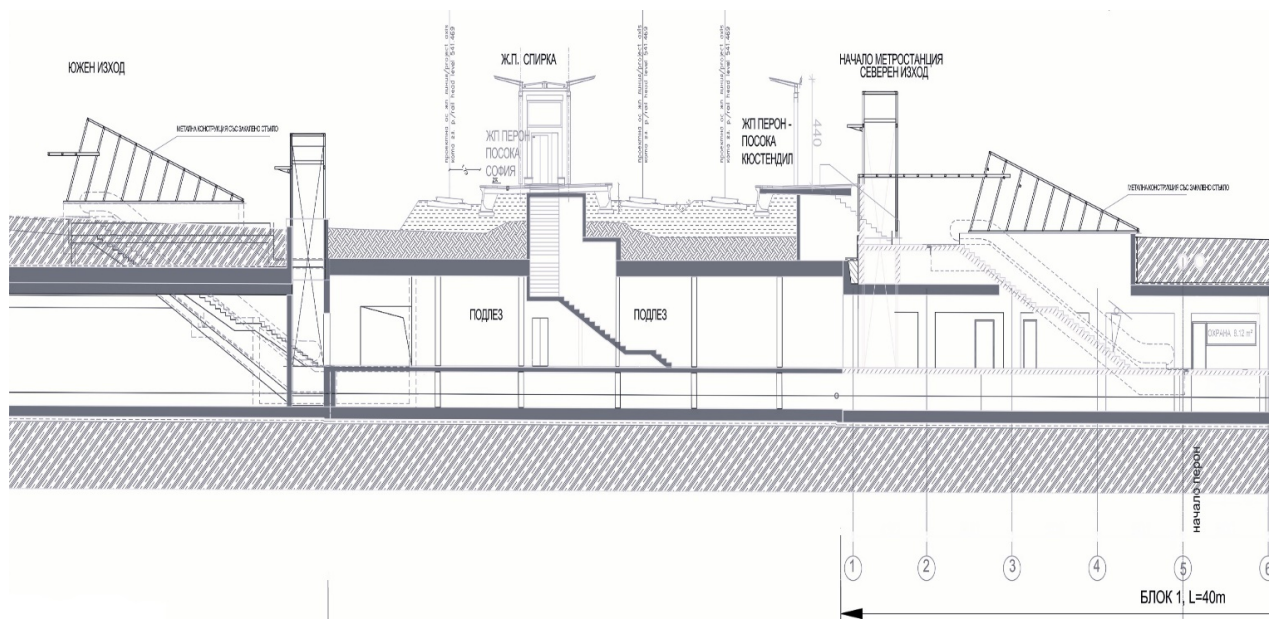
Същевременно на новата МС „Панчо Владигеров“ ще се довършат СМР по архитектурно-довършителните работи, системите в служебните помещения и входовете, както и монтажът на всички съоръжения.

Фаза 3 – през тази фаза е планирано довършването и оформлението на околните пространства и вертикалната планировка около МС „Панчо Владигеров“.

Съществено значение ще имат и тестовите на всички системи (над 20 – броя) за движение на влаковете, единичните и комплексни изпитания, шлайфането на новия релсов път, пускането на движението на влаковете и по двата коловоза и цялостното импортиране на цялата „кръпка“ в системата

на I-ви и II-ри метродиамер, което само по себе си е сложен и отговорен процес и не трябва да бъде подценявано.

Въвеждането в експлоатация на новата служебна връзка с Депо „Обеля“ и новата МС „Панчо Владигеров“ е планирано за лятото на 2027 година.



Фигура 5 – Разрез на МС „Панчо Владигеров“ с показана ж.п. спирката на НКЖИ;

За съжаление в този проект някои външни фактори попречиха за комплексното завършване на Интермодалния хъб на западна София. През 2026 г. стана ясно, че НКЖИ не е включила изграждането на новата гара „Обеля“, вкл. новата ж.п. спирка над МС „Панчо Владигеров“ в краткосрочната си финансова програма (Фиг. 5). Инвестиционните намерения на Столична Община за изграждане на автобусна гара също към момента са неясни. Това само по себе си означава, че МС „Панчо Владигеров“ ще бъде въведена в експлоатация без да има интермодална свързаност с друг вид транспорт. Реално новата метростанция ще се използва от жителите на ж.к. „Обеля“ и посетителите на хипермаркетите в южна посока до построяването на ж.п. спирката.

В заключение, ключови за успешната реализация на подобен сложен инфраструктурен проект са: мултидисциплинарния Екип от специалисти ръководещи проектирането и строителството, изпреварващата проектна готовност водеща до гарантиране на доставките на критично важни материали и изделия, както и имплементирането на широк кръг от познати организационни модели за управление и технологии на строителство.

По отношение на строителството на различни части от един интегриран проект, какъвто е Интермодалния Хъб, би трябвало да бъде приложен един качествено нов управленски подход, гарантиращ участието на всички Възложители по едно и също време и интегрирано управление гарантиращо въвеждането в експлоатация на един завършен инфраструктурен проект, допринасящ чрез завършеността си за повишаването на качеството на транспортните услуги в целия регион.

Използвана литература:

1. Открита процедура за проектиране и строителство на метростанция до ж.п. гара Обеля на линията София - Кюстендил с тунелна връзка с метродепо Обеля – Тръжна документация – „Метрополитен“ ЕАД, гр. София, 2022 г.
2. „Метрото в София - Аспекти на развитие“ – проф. д-р инж. Стоян Братоев, гр. София, 2026 г.

ПРАКТИЧЕСКИ ПОДХОД ЗА ДИСТАНЦИОННА ИНСПЕКЦИЯ И МОНИТОРИНГ В ТЕСНИ ПОДЗЕМНИ МИННИ ИЗРАБОТКИ ЧРЕЗ КОМПАКТНИ СИСТЕМИ ЗА ЛАЗЕРНО СКАНИРАНЕ

Марко Марков
“Геотехинженеринг” ООД, София, България, markomarkov8@abv.bg

A PRACTICAL APPROACH TO REMOTE INSPECTION AND MONITORING OF NARROW UNDERGROUND MINE WORKINGS USING COMPACT LASER SCANNING SYSTEMS

Marko Markov
“Geotechengineering” LTD, Sofia, Bulgaria, markomarkov8@abv.bg

ABSTRACT

A practical approach for monitoring narrow underground mine workings using compact terrestrial laser scanning systems is presented. Through the integration of multiple sensors, automated real-time tracking and registration of scanning stations is achieved without the need for targets. The integration of point clouds with captured imagery enables the generation of a metrically accurate, colorized virtual model. This allows multidisciplinary teams to perform remote inspection, condition assessment, and monitoring of deformation processes. The proposed approach minimizes fieldwork time, significantly streamlines the surveying process, and enhances occupational safety.

Keywords: Terrestrial laser scanning, Visual-Inertial Odometry, Remote inspection, Underground mine workings

1. УВОД

Съвременното подземно минно строителство и експлоатацията на минни обекти се характеризират с изключителна сложност, като съществува и значителна степен на риск. Осигуряването на устойчивостта на минните изработки и безопасността на персонала, изисква непрекъснат, бърз и прецизен пространствен мониторинг на скалния масив и конструкциите [1]. В исторически план, навлизането и утвърждаването на технологиите за наземно лазерно сканиране (TLS) открива нови хоризонти в акумулирането на тримерни пространствени данни, позволявайки детайлно дигитално представяне на минни обекти, архитектурни и инженерни съоръжения [2], както и високоточен контрол на техните деформационни процеси, във времето [3].

Технологичният напредък през последното десетилетие доведе до намаляване на габаритите на хардуерните компоненти и появата на изключително компактни сканиращи системи, както и до бурното развитие на самото лазерно сканиране [4]. Важно е да се отбележи обаче, че тази технологична еволюция по никакъв начин не означава отпадане на необходимостта от използването на “класическите”, по-големи и мощни лазерни скенери. Мощните инструменти, с голям обхват на действие и субмилиметрова точност, остават абсолютно незаменими при изпълнението на специфични задачи – например заснемане на големи открити рудници, обемни подземни камери или мониторинг на мащабни хвостохранилища [5]. Напредъкът в съвременната геодезия и маркшайдерството, в частност, се изразява не в замяната на една технология с друга, а в тяхното надграждане чрез интеграция на допълнителни сензори. Именно тук ролята на специалистите в тези две области става по-ключова от всякога. Инженерът е този, който, познавайки в дълбочина възможностите на апаратурата, спецификата на обекта и изискваната точност, трябва да избере оптималния набор от инструменти, за успешното решаване на конкретната задача.

Едно от най-големите предизвикателства в минното дело остава заснемането на тесни, труднодостъпни и опасни подземни изработки, където времето за престой на човешкия фактор трябва да бъде сведено до минимум. За решаването на този проблем, съвременните компактни системи предлагат иновативен мултисензорен подход. Те комбинират класическия LiDAR сензор със сензори за

визуално ориентиране и инерциални измервателни единици (IMU) за прецизно определяне на пространствената ориентация [6], по-известни като технологии за визуално-инерциална одометрия (VIO – Visual-Inertial Odometry). VIO технологията използва вградени камери за проследяване на движението на скенера в пространството, спрямо околната среда в реално време, заедно с IMU, което позволява автоматична взаимна регистрация на станциите, без необходимост от изграждане на класически опорни геодезически мрежи от предварително фиксирани марки [7].

Целта на настоящия доклад е да представи една практически подход за създаване на дигитални модели на тесни минни изработки, чрез използване на компактни сканиращи системи. Този подход позволява обединяване на метричната информация с изображения (заснети по време на измерването), улеснявайки дистанционната инспекция, картирането на скални и геоложки образувания [8], създавайки виртуална среда, с реални цветове. По този начин става възможно вземането на фактически обосновани решения, без необходимост от физическо присъствие на целия инженерен екип в рисковата зона.

2. Технологични възможности на съвременните компактни сканиращи системи

Развитието и практическото приложение на технологиите за лазерно сканиране показват широките им възможности за решаване на сложни инженерни задачи. Въпреки това, приложението на “конвенционалните” стационарни лазерни скенери в тунели, или при подземни изработки, често е възпрепятствано от техните габарити, тегло и минимални разстояния за отразяване на сигнала [9]. В отговор на тези ограничения, са разработени ново поколение изключително компактни сканиращи системи, които променят подхода към измерванията в тесни и труднодостъпни пространства.

Фундаменталното предимство на тези системи не се крие единствено в тяхната компактност, а във високото ниво на интеграция между различни сензори и алгоритми за обработка на данни. Съвременните компактни скенери комбинират класическия LiDAR (Light Detection and Ranging) сензор с камери, инерциални измервателни модули (IMU), както и допълнителни навигационни сензори. Подобно на мобилните системи за лазерно сканиране (MTLS), където IMU модулите са основополагащи за определяне на пространствената ориентация в тунелното строителство, или на места със загуба на ГНСС сигнал (“горски тунели”) [6], при компактните стационарни скенери се проследява изменението на наклона и движението на инструмента.

Самостоятелното използване на IMU обаче води до натрупване на грешка (drift), тъй като дори малки грешки, могат да бъдат натрупани при по-продължителни измервания. Надграждането на IMU системите се осъществява, когато се комбинират с независим източник на пространствена информация, например визуални измервания от камери. Именно този принцип стои в основата на визуално-инерциална одометрия, известни като Visual-Inertial Odometry (VIO) [10].

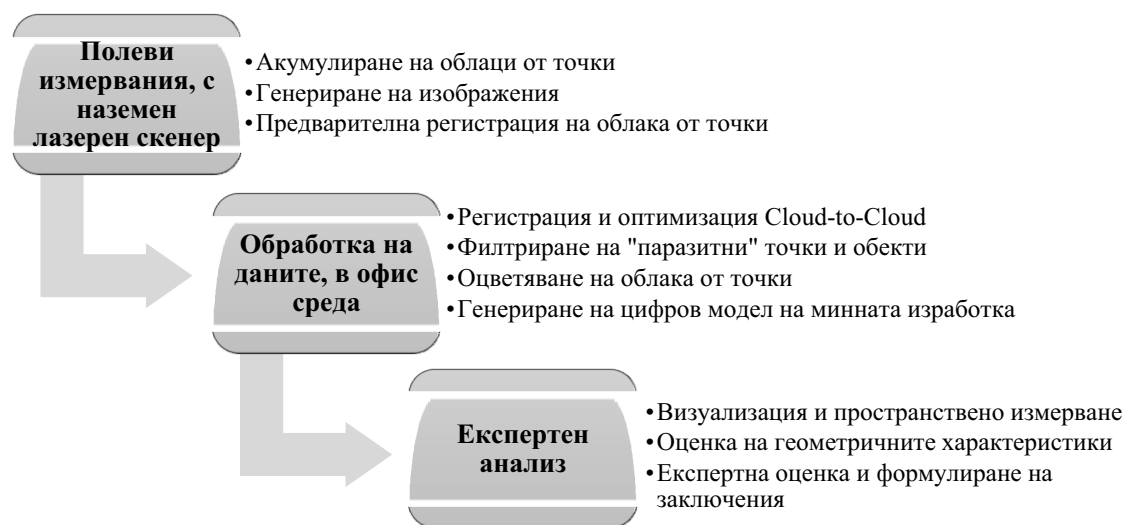
Такъв подход е реализиран от Leica Geosystems в технологията Visual Inertial System (VIS). Тази система използва вградени камери за непрекъснато заснемане на околната среда по време на преместването на скенера от една станция към друга. Чрез алгоритми за “компютърно зрение”, VIS проследява общи характерни точки (feature points) в пространството, като ги комбинира с данните от IMU сензора. Резултатът е изчисляване на относителната траектория и позиция на инструмента в реално време, дори при липса на GNSS сигнал, което е типично за подземните изработки [7].

Освен геометрични данни, компактните системи може да разполагат с HDR (High Dynamic Range) камери. Тези камери позволяват генерирането на 360-градусови панорамни изображения с висока резолюция дори при условия на силно ограничено или изкуствено минно осветление. Възможността за оцветяване на облака от точки в реални цветове е от съществено значение за последващите геоложки и геотехнически анализи на скалния масив [11].

VIO не изисква HDR камера, но една камера с висок динамичен диапазон, може да повиши устойчивостта на визуалната локализация, при резки промени в осветеността, каквито са характерни например за тунели, входи/изходи и подземни изработки [12].

3. Създаване на основа за ефективен мониторинг

Проектирането на един ефективен работен процес изисква ясно дефинирана последователност от взаимосвързани дейности (Фиг. 1). Основната цел на предложената методология е минимизиране на времето за престой на човешкия фактор в потенциално опасните участъци на подземните изработки и прехвърляне на същинската аналитична дейност в безопасна офис среда. За постигането на тази цел, процесът е структуриран в три логически свързани етапа: събиране на пространствени данни на терен, софтуерна обработка и експертен анализ, базиран на реалистично оцветени облаци от точки и достоверен цифров модел на минната изработка, характеризиращ се с необходимата пространствена точност и детайлност.



Фиг. 1: Работна рамка на работния процес

3. 1. Полеви измервания с наземен лазерен скенер

Първият етап от предложената методология включва извършване на полеви измервания с наземен лазерен скенер, чрез които се акумулира необходимата пространствена информация за изследваната минна изработка. Измерванията се извършват от последователно определени позиции на скенера, като броят и разположението на сканиращите станции се съобразяват с геометрията на изследвания участък, обектите, които създават предпоставка за наличие на "мъртви зони" и необходимостта от осигуряване на достатъчно пространствено покритие [13]. Важно е и да няма „презастраховане“, тъй като това от своя страна това може да не даде допълнителна информация, а да доведе до повече „паразитни точки“ и „шум“ в облака от точки. В резултат от всяка сканираща позиция, се получава отделен облак от точки, съдържащ пространствена информация за повърхнините на изработката и разположените в нея обекти. Акумулирането и съвместяването на отделните облаци от точки позволява постепенното изграждане на цялостна пространствена картина на изследвания участък.

Заедно с лазерното сканиране, се генерират изображения, които допълват геометричната информация с визуални данни за заснетата среда. Чрез тях се осигурява възможност за последващо реалистично оцветяване на облака от точки, като по този начин към метричната информация се добавя и информация за визуалните характеристики на повърхнините. Комбинацията от геометрични и визуални данни създава предпоставки за по-пълно пространствено представяне на минната изработка и улеснява последващата интерпретация на резултатите [14].

Съществено предимство на използваната система е възможността за използване на информацията от интегрираните VIO сензори при преместването на скенера между отделните

сканиращи позиции. В процеса на работа, системата самостоятелно определя пространственото отместване между последователните позиции, което позволява извършването на предварителна регистрация (pre-registration) на получените облаци от точки, още по време на полевите измервания [15]. По този начин не се разчита на предварително разположени и пространствено дефинирани визирни цели за определяне на взаимното положение на отделните сканирания.

Предварителната регистрация на станциите има и практическо значение за контрола на пълнотата на заснемането. Получената на терен информация за взаимното положение на последователните сканирания позволява своевременно да бъде установено наличието на непокрити участъци. Това дава възможност за извършване на допълнително сканиране още преди напускане на изследваната минна изработка, без да се налага последващо връщане на екипа в потенциално опасната зона [16].

В резултат от прилагането на описания подход, полевият етап се свежда до пространствено заснемане и контрол в реално време на получената информация, без необходимост от предварително разполагане и фиксиране на визирни цели (марки) или изграждане на специализирана работна геодезическа основа (РГО), за целите на пространствената регистрация на отделните сканирания. Това позволява съкращаване на времето за подготовка и извършване на измерванията и същевременно създава условия за минимизиране на времето на престой на персонала в потенциално опасните участъци на подземните изработки.

3.2. Обработка на данните

Вторият етап се реализира извън рисковата зона и включва обработката на събраните пространствени данни. Чрез регистрация (Cloud-to-Cloud) и предварителната оптимизация, отделните сканирания се обединяват в единна координатна система, след което се извършва филтриране на паразитните точки и обекти. Геометричната информация се допълва с данните от изображенията, чрез което се получава реалистично оцветен облак от точки. На тази основа се генерира триизмерен цифров модел на минната изработка, съчетаващ необходимата метрична точност и пространствена детайлност с реалистично визуално представяне.

3.3. Експертен анализ

Етапът на експертния анализ предполага анализ на експлоатационното състояние на минната изработка, чрез реалистично оцветения облак от точки и 3D цифров модел, без необходимост от физическо присъствие на експерта в изследвания участък. Във виртуална среда могат да се извършват пространствени измервания и оценка на геометрични характеристики, включително размери, площи, обеми, сечения и отклонения от проектни или референтни параметри. В зависимост от поставената задача, цифровият модел позволява контрол на изпълнената геометрия спрямо проектната и анализ на измененията, при наличие на данни от повторни измервания [13, 17]. Сравняването на цифрови модели от различни времеви епохи създава възможност за установяване на пространствени изменения и деформации [4, 8]. По този начин, експертната оценка се извършва в безопасна офис среда, като получените резултати могат да бъдат използвани за оценка на състоянието на изработката и формулиране на необходимите, добре обосновани, експертни заключения.

4. Приложение и автоматизация при анализа на риска

Създаването на тримерен модел на минните изработки е фундаментална основа за внедряване на автоматизирани процеси по управление на риска [18]. Както приетите вече за стандартни, така и компактните системи за лазерно сканиране осигуряват плътна пространствена информация, позволяваща последващ дистанционен анализ. Основната разлика между отделните методологии се състои в оперативността на терен, ограничените изисквания към геодезическата основа и нивото на сензорна интеграция (Таблица 1).

Таблица 1. Сравнителна таблица

Характеристика	Тотална станция / прецизен нивелир	Лазерен скенер	Компактен лазерен скенер с VIO
Точност	Много висока: <i>Нивелир</i> : 0,3–1,0 mm/km (двойно нивелиране) при прецизни класове. <i>Тотална станция</i> : ~1–3" ъглова точност; EDM типично ~1–2 mm + 1–2 ppm.	Висока: Типично ~2–5 mm за разстояния/точки при благоприятни условия; крайната точност зависи от регистрацията, разстоянието и геодезическия контрол.	Средна към висока: ~5–20 mm относителна точност при мобилно сканиране; зависи силно от траекторията, дължината на измерването, VIO/SLAM и геометрията на изработката. За абсолютна точност е необходим геодезически контрол.
Мобилност	Ниска до средна; необходимост от стълбове за принудително центриране за тоталните станции и подходяща видимост.	Средна; обикновено се работи от последователни фиксирани станции и се изисква регистрация между тях.	Висока: Автоматично проследяване на траекторията . Компактните размери улесняват работа в тесни изработки.
Производителност	По-ниска при голям брой точки; измерване на дискретни точки.	Средна към висока - висока плътност на данните, но производителността може да бъде ограничена от броя станции, позиционирането и регистрацията.	Висока; плътна 3D информация се придобива почти непрекъснато, като позицията на скенера се проследява в реално време.
Основни ограничения	Необходимост от видимост и достъп между инструмента и измерваните точки; ограничена пространствена плътност; повече време при по- голям брой точки за заснемане.	Необходимост от подходящи позиции и взаимна видимост; регистрация на отделните сканове; по-големи габарити и при някои системи значителна минимална дистанция на измерване.	Натрупване на drift при продължителни траектории; зависимост от геометрията; необходимост от контрол при изискване за висока абсолютна точност.
Подходящо приложение	Създаване на геодезическа основа, измерване на контролни точки, проследяване на минимални премествания (деформации)	Детайлно 3D заснемане, моделиране и анализ на геометрични изменения.	Бърза инспекция и 3D мониторинг на тесни и труднодостъпни изработки, включително пространствено документиране и анализ на промени.

Наличието на дигитализирана 3D среда отваря възможности за внедряване на алгоритми, касаещи автоматизацията при анализа на получените данни:

- *Автоматизирано разпознаване на структурни дефекти*: Чрез анализиране на интензитета на отразения лазерен сигнал и цветовата информация от изображенията, софтуерните алгоритми могат самостоятелно да идентифицират пукнатини, зони с повишена влажност или корозия по крепежните елементи.
- *Геометричен контрол на контура (As-Built vs. As-Designed)*: Автоматично сравнение между проектния профил на изработката и реално заснетия облак от точки.

- **Пространствено-времеви мониторинг:** При регулярно заснемане, през определени времеви интервали (епохи), алгоритмите за сравнение на повърхности генерират диференциални карти на деформациите. Това позволява ранно регистриране на повреди на тунелния контур и превантивно заздравяване на уязвимите участъци.

5. Дискусия

Предложената методология не следва да се разглежда като универсален заместител на традиционните геодезически методи и използваната до момента апаратура. Изборът на измервателен метод трябва да се определя от характера на конкретната задача, необходимата точност, пространствения обхват и условията на работа. При задачи, изискващи високоточен мониторинг на преместванията на дискретни точки, тоталните станции и прецизната геометрична нивелация запазват своето основно значение. От друга страна, по-големите наземни лазерни скенери предоставят плътна пространствена информация и са особено подходящи при необходимост от детайлно заснемане на големи и геометрично сложни обекти.

В този контекст, предложеният подход с компактен наземен лазерен скенер, с интегрирани VIO сензори, представлява допълващо средство, а не замяна на съществуващите технологии. Неговото предимство е възможността, при подходящи условия, да се съкрати значително времето за полево заснемане и да се ограничи престоят на персонала в рисковата зона, като същевременно се получи набор от данни, с висока пространствена резолюция, подходящ за един детайлен последващ анализ.

Следователно, **ефективността на метода се определя не от универсалното му превъзходство, а от правилния му избор спрямо конкретната измервателна задача.** При подходящо подбрани условия, новото поколение компактни лазерни скенери може да осигури значително по-бързо и качествено получаване на необходимата пространствена информация, като окончателният избор на технология остава инженерно решение на инженера геодезист.

6. Заключение

Предложената методология за дистанционна инспекция на подземни изработки чрез наземен лазерен скенер с интегрирани VIO сензори създава възможност за бързо и детайлно пространствено заснемане и последващ анализ, в безопасна офис среда. Предварителната регистрация и контролът на пълнотата на данните още на терен съкращават времето за работа в рисковата зона, а полученният облак от точки и триизмерен цифров модел осигуряват основа за последващи експертни оценки.

Предложеният подход не заменя традиционните геодезически методи, а разширява възможностите за тяхното приложение при задачи, при които са необходими плътна пространствена информация, висока детайлност и оперативност на заснемането. Изборът на конкретна технология следва да се определя от характера на поставената задача, изискваната точност и условията на работа, като водеща остава професионалната преценка на квалифицирания специалист.

Използвана литература:

1. Stereva, K., Postolovski, A., Gospodinov, S. Control, in the process of the building construction, by means of stationary terrestrial laser scanning, 6th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium – WMESS 2020, Prague, Czech Republic;
2. Господинов, С. Г., Постоловски, А., & Щерева, К., Технологии наземного лазерного сканирования - новые горизонты в области строительства и архитектуры. Славянский форум, 41-49., 2013;
3. Господинов, С. Г., & Шайтура, С. В., Технологии лазерного сканирования в контроле деформаций. Славянский форум, 44-49., 2016;
4. Марков, М., Приложение на наземното лазерно сканиране за структурно-геоложко картиране на скални откоси, Дисертационен труд, УАСГ, София, 2024;
5. Димитров, М., Марков, М., & Хаджиева, Б.. Създаване на 3D модел на стена на хвостохранилище по резултати от наземно лазерно сканиране. Сборник с доклади от Национална научно-техническа

- конференция "Управление и безопасност на хвостохранилища" (стр. 85-90). ISBN 978-619-90939-7-9., 2021;
6. Постолюски, А., Димитров, М., & Марков, М., Приложение на MTLS – технология при одит на тунелното строителство. XVI международна конференция по открит и подводен добив на полезни изкопаеми (стр. 279-285). Варна. ISSN 2535-0854., 2021;
 7. Leica Geosystems. (n.d.). How well can the BLK scanner see? It's all about VIS. Retrieved from Leica Geosystems Reality Capture Blog. [viewed 15.07.2026]
 8. Марков, М., & Митев, И., Применение лазерного сканирования для картографирования горных образований. Современные информационные технологии. Сборник научных статей по материалам 10-й Международной научно-технической конференции (стр. 453-464). Москва, 2024;
 9. Kekes, B., Bilim, N., Karakaya, E., Ghiloufi, D. APPLICATIONS OF TERRESTRIAL LASER SCANNING (TLS) IN MINING: A REVIEW. Turkey Lidar Journal., V.3, N.1, 10.51946/melid.927270., 2021;
 10. Zhang, J., Sing, S., Laser-visual-inertial odometry and mapping with high robustness and low drift, Proceedings of Journal of Field Robotics, 2018, V.35, N.9, eISSN: 1556-4967, DOI: 10.1002/rob.21809
 11. Singh, S., Banerjee, B., Raval, S., A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining. International Journal of Mining Science and Technology, February 2023, Pages: 133-154, Volume 33, Issue 2;
 12. Yang, Y., Geneva, P., Huang, G., Multi-visual-inertial system: Analysis, calibration, and estimation, The International Journal of Robotics Research, V. 43, N. 13, 2024, Online ISSN: 1741-3176 , <https://doi.org/10.1177/0278364924124572>;
 13. Хаджиева, Б., Приложение на мобилно лазерно сканиране при поддръжка, основен ремонт и строителство на пътища, Дисертационен труд, УАСГ, София, 2025;
 14. Господинов, С., Вълканов, Н., Щерева, К., Наземното лазерно сканиране – една нова реалност при експлоатацията на каменни кариери, Четвърта национална научно-техническа конференция с международно участие 2014г., Девин, България;
 15. Yang, M., Cao, Y., McDonald, J. Fusion of camera images and laser scans for wide baseline 3D scene alignment in urban environments. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 66, Issue 6, Supplement, December 2011, Pages S52-S61;
 16. Shi, Y., Yang, Y., Zhang, J., Yu, J., Wang, Q. Multi-temporal TLS-based spatiotemporal deformation monitoring and risk assessment of deep tunnel linings. Measurement, August 2026, 10.1016/j.measurement.2026.122832;
 17. Петрова, М., Изследване на деформациите на инженерните съоръжения посредством технологията "Terrestrial laser scanning" (Автореферат на дисертационен труд). УАСГ, София, 2021.
 18. Господинов, С., Цветков, В., Ознамец, В., СОВРЕМЕННЫЕ АСКТЫ ПРИКЛАДНОЙ ГЕОДЕЗИИ. София, 2024, "Art Eternal Print", ISBN 978-619-277-034-1

ПРИЛОЖЕНИЕ НА LiDAR-ТЕХНОЛОГИЯТА ПРИ ПРОУЧВАНЕ НА ПОДЗЕМНА ТРАНСПОРТНА ИНФРАСТРУКТУРА

Александър Постолювски¹, Славейко Господинов²

¹“Гео Вилд Мак“ Скопие, ²Университет по архитектура, строителство и геодезия

РЕЗЮМЕ

Представено е приложението на наземното лазерно сканиране, като усъвършенстван и високо надежден метод за цифрово документиране, анализ и представяне на съществени елементи от подземната транспортна инфраструктура. Обоснована е съществената роля на 3D-облаците от точки, като прецизен, плътен и обективен източник на пространствени данни за проектантски, реконструкционни и управленски цели.

Подземните транспортни структурни обекти, като тунели и галерии, често са трудни за проучване с помощта на традиционните методи, поради ограничена видимост, сложна геометрия, съображения за безопасност и тесни работни пространства. Наземното лазерно сканиране преодолява много от тези ограничения, като регистрира милиони дискретни точки от обекта за кратък период от време, създавайки детайлно триизмерно представяне на изследваната среда.

Разгледани са два случая при проучването на тунели. Първият се фокусира върху тунел с тесен профил, където конвенционалните методи са неефективни или непрактични. Вторият казус представя заснемането на магистрален тунел, след реконструкция, където лазерното сканиране се използва за документиране на изпълнението. Генерираният 3D-облак от точки служи като надежден запис на завършените работи и позволява сравнение между проектното намерение и окончателното строителство.

Ключови думи: LiDAR, TLS, тунелно проучване, 3D-облак от точки, цифров близък, BIM, GIS, анализ на деформации, пространствени данни

APPLICATION OF LiDAR-TECHNOLOGY BY EXAMINATION OF UNDERGROUND TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Alexander Postolovsky¹, Slaveyko Gospodinov²

¹“Geo Wild Mak” Skopje, ²University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy

ABSTRACT

The application of laser scanning, as an advanced and highly reliable method for the documentation, analysis and digital representation of underground infrastructure is presented. The essential role of 3D-point clouds, as a precise, dense and objective source of spatial data for engineering, reconstruction and asset management purposes is founded.

Underground transport structure objects, such as tunnels and galleries are often difficult to examine, using traditional methods due to restricted access, limited visibility, complicated geometry, safety reasons and narrow working spaces. Terrestrial laser scanning overcomes many of these limitations by capturing millions discreet object-points in a short period of time, creating a complete three-dimensional representation of the examined environment.

Two tunnel survey case studies are inspected. The first one focuses on a tunnel with a narrow profile, where conventional surveying methods are inefficient or impractical. The second case study presents surveying of a highway tunnel, after reconstruction, where laser scanning-technology is used for as-built documentation. The generated 3D point cloud serves as a reliable record of the completed works and allows a comparison between design intent and final construction.

Keywords: LiDAR, TLS, tunnel examination, 3D point cloud, Digital Twin, BIM, GIS, deformation analysis, spatial data

ВЪВЕДЕНИЕ. Подземният транспорт и хидравличните съоръжения са сред най-комплицираните среди за инженерно проучване. Ограниченият достъп, лошата видимост, сложната и често нестандартна геометрия, ограниченията за безопасност и липсата на GNSS-сигнал (сигнал от Глобална

навигационна спътникова система) намаляват ефективността на, все още масово прилаганото конвенционално „точково“ проучване. В същото време, съвременната практика за реконструкция, управление на активи и минно строителство изисква не само ограничен брой характерни напречни сечения, но и пространствено подробен и одитируем запис на изградената повърхнина. Наземното лазерно сканиране отговаря на подобно изискване, записвайки плътни триизмерни облаци от точки за кратък период от време и съхранявайки цифрово представяне на заснетото, от което могат да се извлекат желани напречни сечения, просвети, модели на повърхнината и по-късни измервания [1, 2].

Следователно, централният инженерен въпрос не е дали лазерното сканиране може да замести всяко конвенционално измерване и коя е конфигурацията от инструментариум за сканиране, която гарантира най-полезния баланс между точност, скорост на събиране на данни, геометрична детайлност и оперативна осъществимост. Тоталната станция може да определи, относително подробно, избран профил, с точност до милиметър, но резултатът ще се базира само на „измерените“ подробни точки. Лазерният скенер може да осигури малко по-голяма абсолютна неопределеност, като същевременно улавя, по същество, цялата видима повърхнина. За подземни работи този компромис често е решаващ, тъй като неизмерените локални неравности между традиционните профили не могат да бъдат реконструирани, след като обектът е облицован, ремонтиран или пуснат в експлоатация.

В разработката се разглеждат се два контрастни казуса. Първият е реконструираната северна тръба на тунела „Витиня“, на магистрала „Хемус“, обследвана с мобилна наземна лазерна сканираща система („RIEGEL“MTLS/MLS). Вторият е подземният тунел за пренос на вода „Црвена вода“(PC Македония), обследван със стационарен наземен лазерен скенер (TLS) Leica BLK360 G2. Случаите са избрани умишлено и представят различни приоритети: максимална производителност и документиране на цялата повърхнина в голям пътен тунел и практичен достъп плюс висока локална геометрична точност, в малък тунел, където конвенционалното геодезическо оборудване не може да бъде позиционирано и експлоатирано ефективно.

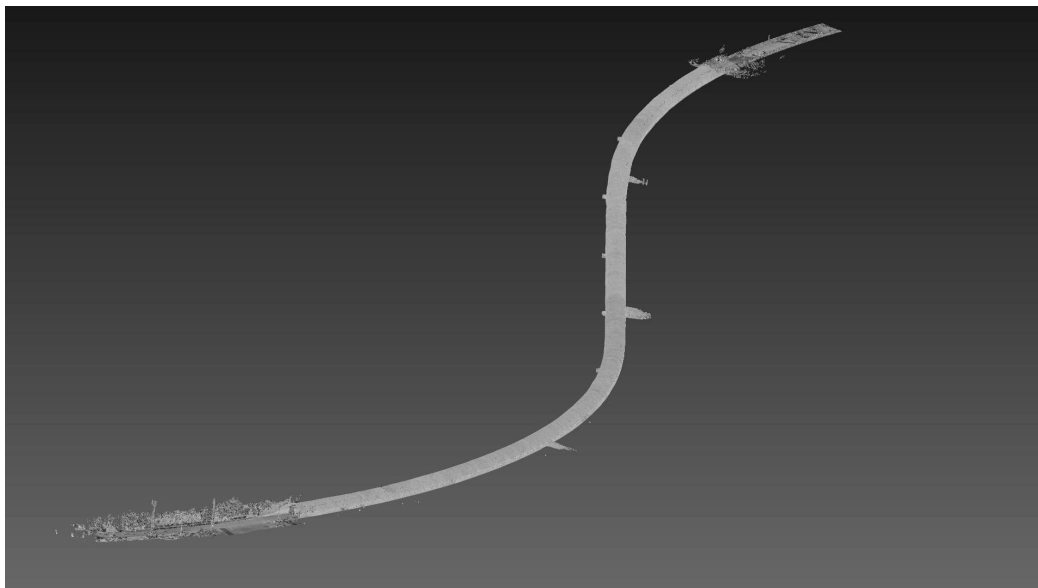
ИЗБОР НА ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ПОДЗЕМНО ГЕОДЕЗИЧЕСКО ПРОУЧВАНЕ. Мобилното лазерно сканиране интегрира един или повече лазерни скенери с инерциална навигационна система (DMI, IMU), GNSS сигнал (когато е наличен), и вход за измерване на разстояние, като например DMI/за километър. Основното му предимство в тунел е производителността: целият коридор може да бъде обхванат, докато платформата се движи. Основното ограничение е отклонението на траекторията по време на прекъсване на GNSS-сигнала. Следователно, траекторията трябва да бъде гарантирана от предварително точно заснети контролни точки и коригирана по време на последващата обработка. Стационарното TLS следва различна концепция. Всяко сканиране се реализира от фиксирана станция, а съседните сканирания са свързани чрез общи обекти - сфери, геометрия на облаците или комбинация от тях. Придобиването на данни е по-бавно, но геометрията не зависи от непрекъснатото разпространяващата се (при MTLS) инерциална траектория.

За практическите класове на точност, разглеждани в тази статия, MLS е подходяща технология, когато абсолютната точност е достатъчна и непрекъснатото „покрытие“ или скоростта са доминиращото изискване. Когато необходимата абсолютна точност е под „приблизително“ 2 см, обикновено трябва да се предпочита фиксирана TLS, при условие че може да се установи стабилна контролна мрежа и геометрия на регистрация. Това е методологичен критерий за избор, а не универсална спецификация на инструмента: постижимата точност остава зависима от качеството на контрола, обхвата на сканирането, ъгъла на „падане“ на лазерния лъч, предварителния проект на регистриращите станции и геометрията на подземния обект.

КАЗУС 1 - ТУНЕЛ „ВИТИНЯ“ НА АВТОМАГИСТРАЛА „ХЕМУС“: ЗАСНЕМАНЕ С МОБИЛЕН ЛИДАР

Обектът е северната тръба на тунел „Витиня“ на автомагистрала „Хемус“, България. „Тръбата“ е с дължина приблизително 1125 м. Проучването е извършено след реконструкция, като част от окончателния строителен одит. В предварителната проектна документация са описани четири пълни преминавания през тунела: две с ориентация на скенера, за подобряване на покритието на настилната

и тротоарите и две с ориентация на скенера, избрана за пълно записване на вътрешността на тунела [3]. Превозното средство се е движило с приблизително 20 км/ч, с намалена скорост близо до контролните точки, за да се подобри разпознаването им в детайлния облак от точки [3].



Фиг. 1. Облак от точки от мобилен LiDAR на реконструирания тунел „Витиня“ - общо покритие.

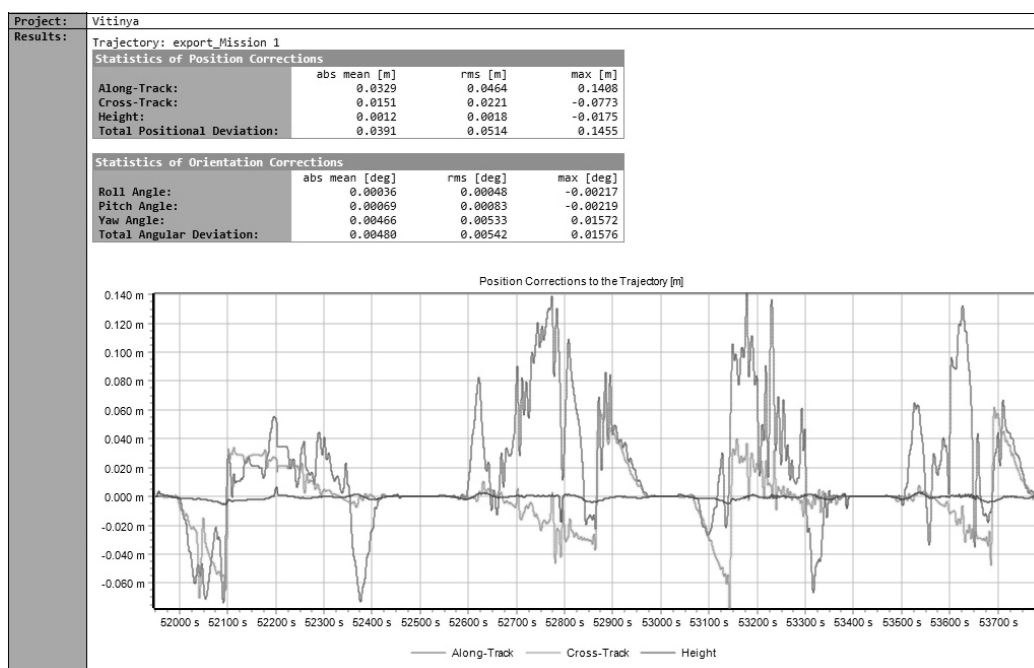
Тъй като GNSS-сигналът е ефективен само извън тунела, мобилната система разчита, вътре в „тръбата“, на инерционните сензори и DMI. Следователно, първоначалният работен процес използва предварително координирани контролни марки, елемент от работната геодезична основа. Предварително са определени (геодезически позиционирани) марки от вътрешната страна на тунела на интервали от приблизително 100 м. Общо 21 маркера [3]. Траекторията първо е обработена с помощта на наличната INS/GNSS и DMI информация, след което LiDAR наблюденията и контролната информация са комбинирани.

Предоставената, за настоящия случай, графика на траекторията, в зависимост от нейното качество, предоставя полезна илюстрация на поведението на инерциалната мобилна система в коридор, в който е „отказан“ GNSS-сигнал. Регистрираната обща позиционна корекция има абсолютна средна стойност от 0,039 м, средноквадратична отклонение (RMS) от 0,051 м и максимална стойност от 0,145 м. Стойностите на компонентите RMS са 0,046 м по траекторията, 0,022 м по напречната линия и 0,002 м по височина. Тези стойности са корекции на траекторията, а не директно представяне на крайната точност на облака от точки. Те показват стойността на корекцията, която трябва да се контролира чрез корекция на траекторията и наземно управление.

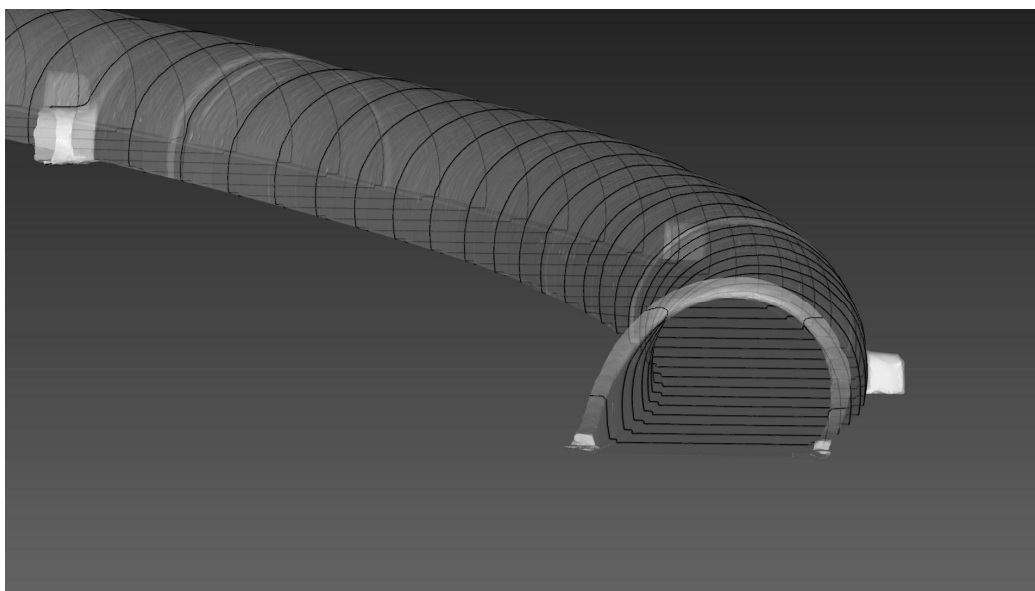
Окончателният отчет за регистрация, за активираните контролни ограничения, показва средна абсолютна грешка от 0,031 м. В предварителния отчет по проекта подобно е записано, че разликите между контролните точки, преди корекцията, са били приблизително 8-29 см и са намалени след корекцията до 1,8-3,4 см в план и 1-11 мм във височина [3]. Тези резултати поставят мобилното решение в клас на точност от порядъка на сантиметър, който порядък е подходящ за цялостната документация, касаеща изпълнението, оценката на клирънс и одит на реконструкцията, където абсолютната точност (от порядъка на милиметър) не е водещо изискване.

ДИЛЕМАТА „СКОРОСТ-ТОЧНОСТ“ НА ПРОФИЛА. Значимостта на мобилния метод е „видима“, когато предоставената информация бъде сравнена с класическото геодезическо заснемане. Традиционното безрефлекторно заснемане (с тотална станция) може да постигне много висока прецизност в избран локален участък или в конкретна точка от обекта, но за всеки участък се изисква

настройка (позициониране) на инструмента, насочване към ограничен брой , предварително определени, дискретни точки, ръчно или полуавтоматично кодиране и последваща интерполация. Увеличаването на броя на участъците увеличава времето за работа на терен почти пропорционално. За разлика от това, мисията MLS записва цялата „видима“ облицовка непрекъснато и детайлно, докато превозното средство, носещо MTLС-системата, преминава през тунела. Всеки необходим участък може да бъде извлечен по-късно и могат да се извършат допълнителни проверки, без да е необходимо връщане в тунела.



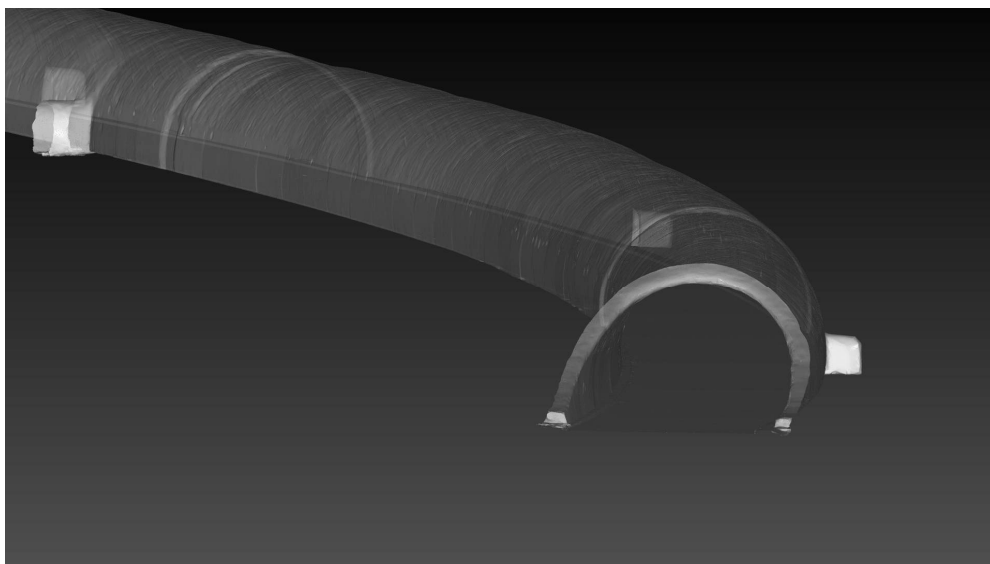
Фиг. 2. Резултати от обработката на траекторията за мисията Vitinya MLS: корекции на позицията и ориентацията.



Фиг. 3. Напречни сечения, извлечени от непрекъснатата мобилна LiDAR повърхнина.

Констатацията за производителност се подкрепя от публикувания експеримент с дълъг тунел в Пахарес, използващ RIEGL VMX-250. Боавида, Оливейра и Сантос изследват гъстотата на контролните точки, при симулирани дълги прекъсвания на GNSS-сигнала и стигат до заключението, че с правилна инициализация, финализация и корекции на траекторията, при използване на контролни точки на всеки 25 м, може да се постигне абсолютна RMS точност от 2 см [4]. По-късният им контрол на качеството, базиран на „конвенционални“ профили, от измервания с тотални станции, установява, че повечето разлики са в интервала от 1-2 см, с максимуми до 3 см [4]. Този резултат е важен за избора на технология: дори плътният контрол от 25 м не превръща MLS в милиметрово проучване, но може да осигури сантиметрова абсолютна точност, заедно с почти пълно детайлно покритие на геометрията на тунела.

Следователно, при одита на „Витиня“, практическата полза не е твърдението, че MLS е по-точна от тоталната станция в отделна точка. Ползата е, че проучването създава детайлен пространствен запис на цялата повърхнина на тунела, с оперативна скорост. Генерираният облак от точки и мрежа могат да бъдат преглеждани отново, за да се извлекат профили, да се проверят локалните деформации или неравностите на облицовката, детайлно да се сравни реконструираната повърхнина с тази от проекта. Първоначалната обработка допуска намаляване детайлността на първоначалния модел от около 800 милиона точки до 215 457 000 точки.

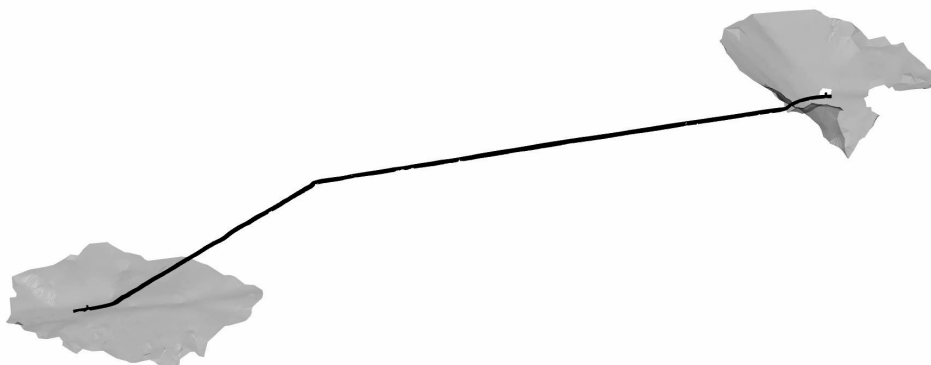


Фиг. 4. Плътност на повърхността/мрежовото представяне, получено от мобилното LiDAR проучване.

КАЗУС 2 – „ЦРВЕНА ВОДА“: СТАЦИОНАРНА ТЛС В МАЛЪК ТУНЕЛ. Вторият случай се отнася данализиран обект е подземният тунел за пренос на вода „Црвена вода“, в РС Македония. Според информацията за проекта, предоставена от екипа по проучването, подземната система пренася вода от горния водоприемник към резервоар, от който наличният напор се насочва към турбинното/машинно отделение. Публично достъпните авторитетниофициални технически данни, описващи схемата с достатъчни инженерни подробности, не дават възможност да бъдат проверени по време детайлите, съпътстващи подготовката на този документ. Следователно, оперативното описание тук е принудително ограничено до публичната информация за проекта и измерените данни от проучването.

Тунелът има малък и неправилен профил. В такава геометрия, класическата тотална станция не е просто по-бавна - тя може да стане непрактична, защото инструментът, операторът и линията на видимост се конкурират за едно и също ограничено пространство. Чрез безрефлекторните наблюдения могат да взематбъдат получени проби от „видимата“ стена на тунела, но те все пак гарантират измервания към отделни точки и изискват предварителен избор на „използваема“ позиция на

инструмента. В подобни случаи, TLS е особено подходяща технология, защото компактният скенер може да бъде поставен във вътрешността на профила и е в състояние да заснема заобикалящата повърхнина, във всички видими посоки, от всяка станция.

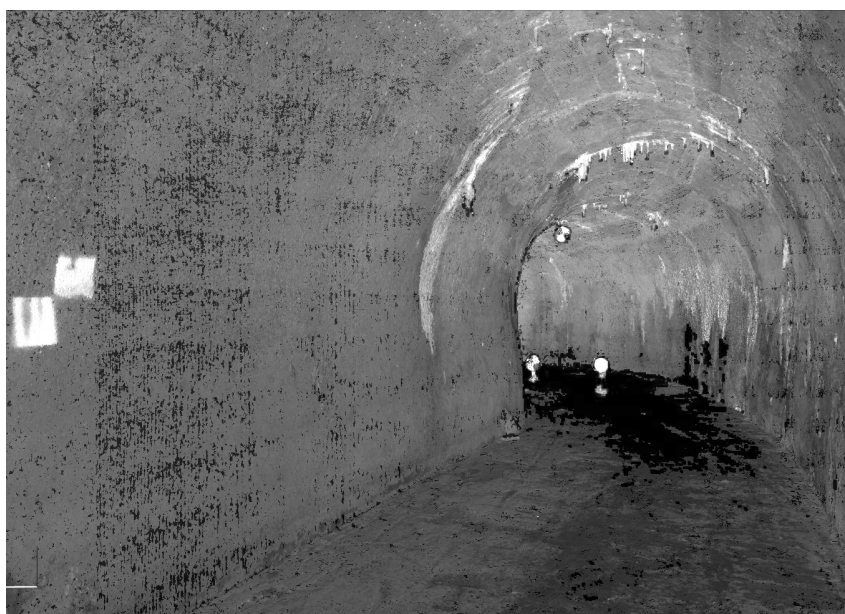


Фиг. 5. Подземна система Цървена вода: пълно трасе на тунела, свързано с изследваните повърхностни площи в двата края.

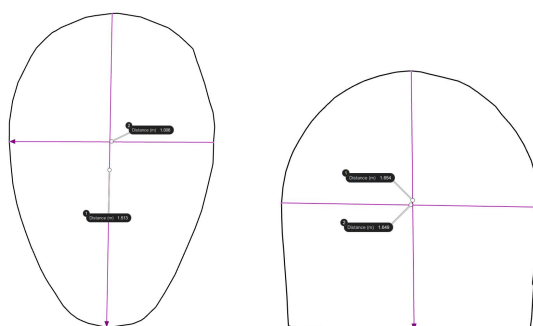
Тунелът е заснет с Leica BLK360 G2, от приблизително 70 сканиращи станции. Няколко от станциите са разположени над земята, за да свържат подземната работна мрежа с държавната координатна система. Работната контролна геодезическа мрежа представлява полигонов ход, от който четири точки са използвани за георефериране - две близо до началото и две близо до края на тунела. Последователността на сканиране е проектирана като контролирана верига. Контролните марки са инсталирани както пред, така и зад всяка сканираща секция. Предходните марки от една секция, впоследствие са използвани като изходни марки за следващата секция. Подобна повтаряща се геометрия осигурява условия за вътрешна проверка на линейното разпространение на траекторията и намалява риска от неконтролирано отклонение на регистрацията.

Докладът за регистрация идентифицира базата данни като Crvena_Voda_Tunnel и отчита достоверността на регистрацията, със средна абсолютна грешка от 0,003 м, при активирани ограничения. Повечето последователни ограничения, от сканиране до сканиране, са на ниво 1-3 мм, с отделни локални стойности от няколко милиметра; Средната грешка на регистрацията от 3 мм демонстрира добрата вътрешна сходимост на точността от сканирането, докато абсолютната точност на геореферирането остава зависима от четирите контролни точки и хода, от който са получени.

Формираните напречни профили демонстрират специфичното предимство на TLS в малкия тунел. Целият периметър е наличен за проверки на размерите, вместо само малък набор от „безотражателни“ наблюдения. Спецификацията на производителя на BLK360 G2 гарантира 3D-точност на точките от 4 mm на 10 m [5]. При късите разстояния, преобладаващи в този тунел, точността на инструмента и наблюдаваната сходимост на регистрацията са от същия порядък, както при типичните измервания с безотражателни тотални станции, използвани за детайлни инженерни определения, докато облакът от точки осигурява с порядъци повече повърхнинни регистрации. Подобно твърдение трябва да се тълкува като еквивалентност на практическия клас на точност за подобни задачи, а не като идентичност на моделите на грешки, характерни поотделно за TLS технологиите и за наблюденията с тотална станция.



Фиг. 6. Облак от точки с TLS True-View вътре в тунела Црвена вода, показващ ограничената геометрия и геодезическите марки, използвани за контрол на резултатите от съседните сканирания .



Фиг. 7. Представително напречно сечение на тунел „Црвена вода“, получено чрез TLS; измерените полуширини са приблизително 1-1,65 м.

СРАВНИТЕЛНА ОЦЕНКА НА ПРИЛОЖЕНИЕТЕ ТЕХНОЛОГИИ

Таблица 1. Практическо сравнение на методите за подземно проучване.

Критерий	Класически TPS	Фиксиран TLS	Мобилен лидар
Резултат от директните измервания	Дискретни точки / избрани профили	Плътна локална 3D повърхнина	Непрекъсната повърхнина на коридора
Достъп до подземния етаж	Изисква настройка и линии на видимост	Изисква стационарни настройки сканиране за	Изисква проходим маршрут
Производителност	Ниска до средна	Средна	Много висока
Най-добра употреба в тези случаи	Контролни/проверъчни и профили	задачи < 1-2 см; ограничена геометрия	Одит на екземпляр от няколко сантиметра
Основен риск	Неизмерена повърхност между точки	Регистрация контролно разпространение	Отклонение на траекторията на INS при прекъсване на GNSS

Двата случая показват, че точността трябва да се специфицира заедно с покритието. Профил, с точност до милиметър на един пикетаж и непрекъсната повърхнина, с точност до сантиметър, отговарят на различни инженерни въпроси. Ако задачата е мониторинг на деформации на малка площ, прецизен контрол или толеранс под 2 см, фиксираната TLS, или целенасочени измервания с тотална станция, където това е уместно, - е „по-безопасният“ избор. Ако задачата е бърза документация за изпълнение на дълъг достъпен тунел и клас на точност от 2-5 см е приемлив, тогава MLS може драстично да намали времето за събиране на данни, като същевременно запази по същество пълните геометрични доказателства.

Хибридният работен процес често е най-силното решение: конвенционална геодезическа мрежа установява референтните данни; TLS или MLS осигуряват плътната геометрия; а независими наблюдения от тоталната станция се запазват за контрол и подsigуряване на качеството. Подобно разделяне между точността при контрол и при заснемането на повърхността предотвратява погрешното приемане на самия плътен облак от точки като доказателство за абсолютна точност.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Лазерното сканиране трябва да се избира, при подземни работи, според необходимата точност, геометрията на обекта и стойността на пълното покритие на неговата повърхнина. Случаят с „Витиня“ демонстрира силата на мобилния LiDAR: бързо заснемане на пълната повърхнина на тунела и извличане на неограничени, по-късни, напречни сечения, за сметка на абсолютна точност на ниво сантиметър, определяна предимно посредством контрол на траекторията на заснемане.

Случаят „Цървена вода“ демонстрира допълващата роля на стационарната TLS в тесен подземен профил, където класическото оборудване е трудно за работа и където може да се постигне съгласуваност на регистрацията на милиметрово ниво чрез внимателно контролирана последователност от сканиращи станции и контролни марки.

Практическото правило за избор на предпочитана технология, в тези случаи е лесно. При изисквания за точност под и около 1-2 см трябва да се използва фиксирана TLS, подкрепена от подходяща геодезическа контролна мрежа и независими проверки. За дълги тунели, където скоростта и 100% документация на повърхнината са по-важни от милиметровата точност, мобилният LiDAR предлага голямо предимство в производителността. Решаващото предимство и на двата подхода за сканиране е, че резултатът не е само чертеж или краен набор от профили, а многократно използваем триизмерен запис от измерванията на елементите на подземната инфраструктура.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Господинов, С., Постоловски, А., Щерева, К. Технологии на наземно лазерно сканиране - нови хоризонти в строителството и архитектурата. Международен научно-образователен форум Бургас 2013, Свети Влас, България.
- [2] Стерева, К., Постоловски, А., Господинов, С. Управление в процеса на строителство на сгради чрез стационарно наземно лазерно сканиране. Серия конференции на IOP: Науки за Земята и околната среда 609 (2020) 012042. doi:10.1088/1755-1315/609/1/012042.
- [3] Кремена С., Постоловски А., Шайтура С.В. Използване на мобилно лазерно сканиране в ремонта и одита на пътната безопасност. Славянски форум, Материали от 5-та Международна научно-практическа конференция, Интеграция, анализи и геоинформационни услуги, Бургас, България, 5 януари 2021 г.
- [4] Боавида, Дж., Оливейра, А., Сантос, Б. Прецизно проучване на дълги тунели с помощта на мобилната лазерна сканираща система RIEGL VMX-250. RIEGL LiDAR 2012, Орландо, Флорида, САЩ, 27 февруари - 1 март 2012 г.
- [5] Leica Geosystems. Технически спецификации на Leica BLK360 (G2): 3D точност на точките 4 мм на 10 м.
- [6] Шайтура, С.В., Господинов, С.Г., Васкина, М.Ю. Комплексен цифров модел за мониторинг на райони. Методи и софтуерни инструменти за информационно обслужване в информационни и пространствени полета, Бургас, 2020, стр. 51-57.

- [7] Шайтура, С.В., Сумзина, Л.В., Розенберг, И.Н., Винтова, Т.А. Моделиране и визуализация на триизмерни пространствени обекти. Монография, Бургас, 2018.
- [8] Шайтура, С.В., Минитаева, А.М., Розенберг, И.Н., Кожаев, Ю.П. Триизмерно моделиране и създаване на панорами. Монография, Бургас, 2019.
- [9] Akinci, B., Anumba, C. Технологична оценка и процесни последици от технологиите за събиране на полеви данни за строителството и управлението на съоръженията и инфраструктурата, 2008.
- [10] Шулц, Т. Калибриране на TLS за инженерна геодезия, 2007.
- [11] Алкан, Р.М., Карсидаг, Г. Анализ на точността на наземните лазерни сканиращи измервания. Работна седмица на FIG 2012, Рим, Италия, 6-10 май 2012 г.
- [12] Бюлер, У., Марбс, А. Изследване на точността на лазерния скенер.

ГЕОДИНАМИКА И ГЕОДЕЗИЯ: ГЕОДИНАМИЧНИ ПРОЦЕСИ И ЯВЛЕНИЯ – ГЕОДЕЗИЧЕСКИ МЕТОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ

Ивелина Колева, e-mail: ivelina.ivn@gmail.com

ABSTRACT

A general retrospective overview is presented of the process that has shaped contemporary perceptions of the Earth as a continuously evolving system, whose components are engaged in complex interactions. A classification of geodynamic processes and phenomena is proposed from the perspective of their hierarchical differentiation. The factors that have led to a shift in research priorities are outlined, namely the transition from a “stationary” to a “non-stationary” Earth. The significant role of a geodesy in the field of a geodynamics is substantiated. The principal theoretical and technological challenges facing “dynamic” geodesy are presented.

Keywords: geodynamics, geodynamic processes, geodetic methods, geodynamic monitoring.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Геодинамичните процеси представляват сложни и непрекъснато протичащи изменения, свързани с движението и деформациите на земната кора. Проявлението им се характеризира с различен териториален обхват, интензивност и продължителност, което определя необходимостта от прилагането на подходящи методи за наблюдение и анализ. Съществено място при изследването на тези процеси заемат геодезическите методи, чрез които се получава количествена информация за пространствените изменения и взаимните премествания на точки от земната повърхност. Развитието на измервателната техника и методите за обработка на наблюденията създава възможности за повишаване на точността и надеждността при установяване на настъпващите изменения. Комплексното използване на различни геодезически подходи позволява по-пълното характеризиране на наблюдаваните процеси и създава основа за проследяване и оценка на тяхното развитие във времето.

2. ГЕОДИНАМИЧНИ ПРОЦЕСИ И ЯВЛЕНИЯ

2.1. Същност на геодинамичните процеси

Представите за движения на земната кора възникват още в дълбока древност. Наблюденията върху измененията на земната повърхност постепенно водят до разбирането, че нейното състояние не е постепенно. Още Аристотел достига до извода за непрекъснатото изменение на земната повърхност, а по-късно Страбон предполага, че както сушата, така и морското дъно с течение на времето се издигат и понижават, в резултат на което площта на континентите и моретата може да се изменя [1,2].

Първите геоложки тълкувания на геодинамичните процеси са свързани с трудовете на М. В. Ломоносов, Дж. Хаттон и А. Целзий. В труда на Ломоносов „За земните пластове“, издаден през 1763 г., е предложена една от първите класификации на геодинамичните процеси. Развитието на представите за движенията на земната повърхност продължава през XIX и XX век в трудовете на редица изследователи, сред които А. Д. Озерский, А. П. Карпинский, Г. Джилберт, М. М. Тетяев, В. В. Белоусов, Н. С. Шатский, В. Е. Хаин и Н. И. Николаев.

Независимо от многобройните изследвания класификацията на тектоничните движения остава сложна задача, за която няма еднозначно решение [3, 4]. Причината се състои както в сложността на процесите, участващи в тектоничния живот на Земята, така и в различния смисъл, който отделните изследователи влагат в понятието „тектонични движения“.

Земята може да бъде разглеждана като непрекъснато изменяща се система, чиито отделни части се намират в сложно взаимодействие. В нейните недра настъпват нарушения на равновесното състояние, съпроводени с тенденции към установяване на ново равновесие. Тектоничните движения се разглеждат като структурообразуващи премествания на земната материя, обусловени от натрупването на пластични и еластични деформации и възникването на напрежения, водещи до промяна във формата на геоложките тела и до колебания на литосферната повърхност [5, 4].

2.2. Класификация на геодинамичните процеси

Съществуват различни подходи за класифициране на тектоничните движения. В голяма част от класификациите те се разглеждат не според причините за тяхното възникване, а според последствията от движенията и образуваните структурни форми. Основно внимание при този подход се отделя на кинематиката на движенията.

За получаване на по-пълна характеристика е необходимо движенията да се описват както по кинематични признаци – вертикални, хоризонтални, плавни, колебателни, насочени, бавни и бързи, така и по генетични признаци [6, 3, 7]. Това създава предпоставки за изследване на причините и механизмите на тектоничните движения.

В зависимост от особеностите на тектоничните движения могат да бъдат използвани различни критерии за тяхната класификация. Основните класификационни признаци и съответстващите им видове движения са обобщени и представени във фигура 1.



Фигура 1 - Класификация на тектоничните движения

Широко разпространено е подразделянето на тектоничните движения на вертикални и хоризонтални според преобладаващата компонента на тяхното направление. При подобна класификация обаче съществуват определени условности. Анализът обикновено се основава на създадените структури при предположението, че конкретната структура е образувана в резултат на преместването на земните маси в определено направление. Това предполага правилно установяване на механизма на формиране на структурата и на взаимното положение и големината на силите, действали в процеса на нейното образуване.

В основата на съвременните за разглеждания период класификации на тектоничните движения са принципите, предложени от В. Е. Хаин [7]. Те представляват опит да бъде отчетено съотношението и взаимното подчинение между тектоничните процеси. Движенията се подразделят на вертикални и хоризонтални, след което се разграничават според нивото, на което възникват. При определянето на това ниво се изхожда от особеностите на вътрешния строеж на планетата.

2.3. Основни характеристики на тектоничните движения

Независимо от различията в произхода и формата на проявление тектоничните движения притежават редица общи свойства. Към тях се отнасят сложност, съподчиненост, комплексност, периодичност, повсеместност и постоянство във времето.

Сложността се изразява във факта, че всяка точка от земната кора е подложена на въздействието на сили от различен ранг. В тази връзка движенията могат да бъдат надрангови, рангови и подрангови [3]. Към надранговите се отнасят приливите, измененията на земния радиус, прецесионните и нутационните колебания. Ранговите включват механични премествания на отделни обеми, изменение на формата и дилатацията, еластични и нееластични изменения на обема и качествени преобразувания, свързани с неговото изменение. Към подранговите се отнасят вулканизмът, земетресенията и изостатичните колебания.

Съподчинеността се изразява в това, че движенията с по-малък мащаб се проявяват на фона на по-мощните движения. Свръхдълбочинните движения обхващат земната кора и мантията и представляват фон, върху който се проявяват дълбочинните и повърхностните корови движения.

Комплексността се характеризира с взаимовръзката между различните типове движения, които обикновено се проявяват съвместно, но с преобладаване на определена компонента. Това обстоятелство има съществено значение при избора на методи за тяхното наблюдение и изследване.

Периодичността е друга важна характеристика на тектоничните движения. Тектоногенетичният процес може да бъде разглеждан като непрекъснато-прекъснат, с периодични и сравнително резки изменения на интензивността. Понятието периодичност се използва и за характеризиране на вълнообразните колебания на отделни участъци от земната кора, водещи до регресия и трансгресия на моретата и океаните [6].

Повсеместността означава, че тектонични движения могат да бъдат установени практически във всяка точка от земната повърхност. Поради сложността и разнообразието им обаче невинаги е възможно за конкретна точка да се определи генетичният вид на движенията, в резултат на които тя се премества в пространството.

Постоянството във времето е присъщо на всички видове тектонични движения. Това свойство се свързва с принципа на наследствеността [8], според който движенията, проявявали се в миналото, се проявяват и в настоящето и ще продължат да се проявяват в бъдеще. Тяхната интензивност и преобладаващото влияние на отделните генетични видове могат да се изменят, но в своята съвкупност движенията запазват постоянен характер.

Логично продължение на разглежданите въпроси, свързани с класификацията и особеностите на тектоничните движения, е определянето на подходящи методи за тяхното изучаване. При научните изследвания се следва определена последователност от наблюденията и установяването на фактите до изграждането и последващото развитие на теорията, представена на фиг.2.



Фигура 2 - Последователност на научното изследване на геодинамичните процеси

3. ГЕОДЕЗИЧЕСКИ МЕТОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ГЕОДИНАМИЧНИ ПРОЦЕСИ

3.1. Значение на геодезическите наблюдения

След разглеждането на класификацията и особеностите на тектоничните движения възниква въпросът за методите, чрез които тези движения могат да бъдат изучавани и количествено характеризирани. Геодинамиката използва разнообразни методи за изследване, обединени в обща система.

Основно място сред тях заемат геодезическите методи, включващи използването на наземни, въздушни и космически средства за наблюдение. Тяхната цел е получаването на възможно най-точна, достоверна и актуална количествена информация за геодинамичните процеси и явления.

От гледна точка на геодезическите изследвания особено значение имат характеристики като характер, интензивност, честота и териториален обхват на движенията. Тези характеристики са взаимно свързани, но едновременно с това служат като основа за избора на подходящ метод за наблюдение.

Според размера на обхванатата територия геодинамичните процеси и явления се подразделят на глобални, крупномасщабни, регионални и локални [9]. Териториалният им обхват, характерът и интензивността определят избора на подходящ метод за наблюдение. За глобалните и крупномасщабните процеси основно приложение намират астрономо-геодезическите и космически методи, докато при регионалните и локалните процеси се използват високоточни наземни геодезически наблюдения и специализирани геодезически мрежи.

3.2. Определяне на движенията на земната кора

Поради естеството на методите за определяне на взаимното положение между точките от геодезическите мрежи хоризонталната и вертикалната компонента на движенията традиционно се определят разделно. Поради това в геодезическата терминология са въведени понятията „съвременни вертикални движения на земната кора“ (СВДЗК) и „съвременни хоризонтални движения на земната кора“ (СХДЗК).

Характерът, интензивността и особено честотата на геодинамичните процеси са показатели, които определят необходимата точност и честота на геодезическите наблюдения. На тази основа може да бъде определен и обхватът на приложение на отделните геодезически методи [10].

Установяването на тектоничните движения представлява сложна задача поради малката им интензивност. Тези движения обикновено се изразяват в милиметри за година и за да бъдат разграничени от останалите процеси, протичащи на земната повърхност и в земните недра, е необходимо използването на инструментални методи и провеждането на продължителни високоточни измервания.

Съвременните движения на земната повърхност в значителна степен представляват отражение на процесите, протичащи в земните дълбини. За правилното разбиране на техния характер е необходимо да се отчита съвкупността от явления в земните недра, както и различните екзодинамични и хидродинамични процеси в земната кора. Като цяло наблюдаваните движения са резултат от действието на множество компоненти, обусловени от вътрешни, външни, космически и техногенни причини.

Поради това надеждното установяване на съвременните движения изисква едновременното използване на различни методи – геоложки, геоморфоложки, геофизически, геохимически и геодезически. Изследването на геодинамичните процеси по този начин придобива комплексен характер.

3.3. Основни геодезически методи

Действителните преки измервания представляват основен източник на количествена информация, необходима за уточняване на характера, проявлението и генетичните особености на конкретен геодинамичен процес и свързаните с него явления. Това определя необходимостта от непрекъснато усъвършенстване както на средствата за измерване, така и на методите за тяхното приложение.

Инструменталните методи за получаване на количествени данни за съвременните геодинамични процеси отразяват преди всичко техните кинематични особености и по-конкретно особеностите на обусловените от тях геодинамични явления. Сред инструменталните методи централно място заемат геодезическите методи, които могат да бъдат класически, астрономо-геодезически и космически. Към основните геодезически методи за изследване на геодинамичните процеси се отнасят астрономичните наблюдения, лазерна локация на Луната, спътникова алтиметрия, свръхдългобазисната радиометрия, доплеровите и GPS измервания, класическите геодезически методи и гравиметричните наблюдения. Областите на тяхното приложение и характерната точност са систематизирани в табл.1.

Таблица 1 – Геодезически методи за изследване на геодинамични процеси

Метод	Геодинамичен процес, който се изследва	Точност
1. Астрономични наблюдения	- движение на Полюса; - неравномерности в ротацията на Земята; - дрейф на континентите;	+0,55 *10 завъртане: +3,10 взаимно преместване: +0,8см преместване по: - дължина: +2,10 - ширина: +6,10
2.Лазерна локация на Луната	- движение на Полюса; - неравномерности в ротацията на Земята; - релативистични и космогонни ефекти; - преместване на континенталните блокове;	+20см до +3см +6,10 +3,10 +20см до +1см
3.Спътникова алтиметрия	- евстатично изменение на морското ниво; - вариации в параметрите на земните приливи;	+10см
4. Свръхдългобазисна радиointерферометрия	- неравномерности в ротацията на Земята; - движение на Полюса; - движение на литосферни плочи;	+5,10 +1,10 до +1,10 До +2см(1,10)
5. Доплерови измервания	- движение на Полюса; - движение на литосферни плочи;	+20см до +40см +5см за 3 години

Метод	Геодинамичен процес, който се изследва	Точност
6. GPS измервания	- дрейф на континентите; - движение на литосферни плочи; - взаимни премествания на точки от земната кора с регионален мащаб;	+1,10
7. Класически геодезически методи: - отделни профили (планини, височинни); - локални геодезически построения (ъглови, линейни); - площни геодезически мрежи (ъглови, линейни, ъглово-линейни, височинни);	Взаимни премествания на литосферни блокове и на точки от земната кора в зоната на активни разломи; Деформации в зоната на активни разломи, локални деформации с техногенен характер; Регионални или локални взаимни премествания на точки от земната повърхност с многогодишен, годишен или месечен период;	0,2мм +2,10 (планини) +1,10 до 1,10 (височинни) +0,4 (+6,10)(ъглови) 0,2мм+2,10 (линейни) +0,4 (+6,10)(ъглови) 0,2мм+2,10 (линейни) 1,10 до 1,10 (височинни)
8.Гравиметрични наблюдения: - абсолютни - относителни	- глобални неприливни вариации на геопотенциала; - регионални годишни вариации на силата на тежестта; - приливни вариации на геопотенциала; - регионални и локални вариации в големината и посоката на силата на тежестта;	+0,01 mgal (+1,10) +0,001 mgal (+1,10)

3.4. Избор и комплексно приложение на методите

Геодинамичните явления са комплексни и представляват съчетание от компоненти с различна амплитуда, дължина на вълната, ритмичност и пулсационни особености. Поради това правилният избор на конкретен метод или комплекс от методи за наблюдение представлява важна задача.

Границите на приложение на отделните методи се определят преди всичко от характеристиките на използваната апаратура и от степента на въздействие на комплекса от смущаващи фактори. Голямото разнообразие от геодезически методи може да доведе до необосновано обединяване на различни методи в отделни системи и до неточно определяне на обекта на тяхното приложение.

Прилагането на един и същ инструментален метод за различни геодинамични обекти в един район може да доведе до различни и дори противоречиви резултати. Това може да бъде обусловено от различното време на формиране и различната насоченост на наблюдаваните движения, различната степен на достоверност на получените данни, както и от недостатъчната теоретична обосновааност и разработеност на конкретния метод.

Използването на определена група методи зависи от поставените задачи и от целите на изследването. Всяка група може да включва множество частни методи. За избягване на едностранчивост при оценката на геодинамичните процеси е необходимо прилагането на комплексен подход, обусловен от сложността, комплексността и съподчинеността на геодинамичните процеси и явления.

Съвместното използване на различни методи създава възможност за по-пълно изследване на съвременните движения и деформации на земната кора с различен мащаб и интензивност. Комплексният подход обаче не трябва да се разглежда като механично съчетаване на различни методи. Той трябва да притежава определена структура, която отчита взаимобусловеността, сложността и многофакторността на изследваните геодинамични процеси.

Прилагането на комплексен подход предполага също ясно и точно формулиране на задачите в зависимост от генезиса и йерархичността на наблюдаваните явления. По този начин могат да бъдат установявани движения от различен ранг и характер, отличаващи се по своята интензивност, преобладаваща насоченост и генетични особености.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геодинамичните процеси и явления се характеризират със сложен характер, различен териториален обхват, интензивност, периодичност и продължителност. Тяхното проявление е резултат от съвместното действие на множество фактори, което затруднява еднозначното им класифициране и налага използването на различни критерии за тяхното характеризиране.

Геодезическите методи заемат основно място сред инструменталните средства за изследване на геодинамичните процеси, тъй като осигуряват количествена информация за измененията и взаимните премествания на точки от земната повърхност. Изборът на конкретен метод зависи от характера и мащаба на изследваното явление, необходимата точност и честотата на наблюденията.

Малката интензивност на голяма част от тектоничните движения изисква провеждането на продължителни и високоточни измервания. Същевременно комплексният характер на геодинамичните процеси определя необходимостта от съвместно използване на различни методи за наблюдение. Именно комплексният подход позволява да бъдат изследвани движения с различен ранг, интензивност и насоченост и да се получи по-пълна количествена характеристика на протичащите геодинамични процеси.

5. ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аристотель. *Метеорология*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983.
- [2] Резанов, И. А. *История геотектонических идей*. Москва: Наука, 1987.
- [3] Николаев, Н. И. *Новейшая тектоника и геодинамика литосферы*. Москва: Недра, 1988.
- [4] Чиков, Б. М. Методологические подходы и систематика методов исследования строения и эволюции земной коры. В: *Структурные элементы земной коры и их эволюция*. Новосибирск: Наука, 1983.
- [5] Хаин, В. Е. *Общая геотектоника*. Москва: Недра, 1973.
- [6] Гаврилов, В. П. *Общая и региональная геотектоника*. Москва: Недра, 1986.
- [7] Хаин, В. Е.; Михайлов, А. Е. *Общая геотектоника*. Москва: Недра, 1985.
- [8] Пейве, А. В. Горизонтальные движения земной коры и принцип унаследованности. *Геотектоника*, 1965, № 1, с. 30–37.
- [9] Пеллинен, Л. П.; Нейман, Ю. М. *Физическая геодезия*. Москва: ВИНТИ, 1980.
- [10] Касахара, К. *Механика землетрясений*. Москва: Мир, 1985.

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА МЕХАНИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ДВУЕТАЖНА КЛЕТКА И СКИПО – КЛЕТКА ЗА ИЗВОЗ НА РУДА

д-р Живко Илиев, кат. „Електроенергетика и автоматика“
МГУ „Св. Иван Рилски“, E-mail: jivko.iliev@mgu.bg
Проф. д-р Димитър Анастасов, „Еко Ток“ ЕООД, E-mail: d.s.anastasov@gmail.com

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF A DOUBLE-DECKER CAGE AND A SKIP – CAGE FOR ORE TRANSPORTATION

Dr. Zhivko Iliev, University of Mining and Geology” St. Ivan Rilski”, Sofia, E-mail: jivko.iliev@mgu.bg
Prof. Dr. Dimitar Anastasov, „EkoTok“ Ltd, E-mail: danastasov@hotmail.com

ABSTRACT

This article presents a comparative analysis of the mechanical and operational characteristics of a mine hoisting system operating in cage and skip-cage hoisting. The mechanical parameters of a loaded two-deck cage with two wagons, each with a capacity of 1,7 m³, have been determined. The weights of the skip-cage unit have been calculated for operation with a loaded skip and with an empty skip. The skip hoisting times for a single cycle have been determined. Two variants of productivity based on the hoisting factor are also provided. Recommendations have been made regarding the implementation of the most efficient operating schemes for the hoisting system under specific extraction and transport conditions.

Key words: mine shaft hoist; mining winders.

Въведение

Много важен въпрос при избора на руднична подемна уредба(РПУ) при извоз на руда е да се подбере такава схема на работа, която да е оптимална по отношение както на производителност, така и по отношение на цена и икономическа рентабилност. Целта на настоящата статия е да се направи сравнителен анализ на механо - технологичните характеристики на руднична подемна уредба работеща при клетков и скипо-клетков извоз. Тези две схеми са дадени като най – подходящи за спецификата на геоложките условия на разглежданото находище на руда[1, 2 , 3].

1. I-ви вариант – подъем със скипо – клетка

1.1. Определяне на теглото на скипа направен от стомана:

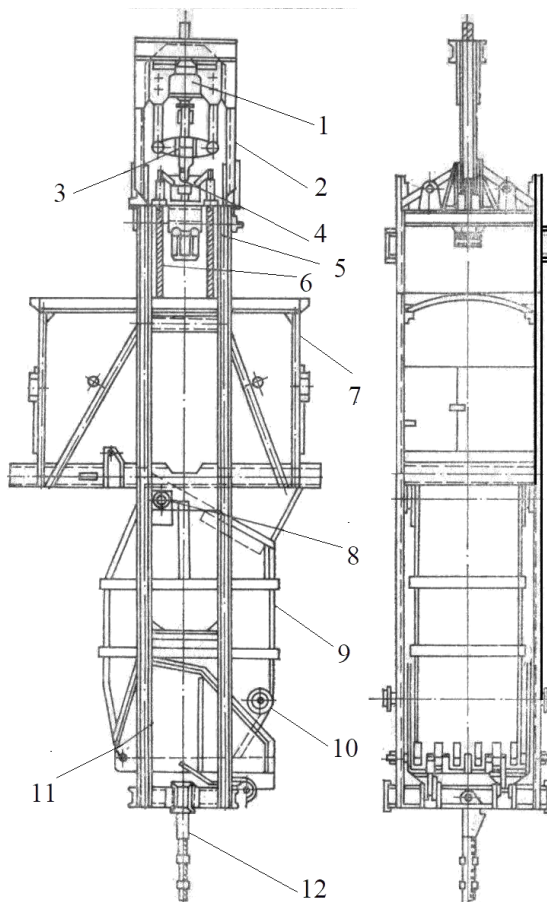
За определяне на теглото на скипа е необходимо да сумираме теглата на отделните части на скипа както следва:

– $P_1[t]$ – тегло на окачването; – $P_2[t]$ – тегло на скипа; – $P_3[t]$ – тегло на товара в скипа;
 $P_1 + P_2 + P_3 = \Sigma G - G_6 = 14,5 - 4,8 = 9,7t$ – общото тегло на скипа

Теглото на скипа се определя при две възможности: когато е без обшивка и когато е с обшивка от високоякостна стомана. Обшивката се прилага, когато абразивността на рудата е прекалено голяма и ще доведе до интензивното износване на коша на скипа.

– при варианта без обшивка с дебелина на стената $d = 1,0$ cm ще имаме тегло на скипа:
 $G_{ск} = 1,33 t$;

— при варианта с обшивка ще имаме тегло на скипа – $G_{\text{СК}} = 2,0 \text{ t}$;



Фигура 1. Чертеж на скипо-клетка

На фигура 1 е даден чертеж на скипо-клетка със следните позиции: 1- лостово – клинов кауш; П – образно шарнирно окачващо устройство, 3 – работно окачване; 4 – ловител на парашутите за релсови водачи; 5 – обща носеща рама; 6 – амортизьорни въжета на парашутите; 7 – клетка; 8 – шарнирна ос на скипа; 9 – скип; 10 – разтоварна ролка; 11 – клапанен затвор на скипа; 12 – окачващо устройство на уравниващото въже .

1.2. Изчисляване на обема на скипа при следните параметри на коша: дължина - 1m; широчина – 1 m и височина – 4 m

$$V = 1,0 \times 1,0 \times 4,0 = 4,0 \text{ m}^3; V = 4,0 \text{ m}^3$$

1.3. Изчисляване на площта на облицовката на скипа :

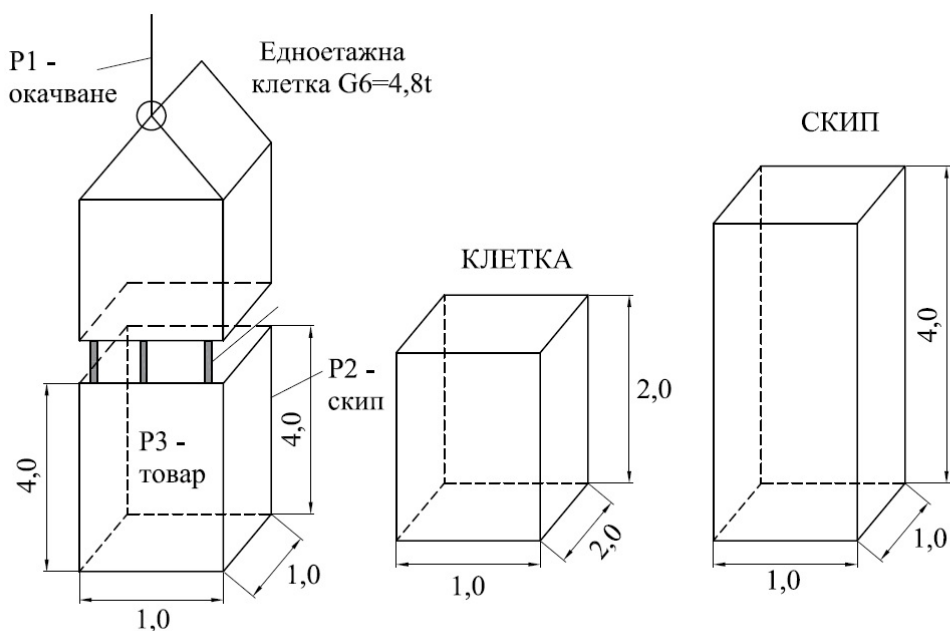
$$S = (1,0 \times 1,0) + (1,0 \times 4,0) \times 4 = 1,0 + 16,0 = 17\text{m}^2; S = 17\text{m}^2$$

1.4. Изчисляване на обема на облицовката на скипа

$$V = 17\text{m}^3 \times 0,01\text{m} = 0,17 \text{ m}^3; V = 0,17 \text{ m}^3$$

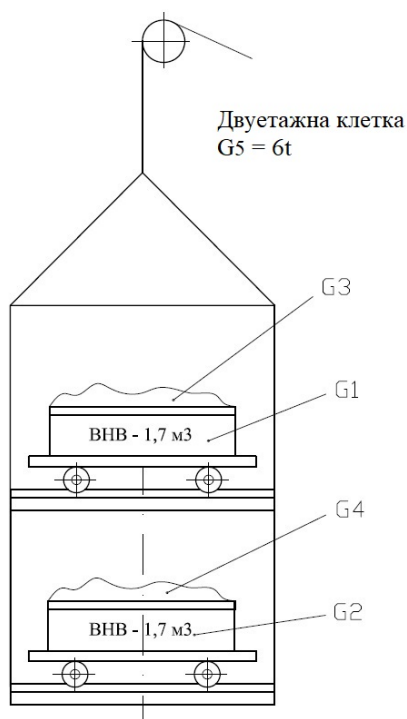
1.5. Определяне на теглото на скипа

$$G_{\text{СК}} = 0,17 \text{ m}^3 \times 7,8555 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 1,33 \text{ t}; G_{\text{СК}} = 1,33 \text{ t}$$



Фигура 2. Геометрични параметри на скипо- клетка

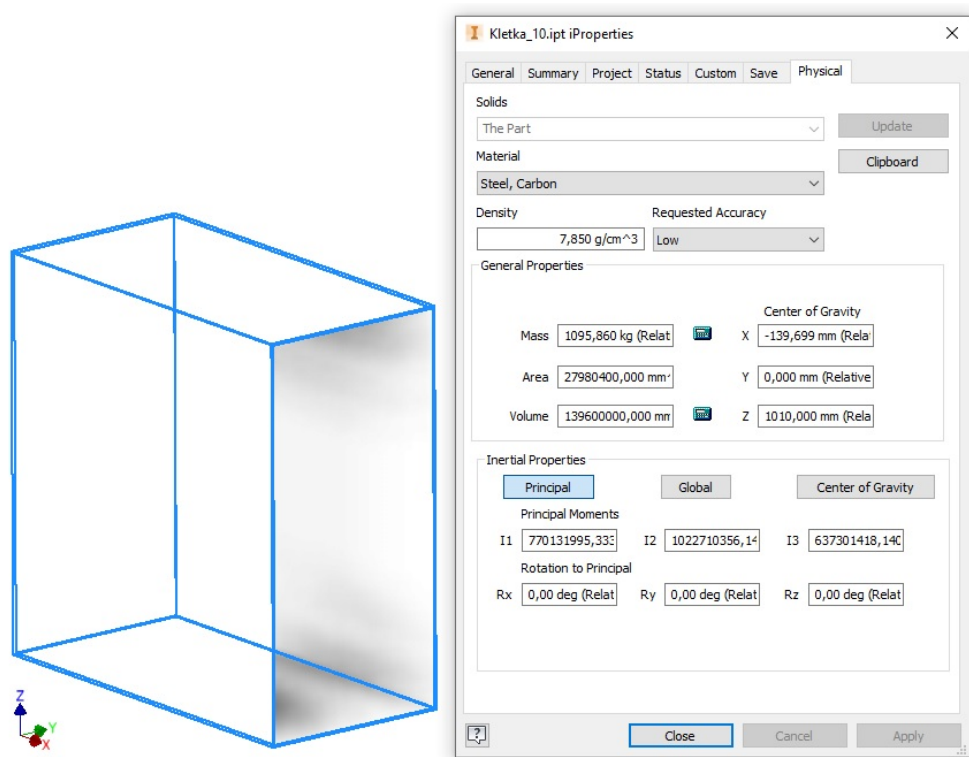
2. II-ри вариант – подем с двуетажна клетка



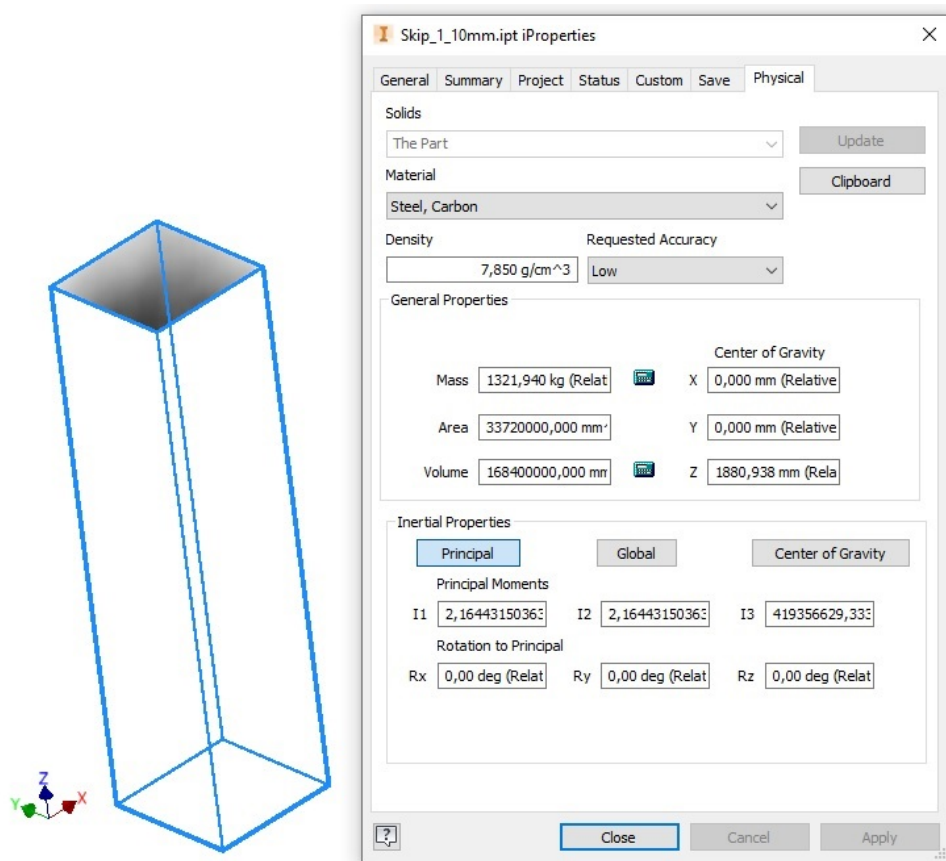
Фигура 3. Двуетажна клетка за подем с вагони 1,7 m³

2.1. Изчисляване на теглото в двуетажна клетка:

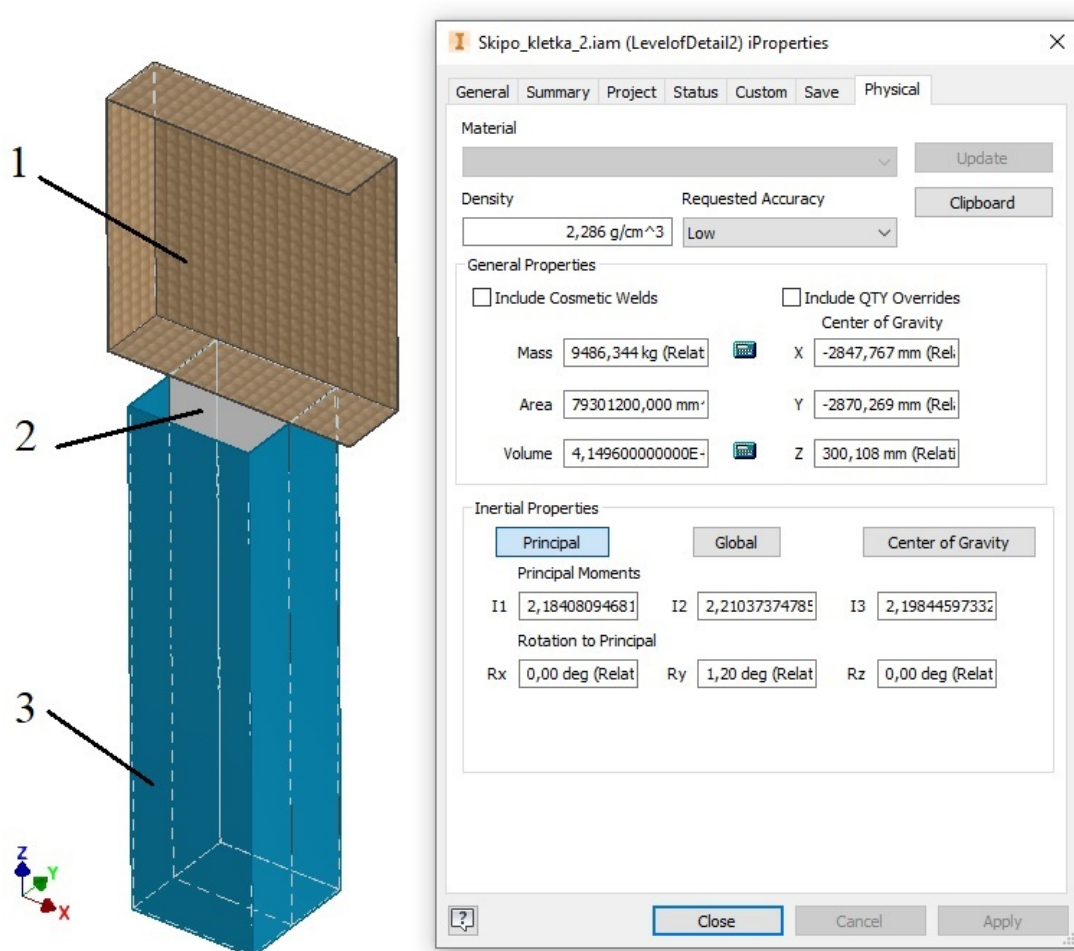
— тегло на товара в първата вагонетка: $G_3 = 1,7m^3 \times 2t/m^3 = 3,4t$ — товар; тегло на товара във втората вагонетка: — $G_4 = 1,7m^3 \times 2t/m^3 = 3,4t$ — товар



Фигура 5. Опростен 3 D модел на клетка за хора и таблица с теглото на клетката



Фигура 6. Опростен 3 D модел на скипа и таблица с теглото на скипа



Фигура 7. Опростен 3 D модел на скипо-клетка и таблица с теглото на скипо-клетката. Позиции: 1- клетка; 2 материал в скипа; 3 скип

Фигури 5 и 6 изобразяват опростени 3 D модели на клетка за хора и скип, като в дясно на фигурите има таблици с теглото на клетката и скипа. На *фигура 7* е даден опростен 3D модел на скипо-клетката със следните позиции: 1 - клетка за хора; 2 – насипен материал в скипа; 3 - скип. Формата на клетката е паралелепипед изработен от въглеродна стомана с плътност $7,85 \text{ t/m}^3$. В таблицата за свойствата на детайла се вижда, че теглото на клетката е 1095,86 kg. На *фигура 6* е показан 3D модел на скипа, който също е направен от въглеродна стомана с плътност $7,85 \text{ t/m}^3$. Теглото на скипа е 1321,94 kg. И двете конструкции са изградени от ламарина с дебелина на стената $d = 10 \text{ mm}$. Материала, който е натоварен в скипа е зададен в софтуера като натрошена руда или откривка със средна плътност $1,84 \text{ t/m}^3$. Изчисленото му тегло е 7068 kg. От *фигура 7*, на която имаме 3D модел на скипо - клетката става ясно, че общото тегло на натоварената скипо - клетка е 9486 kg. Така изследвания компютърен модел потвърждава аналитичните пресмятания, които бяха направени по-горе. Получените резултати са очаквани и адекватни при сравняване на двете методики – аналитичната и компютърния модел.

5. Определяне на времето за един цикъл за скипов подеи

5.1. Изчисляване на времето за един цикъл

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{тов.}} + t_{\text{под.п.}} + t_{\text{разт.}} + t_{\text{пр.х.}};$$

– време за товарене: $t_{\text{тов.}} = 15 \text{ sec}/20 \text{ sec}$; време за разтоварване $t_{\text{разт.}} = 10 \text{ sec}/15 \text{ sec}$;

– време за подем на пълен скип:

$$t_{\text{под.п.}} = \frac{467m}{7m/\text{sec}};$$

– време за празен ход:

$$t_{\text{пр.х.}} = 67 \text{ sec.}$$

5.2. Изчисляване на времето за първи цикъл

$$t1_{\text{цикъл}} = 15 + 67 + 10 + 67 = 154 \text{ sec} = 2,57 \text{ min} = 2 \text{ min и } 34 \text{ sec}$$

5.3. Изчисляване на времето за втори цикъл

$$t2_{\text{цикъл}} = 20 + 67 + 15 + 67 = 169 \text{ sec} = 2,82 \text{ min} = 2 \text{ min и } 49 \text{ sec}$$

$$6h = 60 \text{ min} \times 6 \times 60 \text{ sec} = 21600 \text{ sec};$$

5.4. Изчисляване на курсовете за смяна:

$$N_{\text{курсове/смяна}} = 21600 : 169 = 127 \text{ курса/смяна};$$

5.5. Изчисляване на курсовете за ден:

$$N_{\text{курсове/ден}} = 127 \times 3 = 381 \text{ курса/ден}$$

6. Определяне на производителността по фактор подем – I вариант

6.1. Изчисляване на времето за една смяна

$$t_{\text{смяна}} = 6h \times 60 \text{ min} \times 60 \text{ sec} = 21600 \text{ sec};$$

6.2. Изчисляване на броя на курсовете за една смяна

$$N_{\text{курсове/смяна}} = 21600 : 169 = 127 \text{ курса/смяна}$$

6.3. Изчисляване на производителността за една смяна

$$G_{\text{смяна}} = 127 \text{ курса} \times 4 \text{ m}^3 \times 2 \text{ t/m}^3 = 1016 \text{ t/смяна}$$

6.4. Изчисляване на дневната производителност

$$G_{\text{дневна}} = 1016 \text{ t/смяна} \times 3 \text{ смени} = 3048 \text{ t/ден}$$

6.5. Изчисляване на годишната производителност

$$G_{\text{год.}} = 3048 \text{ t/ден} \times 260 \text{ дни} = 792\,480 \text{ t/год}$$

7. Определяне на производителността по фактор подем – II вариант

7.1. Изчисляване на времето за една смяна

$$t_{\text{смяна}} = 21600 \text{ sec}$$

7.2. Изчисляване на броя на курсовете за една смяна при $t_{\text{цикъл}} = 408 \text{ sec}$ – за клетков подем [1]

$$N_{\text{курсове/смяна}} = 21600 : 408 = 53 \text{ курса/смяна}$$

7.3. Изчисляване на производителността за една смяна

$$G_{\text{смяна}} = 53 \text{ курса} \times 4 \text{ m}^3 \times \frac{2,0 \text{ t}}{\text{m}^3} = 424 \text{ t/смяна}$$

7.4. Изчисляване на дневната производителност

$$G_{\text{дневна}} = 424 \text{ t/смяна} \times 3 \text{ смени} = 1272 \text{ t/смяна}$$

7.5. Изчисляване на годишната производителност

$$G_{\text{год.}} = 3048t/\text{ден} \times 260 \text{ дни} = 330\,720 \text{ t/год}$$

8. Изчисляване на коефициента на изпълнение за вариант I

като по задание имаме[1]: $G_{\text{год.}} = 182\,600t/\text{год}$

$$K_{\text{изп}}^I = \frac{792480}{182600} = 4,34 \text{ пъти;}$$

9. Изчисляване на коефициента на изпълнение за вариант II

$$K_{\text{изп}}^{II} = \frac{330720}{182600} = 1,81 \text{ пъти;}$$

10. Заключение

Представените два варианта(I и II вариант) по фактор подем дават две решения за рационален избор на поставената задача. Очевидно е, че I вариант ще даде годишната производителност от 792 490 тона, докато вторият е 330 720 тона. Разликата в производителността е над два пъти, което дава сериозно предимство за този с по-голямата производителност. Но това е само на пръв поглед. За да се вземе правилното решение трябва да се отговори на въпроса кой вариант е по-полезен за даденото находище. Тук важни моменти са : възможността на бункерите да акумулират руда и скална маса; дали е осигурено ефективното разделяне на потоците от руда и скална маса, вида на рудничния транспорт и неговите възможности за товарене и разтоварване, както и производителността му.

Литература:

1. Договор No Г.М. – 232/22.10.2025г г. на „Еко Ток“ ЕООД и „Горубсо“ - Мадан АД.
2. Илиев Ж. „Изследване режима на работа и обосноваване на рационални параметри на ролкови направляващи устройства на подемни съдове за руднични клеткови подемни уредби“, Дисертация за ОНС „Доктор“, МГУ „Св. Иван Рилски“, 2015.
3. „Еко Ток“ ЕООД, Илиев Ж. Заявка за патент вх. No BG/P/2024/113874 от 22.03.2024 г. Метод за подем на руда със скип и конструкция за приложението

КОМПЮТЪРНО МОДЕЛИРАНЕ И ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ИНЕРЦИОННИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПОДЕМЕН СЪД ЗА РУДНИЧНА СКИПОВА УРЕДБА

д-р Живко Илиев
кат. „Електроенергетика и автоматика“, МГУ „Св. Иван Рилски“, E-mail: jivko.iliev@mgu.bg

COMPUTER MODELING AND DETERMINATION OF THE INERTIAL CHARACTERISTICS OF A HOISTING VESSEL FOR A MINE SKIP SYSTEM

Dr. Zhivko Iliev
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia, E-mail: jivko.iliev@mgu.bg

ABSTRACT

A computer model of a skip for a mine hoisting system has been created. The mass moments of inertia of the empty and full hoisting vessel have been determined analytically. The inertial characteristics of the skip were obtained from the computer model. A comparative analysis of the two applied methodologies has been conducted.

Key words: mine shaft hoist; mining winders.

Въведение

В литературата са описани случаи [1,3] на внезапно разрушаване на армировката на шахтата през време на движение на подемен съд, което показва, че са на лице разрушаващи динамични сили възникващи по време на движение на подемен съд. Те може да са резултат от системните вибрации на подемен съд, които се предават по еластичните шахтови водачи по време на експлоатация с голяма скорост или от дефекти както в армировката, така и в подемен съд. Едни от основните фактори, които характеризират работоспособността на системата „армировка - подемен съд“, са възникващите хоризонтални трептения на подемен съд; ударите при движение на подемен съд вследствие на некачествен монтаж на водачите и наличието на резонансни явления.

Редица изследвания доказват [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8], че характера на процеса на взаимодействие между движещ се подемен съд и армировката на вертикалната шахта в значителна степен се определят от инерционните характеристики на подемен съд. Тези характеристики на подемен съд участват в определянето на условията за динамическата устойчивост на системата „подемен съд - армировка“.

Аналитичното изчисляване на основните технически характеристики на подемен съд поради обективни причини е съпроводено с редица приближения и грешки в получените резултати.

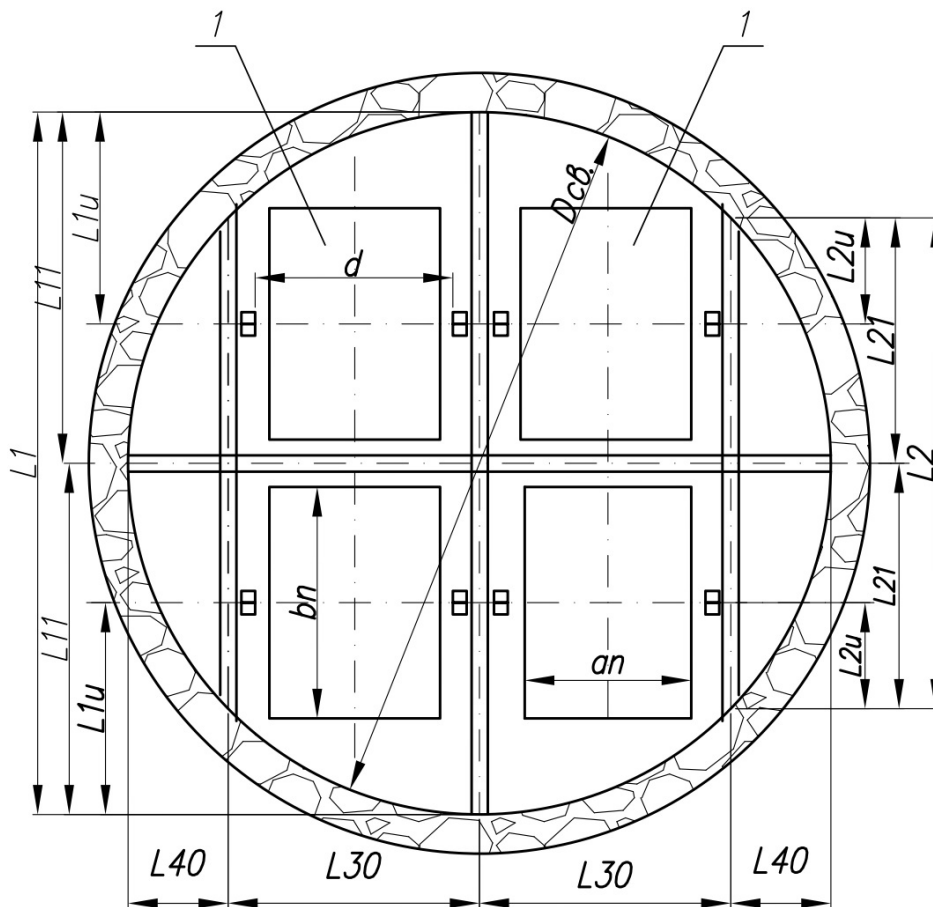
В статията е обоснована и предложена методика за компютърно определяне на инерционните характеристики на скип за руднична подемна уредба.

1. Аналитично определяне на инерционните моменти на скипов подемен съд [1, 9, 10]

Определяне на инерционните характеристики на еднородни тела с правилна геометрична форма, се извършва с методите на интегралното смятане. Скиповете са тела с правилна геометрична форма, но нееднородни, поради което масовите им инерционни моменти се определят аналитично или експериментално. При аналитичното определяне на инерционните моменти скиповете се представят като съставени от възможно по-прости елементи със систематизирани характеристики.

Съществуващите теоретични методи за изследване и определяне на динамичната устойчивост на подемния съд в една или друга степен се основават на някои предположения, които трябва да се проверяват и изясняват единствено чрез експериментални изследвания. Тук много подходящи методи се явяват компютърните софтуери за моделиране и изследване на тези механични системи.

Обектът на изследване е разгледаният на *фигури 1 и 2* рудничен подемен съд, а именно скип за въглища с вместимост от 12 m³. На *фигура 1* е показана схемата на армировката на скипова шахта в рудник „Бабино“, мини „Бобов дол“ АД. Скипа е предназначен за превоз на полезни изкопаеми в случая въглища.



Фигура 1. Схема на разположение на подемните съдове за скипова подемна уредба. Позиция: 1 – скип;

1.1. Определяне на масовите инерционни моменти на празния скип

1.1.1. Масов инерционен момент на празен скип спрямо ос Ох:

$$I_x^{\text{празен}} = \frac{m_{\text{скип}}}{12} \cdot (a_{\text{п}}^2 + c_{\text{п}}^2), [kg \cdot m^2] \quad (1)$$

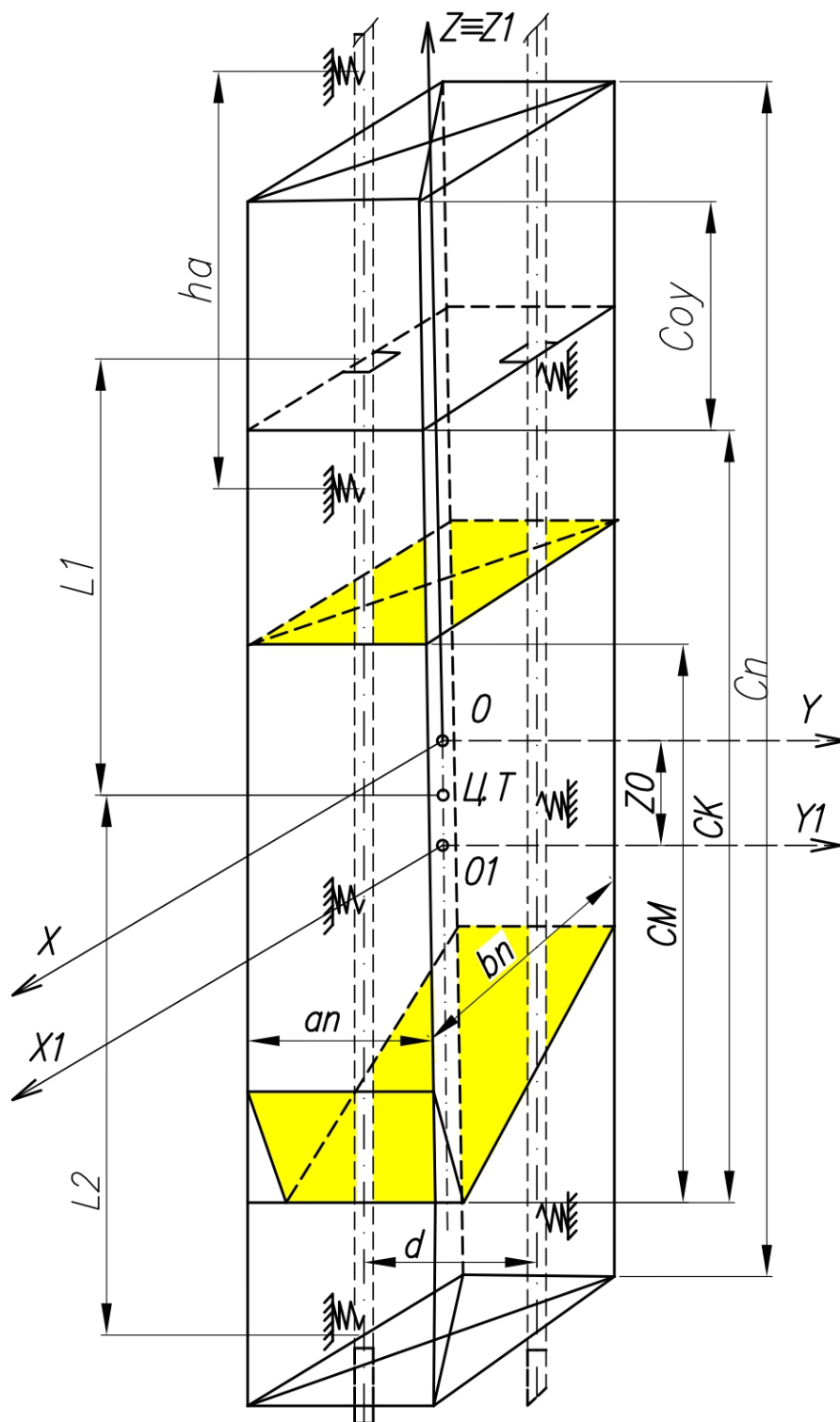
1.1.2. Масов инерционен момент на празен скип спрямо ос Оу:

$$I_y^{\text{празен}} = \frac{m_{\text{скип}}}{12} \cdot (b_{\text{п}}^2 + c_{\text{п}}^2), [kg \cdot m^2] \quad (2)$$

1.1.3. Масов инерционен момент на празен скип спрямо ос Oz:

$$I_z^{\text{празен}} = \frac{m_{\text{скип}}}{12} \cdot (a_{\text{п}}^2 + b_{\text{п}}^2), [kg \cdot m^2] \quad (3)$$

Където $m_{\text{скип}} [kg]$ – маса на празния скип[1];



Фигура 2. Геометрични параметри на скип с обем на коша 12 m³

1.2. Определяне на масовите инерционни моменти на пълния скип

1.2.1. Масов инерционен момент на пълен скип спрямо ос Ох:

$$I_X^{\text{пълен}} = I_X^{\text{празен}} + m_{\text{товар}} \cdot \left(\frac{a_{\Pi}^2 + c_M^2}{12} + Z_0^2 \right), [kg \cdot m^2] \quad (4)$$

1.2.2. Масов инерционен момент на пълен скип спрямо ос Оу:

$$I_Y^{\text{пълен}} = I_Y^{\text{празен}} + m_{\text{товар}} \cdot \left(\frac{b_{\Pi}^2 + c_M^2}{12} + Z_0^2 \right), [kg \cdot m^2] \quad (5)$$

1.2.3. Масов инерционен момент на пълен скип спрямо ос Oz:

$$I_Z^{\text{пълен}} = I_Z^{\text{празен}} + m_{\text{товар}} \cdot \left(\frac{a_{\Pi}^2 + b_{\Pi}^2}{12} \right), [kg \cdot m^2] \quad (6)$$

1.3. Габаритни размери на скипа(показан на фигура 2):

- $a_{\Pi} = 1620mm$ – дължина на скипа;
- $b_{\Pi} = 2230mm$ – ширина на скипа;
- $c_{\Pi} = 11580mm$ – височина на скипа заедно с долното и горното окачващо устройство;
- $C_{Oy} = 2200mm$ – височина на горното окачващото устройство;
- $C_K = 7580mm$ – височина само на скипа;
- $C_M = 5500mm$ – височина само на материала в скипа;
- $ha = 4000mm$ – стъпка на носачите;
- $d = 1690mm$ – разстояние между водачите;
- $Z_0 = 1200mm$ – проекция на геометричния център на полезния товар върху осите Ох и Оу;

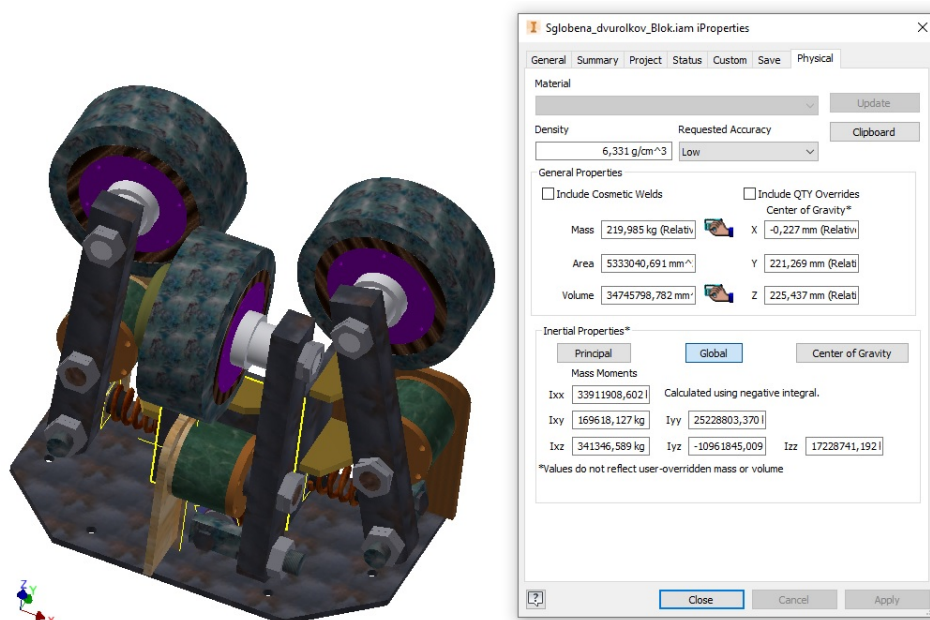
Където $m_{\text{товар}} [kg]$ – маса на товара в скипа [1];

2. Компютърен 3D CAD модел на скип за въглища с вместимост 12 m³

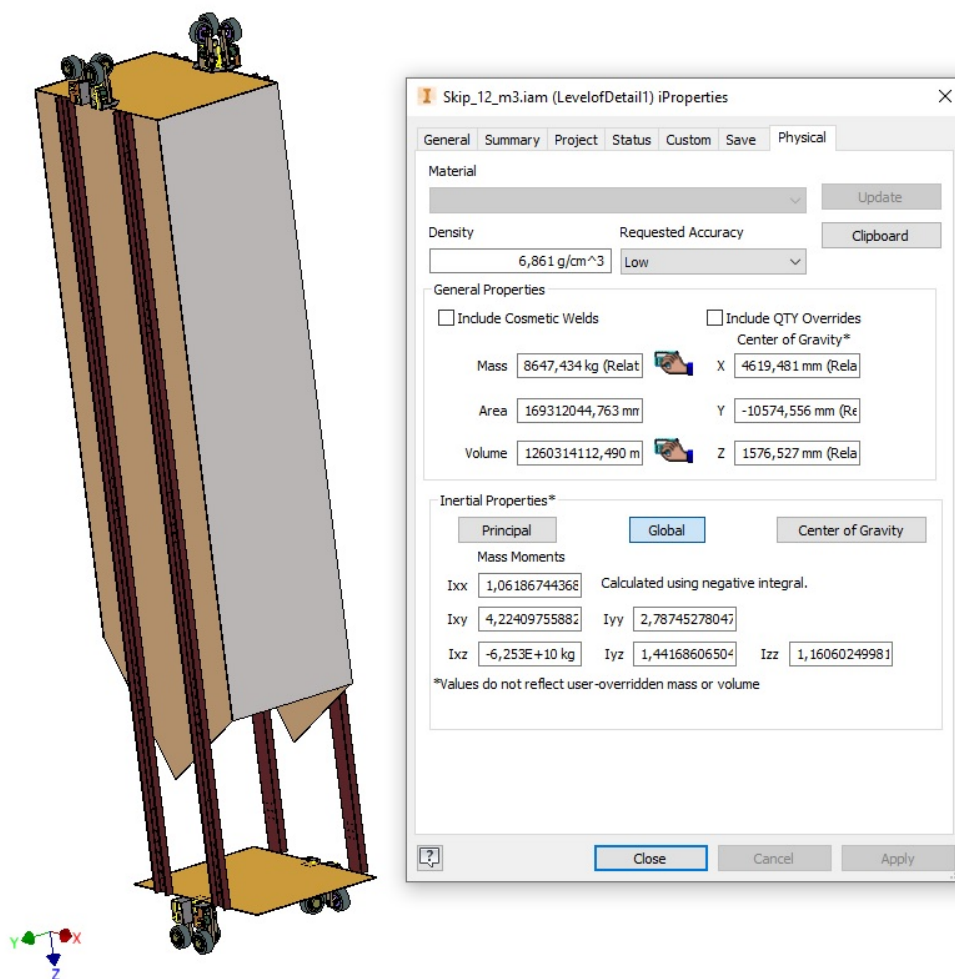
Създаването на 3D CAD модел на скип с обем на коша е на база геометричните параметри дадени на *фигура 2* и описани в детайли по-горе. Планирането на изследването включва използване на възможностите на CAD - продукта AutoDesk Inventor за определяне на инерционните характеристики на подемен съд за руднична скипова уредба. Този софтуерен продукт е предназначен за конструиране и изследване на механични елементи и системи.

На *фигура 3* е даден 3 D модел, който представлява еластично направляващо устройство или триролков блок за скипа с таблица с геометричните му характеристики. Скипа е снабден с четири триролкови блока разположени по два в горната и долната му част. Всеки един от блоковете е с маса от 219 kg, което е видно от таблицата в дясно, като общото тегло на блоковете е 876 kg. На *фигура 4* е изобразен 3 D модел на празен скип за въглища и таблица с геометричните му характеристики. Конструкцията му е изградена от ламарина от въглеродна стомана с плътност 7,85 t/m³ и дебелина на стената $d = 10 mm$.

От *фигура 4*, на която имаме 3D модел на скипов подемен съд става ясно, че масата на празния скип е 8647 kg. В таблицата от дясно на фигурата са дадени глобалните масови инерционни моменти (global mass moments of inertia) спрямо трите оси както са показани на фигурата, които са получени от софтуера на програмата.



Фигура 3. 3 D модел на триролков блок за ски



Фигура 4. 3 D модел на празен ски и таблица с геометричните и инерционните му характеристики

2.1. Компютърно определяне на масовите инерционни моменти на празен скип за въглища с вместимост 12 m³

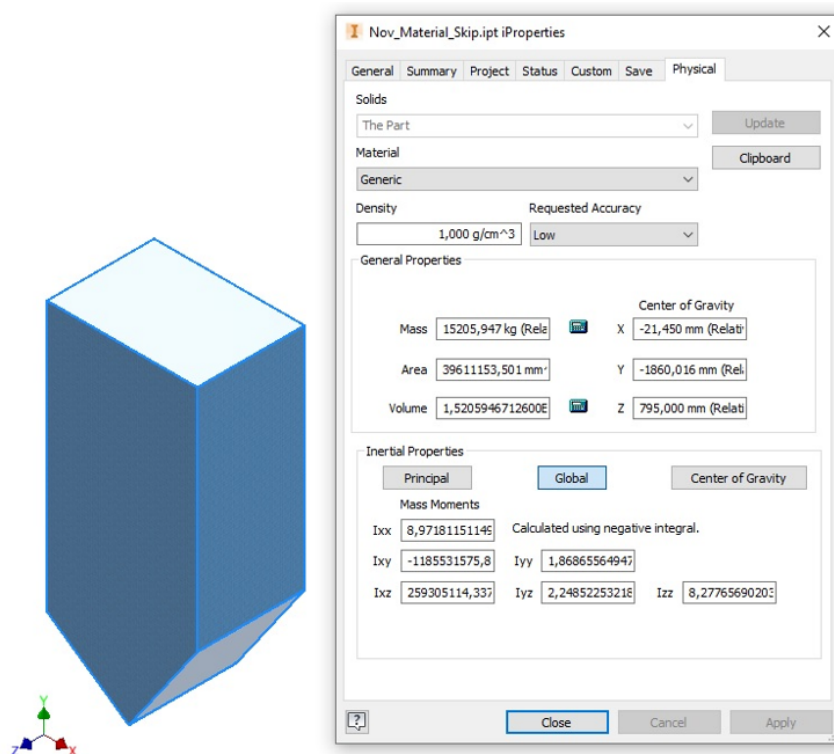
- $I_{xx} = 1\,061\,867\text{ kg.m}^2$ – масов инерционен момент спрямо ос 0x;
- $I_{yy} = 278\,745\text{ kg.m}^2$ – масов инерционен момент спрямо ос 0y;
- $I_{zz} = 1\,160\,602\text{ kg.m}^2$ – масов инерционен момент спрямо ос 0z;

На *фигура 5* е изобразен насипния материал в скипа, който представлява паралелепипед с неправилна форма. Зададен е в програмата с плътност 1 000 kg/m³, което е осреднена стойност за натрошените въглища и поради факта, че те са нееднородни и с различна големина е приета тази стойност. Полученото тегло на товара е 15 205 kg, като той е приблизително равен на товароподемността на скипа[1, 10].

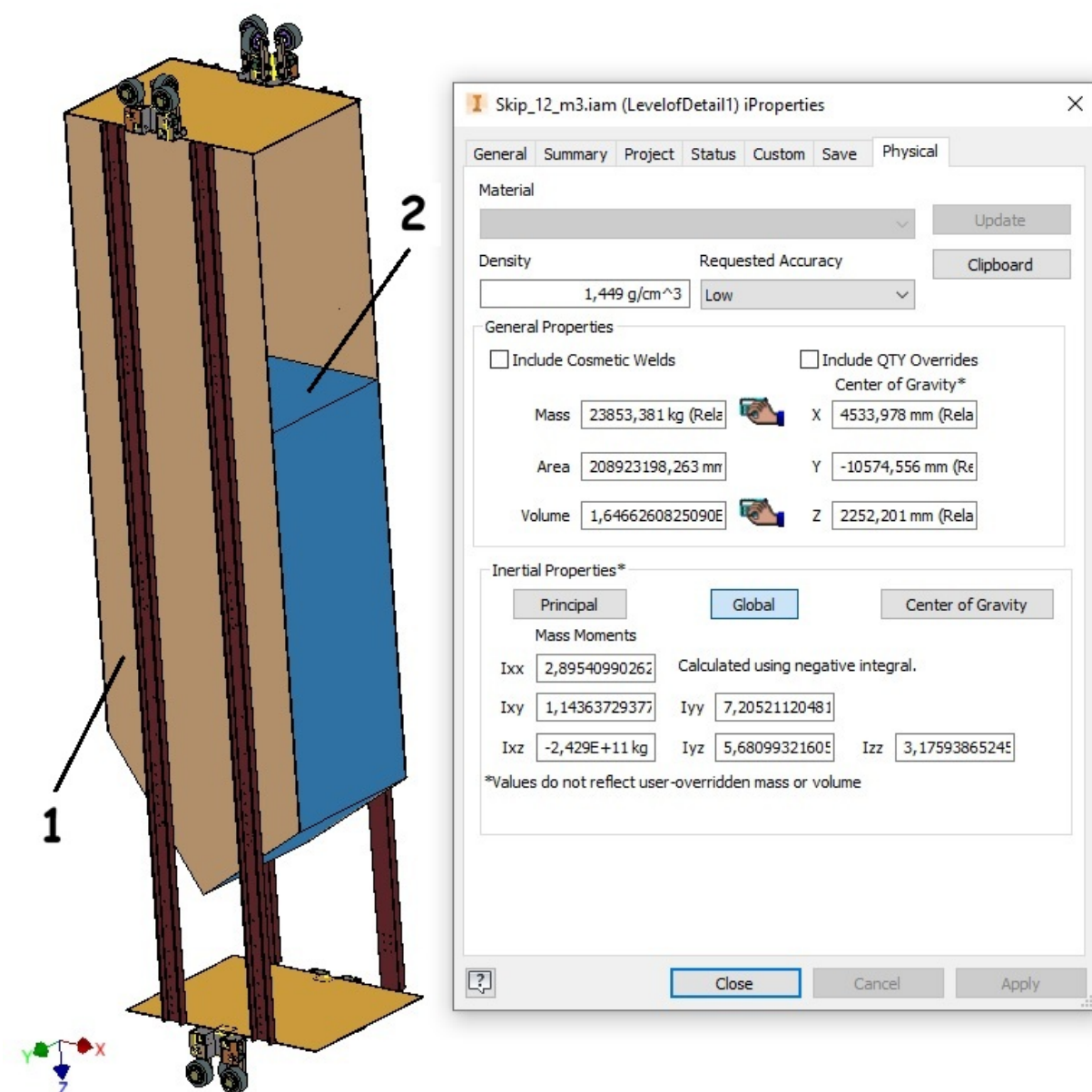
На *фигура 6* имаме компютърен модел на скип с материал в него. От таблицата(*фиг.6 – в дясно*) с характеристиките виждаме, че общото му тегло е 23 853 kg. В табличен вид са дадени геометричните характеристики на глобалните масови инерционни моменти на пълния скип като получените резултати са анализирани по-долу.

2.2. Компютърно определяне на масовите инерционни моменти на пълен скип за въглища с вместимост 12 m³

- $I_{xx} = 2\,895\,409\text{ kg.m}^2$ – масов инерционен момент спрямо ос 0x;
- $I_{yy} = 720\,521\text{ kg.m}^2$ – масов инерционен момент спрямо ос 0y;
- $I_{zz} = 3\,175\,938\text{ kg.m}^2$ – масов инерционен момент спрямо ос 0z;



Фигура 5. 3 D модел на насипния материал в скипа



Фигура 6. 3 D модел на пълен скип и таблица с геометричните и инерционните му характеристики. Позиции:
1 – скип; 2- материал в скипа

3. Изводи

Така изследвания компютърен модел потвърждава аналитичните пресмятания, които бяха направени по-горе. Получените резултати са очаквани и адекватни при сравняване на двете методики – аналитичната и компютърния модел.

Компютърните програмни продукти за 3D моделиране намират широко приложение при съставянето на изчислителни модели за изследване на големи линейни и нелинейни материални системи подложени на статични и динамични въздействия. Чрез тях сме в състояние да съставим, анализираме и тълкуваме сложни, както в геометрично, така и в материално отношение модели на системи съставени от множество конструктивни елементи. И така базисната идея се състои в представяне на сложната в геометрично отношение изследвана система като ансамбъл от подсистеми, или аналогично казано сложната геометрична област се разделя на краен брой елементи. Тези

елементи в 3D модела могат да са разглеждани и като отделни части и като едно тяло със съответните геометрични характеристики.

Чрез тази процедура сложните от математическа гледна точка изрази описващи интересувашите ни величини в цялата област се заменят с по-прости отнесени към областта на отделните елементи.

Изследванията за динамиката на системата „подемна съд - армировка“, на вертикална шахта показват, че нейната работоспособност се определя преди всичко от такава комбинация между параметрите на армировката, подемния съд, направляващите устройства и режима на работа на движение, при която се осигурява динамическа устойчивост на системата при нормални амплитуди на параметричните колебания на подемния съд при взаимодействието му с водачите от армировката. В статията е предложен компютърен метод за изследване и определяне на основните инерционни параметри на скип за руднична подемна уредба, като той осигурява възможност за изследване на произведено или новопроектирано конструктивно изделие.

Литература

1. Глабаданидис Т. „Избиране на рационален полезен товар за скипова подемна уредба“. Годишник на МГУ - София, том XXXVI. 1989г.
2. Илиев Ж., Д Анастасов., „Относно избора на скипова подемна уредба за условията на открит рудник“. „XVII Международна конференция по открит и подводен добив на полезни изкопаеми“, 2023 г., Варна, ISSN: 2535-0854.
3. Илиев Ж. „Изследване режима на работа и обосноваване на рационални параметри на ролкови направляващи устройства на подемни съдове за руднични клеткови подемни уредби“, Дисертация за ОНС „Доктор“, МГУ „Св. Иван Рилски“, 2015.
4. Кърцелин Е. Р. Топалов Ст., Александров Р., Радлов К., Минеков Н. Йочев И. „147 години история , теория и практика за използване на рудничните подемни уредби система „Кьопе“. БУЛКАМК'24, София, 2024, ISSN 1314-4537“
5. Кърцелин Е. Р. Саравски Н., Александров Р., Радлов К. Йочев „Резултати от измерване на временни параметри на спирачните ситеми на руднични подеми уредби в експлоатация“, БУЛКАМК'24, София, 2024, ISSN 1314-4537“
6. Кърцелин Е. Р., Иванов К., Александров Р., Минеков Н. „За необходимостта от модернизиране на системата за пускане и управление на мощни синхронни двигатели в експлоатация“, БУЛКАМК'20, София, 2020, ISSN 1314-4537“
7. Зъбчев А., Р. Александров, И. Проданов, „Анализ на енергийната ефективност при преустройство на електрозадвижването на подемна машина., БУЛКАМК'14, София, 2014, ISSN 1314-4537“
8. Александров Р. „Надеждност на руднични подемни уредби с отчитане на техническото обслужване“, БУЛКАМК'22, София, 2022, ISSN 1314-4537.
9. Федорова З.М. „Сборник примеров и задач по рудничным подъемным установкам“, Госгориздат, 1961г.
10. Ковачев В. Руднични подемни уредби, София, 1990г.

СЕИЗМИЧНО ПРОЕКТИРАНЕ НА ПОДЗЕМНИ СЪОРЪЖЕНИЯ В СКАЛНИ МАСИВИ – НОРМАТИВНА РАМКА И ПРАКТИЧЕСКИ ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА

Владимир Вутов¹
¹„Геострой“ АД, София

ABSTRACT

The paper reviews the state of the regulatory framework for the seismic design of underground structures in rock masses. A comparative analysis between the current Bulgarian regulatory framework and international best practices is presented, with an emphasis on the specifics of the kinematic rock-structure interaction. Practical challenges in determining deep-seated seismic loads, the limitations of simplified analytical methods, and the application of numerical modeling are examined. In the context of the second generation of Eurocodes, recommendations for practice are formulated to enhance safety in mining and underground engineering. Ultimately, the work aims to provide actionable insights for structural and mining engineers navigating complex seismic design standards.

Keywords: Seismic design, Underground structures, Rock masses, Regulatory framework

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Сеизмичното проектиране на подземни съоръжения в скални масиви придобива особено значение, когато проблемът се разглежда от гледна точка на инженерната практика в България. Страната се намира в един от сеизмично активните райони на Европа, като значителни части от територията попадат в области с умерена до висока сеизмична опасност [1, 2].

Сеизмичната опасност се формира както от плиткни огнища на територията на страната (напр. Кресненското земетресение от 1904 г.), така и от междинно-дълбочинната зона Вранча в Румъния [2]. Силни земетресения продължават да се проявяват и в региона – напр. земетресенията от 6 февруари 2023 г. в Югоизточна Турция при Pazarcık ($M_w = 7.7$) и Elbistan ($M_w = 7.6$) [3].

Натрупаният опит от силни земетресения показва, че подземните съоръжения като цяло проявяват по-добро сеизмично поведение и по-ниска степен на повреди в сравнение с наземните конструкции [4, 6]. Подземната конструкция е ограничена от скалния или почвения масив и не може свободно да развива инерционен отговор по начина, характерен за наземните конструкции. Освен това ускоренията обичайно намаляват с дълбочината, макар това да не важи непременно за деформациите на масива. Поради това при значителна част от подземните конструкции основният механизъм на сеизмично натоварване се определя не толкова от собствените инерционни сили, колкото от деформациите и относителните премествания, налагани от заобикалящия масив, т.е. от кинематичното взаимодействие между масива и конструкцията [4, 5].

Това сравнително благоприятно поведение обаче не е универсално. Наблюденията след силни земетресения показват, че тежки повреди могат да възникнат при пресичане или близост до активни разломи, в силно нарушени и слаби зони, при портални участъци и при значителни постоянни земни деформации [4, 6]. Полевото обследване след земетресенията в Турция през 2023 г. например установява като цяло добро поведение на съвременните тунели, но същевременно документира тежко повреждане на стар тунел с каменна облицовка, локални повреди на облицовки и портали и скални обрушвания [3].

Второ съществено предизвикателство е, че сеизмичното въздействие не може да се разглежда независимо от действителното състояние на скалния масив. При преминаване на тунели и минни изработки през напукани, тектонски нарушени и разломни зони дискретността, анизотропията и пространствената изменчивост на масива могат съществено да изменят както разпространението на сеизмичните вълни, така и локалните деформации, предавани на конструкцията. Следователно проблемът има двоен характер: необходимо е едновременно надеждно определяне на сеизмичното въздействие на дълбочината на съоръжението и адекватно моделиране на механичното поведение на

скалния масив и взаимодействието му с конструкцията. В минната практика към това се добавя и индуцираната от минните работи сеизмичност, която е извън обхвата на Еврокод 8.

При подземни съоръжения от критичната транспортна, енергийна и хидротехническа инфраструктура приемливото поведение включва и запазване или бързо възстановяване на функционалността след земетресение – принцип, заложен в основните цели на Еврокод 8, според които при сеизмично въздействие следва да бъдат защитени човешките животи, да бъдат ограничени повредите, а конструкциите, важни за гражданската защита, да останат функциониращи [7].

В този контекст настоящата работа анализира приложимата нормативна рамка и съответствието ѝ с международната практика и второто поколение на Еврокод 8, с акцент върху кинематичното взаимодействие скален масив–конструкция, сеизмичното въздействие в дълбочина и избора на метод за анализ, и предлага практически насоки за избор на ниво на анализ.

2. ОСОБЕНОСТИ НА СЕИЗМИЧНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА ПОДЗЕМНИ СЪОРЪЖЕНИЯ В СКАЛНИ МАСИВИ

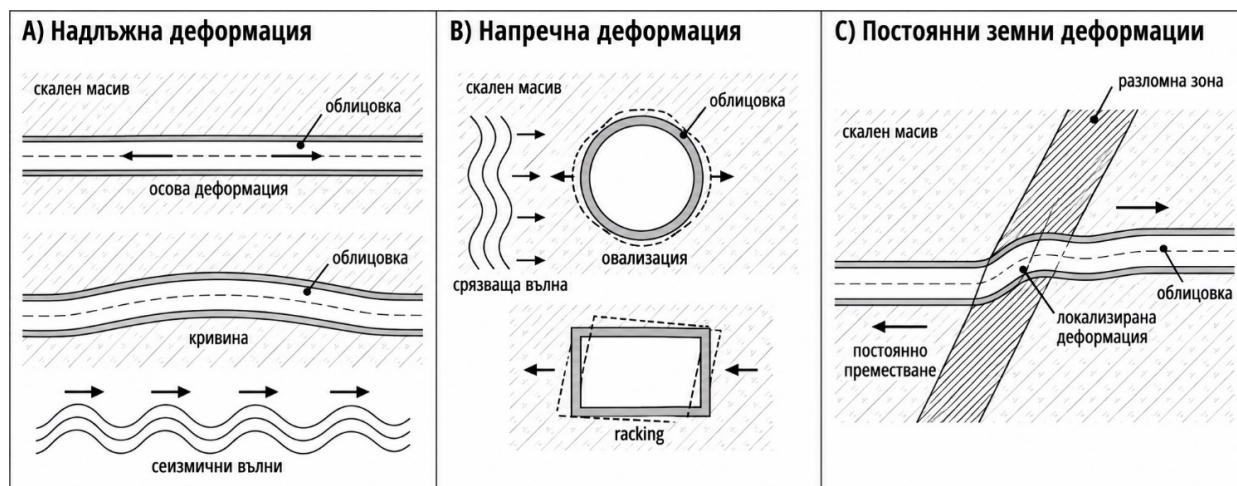
От гледна точка на механизма на въздействие е целесъобразно да се разграничат временните деформации на масива, предизвикани от разпространението на сеизмичните вълни, и постоянните земни деформации, свързани например с разломни премествания, свлачищни процеси или други форми на необратимо изменение на масива [4, 5]. В надлъжно направление компонентите на движението, успоредни на оста на тунела, пораждаат осови деформации, а перпендикулярните на нея – огъване (кривина) [4, 8]. При срязващи вълни, разпространяващи се перпендикулярно на оста, се изменя формата на напречното сечение – при кръгли сечения типичният механизъм е овализация (ovaling), а при правоъгълни подземни конструкции – странично изкривяване (racking) [4,8].

Определящо значение за дълбоко разположените съоръжения има кинематичното взаимодействие между скалния масив и конструкцията. Деформацията на облицовката не е непременно равна на деформацията на масива, тъй като конструкцията променя локално деформационното поле. Степента на това взаимодействие зависи основно от относителната коравина на конструкцията и масива, геометрията на изработката и условията на контакта между облицовката и скалата. Това се изразява чрез коефициента на гъвкавост F [4, 8]: при $F < 1$ облицовката е по-корава от масива, деформира се по-малко от него и поема по-големи усилия, а при $F > 1$ се деформира повече от масива в свободно поле, като при много голямо F се доближава до деформацията на неукрепена изработка. Тъй като при тунели в скала F често е значително по-голямо от 1, директното налагане на деформацията в свободно поле може да я подцени.

Спецификата на скалните масиви допълнително усложнява този механизъм. При сравнително здрав и хомогенен масив деформациите могат да бъдат относително плавно разпределени, докато при силно нарушени зони е възможно локализиране на деформации и концентрация на повреди в облицовката. Анализите на реални повреди на тунели показват, че геоложките условия и особено разломните и пукнатинни зони са сред най-съществените фактори за тяхната сеизмична уязвимост [6].

Особено неблагоприятен случай е директното пресичане на активен разлом. Тогава към цикличните деформации от преминаващите сеизмични вълни се добавя възможността за постоянно относително преместване между отделни части на масива. За разлика от сравнително разпределените деформации при сеизмично вълново движение, разломното преместване може да бъде концентрирано в ограничена зона и да наложи значителни осови, срязващи и огъвни деформации на подземната конструкция. Също по-уязвими могат да бъдат порталните и плитко заложените участъци, където към динамичното въздействие се добавят ефектите на свободната повърхност и възможни нестабилности на склоновете.

Следователно изборът на метод за сеизмичен анализ трябва да бъде обвързан не само с очакваното ниво на сеизмично въздействие, но и с геоложката структура и степента на нарушеност на масива. Тази граница между приложимостта на опростените и на числените подходи е от ключово практическо значение и е разгледана в раздел 5.



Фигура 1. Основни механизми на сеизмично въздействие върху подземни съоръжения: а) надлъжни осови деформации и кривина; б) напречна овализация/странично изкривяване в) постоянни деформации при пресичане на разломна зона.

3. ДЕЙСТВАЩА НОРМАТИВНА РАМКА В БЪЛГАРИЯ

Проектирането на строителни конструкции в България се извършва в рамките на европейската система за конструктивно проектиране, въведена с Наредба № РД-02-20-19 от 2011 г., която определя условията за прилагане на Еврокодовете и съответните национални приложения [9]. Наредбата предвижда задължително прилагане на Еврокодовете за определени категории строежи, като за част от останалите допуска и проектиране по действащите национални нормативни актове, без смесване на методите от двете системи [9]. Успоредно с това действа Наредба № РД-02-20-2 от 2012 г. за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони [10]. Предвид характера и категорията им по ЗУТ, тунелите – най-често срещаният вид подземни съоръжения – се проектират по системата на Еврокодовете.

Основните приложими документи от европейската система са БДС EN 1998-1 и неговото Национално приложение, чрез които се определят общите правила и сеизмичните въздействия [7], БДС EN 1998-5 и Националното му приложение, обхващащи фундаменти, подпорни конструкции и геотехническите аспекти на сеизмичното проектиране [11], както и БДС EN 1997 за геотехническото проектиране. Специфични технически правила съществуват за пътните тунели чрез Наредба № РД-02-20-2 от 2015 г., актуализирана през 2025 г., но нейният обхват е ограничен до пътни тунели по републиканската пътна мрежа и изрично не включва тунели с друго предназначение [12].

Съществен проблем е, че първото поколение Еврокодове не съдържа самостоятелна и цялостна методика за проектиране на тунели и други подземни съоръжения. Съществуващите части на EN 1997 и EN 1998 могат да бъдат използвани като обща рамка, но не регламентират в достатъчна степен специфични въпроси като кинематичното взаимодействие масив–конструкция, определянето на сеизмичните деформации в дълбочина и проверките при преминаване през нарушени и разломни зони [13]. Именно тази нормативна празнина налага в практиката комбиниране на изискванията на Еврокодовете с международни ръководства, специализирана литература и числен анализ.

4. МЕЖДУНАРОДНА ПРАКТИКА И ВТОРО ПОКОЛЕНИЕ НА ЕВРОКОД 8

За целите на настоящия анализ са избрани три референтни документа: обзорът на Hashash et al. [4], публикуван в официалното списание на ITA/AITES, техническото ръководство на Federal Highway Administration (FHWA) за проектиране на тунели [5] и второто поколение на EN 1998-5:2024 [14].

Подходът, систематизиран в [4], поставя в основата на сеизмичното проектиране деформациите на околния масив, а не директното прилагане на инерционни сили върху конструкцията. Анализът

започва с оценка на деформациите на свободното поле, след което се отчита взаимодействието между масива и облицовката. При сложни геоложки условия, значително взаимодействие масив–конструкция или наличие на разломи се преминава към по-подробен числен анализ [4].

Ръководството на FHWA [5] доразвива практически този подход, като разграничава опростени аналитични процедури и по-детайлно числено моделиране. При напречен анализ въздействието се задава преимуществено чрез очакваната деформация на масива, която конструкцията трябва да поеме, вместо чрез предварително определен динамичен натиск на масива. Деформацията на свободното поле е приемлива при корав масив и малки деформации, а при съществено влияние на относителната коравина взаимодействието трябва да се отчита изрично [5].

Съществена промяна спрямо първото поколение Еврокодове настъпва с публикуването на EN 1998-5:2024 [14]. За първи път подземните конструкции са изрично включени още в наименованието и обхвата на стандарта, а специална глава 11 „Underground structures“ разглежда сеизмичните въздействия, параметрите на земното движение, методите за анализ, временните сеизмични въздействия, постоянните земни деформации и големите подземни пространства [14]. Информативните приложения H, I и J допълват основния текст съответно с опростена оценка на параметрите на движение на масива, аналитични зависимости за сеизмично проектиране на тунели и функции на импеданс за взаимодействието със средата.

Особено важно е разграничението между плитко и дълбоко разположени съоръжения. Анализът на JRC [13] посочва, че при плиткит тунели и cut-and-cover конструкции въздействието може да бъде представено чрез еквивалентни натоварвания в напречно направление, докато при дълбоки тунели и големи подземни пространства се предпочита определянето на деформациите на масива както в напречно, така и в надлъжно направление. Динамичното числено моделиране при високи класове на сеизмично въздействие и проектирането на тунели в потенциално активни разломи обаче са посочени като направления за бъдещо развитие на стандарта [13].

Въвеждането на тези положения представлява съществено сближаване на Еврокод 8 с утвърдената международна практика. Същевременно EN 1998-5 не следва да се разглежда като самостоятелна и изчерпателна нормативна система за проектиране на тунели. Анализът на JRC [13] подчертава необходимостта от съвместното му прилагане с EN 1997 и от по-нататъшно развитие на хармонизирани правила за цялостното проектиране и проверка на подземните конструкции.

5. ПРАКТИЧЕСКИ ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА ПРИ СЕИЗМИЧНОТО ПРОЕКТИРАНЕ

Основното практическо затруднение при съоръжения в скални масиви е, че сеизмичното въздействие, характеристиките на масива и взаимодействието му с конструкцията не могат да бъдат разглеждани независимо. Неопределеността във всеки от тези компоненти се пренася в оценката на крайния сеизмичен отговор.

5.1. Определяне на сеизмичното въздействие на дълбочината на съоръжението

Проектното движение на земната повърхност не следва да се приема като сеизмично въздействие върху дълбоко разположено подземно съоръжение. При подземните съоръжения особено значение имат скоростта на частиците, характеристиките на разпространение на вълните и съответните деформации на свободното поле. От тази гледна точка пиковата скорост на движение (PGV) и скоростта на разпространение на срязващите вълни V_s са пряко свързани с оценката на максималните срязващи деформации на масива и могат да бъдат по-информативни за кинематичния отговор на тунела от самостоятелното разглеждане на PGA [4, 8].

Следователно съществен практически въпрос е определянето на движението именно на котата на подземното съоръжение. При значими съоръжения това предполага „site-specific“ оценка, отчитаща геоложкия разрез, динамичните свойства на пластовете и скалните разновидности, дълбочината и промяната на характеристиките на сеизмичните вълни при тяхното разпространение [5, 14]. При сложна геология простото редуциране на повърхностното ускорение с дълбочината не е достатъчно, тъй като граници между среди с различен импеданс, тектонски нарушения и локални слаби зони могат да доведат до отражение, пречупване и концентрация на деформациите.

5.2. Представяне на скалния масив

Второто основно предизвикателство е изборът на представителни механични характеристики на масива. Параметрите на ненарушената скала не могат директно да се използват като свойства на скалния масив. Неговата деформируемост и якост зависят от напукаността, ориентацията и характеристиките на пукнатините, тектонската нарушеност, изветрянето и въздействието на изкопните работи. Деформационният модул на скалния масив е един от основните параметри, определящи взаимодействието с облицовката, като неговата оценка обикновено се основава на полеви изпитвания или на емпирични зависимости, свързани с класификации като RMR и GSI [15].

Особено важно е да се прецени дали масивът може да бъде представен като еквивалентна непрекъсната среда, или отделните структурни нарушения трябва да бъдат моделирани експлицитно. Подходът на еквивалентна непрекъсната среда може да бъде достатъчен при сравнително равномерно напукан масив, когато размерът и гъстотата на пукнатините позволяват осредняване на поведението. При доминиращи пукнатинни системи, разломи и силно изразени блокови масиви обаче механизмът на отговор може да се определя от приплъзване, отваряне и относително преместване по дискретните нарушения. Числени изследвания на тунели в напукани скални масиви показват значително влияние на ориентацията, коравината и триенето по пукнатините върху динамичните деформации.

Таблица 1. Основни източници на неопределеност при практическото сеизмично проектиране

Компонент	Основен практически проблем	Влияние върху анализа
Сеизмично въздействие	Определяне на движението на дълбочината на съоръжението	Неточна оценка на деформации в полето
Динамични свойства	V_s , динамичен модул и затихване	Определят разпространението на вълните и нивото на деформациите
Състояние на масива	Напуканост, анизотропия, изветряне	Променя коравината и разпределението на деформациите
Разломи и слаби зони	Неизвестна геометрия и механични свойства	Възможна локализация на големи относителни премествания
Контакт масив–облицовка	Приплъзване, отделяне или пълен контакт	Определя предаването на деформациите към конструкцията

5.3. Област на приложимост на различните методи

Опростените методи са ценен инструмент за предварителна оценка и в много случаи могат да бъдат достатъчни за инженерното проектиране. Тяхната надеждност обаче зависи от изпълнението на предпоставките, върху които са разработени. Класическите аналитични решения за ovaling и racking обикновено приемат проста геометрия, хомогенна и изотропна среда, достатъчна дълбочина и отсъствие на влияние от съседни съоръжения. FHWA изрично посочва, че при отклонение от тези предпоставки или при съоръжения с висока значимост в силно сеизмична среда може да бъде необходим числен анализ.

Таблица 2. Приложимост и ограничения на основните методи за сеизмичен анализ

Метод	Подходящо приложение	Основно ограничение
Деформации на свободното поле	Предварителен анализ; гъвкава конструкция в сравнително корав и еднороден масив	Не отчита изрично взаимодействието масив–конструкция
Аналитичен модел на взаимодействие	Кръгли/правоъгълни сечения и идеализирана среда	Ограничена приложимост при сложна геометрия и геология
Псевдостатичен FEM/FDM	Отчитане на геометрията и взаимодействието без пълен динамичен анализ	Не моделира непосредствено разпространението на вълните

Метод	Подходящо приложение	Основно ограничение
Динамичен FEM/FDM	Висока сеизмичност, сложна геология и важни съоръжения	Чувствителност към входното движение, граничните условия, мрежата и затихването
Модели с дискретна среда/DEM	Блокови и силно напукани масиви, значими дискретни нарушения	Необходимост от надеждни параметри на голям брой контакти и висока изчислителна сложност

Таблицата показва, че усложняването на модела само по себе си не гарантира по-надежден резултат. По-детайлният анализ изисква съответно по-пълни входни данни; в противен случай геоложката неопределеност просто се пренася в по-сложен числен модел.

5.4. Числено моделиране

При сложни геоложки условия численото моделиране позволява едновременно отчитане на реалната геометрия, последователността на изграждане, нелинейното поведение на масива, взаимодействието с облицовката и пространствената изменчивост на свойствата. За напречния отговор на дълги тунели двумерният FEM/FDM модел често е достатъчен, докато тримерният анализ става необходим при портали, пресичания, големи каверни, сложни пространствени разломни зони и други ситуации, при които предпоставката за равнинна деформация не е приложима.

При динамичен анализ критични са правилното задаване на входното сеизмично движение, подходящите абсорбиращи или свободнополеви гранични условия, достатъчната дискретизация за предаване на разглеждания честотен диапазон и реалистичното представяне на затихването. Не по-малко важна е верификацията на модела чрез сравнение с по-прости аналитични решения или свободнополеви анализ. При силно напукани скални масиви континуалните методи могат да не възпроизведат приплъзването и отварянето по отделни структурни нарушения, поради което при определящо влияние на дискретните пукнатини или разломи следва да се обмислят модели с дискретна среда или комбинирани модели [16].

Практическият избор следователно не е между „опростен“ и „точен“ модел, а между нива на анализ, съобразени с качеството на наличната информация, сложността на геоложката среда, сеизмичното въздействие и последствията от евентуална повреда.

6. ПРЕДЛОЖЕНА ПРАКТИЧЕСКА РАМКА ЗА СЕИЗМИЧНО ПРОЕКТИРАНЕ

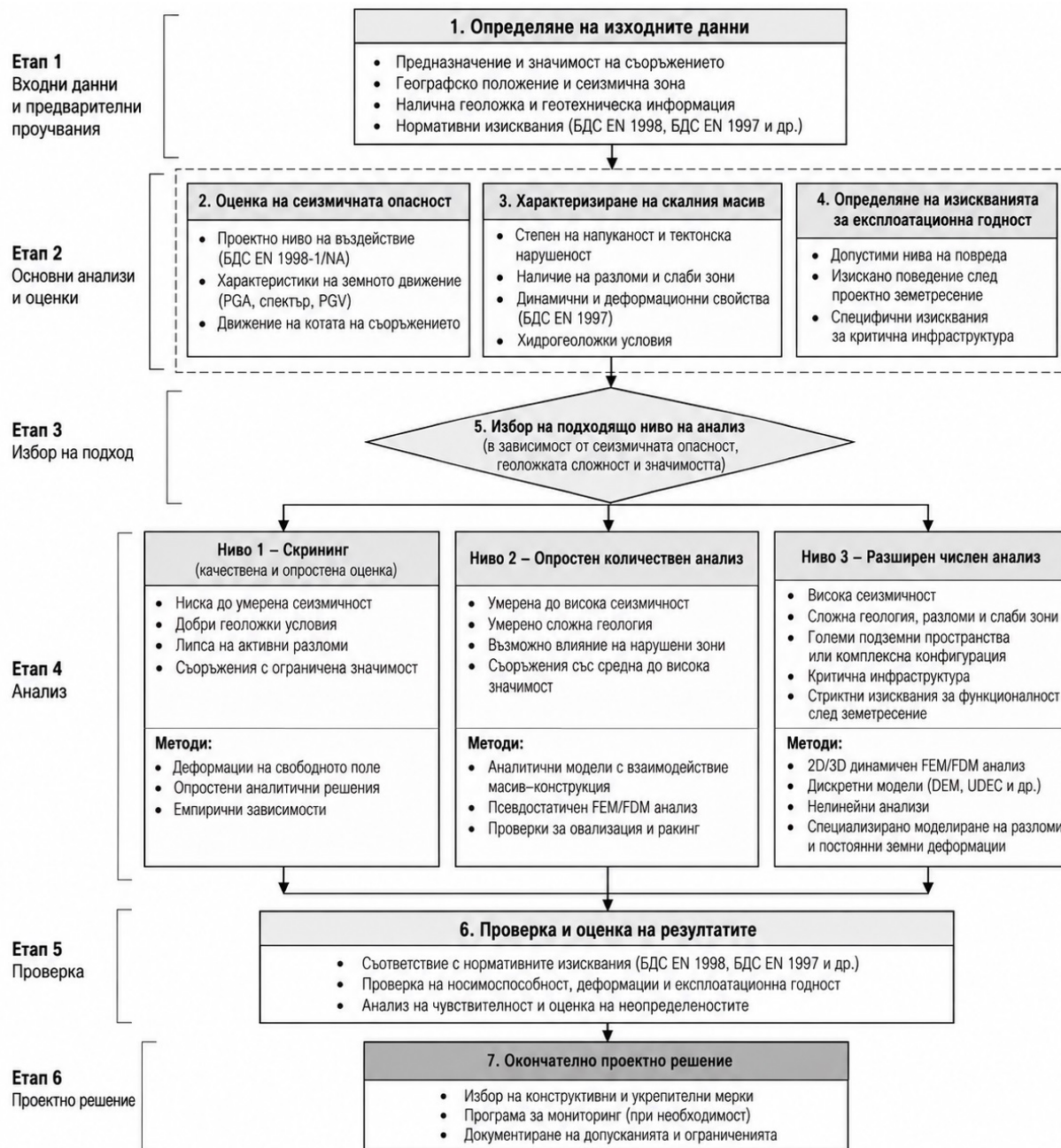
Въз основа на изложеното се предлага степенуван подход за избор на метод за сеизмичен анализ на подземни съоръжения в скални масиви. Необходимата сложност на анализа следва да се определя съвместно от нивото на сеизмично въздействие, геоложката сложност на масива, конструктивните особености и значимостта на съоръжението.

При ниво 1 – предварителна оценка (screening) се разглеждат съоръжения с относително проста геометрия, разположени в сравнително хомогенен скален масив, без значими разломни и слаби зони. Подходът включва определяне на сеизмичното въздействие и деформациите в свободно поле и оценка на приложимостта на опростени аналитични методи.

При ниво 2 – опростен анализ взаимодействието между масива и конструкцията се отчита изрично чрез аналитични или псевдостатични числени модели. Това ниво е приложимо при по-високи очаквани деформации, умерено сложни геоложки условия или повишена значимост на съоръжението, когато скалният масив все още може обосновано да бъде представен като еквивалентна континуална среда.

При ниво 3 – усъвършенстван числен анализ се преминава към двумерно или тримерно нелинейно динамично моделиране. Такъв подход е необходим при висока сеизмична опасност, сложна геология, големи подземни пространства, активни разломи и значими слаби зони, както и за съоръжения от критичната инфраструктура. При определящо влияние на отделни структурни нарушения могат да бъдат необходими дискретни или комбинирани модели на скалния масив.

Предложената рамка не представлява нормативна класификация, а инженерен инструмент за избор на обосновано ниво на анализ. Независимо от избраното ниво, резултатите следва да бъдат проверявани за съответствие с приложимите нормативни изисквания, геоложките данни и основните предпоставки на използвания изчислителен модел.



Фигура 2. Предложена практическа рамка за избор на ниво на сеизмичен анализ на подземни съоръжения в скални масиви.

7. ИЗВОДИ И ПРЕПОРЪКИ

Сеизмичното проектиране на подземни съоръжения в скални масиви изисква подход, различен от този при наземните конструкции, тъй като определящи често са не инерционните сили, а деформациите, налагани от околния масив, и кинематичното взаимодействие между масива и облицовката.

Действащата в България нормативна система не предоставя цялостна специализирана процедура за тунели и други подземни конструкции. Второто поколение на EN 1998-5 е съществено развитие чрез изричното им включване, макар да не представлява самостоятелна система за проектиране и проверка на тунели.

От практическа гледна точка ключови са определянето на движението в дълбочина, характеристиките и нарушеността на масива и условията на контакт масив–облицовка. Предложената степенувана рамка съпоставя сложността на модела с геоложката сложност и значимостта на обекта и следва да се съчетае с качествено инженерно-геоложко проучване и верифицирано числено моделиране.

Библиография

1. JRC. EU Member State Case Study 1 – Bulgaria: Nationally Determined Parameters for Eurocode 8. The Way Forward for the Eurocodes Implementation in the Balkans, Tirana, 10–11 October 2018.
2. Danciu, L., Nandan, S., Reyes, C., et al. The 2020 Update of the European Seismic Hazard Model: Model Overview. EFEHR Technical Report 001, v1.0.0, 2021. DOI: 10.12686/a15.
3. Çetin, K. Ö., İlgaç, M., Can, G., Çakır, E. (eds.). Preliminary Reconnaissance Report on February 6, 2023, Pazarcık Mw=7.7 and Elbistan Mw=7.6, Kahramanmaraş–Türkiye Earthquakes. METU-EERC, Report No. METU/EERC 2023-01, Ankara, 2023.
4. Hashash, Y. M. A., Hook, J. J., Schmidt, B., Yao, J. I.-C. Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(4), 247–293, 2001. DOI: 10.1016/S0886-7798(01)00051-7.
5. Hung, C. J., Monsees, J., Munfah, N., Wisniewski, J. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements. FHWA, Report No. FHWA-NHI-10-034, 2009.
6. Zhang, X., Jiang, Y., Maegawa, K. Mountain tunnel under earthquake force: A review of possible causes of damages and restoration methods. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2), 414–426, 2020. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.11.002.
7. CEN. EN 1998-1:2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels, 2004.
8. Wang, J.-N. *Seismic Design of Tunnels: A Simple State-of-the-Art Design Approach*. Monograph 7, Parsons Brinckerhoff, New York, 1993.
9. МРРБ. Наредба № РД-02-20-19 от 29 декември 2011 г. за проектиране на строителните конструкции на строежите чрез прилагане на европейската система за проектиране на строителни конструкции. ДВ, бр. 2/2012, с последващи изменения и допълнения.
10. МРРБ. Наредба № РД-02-20-2 от 27 януари 2012 г. за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони. ДВ, бр. 13/2012.
11. БИС. БДС EN 1998-5:2005/NA:2012. Еврокод 8: Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Част 5: Фундаменти, подпорни конструкции и геотехнически аспекти – Национално приложение, с изменение 1:2015.
12. МРРБ. Наредба № РД-02-20-2 от 21 декември 2015 г. за технически правила и норми за проектиране на пътни тунели. ДВ, бр. 8/2016, изм. и доп. ДВ, бр. 69/2025.
13. Athanasopoulou, A., Bogusz, W., Boldini, D., et al. Prospects for Designing Tunnels and Other Underground Structures in the Context of the Eurocodes. Publications Office of the European Union, JRC Technical Report, EUR 31265 EN, 2022. DOI: 10.2760/307164.
14. CEN. EN 1998-5:2024. Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Geotechnical aspects, foundations, retaining and underground structures. Brussels, 2024.
15. Hoek, E., Diederichs, M. S. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 203–215, 2006. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.06.005.
16. Varma, M., Maji, V. B., Boominathan, A. Numerical modeling of a tunnel in jointed rocks subjected to seismic loading. *Underground Space*, 4(2), 133–146, 2019. DOI: 10.1016/j.undsp.2018.11.001.

КИСЕЛИННИЯТ МИНЕН ДРЕНАЖ КАТО ИКОНОМИЧЕСКИ РЕСУРС.

МЕТОДИКА ЗА ПРЕДВАРИТЕЛНА ТЕХНИКО-ИКОНОМИЧЕСКА ОЦЕНКА НА ИЗВЛИЧАНЕ НА МЕД

инж. Георги Савов, инж. Иван Гюров
Премиятех ООД, София
premiattec2016@gmail.com; premiattec@yahoo.com

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is commonly treated as a long-term environmental liability, although dissolved copper may create a secondary-resource opportunity. This paper presents a screening techno-economic methodology that compares a mandatory baseline treatment scenario with a resource-recovery scenario for the same AMD stream and system boundary. The method combines technology feasibility, annual copper load, differential CAPEX/OPEX, NPV, break-even indicators, data-reliability classes and sensitivity analysis. Preliminary stress testing identifies sensitivity to water reuse value, OPEX and time-dependent metal recovery, confirming that the present model should be regarded as an initial project-screening framework requiring further validation and development.

АБРЕВИАТУРИ И ОЗНАЧЕНИЯ

Таблица 1. Абревиатури и означения

Абревиатура / символ	Значение	Единица / бележка
AMD; Cu	киселинен минен дренаж; мед	—
CAPEX; OPEX	капиталови; експлоатационни разходи	€, млн. €; €/y, €/m ³
NPV; ΔNPV; PVF	нетна настояща стойност; разлика в NPV между ресурсния и базовия сценарий; фактор за настояща стойност	€, млн. €; —
ΔX	разлика между ресурсния и базовия сценарий: X _{res} – X _{base}	според X
Q, Q _i , Q _{avg}	дебит; дебит за i-тия интервал; среден дебит	m ³ /h
C _{Cu} , C _{Cu,i} , C _{Cu,avg}	концентрация на Cu; за i-тия интервал; средна концентрация	mg/L
Δt; H	продължителност на i-тия интервал; годишни работни часове	h; h/y
M _{Cu,in} ; M _{Cu,rec}	годишен входящ Cu товар; годишно възстановено количество Cu	t Cu/y
η _{Cu}	общо технологично извличане на Cu	% или дял
P _{Cu}	референтна цена на Cu	€/t Cu
f _p	коефициент на платимост/качество на Cu продукта	—
R _{Cu}	годишен приход/икономическа стойност от възстановения Cu	€/y
S _{water} ; B _{other}	стойност на повторно използваната вода; други доказуеми годишни ползи	€/y
ΔCAPEX; ΔOPEX; ΔCF; ΔCF _t	допълнителен CAPEX; годишна разлика в OPEX; допълнителен паричен поток и поток през година t	€ / €/y
r; n; t	реален дисконтов процент; анализен период; година в дисконтирания период	% или дял; y
f _{reuse} ; C _{water} ; C	дял повторно използвана вода; заместваща стойност на водата; специфичен OPEX в примера	% или дял; €/m ³
R _{Cu,req}	необходим годишен икономически принос от Cu при ΔNPV = 0	€/y
M _{Cu,in,BE} ; C _{Cu,BE}	граничен Cu товар; гранична концентрация на Cu	t Cu/y; mg/L
P _{Cu,BE} ; η _{Cu,BE} ; ΔCAPEX _{max}	гранична цена; гранично извличане; максимално допустим допълнителен CAPEX	€/t Cu; %; €, млн. €
Margin _M ; Margin _C	абсолютен резерв по Cu товар; по концентрация	t Cu/y; mg/L

1. ВЪВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА НА ПРОБЛЕМА

Киселинният минен дренаж (AMD) традиционно се разглежда като екологичен пасив, който изисква дългосрочно управление, неутрализация, отделяне на утайки и контрол на остатъчните води. Същевременно разтворените метали могат да превърнат част от тези потоци в потенциален вторичен ресурс, когато съществува технологично приложим начин за селективното им възстановяване [1, 2]. Самото наличие на Си обаче не е достатъчно основание един воден поток да бъде определен като икономически ресурс.

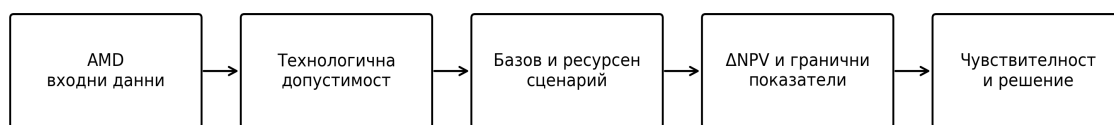
От инвестиционна гледна точка ключовият въпрос е: създава ли извличането на Си допълнителна икономическа стойност спрямо задължителното управление на същия AMD поток? При екологични проекти значителна част от капиталовите и експлоатационните разходи ще бъдат понесени независимо дали се произвежда търговски продукт. Затова директното сравнение на приходите от мед с пълния разход за ресурсната инсталация може да даде изкривена картина.

В настоящата разработка е предложена методика за предварителна технико-икономическа оценка, при която един и същ AMD поток се разглежда в два съпоставими сценария: базов сценарий за задължително екологично третиране и ресурсен сценарий с извличане на Си и последващо достигане на същата крайна функция на водата. Подходът следва общите принципи на сравнителната инвестиционна оценка, дисконтирането и анализа на алтернативи [3, 4], но ги адаптира към специфичната ситуация на AMD.

2. МЕТОДИЧЕСКИ ПОДХОД

Основният принцип е двата сценария да имат еднаква начална точка, системна граница и крайна функция. Базовият сценарий включва минимално необходимото реалистично третиране без целенасочено производство на Си продукт. Ресурсният сценарий включва селективно извличане на Си преди или в рамките на окончателното третиране. Сравняват се действителните разлики между вариантите, като за всеки показател се използва знаковата конвенция $\Delta X = X_{\text{res}} - X_{\text{base}}$. Това позволява ресурсният вариант да не бъде натоварван с разходи, които операторът би понесъл и при базовото решение.

Положителната икономика не е достатъчна сама по себе си. Преди финансовата интерпретация се проверява технологичната допустимост: приложимост на избрания процес към конкретния AMD състав, обосновано общо извличане, определим и реализируем продукт, възможност остатъчната вода да достигне необходимото качество и реалност на декларираното повторно използване. Методиката е технологично независима; конкретното решение участва чрез η_{Si} , качеството и платимостта на продукта, CAPEX, OPEX и остатъчното третиране.



Фиг. 1. Логическа последователност на предварителната оценка.

Проектната зрялост се представя чрез три нива: Ниво I – предварителна оценка с налични средни данни и ориентировъчни CAPEX/OPEX; Ниво II – оценка след лабораторни или пилотни изпитания; Ниво III – проектна оценка с потвърден материален баланс, конкретно оборудване и офертни стойности. Подобна поетапност е съвместима с практиката за класификация на разчетите според зрелостта на проектната дефиниция [5, 6]. Допълнително всеки ключов входен параметър се

обозначава с клас А, В или С – съответно потвърден, инженерно оценен или ориентиран. Положителният резултат на Ниво I означава основание за следващ етап, а не инвестиционно одобрение.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ И ГРАНИЧНИ ПОКАЗАТЕЛИ

Водещият физически показател е годишният входящ метален товар на Cu, а не концентрацията сама по себе си. При наличие на времево съпоставени данни за дебит и концентрация той се определя чрез интегриране по характерни интервали:

$$M_{Cu,in} = \sum (Q_i \cdot C_{Cu,i} \cdot \Delta t_i) / 10^6 \quad (1)$$

където Q е в m³/h, C_{Cu} – в mg/L, Δt – в h, а резултатът е в t Cu/y. При Ниво I се допуска опростеното приближение $M_{Cu,in} = Q_{avg} \cdot C_{Cu,avg} \cdot H / 10^6$. При наличие на сезонност или зависимост между Q и C_{Cu} интегрираният товар има приоритет.

$$M_{Cu,rec} = M_{Cu,in} \cdot \eta_{Cu} \quad (2)$$

$$R_{Cu} = M_{Cu,rec} \cdot P_{Cu} \cdot f_p \quad (3)$$

където η_{Cu} е общото извличане от входящия AMD до реално получавания продукт, P_{Cu} – референтната цена на Cu, а f_p – коефициентът на платимост/качество. Така междинен продукт не се оценява автоматично на пълната цена на катодната мед.

$$\Delta CAPEX = CAPEX_{res} - CAPEX_{base}; \quad \Delta OPEX = OPEX_{res} - OPEX_{base} \quad (4)$$

$$\Delta CF = R_{Cu} + S_{water} + B_{other} - \Delta OPEX \quad (5)$$

$$\Delta NPV = -\Delta CAPEX + \sum [\Delta CF_t / (1 + r)^t] \quad (6)$$

S_{water} се включва само когато пречистената вода действително замества друг водоизточник и тази полза не е вече отчетена в OPEX. B_{other} включва само други доказуеми ползи, които не се дублират с приходите от Cu, водата или разликата в текущите разходи. Основният критерий е знакът на ΔNPV, но той се интерпретира само при технологична допустимост = ДА.

За инвестиционната преценка е важно не само дали ΔNPV е положителна, а колко далеч проектът се намира от икономическата граница. Граничното състояние е:

$$\Delta NPV = 0 \quad (7)$$

$$R_{Cu,req} = \Delta CAPEX / PVF + \Delta OPEX - S_{water} - B_{other} \quad (8)$$

$$M_{Cu,in,BE} = R_{Cu,req} / (\eta_{Cu} \cdot P_{Cu} \cdot f_p) \quad (9)$$

$$C_{Cu,BE} = 10^6 \cdot R_{Cu,req} / (Q \cdot H \cdot \eta_{Cu} \cdot P_{Cu} \cdot f_p) \quad (10)$$

От същото условие се извеждат гранична цена P_{Cu,BE}, гранично технологично извличане η_{Cu,BE} и максимално допустим допълнителен CAPEX. Граничният метален товар е по-общият показател, защото остава валиден и когато дебитът и концентрацията са сезонни или взаимно зависими. Граничната концентрация е удобна за ранна инженерна оценка, но е условна спрямо дебита и останалите параметри.

4. КРИТЕРИЙ ЗА ПРЕДВАРИТЕЛНО ИНВЕСТИЦИОННО РЕШЕНИЕ

Таблица 2. Основни проверки при предварителното решение

Проверка	Критерий	Интерпретация
Технологична допустимост	ДА	Задължително предварително условие
Икономически резултат	ΔNPV > 0	Ресурсният сценарий е по-благоприятен номинално
Ресурсен резерв	M _{Cu,in} > M _{Cu,in,BE}	Реалният товар е над икономическата граница
Достоверност	A/B/C според етапа	Определя доказателствената сила на резултата
Чувствителност	Реалистичният диапазон се проверява спрямо ΔNPV = 0	Оценява устойчивостта на номиналния резултат

Методиката използва четири категории: I – недостатъчна основа за решение; II – базовият сценарий е предпочитан; III – граничен или условно перспективен ресурсен сценарий; IV – перспективен ресурсен сценарий. Категория IV на Ниво I не означава инвестиционно одобрение, а обосновава преминаване към следващ етап. Анализът на чувствителността е детерминистичен и проверява как реалистично изменение на металния товар, η_{Cu} , P_{Cu} , $\Delta CAPEX$, $\Delta OPEX$, f_p и водния компонент влияе върху решението. Общите принципи за управление на риск и неопределеност се използват като рамка, без да се въвежда вероятностен Monte Carlo модел [7].

5. ДЕМОНСТРАЦИОННО ПРИЛОЖЕНИЕ

Работоспособността на модела е демонстрирана с условен AMD поток. Числата не представляват конкретен минен обект и имат единствено илюстративен характер; оценката е Ниво I с преобладаващо клас C. Технологичната допустимост е приета като „ДА“ само за целите на демонстрацията.

Таблица 3. Илюстративни входни данни

Показател	Символ	Стойност	Единица
Среден дебит	Q	200	m ³ /h
Работни часове	H	8 000	h/y
Средна концентрация Cu	C _{Cu}	100	mg/L
Общо извличане	η_{Cu}	92	%
Коефициент платимост	f_p	1.00	–
Референтна цена Cu	P _{Cu}	8 500	€/t Cu
Повторно използвана вода	f_{reuse}	75	%
Заместваща стойност вода	C _{water}	0.35	€/m ³
CAPEX – базов / ресурсен	CAPEX	2.0 / 6.5	млн. €
OPEX – базов / ресурсен	c	1.10 / 1.65	€/m ³
Анализен период	n	12	y
Реален дисконтов процент	r	8	%

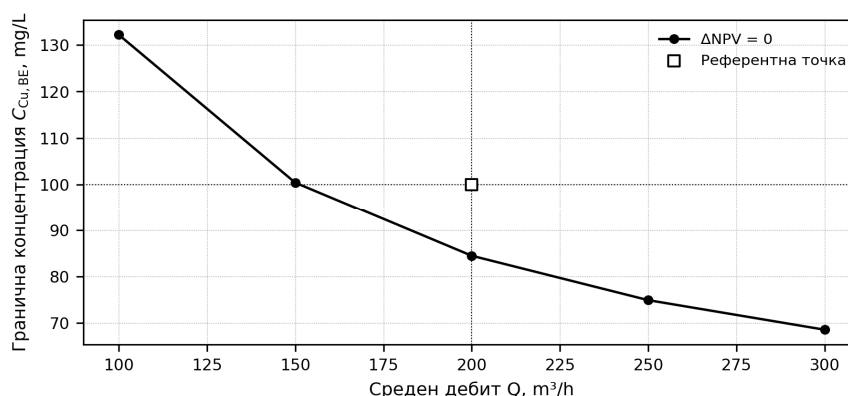
За приетите условия годишният воден обем е $1.60 \cdot 10^6$ m³/y, входящият метален товар е 160 t Cu/y, а възстановимото количество при $\eta_{Cu} = 92\%$ е 147.2 t Cu/y. Допълнителният капиталов разход е 4.5 млн. €, годишната разлика в OPEX е +0.88 млн. €/y, стойността на повторно използваната вода е 0.42 млн. €/y, а допълнителният годишен икономически ефект е 0.791 млн. €/y. За 12 години и реален дисконтов процент 8% се получава $\Delta NPV = +1.463$ млн. €.

Таблица 4. Основни резултати и гранични показатели

Показател	Символ	Стойност	Единица
Годишен входящ Cu товар	M _{Cu,in}	160.00	t/y
ΔNPV	ΔNPV	+1.463	млн. €
Граничен Cu товар	M _{Cu,in,BE}	135.18	t/y
Гранична концентрация	C _{Cu,BE}	84.49	mg/L
Резерв по Cu товар	Margin _M	24.82	t/y
Резерв по концентрация	Margin _C	15.51	mg/L
Гранична цена Cu	P _{Cu,BE}	7 182	€/t Cu
Гранично извличане	$\eta_{Cu,BE}$	77.73	%
Максимално допустим $\Delta CAPEX$	$\Delta CAPEX_{max}$	5.963	млн. €

Референтният метален товар превишава граничния с 24.82 t Cu/y, а концентрацията превишава граничната с 15.51 mg/L. Положителният резултат обаче не се квалифицира като доказана инвестиционна ефективност, защото входните данни са ориентировъчни. Правилната интерпретация е

Категория III – положителен резултат от предварителната оценка, който изисква потвърждение чрез мониторинг, технологични изпитания и актуализирани CAPEX/OPEX.



Фиг. 2. Гранична зависимост Q – C_{Cu} при фиксирана инвестиционна конфигурация.

Фиг. 2 показва, че не съществува една универсална „икономическа“ концентрация на Cu . При малък дебит капиталовият компонент се разпределя върху по-малък годишен обем и необходимата концентрация нараства. Кривата е локална чувствителност при фиксиран CAPEX; тя не трябва да се използва за проектно преоразмеряване на инсталации с различен капацитет.

6. ПРЕДВАРИТЕЛНО ТЕСТВАНЕ НА МОДЕЛА И СТАТУТ НА РАЗРАБОТКАТА

След разработването на първоначалната версия е извършено предварително числено стрес-тестване чрез контролни сценарии и промяна на ключови параметри. Тестовите потвърждават работоспособността на сравнителното ядро, но показват, че положителният номинален резултат от демонстрационния пример не е устойчив при всяко реалистично отклонение на входните предпоставки. Най-съществените наблюдения са обобщени в Таблица 5.

Таблица 5. Предварителни стрес-тестове на демонстрационния пример

Тестова промяна	Получена ΔNPV	Извод
Допълнителна стойност на повторно използваната вода = 0	$\approx -1,70$ млн. €	Водният ефект е критичен за знака на резултата.
OPEX на ресурсния сценарий $\approx 1,77$ €/m³	≈ 0	Оперативният разход е сред най-тесните резерви до икономическата граница.
Cu приход -5% /год. при непроменени разходи	$\approx -0,41$ млн. €	Статичният анюитетен модел е недостатъчен при траен спад на ресурсния приход.

Предварителното тестване установява и няколко методически ограничения на началния модел: водният ефект трябва да се сравнява симетрично между базовия и ресурсния сценарий; граничният анализ трябва да обхване всички критични параметри, а не само Cu товара и концентрацията; чувствителността следва да се основава на обосновани диапазони за решение, отделени от чисто изследователските диапазони; за по-зрели етапи е необходим годишен профил на паричните потоци и разчленяване на OPEX на фиксирани, обемно и химически зависими компоненти. Допълнително технологичната допустимост следва да бъде разширена с пазарни, регулаторни и експлоатационни проверки.

На този етап Методиката и изчислителният модел се определят като работеща предварителна рамка и прототип за Ниво I. Концептуалното ядро — сравнение спрямо базов сценарий, метален товар, технологична допустимост, ΔNPV и гранични показатели — се запазва. Развитието на проекта е

насочено към симетричен воден ефект, пълна таблица на граничните стойности (switching values) с единен „критичен резерв“, динамичен годишен модел за Ниво II–III, по-детайлен OPEX и разширена проверка за осъществимост (Feasibility Gate). След методическата редакция следва нов изчислителен инструмент и валидация с реален AMD проект.

7. ОБСЪЖДАНЕ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Наред с конкретните слабости, установени при предварителното стрес-тестване, предложеният подход има и общи практически ограничения. Икономическият резултат е валиден само ако ресурсният сценарий е технологично допустим и достига същата крайна функция на водата като базовия. Годишният метален товар е по-надежден от единична средна концентрация; при съществена сезонност следва да се използват съвместени времеви редове Q_i и $C_{Cu,i}$. Числената точност на ΔNPV не може да бъде по-висока от качеството на CAPEX/OPEX и технологичните входове. Стойността на повторно използваната вода трябва да се монетизира само при реален потребител и доказуема заместваща стойност. Настоящата версия е предназначена за предварителна технико-икономическа оценка и не включва данъци, финансиране, инфлационна ескалация, оборотен капитал и вероятностен риск-анализ; тези елементи се добавят едва при достатъчна проектна зрялост.

Практическата стойност на подхода е в това, че положителният NPV не се разглежда изолирано. Той се свързва с технологичната допустимост, граничните показатели, качеството на входните данни и чувствителността. Така предварителната оценка не отговаря само „изгодно/неизгодно“, а определя какъв е резервът до икономическата граница и кои данни трябва да бъдат потвърдени преди следващото инвестиционно решение.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Киселинният минен дренаж не се превръща в икономически ресурс само защото съдържа мед. Ресурсният му характер възниква, когато технологично допустимото извличане създава положителна и достатъчно устойчива допълнителна икономическа стойност спрямо задължителното управление на същия воден поток. Предложената методика структурира тази преценка чрез обща системна граница, годишен метален товар, $\Delta CAPEX$, $\Delta OPEX$, ΔNPV , гранични показатели, класове на достоверност и анализ на чувствителността. Демонстрационният пример и предварителните стрес-тестове показват едновременно работоспособността на концептуалното ядро и чувствителността на началния модел към водния ефект, OPEX и времеви профил на ресурса. Поради това представеният етап следва да се разглежда като работеща предварителна рамка за Ниво I, а не като завършена универсална инвестиционна методика. Развитието е насочено към симетрично сравнение на водния ефект между сценариите, пълна система от гранични стойности (switching values) и критичен резерв, годишен профил на паричните потоци, по-детайлен модел на OPEX и разширена технологична, пазарна, регулаторна и експлоатационна проверка. Следващата ключова стъпка е валидация с реален AMD проект и последователно преминаване от Ниво I към Ниво II и Ниво III.

Методиката се разработва с контролирано използване на обучени инструменти с изкуствен интелект за структуриране, числено тестване и анализ на чувствителността, при запазен инженерно-експертен контрол върху всички допускания и изводи. Разработката се проверява чрез контролни сценарии и казуси, базирани на реални инженерни условия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Simate, G.S.; Ndlovu, S. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2(3), 1785–1803, 2014. DOI: 10.1016/j.jece.2014.07.021.
- [2] Masindi, V.; Foteinis, S.; Renforth, P.; Ndiritu, J. Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review. Ecological Engineering, 2022, 106740. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2022.106740.

- [3] European Commission, Directorate-General for Regional and Urban Policy. Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects: Economic Appraisal Tool for Cohesion Policy 2014–2020. Brussels, 2014.
- [4] European Investment Bank. The Economic Appraisal of Investment Projects at the EIB. 2nd Edition, 2023. DOI: 10.2867/076767.
- [5] AACE International. Recommended Practice No. 47R-11: Cost Estimate Classification System – As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Mining and Mineral Processing Industries. Revision 7 August 2020.
- [6] Behrens, W.; Hawranek, P.M. Manual for the Preparation of Industrial Feasibility Studies. Revised and Expanded Edition. UNIDO, 1991. ISBN 92-1-106270-5.
- [7] ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines. International Organization for Standardization, 2018; confirmed 2023.

МИННАТА ТЕРМИНОЛОГИЯ И НЕЙНОТО ИЗПОЛЗВАНЕ В ПРАКТИКАТА НА ПОДЗЕМНИЯ ДОБИВ И ПОДЗЕМНОТО МИННО СТРОИТЕЛСТВО

Кр. Дерменджиев, e-mail: knderm45@gmail.com

Г. Стоянчев, e-mail: g.stoyanchev@mail.bg

РЕЗЮМЕ

Минната наука и практика се характеризира с многобройни, широко обхватни и специфични понятия и термини. При развитието им се налага създаването и въвеждането на нови и актуализирани чужди такива. В доклада се изтъква необходимостта от правилното и точно използване на минната терминология за различни цели. Представена е методика за формиране на наименованието на подземни минни изработки, като на нейна основа са разгледани два нови термина за минни изработки. Предложени са подходящи адаптирани определения за тях.

Увод

Всяка специалност използва специфична за нея познавателна, научна и практическа терминология. Като съвкупност от знания и умения използването на терминологията позволява опознавателно и творческо общуване между специалистите на национално и международно ниво. Да осъществяват съвместни дейности, да създават новости, като проекти, експертизи и контролно управленски дейности.

По владенето на терминологията се познава специалността на специалиста, степента на владене, подготовката му по съответната специалност и неговата експертиза.

Като исторически стара и практически много широка, терминологията на минните инженери по разработване на полезни изкопаеми /бакалаври, магистри/ се характеризира със сериозна терминологична основа, поради големия обем от знания и умения по основната и много други знания и умения от други специалности.

Висш израз на знания и умения на специалистите е проектът. Той трябва да бъде добре списан в текстовата си част и добре подкрепен с подходящи графични приложения. Изготвянето на проекта трябва да бъде граматически правилно, да бъде издържан по всички изискванията към него - по вид, обем и професионално направление. От особена важност е, в зависимост от професионалното направление да бъдат прилагани ясно и точно всички валидни за проекта дефиниции, наименования на части и специфични термини характерни за решенията залегнали в него.

За проектите свързани с миннодобивни дейности и особено тези свързани с подземният добив на полезни изкопаеми посоченото по-горе е от особена важност. Това е свързано с оперирането с голям обем от различен вид информация: геолого-географска; миннотехническа; технологична; за механизация и автоматизация; организационно-управленска; екологична и аварийно-спасителна. Друга особеност на тези проекти е динамиката на проектните решения и многото спомагателни дейности свързани с основната като: проветряване; водоотлив; транспорт; минното строителство и др.

В периодът на работа на мината по проекта, поради динамиката на минните работи е много важно във всеки момент от време да се вземат решения свързани с транспорта, вентилацията и водоотлива. Решения свързани с аварийни и за предотвратяване и ликвидиране на аварии планове. Тези планове трябва да бъдат свързани не само с обслужването на мината но и с други звена извън нея: за контрол и спасителна дейности. При работата на всяка мина се извършват много вътрешни и външни контролни дейности.

Поради горните причини в обяснителната записка на проекта и графичната му части не трябва да има двусмислия, терминологични и описателни неточности.

Много често на вербално /речево/ и писмено, в проекти, презентации и доклади, а и в експертизи се изразяват предложения, минни термини и наименования на минни изработки, които са в противоречие с основни наименования приети в минната теория и практика. В тези случаи се поставя под съмнение нивото и минната култура на специалиста, пораждат се съмнения в предлаганите решения, а много често и съмнения относно истинското образование на специалиста, качествата на автора, като инженер, проектант, експерт, консултант и др.

Формиране на минни понятия, термини и определения

Миннодобивната практика, техника и технологии се развиват непрекъснато. Затова е напълно приемливо да се използват и специфични нови термини. При създаване на новите определения и терминологичната им обосновка е необходимо да се спазва основният принцип : Определението на всеки нов минен термин в областта на минните изработки да бъде свързано с природната, миннотехническата и технологична среда и най близките до него, приети и утвърдени термини в минната теория и практика.

При изкривяване на средата, в която ще бъде адресиран терминът е възможно да се допуснат грешки в проектните решения, а в някои случаи и до тяхната абсурдност. Тоест предлаганите разговорно и писмено решения да бъдат в противоречие. Затова е много важно в такива случаи да се работи с голяма точност и обективност при използване на минните термини в практиката: образователна; научна; проектна и на обекта.

Формирането на минната терминология е свързано с многогодишната минна практика в света и нашата страна. Израз на това са всички посочени литературни източници посочени по-нататък.

Ние нямаме за цел да проучваме формирането и развитието на световната и в нашата страна минна терминология и по-точно тази свързана с наименованието на различните минни изработки. Ще се базираме на терминологията на водещи в минното дело страни [1, 2, 3, 4] и приетите в резултат на адаптация чужди и на съвременната почти 130 годишна българска минна терминология. На тази основа ще си позволим да коментираме нейното използване на практика и формирането и налагането на нови такива.

Подземният рудник представлява сложна мрежа от подземни минни изработки, предназначението на която е да осигурява безопасно и ефективно разработване на подземните богатства в границите на рудничното поле. В резултат на това в краткосрочен и дългосрочен план тази мрежа непрекъснато се променя. Затова описанието на мрежата при представянето и в проекти, паспорти, планове и на презентации е от особена важност. За да направи това минният специалист трябва да знае точното определение на минните изработки от рудничната мрежа.

Всяко наименование-термин включва определено съдържание и определение. Съдържанието е съвкупност от елементи и процеси, които съставят основата на обектите и обуславят съществуването и използването им. Определението е логична операция на разкриване същността на явленията и отличаване от останалите обекти, при която чрез съществените признаци на определените неща се разкрива съдържанието на отразяващите ги понятия – дефиниция. Следователно наименованието е име на предмети и процеси с ясно съдържание и определение.

Анализът на минната терминология показва, че по тази схема са формирани и използваните в минната практика наименования на всички минни изработки.

Формирането на наименованието на минните изработки най-точно да става на принципа: признаци-алтернативни решения. Като основни признаци се използват следните: изход на изработката на повърхността; наклон; ориентировка на изработката спрямо рудничното поле; ориентировка спрямо разпространението на залежите. Като допълнителни признаци се използват: рудничните части обслужвани от изработката /панели; хоризонти; етажи; стълбове; блокове; подетаж; камера; слой/, и нейната дължина. Като допълнителни признаци за определяне наименованието на изработките се използват предназначението на изработката и начинът на нейното съоръжаване за използване.

В Таблица №1 са представени основните и спомагателни признаци за характеризиране на изработките в рамките на три групи възможни технически решения.

Таблица №1.

№ по ред	Основни и спомагателни признаци за групиране на минните изработки	Възможни технически решения за минни изработки		
		Първа група	Втора група	Трета група
1.	Разположение на минните изработки	На повърхността	Под земната повърхност	Под вода
2.	Основни цели	За обслужване	За добив	
3.	Наклон на изработката	Вертикална	Наклонена	Хоризонтална
4.	Изход на повърхността	С изход на повърхността	Без изход на повърхността	
5.	Направление спрямо разпростирането на залежа	Перпендикулярно	Косо	Съпосочно
6.	Разположение спрямо залежа	По залеж-в долнище, горнище	По скала- в долнище, горнище	По залежа-пласта
7.	Използване за разделяне, основна и допълнителна подготовка на РП	Хоризонти, етажи, подетажи	Панели	Стълбове
8.	Съоръжаване и използване	Подем, спуск, логистика, вентилация и водоотлив	Транспорт, логистика	Транспорт, логистика, вентилация
9.	Съоръжаване за използване на механични средства	Подем и спускане	Пневмоколесни средства	Транспорт с ВТ, ГТЛ, ЖП,
10.	Начин на преместване на товари	Гравитачно	С механични средства	Пневматично, хидравлично
11.	Дължина на изработката	Къса 5-50м	Средна 50-300 м	Повече от 300м.
12.	Цели, степен на важност и дълготрайност на изработката	Главна – капитална	Спомагателна	Допълнителна
13.	Използване на изработката за разделяне на рудн. Поле на части по:	Простиране – полета, панели, блокове, стълбове	Етажи, подетажи	Стълбове

На базата на този принцип са наименовани и групирани всички минни изработки: щолни; вертикални и наклонени шахти; слепи шахти; бремсберги и уклони; галерии; травербани ;гезенки; комини; скатове; разсечки; начални; монтажно-демонтажни и др. При съчетаване на съответните решения за отделните признаци се формира съдържанието и основната част от определението за минната изработка. По-нататъшната конкретизация и уточняване на наименованието се извършва чрез решението за допълнителния признак на конкретната минна изработка.

Например съдържателното основно определение на изработката „Уклон“ е: Подземна наклонена минна изработка, предназначена за изкачване на товари от полезно изкопаемо с механични средства. В минно строителната практика наименованието на уклона е свързано с направлението на неговото прокарване - отдолу нагоре. Уклонът може да получи допълнително уточняващо наименование: в зависимост от дължината му – къс; в зависимост от формата на неговата ос – праволинейна, начупена, винтова и серпентинообразна; в зависимост от съоръжаването – за пневмоколесни, въжено-релсови, гуменолентови и верижни средства за транспорт. Уклонът може да се използва като основна и като допълнителна изработка в рудничната мрежа.

За определението предварително се знае, че това е подземна изработка без изход на повърхността. Включена е в транспортната схема, за извозване-изкачване на товари основно от добито полезно изкопаемо. Може да бъде ориентирана в пространството с различни наклони. Наклонът зависи от използваните механични средства за транспорт по наклон: въжен, с безконечни въжета; моно релсов; верижен и лентов ; пневмоколесен и др. Може да свързва два съседни хоризонта, етажи, или да бъде подготвителна изработка на стълб.

В рудничната технологична мрежа от минни изработки, за целите на транспорта, вентилацията и водоотлива се прокарват много спомагателни изработки. Тези изработки по местоположение, параметри и цели за използване може да притежават някои основни признаци свързани с наименованието на основни минни изработки, но имат специфични цели. Такива са: свързване на съседни изработки; нарязване и подготовка на руднични части и др. В такива случаи, на словесно ниво най-общо за тези изработки се споменава наименованието „минна изработка“ с уточняващ текст, свързан най-често със: съединителна; разсечка; диагонална; наклонена и др.; вентилационна; водоотливна; камерна; нишова и др.

В рудничната мрежа от минни изработки се включват много различни изработки с най-разнообразни цели. Едни от тях са основни: разкриващи; допълнителни разкриващи; подготвителни и добивни, а други са сервисни / рампи , достъпи, разсечки, начални и др./, които нямат точно и строго наименование, затова се нуждаят от подходящо определение.

В минната теория и практика се използват минни изработки с точно определение и наименование. Всички изработки в зависимост, основно от използването си в рамките на рудничното поле, може да бъдат групирани в пет групи, в които се включват различни по наименование подземни минни изработки. По-долу са представени групите и наименованията на минните изработки включени в тях.

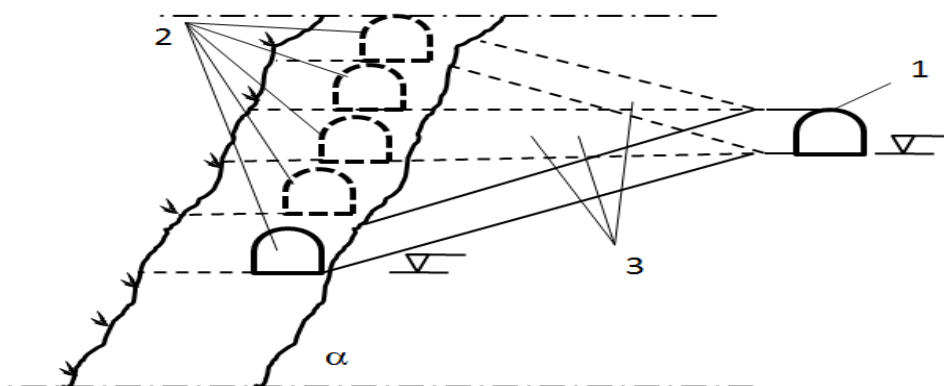
1. Разкриващи-основни минни изработки, с които се осигурява достъп от повърхността до залежа, рудничното поле или негови части, с цел проучване и разработване. В тази група се включват следните изработки: вертикална шахта; наклонена шахта; шурф; кладенец. За постигане на горните цели се използват и допълнителни, след разкриващите изработки като: сляпа вертикална шахта; травербан; уклон; бремсберг и др.
2. Подготвителни- минни изработки, с които се разделя рудничното поле на части. Такива са: галерията; бремсбергът; уклонът; травербанът; гезенкът; коминът и др.
3. Нарезни - минни изработки, с които руднична част се разделя на по-малки участъци и се създава възможност за отпочване на добивни работи. Такива са: галерия; комини; скат; начални; прозорци и др.

4. Добивни - минни изработки, с които се извършва добивна дейност, по определена технология и добивни средства. Такива са: фронтът; камерата; галерията; ортът; нишата; лентата, заходката и др.

Нови наименования на подземни минни изработки

В проектната, строителната и добивната практика при разработване на полезни изкопаеми се вземат и ще се вземат решения, свързани с прилагането на нови технически средства и свързаните с тях нови системи и технологии. Тези решения са свързани с прилагане на различни мрежи от минни изработки, чийто наименования може да бъдат и нови, но трябва да са в синхрон с утвърдената минна терминология.

Наименованието на нови минни изработки с конкретно предназначение в рудничната мрежа е деликатна задача. Трябва да се знае, че то трябва да се формира на принципа признаци - решения, като същевременно се търсят съответствия с утвърдени в минната терминология наименования на подобни минни изработки. Напоследък, в нов проект се появи минна изработка с наименование „Достъп-достъпи“, фиг.1.



Фиг.1

1-етажна извозна галерия; 2-слоеви галерии; 3-достъпи.

На фиг. 1. са показани елементите на залягане на залежа – рудна жила, изработката – достъп, свързва две галерии на една ниво. Едната е скална в долнище, другата е рудна в залежа. Последната може да бъде подготвителна или добивна: етажна или подетажна галерия; слоева галерия, която може да бъде добивна. Направлението на „достъпа“ е перпендикулярно или косо на разпространението на залежа. Изработката е хоризонтална, като се допуска малък наклон.

Откъснато от обяснителната записка на проекта и без графично представяне, на вербално ниво тази дума не означава нищо свързано с минната практика. Тази дума граматически е съществително име, от мъжки род ед.число. Има синоними като: достъпност; вход; досег; контакт. В това наименование не са включени както основни, така и спомагателни признаци на базата, на които се формират наименованията на подземните минни изработки. Принципът представен по-горе

В проекта тази изработка трябва да свързва етажната скална галерия със слоевите галерии на различни нива, като чрез запълване се променя нейният наклон, в граници позволяващи използването на един и същи вид транспорт, в случая пневмоколесен.

Разглеждайки схемата в начален момент веднага можем да заявим, че това е минна изработка - травербан, защото притежава неговите основни признаци представени с определението: “ Подземна,

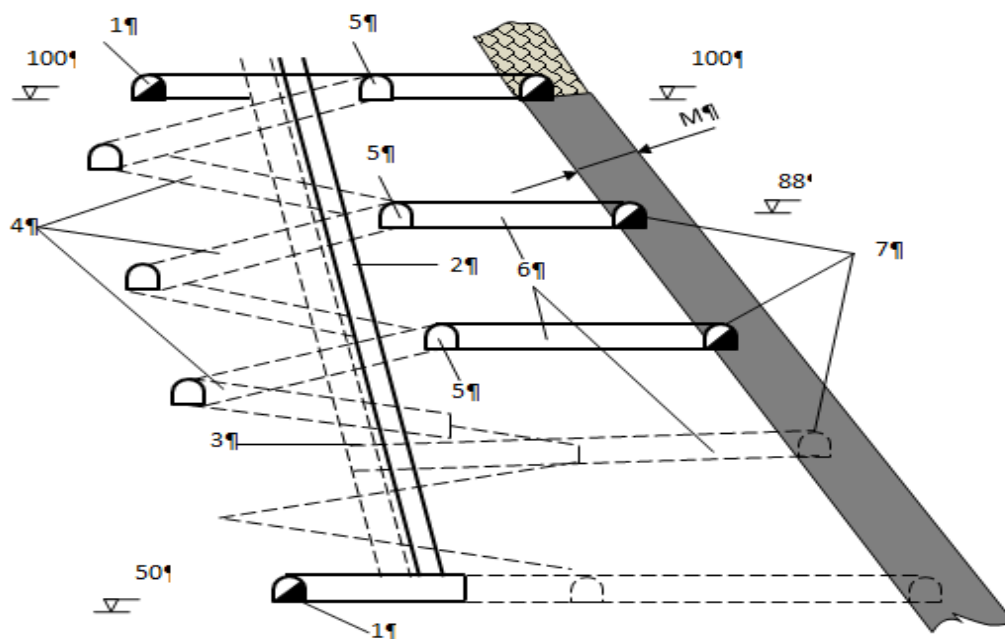
хоризонтална или леко наклонена минна изработка перпендикулярно или косо ориентирана спрямо разпространението на залежа. Допълнително уточняващи наименования по допълнителни признаци са: осигуряване на достъп до залежа; връзка с други изработки; галерии; може да служи за извоз на полезно изкопаемо с механични средства. Следователно посочената изработка е травербан. Наименованието вече е свързано с минната терминология и вербално дава представа на специалиста за вида на минната изработка, нейното местоположение в пространството и рудничната мрежа от минни изработки.

Когато обаче, се разгледа динамиката на подготовка на участъка – блока и прокарването – изграждането на изработката за подготовката и отработването на следващите слоеве чрез запълване, определението и само като „травербан“ не дава истинската представа за тази изработка. Затова следва да се потърси ново - разширено наименование. На основата на определението и като травербан тази изработка може да получи няколко определения: слоеви или многослоев травербан; комбиниран травербан и др.

Като изхождаме от наложеното в проекта и инженерната практика наименование на тази изработка, като „достъп“ и „достъпи“ и направените по-горе разсъждения считаме, че подходящото наименование трябва да бъде **„травербанен достъп“**. Подходящото определение за него е :

„Комбинирана слоева минна изработка за осигуряване на връзка между основни подготвителни транспортни изработки и няколко слоеви галерии. При последователното отработване на слоевете, отдолу нагоре или обратно, изработката се трансформира по наклон като травербан-уклон-бремсберг“

Друго ново наименование в практиката на подземния добив в България е за минната изработка **„рампа“**. То се употребява широко в световната минна практика: в проекти; литература и др. , както и на вербално ниво, като под това наименование най-общо се разбира: „наклонена подземна минна изработка предназначена за различни цели с използване на пневмоколесни средства за транспорт и логистика“, фиг.2.



Фиг.2.

1- етажни галерии; 2- блоков комин, рудоспусен; 3 - вентилационен комин; 4 - рампова изработка, удължавана в дълбочина; 5 - рампи-кръстове; 6 - подетажни травербани; 7 - подетажни галерии.

В минната наука и практика има още много други изработки, чийто признаци покриват изискванията по определението за изработката „рампа“. Такива са: наклонената шахта; бремсбергът и уклонът. Затова определението за тази изработка трябва да бъде прецизирано с включване и на други признаци. Един от основните признаци характеризиращи „рампата“ е, че оста на този тип изработка е във вид на серпентина, при което се създава възможност транспортните средства освен да преодоляват определен наклон, но и да използват изградени площадки – рампи за миннотехнологични цели.

При съобразяването с посоченото по-горе, по-широкото определение за минната изработка „рампа“ трябва да бъде: **„Наклонена минна изработка без изход на повърхността със серпентинообразна надлъжна ос, предназначена за използване на технически средства на пневмоколесен ход за транспорт и логистика“**

Тази изработка се използва за осигуряване на връзка между руднични хоризонти, етажни и подетажни галерии, като за транспорта и логистиката на добивните работи в рудника и участъците се изграждат специални площадки - рампи по протежението на изработката. Затова под това определение попадат: капитални; блокови и участъкови рампови изработки, а също така и наклонената шахта, само тогава, когато е със серпентинообразна ос. В този случай трябва да се употребява наименованието „НШ – Рампа“ или рампова наклонена шахта.

При описанието на мрежите от този тип изработки е необходимо винаги да се прецизира тяхното наименование с използване на допълнителните признаци описани в Таблица №1.

Изводи и препоръки

Използването на правилната минна терминология е от голямо значение за минната теория и практика. Важно е за общуването на минните специалисти на всички нива и решаването на проблеми свързани с обучението, проектирането, презентирането, управлението и контролните дейности. То е свързано с представяне на специалността, нивото на знания и умения на специалиста и неговата експертиза. Затова е необходимо винаги да се оперира с утвърдената в минната теория и практика терминология. Поради непрекъснатото развитие на минната теория и практика и свързаното с това въвеждане и приемане на нови минни понятия е необходимо винаги да се подхожда принципно. Внимателно да се анализира новото определение и на базата на основни и спомагателни признаци /Таблица №1./, да се прецизира, промени или отхвърли. Не винаги е необходимо да се усложнява минната терминология, която на този етап е достатъчно обширна и обхваща сложната и комплексна минно-добивна и строителна теория и практика.

Литература

1. ДРАГАНОВ, Л., М. Кетипова, Българско-немски минно-геоложки речник. МНП, МГУ, София, 1953, 182 с.
2. ДРАГАНОВ, Л., Немско-български минен речник., С., МНП, МГИ, 1979, 323 с.
3. ПАТРОНЕВ, И., Б. Алексиев, Английско-български речник, МНП, София, 1987, 578 с.
4. ALEKSIEV B., A Reader in Mining Industry of culture, science and education, Sofia, 1988, 116 p.
5. ЧОНКОВ, Т., Подземно минно строителство., С., „Техника“, 1975, 651 с.
6. ДЕРМЕНДЖИЕВ, Кр., Минни работи и минни изработки., Брошура – учебно помагало по дисциплината „Въведение в минното дело“, 1995, 30 с.
7. Енциклопедия от А до Я, изд. БАН, София, 1974, 975 с.
8. Физико-математическа и техническа енциклопедия А-Й, С. Изд. БАН, 1990, 1075 с.

ОРГАНИЗАЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ, ПОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМИ ПРИ СТРОИТЕЛСТВОТО НА „ВЕНТИЛАЦИОННА ШАХТА № 5“ – ПОСЛЕДНАТА ШАХТА В МИНИ „БОБОВ ДОЛ“

Евтим Кърцелин¹, Станислав Топалов¹, Венцислав Гълъбов²

¹ Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София stopalov@gmail.com,

² Минстрой „Бобов дол“- механик ВШ-5

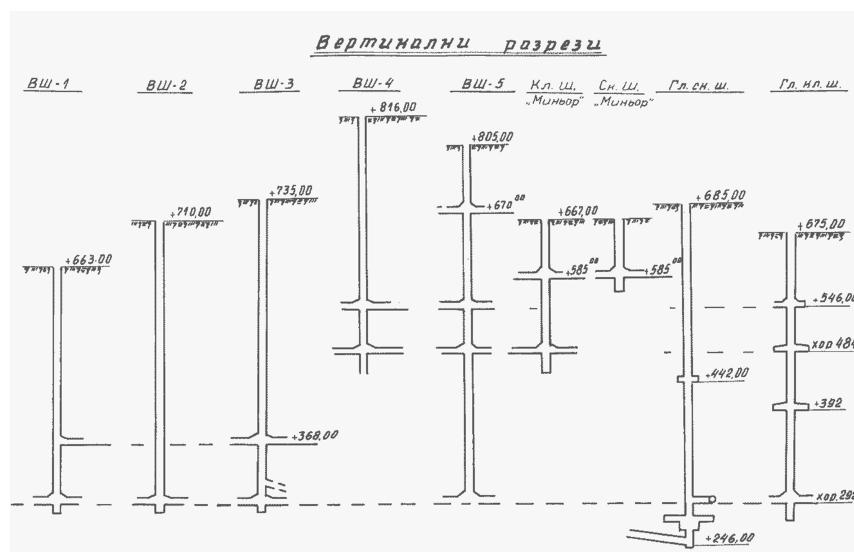
ABSTRACT

The report presents information on the used technology, the tunnel equipment and the number of personnel for the construction of "Ventilation Shaft No. 5" (VS-5), as well as the deadlines for the realization of the individual stages of the project. A summarized construction schedule is also provided, indicating some events and problems accompanying and delaying the implementation of the construction process according to the project.

Key words: underground mining construction, vertical shaft, organization, special technologies

Въведение

За разкриване на въглищното находище и реализиране на подземен добив на въглища в Бобовдолския въглищен басейн са построени и въведени в експлоатация девет броя вертикални шахти, дванадесет броя наклонени и три броя щолни. На фиг. 1 е представена схема (вертикален разрез) на взаимното положение на вертикалните шахти. За по-голяма яснота е показано и мястото на Вертикална шахта №5 (ВШ-5), която е обект на представяне, анализ и оценки в настоящия доклад.



Фиг. 1. Схема (вертикален разрез) на взаимното положение на вертикалните шахти

Независимо от натрупаният богат опит и знания при изпълнение строителството на обекти от този тип, техните параметри и характеристики, строителството на всяка нова шахта с голямо сечение и дълбочина се явява ново предизвикателство и изпитание за всички участници в този процес – инвеститори, проектанти и строители, поради следните основни причини:

- за всяка нова шахта се решават нови и специфични задачи свързани с конкретните условия;
- необходимо е проектиране и изработване на проходчески комплекс, предназначен и приложен само за строителството на тази нова шахта;
- строителството на всяка нова шахта се изпълнява от почти нов състав на работници (миньори-шахтьори), обектово ръководство и спомагателен персонал.

За етапите на строителство на обект ВШ-5 се представя обобщена информация за организацията, техническите решения и регистрирани постижения, което може да се приеме като един скромнен принос в научното познание в тази област на минното строителство и минното дело.

1. Предназначение на „Вентилационна шахта № 5“ (ВШ-5).

В проекта за изграждане на обект: рудник „Бобов дол - обединен“ [1] и реализиране на подземен добив на въглища в сектор „Иван Русев“ се определя и функционалното предназначение на ВШ-5:

- Осигуряване на вертикален транспорт на хора, машини и материали при изпълнение на подземното минно строителство на всички разкриващи минни изработки от „Чеганската синклинала“ на хор. 292, хор. 392 и хор. 484.

- Подаване на чиста вентилационна струя за добивните забои на отделните хоризонти, за транспорт на хора, материали и машини, както и като втори изход по време на експлоатацията на находището.

2. Етапи на строителство на ВШ-5

Технологията и организацията за строителството на обект ВШ-5 включва 5 основни етапа [2,4,5]:

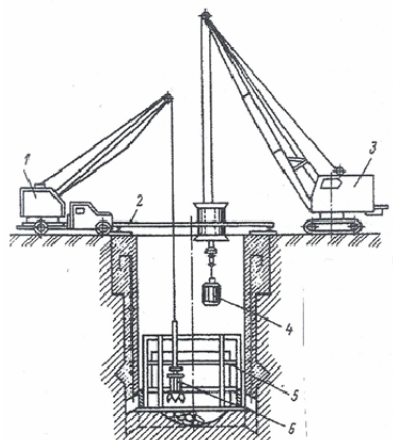
✓ **Първи етап** – прокарване на технологичен отход – 25 m. През този етап шахтата се удължава до 25 m – дълбочина, необходима за осигуряване условия и възможности за монтаж на основния проходчески комплекс (пълящ метален кофрак с височина 4 m; висяща метална предпазна двуетажна площадка с височина 7m; универсална грайферна товарачна машина КС-2у/40 с височина 6 m и надземен технологичен комплекс за разтоварване на проходческите кофи), използван за строителството на цялата шахта.

Последователността на строителството на тази част от шахтата включва: изкопаване на „котлована“ на шахтата (дълбочина 4 m), закрепване с временен крепеж, изграждане на нулева предпазна площадка, на която се монтират въздушна лебедка за спускане на материали, въздушна лебедка с монтирано въже на грайферния товарач КС-3 и ел. табло за осветление на шахтата. За пробиване на взривните дупки (дълбоки 2 m) са използвани ръчни перфоратори ПР-24, Чрез грайферния товарач скалната маса е натоварвана в проходческата кофа, чието изваждане е реализирано с автокран с товароподемност 16 t. След извозването на материала шахтата се закрепва с временни метални пръстени през 1 m и мрежеста обшивка с дървени таванки. След удължаване на шахтата до 25 m отдолу нагоре започва полагането на арматурата и изграждане на бетоновия крепеж. Спускането на бетона се осъществява чрез специално изготвен бетонопровод (с отделни 1 m дълги кофички), който последователно се скъсява с напредването във височина.

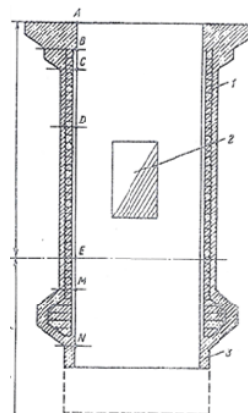
Използваната механизация за този етап е: автокран 16 t; грайфер с ръчно водене КС-3; компресор „Борец“ с производителност 30 m³/min; перфоратори тип ПР-24; проходческа кофа с обем 1 m³; вентилатор СВМ-6м за проветряване на шахтата след взривяване; бетоновоз и вибратори за уплътняване на бетоновия крепеж.

На фиг. 2. е представен проходческият комплекс за изпълнение строителството на технологичния отход на ВШ-5.

На фиг. 3. е показано сечение за конструктивното изпълнение на устието на ВШ-5, изпълнено с армиран бетон и опорна пета в участъка М-Н.



Фиг. 2. Проходчески комплекс за изпълнение строителството на технологичния отход на ВШ-5.



Фиг. 3. Сечение на устието на ВШ-5, изпълнено с армиран бетон и опорна пета в участъка М-Н

Устието на шахтата в участъка А-В-С се изпълнява с проекта за надшаховата кула. Важно е да се отбележи, че устието на шахтата в участъка В-Н е изпълнено с армиран бетон. Участъкът М-Н е опорната пета на шахтовия крепеж.

✓ **Втори етап** – Един от използваните методи при строителство на шахти с голямо сечение и голяма дълбочина включва предварително изграждане на капиталната надшахова кула. Такъв подход е приложен и при строителството на ВШ-5. Надшаховата кула се използва за: осигуряване условията на работа на временните подедни машини (с проходчески кофи с обем $1,5 \text{ m}^3$ и 3 m^3); монтажа на надземния проходчески комплекс (приемни бункери, нулева предпазна площадка и кабина и за сигналистите); монтиране на временни шайбени блокове (2 бр. - за направляващите шайби на проходческите лебедки и подедните машини).

Надшаховата кула (с височина 32 m) е железобетонна конструкция, чието строителство е изпълнено с едроплощен пълзящ кофраж (стъпка на преместване 1,6 m), а полагането на бетона – с бетон помпа немско производство (издигане до 80 m). Работните площадки са от тръбно метално скеле. Всички материали са качвани на кулата с автокран „Джонсън“ с удължена стрела 35m. Надшаховата кулата е без странични опори (укасини).

✓ **Трети етап** – Строителството на шахтата от дълбочина 25 m до дълбочина 510 m е извършено напълно механизирено [2,4,5].

Последователност на удължаване: пробиване на взривните дупки (3,3 m), зареждане и взривяване на забоя; проветряване; извозване на отбитата скална маса (3 m); спускане и центроване на кофража; спускане на бетон и бетониране на участъка от шахтата (с дълбочина 2,9 m); извозване на материала до 3,3 m дълбочина, удължаване на тръбопроводите и кабелите. Изброените операции се отнасят за един цикъл на строителство и се повтарят на всеки 3 m.

✓ **Четвърти етап** – През него, по проект, се демонтира цялото проходческо оборудване използвано за строителството на шахтата (освен ВПП) и се изпълнява армировката на шахтата с цел осигуряване нормалното движение на капиталните подедни съдове по цялата дълбочина на шахтата.

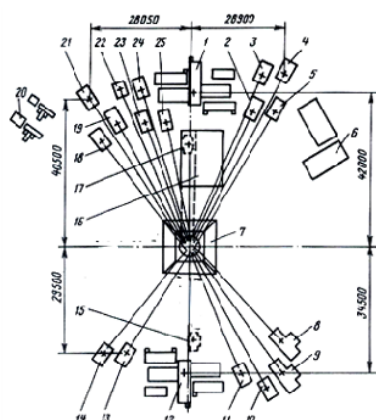
✓ **Пети етап** – През този етап е изпълняван монтаж само на капиталното обзавеждане на шахтата, предвидено в специален проект, разработен от „Минпроект“ – София (монтаж на капиталните направляващи шайби в надшаховата кула; монтаж на подедните въжета и монтаж на капиталните подедни съдове – клетки).

3. Проходческо обзавеждане, използвано за безопасно и качествено изпълнение на строителството на ВШ-5

За осъществяване на строителството на ВШ-5 в проходческия комплекс е включено следното обзавеждане [2,4,5]:

- а) Руднични подедни уредби – 2 бр.;
- б) Нулева предпазна площадка $K \pm 0$;
- в) Висяща предпазна площадка (ВПП);
- г) Триделен секционен метален кофраж;
- д) Спасителна стълба;
- е) Проходчески лебедки – 11 бр.;
- ж) Проходчески кофи с $V = 1 \text{ m}^3$ и $V = 3 \text{ m}^3$.

Триделен секционен метален кофраж [3]. Този тип кофраж с $\varnothing 6000$ и $H = 4000$, е предназначен за закрепване (бетониране) на вертикални изработки със светъл диаметър $\varnothing 6000 \text{ mm}$ чрез автоматично спускане и центроване спрямо оста на вертикалната шахта. Общото му тегло е 22000 kg и се състои от три секции. Височината му (без горна пелерина) е 4000 mm и осигурява височина на бетониране 3000 mm. Центроването на кофража се осъществява с помощта на носещите лебедки чрез последователно задвижване, а проверката му за съсност – чрез контролни измервания на диаметъра в горния му край (6000 mm) и в долния (6080 mm) с предварително изготвени шаблони. Освен това се измерват осем диаметрално разположени радиуса, които се сравняват с проектния, а отклоненията им трябва да са в допуските посочени в Техническата маркшайдерска инструкция. В проекта са дадени



Фиг. 4. Схема за разположение на проходческите подечни машини и лебедки около устието на шахтата

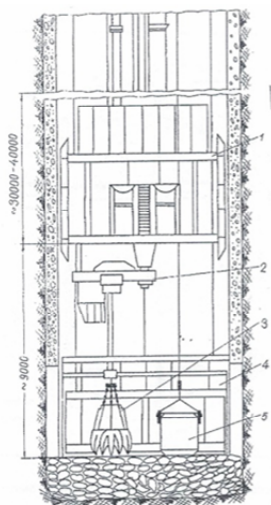
изискванията за последователността при извършване на бетонирането, най-вече с цел запазване на центровката на кофража, както и тези при декофрирането на закрепения участък. Детайлно са разписани и правилата за техническа безопасност при извършване на посочените технологични операции.

Цялото проходческо оборудване в шахтата се окачва на стоманени въжета, изчислени и избрани съгласно условията на работа с необходимия коефициент на запас.

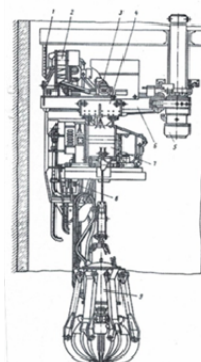
За осигуряване на възможност за удължаване на стоманените въжета с удължаване на шахтата, същите са навити върху барабаните на проходчески лебедки, монтирани на специални бетонови фундаменти. Разположението на проходческите лебедки и рудничните подечни уредби (2 бр.) на повърхността е показано на фиг. 4.

Техническата характеристика на проходческите лебедки и тяхното предназначение, използвани за строителството на ВШ-5 е представена в табл. 1.

На фиг. 5. е показан проходческият комплекс на ВШ-5, а на фиг. 6 – схемата на универсален грайферен товарач с механизмирано водене КС-2у/40



Фиг. 5. Проходчески комплекс за строителство на вертикални шахти с голяма дълбочина



Фиг. 6 – Схема на универсален грайферен товарач с механизмирано водене КС-2у/40

Табл. 1.

Предназначение	Бр.	тип	Товароподемност, kg	Крайно натоварване, kg
1. РПУ за кофа 3 m ³	1	Ц-3,5×2А	10000	5909
2. РПУ за кофа 1,5 m ³	1	БЛ-1600	4000	3059
3. Проходческа лебедка за ВПП	2	ЛП-25/600	25000	4000
4. Проходческа лебедка за кофраж	4	ЛПК-10/800	10000	32000
5. Проходческа лебедка за спасителна стълба	1	ЛПК-4/500	4000	1641
6. Проходческа лебедка за телескоп	1	ЛП-5/500	5000	1250
7. Проходческа лебедка за монтажни дейности	1	ЛП-5/500	5000	1500
8. Проходческа лебедка за проходчески кабели	1	ЛП-5/51500	5000	2000
9. Проходческа лебедка за взривен кабел	1	ЛП-5/500	5000	580

4. Числен състав на колектива изпълнил строителството на ВШ-5

Съставът на колектива по специалности, длъжности и численост е определен при следните условия:

- Обектът е напълно обзаведен с машини, съоръжения и проходческо оборудване за изпълнение на строителството на шахтата от 25-ия до 510-я метър.
- Строителството на обекта ще се изпълнява при непрекъснат режим на работа с изключение на официалните празници на страната.
- Поради специфичния характер на изпълняваните задачи се формира специално звено „бурачи“

Ръководството на обекта включва:

- Началник участък;
- Механик участък;
- Началник смяна – 4 бр.;
- Монтажник.

Първа постоянна смяна:

- Контролен шлосер;
- Оператор бетонов център;
- Монтажник;
- Шлосер по ревизия и ремонт на пробивни перфоратори.

Звено „бурачи“ и шофьори – 10 човека. В смяна „А“, освен Началник смяна се назначават и 3 миньори, 2-ма машинисти на РПУ, 2-ма надземни и 1 подземен сигналисти, както и един компресорист. В състава на колектива текущо вземат участие и тесни специалисти – маркшайдери.

Рекапитулация на числения състав на колектива, изпълнил строителството на ВШ-5.

1. Ръководство на обекта – 7;
2. Първа постоянна смяна – 4;
3. Звено „бурачи“ – 3;
4. Състав на 4 смени (А, Б, В и Г) – 4 см × 11 = 44 човека:
 - шахтьори – 3;
 - подземен сигналист – 1;
 - надземен сигналист – 2;
 - машинист на РПУ – 2;
 - компресорист – 1;
 - шофьор на технологичен самосвал – 1;
 - лампистер – 1.

Всичко състав за смяна = 11 човека.

Общо състав за ВШ-5 през етапа на строителството – 58 човека.

5. Проект за изпълнение на взривните работи при прокарването на ВШ-5

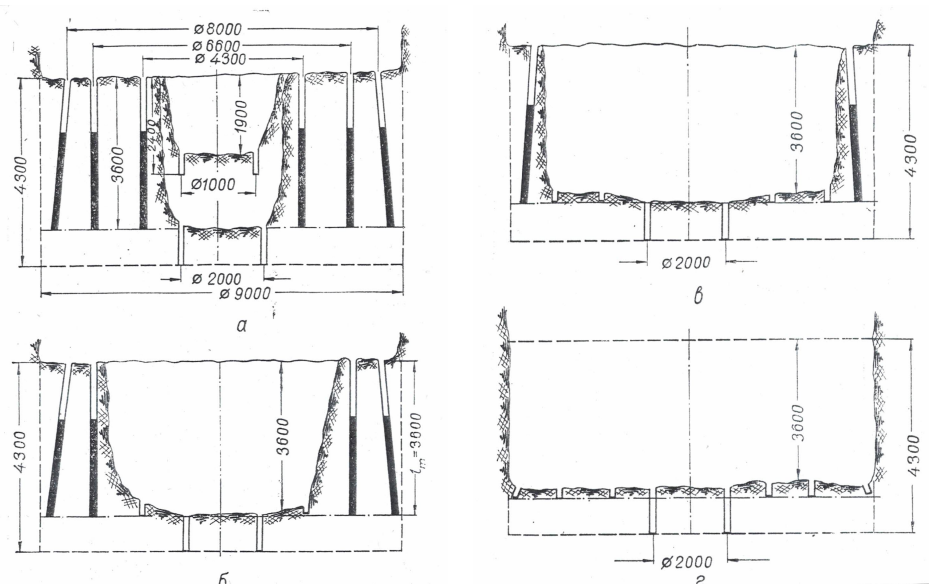
По-значимата информация от изготвения „Проект за изпълнение на взривните работи на ВШ-5“ се свежда до броя (46 бр.) и дълбочината на взривните дупки – 3,3 m. Същите са разположени в 4 концентрични окръжности с диаметри съответно 1.5, 3.1, 4.7 и 6.5 m. Общият разход на взривно вещество „Скален амонит“ е 82 kg. Пробиването на взривните дупки е реализирано с перфоратори ПР-30 ЛС. Електроувзривната мрежа е изпълнявана по паралелна схема.

В табл. 2. е представено разпределението на взривните дупки по определените показатели.

Табл. 2.

№	Наименование на взривните дупки	Диаметър на окръжността за разполагане на ВД	Брой и номера на ВД
1	Подкопни ВД	$D_1 = 1.5 \text{ m}$	$n_1 = 5 \text{ бр.}$ № от 1 до 5
2	Отбивни ВД	$D_2 = 3.1 \text{ m}$	$n_2 = 9 \text{ бр.}$ № от 6 до 14
3	Отбивни ВД	$D_3 = 4.7 \text{ m}$	$n_3 = 13 \text{ бр.}$ № от 15 до 27
4	Оконтурващи ВД	$D_4 = 6.5 \text{ m}$	$n_4 = 18 \text{ бр.}$ № от 28 до 46

На фиг. 7 (а, б, в и г) е показано състоянието на забоя след взривяване на отделните групи взривни дупки, като: а – след взривяване на подкопните взривни дупки по D_1 , б – след взривяване на отбивните дупки по D_2 , в – след взривяване на отбивните ВД по D_3 , и г – след взривяване на оконтурващите ВД по D_4



Фиг. 7. Състояние на забоя след взривяване на отделните групи взривни дупки

6. Проект за изпълнение на бетоновия крепеж на ВШ-5

В този проект са включени:

- Рецепта за качеството на бетона
- Контрол на качеството на бетоновата смес – чрез вземане на проби в специално изготвени стоманени кубчета, лабораторно изпитване на кубчетата отляти при изливане на бетона и отлежали в контролирани условия за изпитване якостта му, както и контрол на количеството вложен бетон.
- Контрол на дебелината на бетоновия крепеж – чрез т.нар. „пета на кофража“ – специално уширение в долната част на металния кофраж с диаметър равен на диаметъра на „черното сечение“ на шахтата.

В табл. 3. е представена рецептата за приготвяне на бетоновата смес за бетониране на ВШ-5.

Табл. 3.

№	Вид на материала	мярка	количество
1	Сулфатостойчив цимент М 350	kg	126.0
2	Пясък 0 ÷ 5 mm	kg	270.0
3	Речен чакъл 5 ÷ 20 mm	kg	168.0
4	Речен чакъл 20 ÷ 40 mm	kg	112.0
5	Вода	l	75.0
6	Суперпластификатор БП-1	l	2 l (0.75 kg)
7	Литол „КН“	l	3 l (1.88 kg)
8	Бентонит активиран	l	1 l (1.25 kg)

В проекта за изпълнение на бетоновия крепеж на шахтата е приложена „Инструкция вземане и съхраняване на пробни бетонни тела за доказване якостните характеристики на бетона, използван за бетониране на ВШ-5 [7], в която е записано:

1. От всеки цикъл (3 m) при бетониране на шахтата се вземат пробни бетонови тела както следва - 6 бр. с кубична форма (за доказване на якостните характеристики на бетона) и 8 бр. с цилиндрична форма (за доказване на водонепропускливостта му).

2. Бетоновата смес, с която се запълват формите, се взема непосредствено от бетоновата смес, приготвена за спускане в шахтата.

3. Освобождаване на пробните бетонови тела от формите се извършва след 24 ч. от направата им.

4. Определени са условията за съхраняване на пробните тела до момента на изпращане за изпитване в акредитирана лаборатория.

5. Всяко пробно тяло има свой номер, който се записва в дневника за качеството на бетона.

7. Маркшайдерски контрол при изпълнение на строителството на ВШ-5

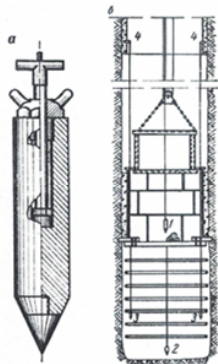
Надеждната, ефективна и безопасна работа на подземния комплекс зависи най-вече от спазването на определени геометрични условия и геометрични отношения между различните му елементи, което е валидно за етапа на строителство на съоръжението и при неговата експлоатация. Затова, в процеса на строителството всички трасировъчно-контролни измервания за положението на елементите от подземния комплекс трябва да отговарят на изискванията за осигуряване на проекта, а отклоненията могат да бъдат само в нормативно регламентирани, посочени в Техническата Маркшайдерска Инструкция (ТМИ) [9]. Тези нормативно допустими отклонения са три вида [1.]: при монтажа на оборудването; от определени съотношения между отделните геометрични елементи, и зависещи от точността на маркшайдерските трасировъчно-контролни измервания и екзекутивни снимки преди приемането на завършените обекти. Всички елементи на подземния комплекс са свързани в единна система по отношение центъра и осите на вертикалната шахта. Комплектът проектна документация трябва да съдържа основно - работни чертежи, планове, разрези и обяснителни записки, от техническия проект, изготвен от проектантската и геолого-проучвателна организации. Вторият комплект - документация, създавана по време на строителството (екзекутивна) включва топографски и маркшайдерски планове, профили, разрези, нагледни графики, схеми, таблици, всеки от които отразява действителното състояние на построените обекти, съоръжения и минни изработки. След приключване на строително-монтажните работи, преди да се предаде в експлоатация задължително [9.] се извършва цялостна маркшайдерска проверка за състоянието на подземната уредба. В процеса на експлоатация на рудника съгласно Правилник по безопасността на труда при разработване на възлищни находища по подземен начин (В-01-01-01) чл. 374 следва да бъде извършвана също маркшайдерска проверка на подземната уредба поне веднъж годишно.

Основно, в процеса на строителството е необходимо маркшайдерските трасировъчни и контролни дейности да осигурят решението на три основни задачи:

- Трасиране на центъра на вертикалната шахта съгласно проекта с необходимата точност;

- Осигуряване на проектното сечение (черно и светло) на шахтата;
- Осигуряване вертикалното положение на стените на шахтата (преди закрепване и на крепежа)
- Осигуряване на пректното и взаимно положение на елементите от армировката на шахтата (носачи и водачи);
- Осигуряване вертикалното положение на водачите по цялата дълбочина на шахтата съгласно предвидените допустими отклонения. Доказва се чрез изготвяне на ексекутивни чертежи.

Сами по себе си изброените задачи от технологична гледна точка не представляват особена трудност, но предвид условията в които трябва да бъдат успешно решени се налага строго спазване на определена периодичност и последователност, както и креативност наложена от специфичните минно-геоложки и минно-технологични условия.



Фиг. 8. Централен проходчески отвес

Както бе посочено по-горе при закрепването на шахтата в проекта е предвидено използване на трисекционен метален кофраж. За отправна линия (вертикална), съгласно нормативните документи, следва да се използва Централен проходчески отвес (ЦПО), за който се осигуряват условия за лесно и точно монтиране на нивото на нулевата рамка. За осигуряване на неизменност на въжето, чрез което е окачен ЦПО, е необходимо да се предвиди възможност за увеличаване на масата му при напредване прокарването на шахтата в дълбочина. Използваният при прокарване на ВШ-5 ЦПО и неговото положение в ствола на шахтата са показани на фиг 8.

За текущото отразяване на резултатите от центрирането на трисекционния метален кофраж преди извършване на бетонирането на ВШ-5 е воден Дневник (тетрадка) за цялата дълбочина на шахтата (фиг. 9.).



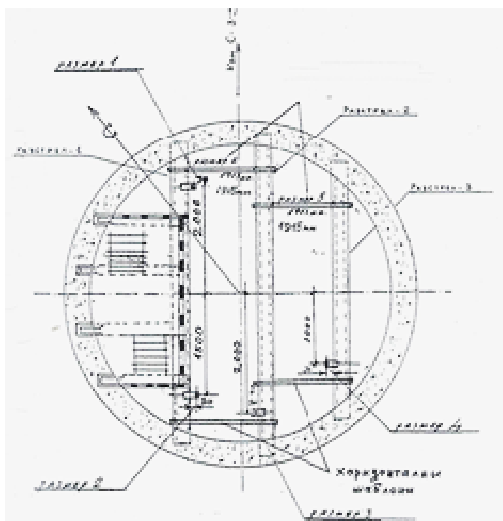
Фиг. 9. Дневник за регистриране на резултатите от центровката на кофража преди бетонирането на ВШ-5

За успешното решаване на задачата „Осигуряване плановото и взаимно положение на елементите от армировката (носачи и водачи)“ е необходимо да се изберат местата на отвеси, които през определен интервал се пренасят в дълбочина. Техният брой и местоположение в план зависят от състава на армировката и големината на сечението. Схемата на разположението на отделните елементи от армировката (на един етаж) – носачи (разстреки) и използваните шаблони за взаимното им позициониране, както и армировъчните отвеси са показани на фиг. 10 и фиг. 11.

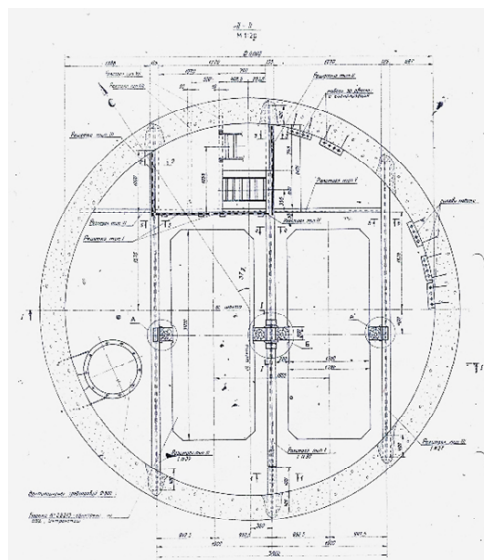
Освен оперативно-контролните измервания по време на строително-монтажните работи друга отговорна задача на маркшайдерския колектив е извършването на изпълнителна (екзекутивна) снимка за фактическото положение на пострените съоръжения и изработки, на базата на която се съставя графична документация (планове, профили и проекции) в необходимия мащаб с нанесени на тях всички построени съоръжения и изработки.

Съгласно нормативните документи е необходимо периодично да се извършва маркшайдерска снимка на фактическото сечение на шахтата през 3-4 m, която включва измерване на не-по-малко от 8 радиуса от ЦПО до стените/крепежа, които се сравняват с проектните радиуси и се анализират допуснатите отклонения. Систематично набраните данни се попълват в геолого-маркшайдерския паспорт на шахтата (М 1:100). На базата на „Протоколи за резултатите от изпълнена маркшайдерска

профилировка (в случая през 2 m) на армировката на ВШ-5, р-к „Иван Русев“ (съставени от колектива на Маркшайдерския отдел при СО „Минстрой“ - клон Бобов дол“), е попълнен посочения паспорт. Анализът на констатираните фактически отклонения от проектните величини доказва, че изискванията за точност и прецизност на изпълнените строително-монтажните работи не само са спазени, но могат да се оценят като отлични.



Фиг. 10. Схема на разположението на отвесите при изпълнение на армировката



Фиг. 11. Разположение на капиталното обзавеждане на ВШ-5 в сечението ѝ

По тези схеми са извършвани изпълнението и контрола на качеството на изпълнението на армировъчните работи и съставянето на екзекутивната документация.

8. За някои проблеми съпровождащи строителството на ВШ-5

По време на строителството (удълбаване) на ВШ-5 са възниквали различни по сложност, тежест и опасност събития и проблеми, които са изисквали задължително спиране на производствения процес до момента на отстраняване на породилите ги причини.

За целия период на строителство на шахтата ще се посочат само две от най-тежките възникнали събития:

Първо събитие: След сваляне на кофража и подготовката му за следващия цикъл, се получава „свличане – изтичане“ на част от бетона, положен в последния кофражен пръстен. Проблемът е отстранен в рамките на една смяна, а причините за „свличането“ на бетона са изяснени.

Второ събитие: Бетонопроводната тръба, с диаметър Ø168, е вградена в една от носещите ски-греди, свързваща двата етажа на висящата проходческа площадка (ВПП).

Диаметърът на бетонопроводната тръба се оказва по-голям от размера на профила на свързващата греда, в резултат на което бетонопроводната тръба трие в бетона и при спускане на ВПП става негодна за ползване. За две смени, със заваръчни работи, бетонопроводът е преместен през централната част на ВПП – решение, което се оказва достатъчно успешно и надеждно

9. Дневник за изпълнение на строителството на ВШ-5

В този дневник (табл. 4.) са обобщени основните видове подготвителни и капитални строително-монтажни работи, както и последователността и сроковете за тяхното изпълнение.

Дневник за изпълнение строителството „Вентилационна шахта № 5“ в мини „Бобов дол“

Табл. 4.

Дати и срокове за изпълнение на СМР	Изпълнение на подготвителни и капитални строително монтажни работи на ВШ-5
28.X.1981 г.	Официално направена първа копка на шахтата
28.X.1981 г., 15.11. 1982 г.	Изпълнение на временно строителство на площадката на ВШ-5, с която се осигуряват условия за изпълнение строителството (проходката) на технологичния отход на шахтата с дълбочина 25 m.
15.11. 1982 г.- 6. IV. 1982 г.	Проходка на технологичен отход на шахтата: • Проходка с използване на време на крепеж при удълбаване на шахтата на дълбочина 25 m; • Армиране и бетониране на шахтата отдолу нагоре с използване на метални кофражни платна
1 .V. 1982 - 30.V. 1983 г.	Строителството на капитална надшахтова кула (монолитна железобетонна конструкция) с височина H=32 m
1 .V. 1982 - 30.V. 1983 г.	Едновременно с изграждането на капиталната надшахтова кула на площадката на „Вентилационна шахта № 5“ се изпълнява строителството на следните обекти: 1. Строителството на баня с назначение. 2. Строителство на компресорна уредба с 4 броя компресори и с охладителна кула 3. Направа фундаменти и монтаж на 2 бр. руднични проходчески подечни уредби. 4. Направа на фундаменти и монтаж на 11 бр. проходчески лебедки и на 2 бр. руднични подечни проходчески уредби. 5. Монтаж на немски автоматизиран бетонов център с 2 бр. силузи за цимент с вместимост : 2 бр. x 80 t= 160 t 6. Строителството на временен път и канализационна система за отводняване площадката на ВШ-5 7. Електроснабдяване на всички електропотребители на ВШ-5 с напрежение $U_n=6$ kV и $U_n=380$ V. 8. Водоснабдяване на всички консуматори на ВШ-5
IV.1982- 27.X.1982 г.	След построяване на капиталната надшахтова кула се изпълнява монтажа на проходческия комплекс, с който се осигурява безопасно и качествено строителство на „ВШ № 5“ с проектната и дълбочина (515 m) Проходческият комплекс включва: 1. Монтаж на временен шайбен блок в надшахтова кула. 2. Монтаж на разтоварни устройства на K+6,10 за два броя проходчески кофи с обем $V=3$ m³ и $N=1,5$ m³ 3. Монтаж на нулева предпазна площадка на K±0; 4. Монтаж на двуетажна висяща предпазна площадка в шахтата (в зоната на технологичния отход) с общо тегло P=28 тона. 5. Монтаж на метален триделен секционен пълзящ кофраж за бетониране на шахтата с тегло P=22 тона. 6. Монтаж на пневматичен грайферен товарач тип КС-2Д/40. 7. Монтаж на вентилатор ВНСН-16 и въздухопровод за проветряване на шахтата след взривни работи. 8. Монтаж на въздухопровод за подаване на състен въздух за пневматичната система и консуматори на проходческия комплекс. 9. Монтаж на тръбопроводи за водоснабдяване и водоотлив на забоя на шахтата. 10. Монтаж на електрически кабели за осветление, сигнализация и за взривната мрежа. 11. Приемане на проходческия комплекс от Комисия и даване разрешение за въвеждането му в експлоатация (Протокол от 27.X.1983 г.)

	27.X.1983 - 12.11.1986 г.	Проходка (строителство) на „Вентилационна шахта № 5“
	15. 11.1986- 30.IV.1986 г.	Преустройство на проходческия комплекс с цел осигуряване на условия за безопасно и качествено изпълнение (монтаж) на армировката по цялата дълбочина на шахтата.
	4.V.1986 - 6.X.1986 г.	Изпълнение профилировка на армровката на шахтата и изготвяне на екзекутивен чертеж на по цялата ѝ дълбочина
0		Демонтаж на проходческия комплекс, използван за строителство и армировка на ВШ-5
1		Монтаж на капиталното обзавеждане на „Вентилационна шахта № 5“: 1. Монтаж на 2 бр. направляващи шайби на к+25 в надшахтова кула. 2. Монтаж на 2 бр. подеumni съдове (едноетажни клетки) в шахтата 3. Монтаж на капиталната руднична подемна уредба 4. Монтаж на сигнална уредба на шахтата 5. Приемане на обект „Вентилационна шахта № 5“ от държавна приемателна комисия и даване разрешение за експлоатация по предназначение.

10. Протокол за резултати от изпълнената профилировка на армировката на ВШ-5, р-к „Иван Русев“, Мини „Бобов дол“ [9,10].

Съставянето на този протокол е един от задължителните документи, който се изготвя в заключителния етап на строителството на вертикални шахти за доказване качеството на строително-монтажните работи и удовлетворяването на изискванията на нормативните документи. Същият е придружен със схема на разположението на отделните елементи от армировката на шахтата и с посочени размери между основните от тях. В специално изготвен формат и необходимия мащаб (М 1:500) на всяка площадка се вписват измерените и заложиени в проекта размери (6 на брой), което дава възможност за оценка на изпълнението на проекта.

Извършените измервания от колектив: инж. Стоян Даков, инж. Др. Велиновски, инж. Асен Иванов, инж. Никола Георгиев, инж. Антон Ковачев и инж. Симеон Виденов са приети без забележки от ДИК с председател инж. маркшайдер Й. Михайлов.

11. Влияние на политическото ръководство на страната върху производствената дейност на Мини „Бобов дол“

За да се направи обективна оценка за влиянието на политическото ръководство на страната, Република България, върху производствената дейност на Мини „Бобов дол“ се представя следната информация.

А) През 1997 г. новоназначеният борд на директорите в Мини „Бобов дол“ по указание на СДС уволнява 15 стопански ръководители с доказан професионален опит и на тяхно място назначава политически лица, като например:

- Йордан Андонов, регионален координатор на СДС в гр. Кюстендил - назначен за Зам. председател на борда на директорите;
- Манол Найденов - Зам. председател на СДС в гр. Бобов дол - назначен за Зам. директор по производството;
- Николай Игнатов - Зам. председател на СДС в гр. Бобов дол - за Зам. директор на енергомеханичен отдел;
- Генчо Велинов - Зам. председател на СДС е назначен за Зам. директор на рудник „Бабино“;
- Йордан Георгиев - Председател на градския клуб на СДС е назначен за „Началник на техническа безопасност“ и др.

Б) В следващата таблица (табл. 5.) е представена информация за резултатите от производствената дейност на Мини „Бобов дол“ през мандатите на управление на различните политически сили в България и първите ръководители, при които е „писана“ историята до окончателно прекратяване и закриване на производствената дейност.

Табл. 5.

Управление на БСП	Управление на СДС	Управление на НДСВ
<u>1. инж. Жак Каракаш</u> 1987 г. - 2 402 000 t 1988 г. - 2 358 000 t 1989 г. - 2 360 000 t <u>2. инж. Иван Владимиров</u> 1990 г. - 1 876 062 t 1991 г. - 1 619 026 t <u>инж. Цветан Тодоров</u> 1992 г. - 1 755 891 t 1993 г. - 1 866 709 t <u>инж. Иван Крумов</u> 1994 г. - 1 749 765 t <u>инж. Венци Тодоров</u> 1995г. - 1 619 026 t 1996 г. - 1619 026 1t	<u>1. инж. Милчо Лозанов</u> 1997 г.- 1 579 457 t <u>2. инж. Николай Василев</u> 1998 г. - 1 835 000 t <u>3. инж. Васил Качаров</u> 1999 г. - 1 314 832 t <u>4. инж. Теодор Дребов</u> 2000 г. - 1 117 056 t <u>5. Кирил Радев</u> 2001 г. - 696 875 t	<u>инж. Венцислав Алексов</u> 2002 г. -812 564 t 2003 г. - 982 080 t 2004 г. - 1 013 444 t 2005 г. - 866 198 t

В) Възникване на катастрофални събития в Мини „Бобов дол“.

На 23 юни 1997 г. в рудник „Бобов дол“ възниква експлозия на газ метан (CH₄), в резултат на което са пострадали 11 работници и са нанесени големи материални загуби.

На 1 септември 1997 г. възниква експлозия на газ метан (CH₄), в резултат на което загиват 10 души миньори, много пострадали и огромни материални щети.

Г) Някои събития, които предопределят края на Мини „Бобов дол“.

Със Заповед № 296/12.07.1999 г. на Комитета по енергетика в структурата на Мини „Бобов дол“ ЕАД се извършват промени чрез отделяне и образуване на нови самостоятелни еднолични дружества:

1. Автобаза „Бобов дол“ ЕООД;
2. ЦРБ „Бобов дол“ ЕООД;
3. Колош „Бобов дол“ ЕООД, като в структурата на Колош „Бобов дол“ ЕООД са включени:
 - 1) Рудник „Миньор“;
 - 2) Рудник „Мламолowo“
 - 3) Рудник „Мламолowo – 2“
 - 4) Незавършено строителство (РОЦ „Миньор“, ВШ-6 и др.)

Поради неефективни резултати от добива на въглища в тримесечния срок на функциониране и със Заповед № 88/01.11.1999 г. на Председателя на Държавната комисия по енергетика и енергийни ресурси, Колош „Бобов дол“ ЕООД е обявено в ликвидация.

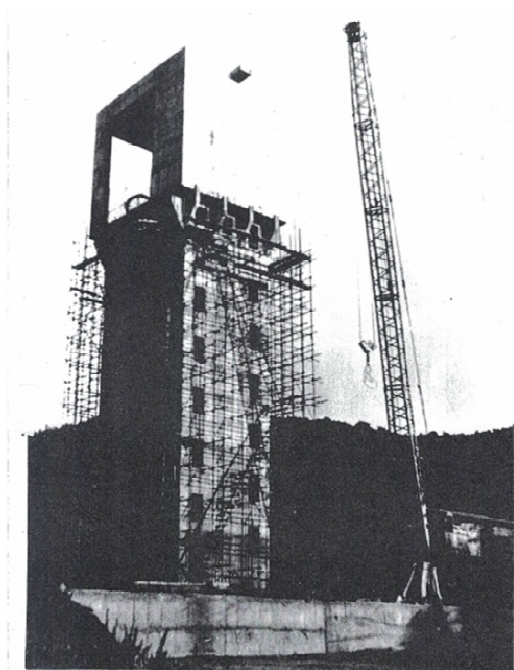
През 2004 г. е завършена техническата ликвидация на р-к „Мламолowo“, а през 2005 г. на р-к „Мламолowo – 2“.

В отчетните доклади на ликвидатора е записано, че целите и задачите, възложени с проектите за ликвидация са изпълнени. В ликвидираните обекти не са допуснати недовършени, незавършени и некачествено извършени работи.

С Решение от 14.10.2019 г. Кюстендилският окръжен съд обявява „Въгледобив Бобов дол“ в несъстоятелност.

Заклучение

Минното дело, свързано преди всичко с добива и преработката на различни полезни изкопаеми и суровини, е един от най-старите занаяти, които човечеството опознава, развива и практикува от древността до наши дни.



Фиг. 12 Надшахтова кула на ВШ-5

И през ядрената епоха днес, XXI век, съвременната атомна енергетика започва с минно дело (проучване, добив и обогатяване на уранови руди) за производство на гориво за АЕЦ и завършва с минното дело, свързано със строителството на хранилища за съхраняване на отработеното гориво в продължение на 50-100 и повече години.

Заключението на този доклад се предопределя от неговото заглавие „Вентилационна шахта № 5“ – последната шахта в Мини „Бобов дол“.

И, за да се знае и помни, за идните поколения, трябва да се допълни и следното: надшахтовата кула на ВШ-5 е взривена през 1994 г., както и всички сгради на административно-битовия комплекс (АБК), компресорното отделение и сградата на рудничната подемна уредба (РПУ).

През 1981 г. „на гола зелена поляна“ започва строителството на ВШ-5, а през 1994 г. в района на обекта всичко е взривено, изринато и изравнено и оставено отново „да расте зелена трева“.

Литература

1. ПСД „Комплексен идеен проект за обект: рудник „Бобов дол – обединен“, сектор „Иван Русев“, Минпроект, София, 1970.
2. Проект (ПСД) „ВШ-5“. Прокарване и закрепване – обяснителна записка., Минпроект., София, 1981.
3. ПСД „Инструкция за монтаж и експлоатация на триделен секционен кофраж Ø 6000 и Н=4000 m. Част „Технологична“, ИМС., София, 1983.
4. ПСД „Висяща предпазна площадка Ø 5600., от 1 април 1982
5. Инструкция за експлоатация на универсална товарачна машина КС-27/40.
6. ПСД „Проект за бетона на „Вентилационна шахта № 5“. Енергопроект., София, 1982.
7. Инструкция вземане и съхраняване на пробни бетонни тела за доказване якостните характеристики на бетона, използван за бетониране на обект ВШ-5, рудник „Иван Русев“, Мини „Бобов дол“.
8. Проект (ПСД) „ВШ-5“. Армировка на шахтата. Част „минна“, Минпроект., София, 1981.
9. Техническа маркшайдерска инструкция. С., Техника, 1969.
10. Правилник по безопасността на труда при разработване на въглищни находища по подземен начин (В-01-01-01), утвърден 1971 г. от Министерството на енергетиката и горивата.

ПОДЗЕМНИЯТ ДОБИВ НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ ПРИ УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ НА МИНЕРАЛНО СУРОВИННАТА БАЗА НА Р. БЪЛГАРИЯ

д-р инж. Георги Дачев e-mail: g.dachev@me.government.bg

д-р. инж. К.Куцаров e-mail: kbkutsarov@gmail.com

UNDERGROUND MINERAL EXTRACTION WITHIN THE FRAMEWORK OF THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE REPUBLIC OF BULGARIA'S MINERAL RESOURCE BASE

PhD. Eng. Georgi Dachev e-mail: g.dachev@me.government.bg

PhD. Eng. Kiril Kutsarov e-mail: kbkutsarov@gmail.com

РЕЗЮМЕ

През 2019 г. Европейската комисия публикува Европейския зелен пакт (COM (2019) 640), чиято цел е постигане на устойчива икономика в Европейския съюз (ЕС). Това е основният елемент в политиката на ЕС в областта на околната среда, климата и промишлеността. С него се определя целта за неутралност по отношение на климата през 2050 г., за нулево замърсяване и за намаляване на емисиите на въглероден диоксид до 55% до 2030 г. Постигането на определените в Зеления пакт цели изисква достъп до устойчиви суровини, по-специално суровини от критично значение, необходими за чисти технологии, цифрови, космически и отбранителни приложения. За постигане на тези цели, в доклада са посочени много важни условия и действия в областта на подземния добив и преработката на добиваните природни ресурси. Посочени са и основните задачи и действия на операторите на мини и рудници по отношение на съхраняването на минни отпадъци.

Въведение

На 03.05.2024 г. в Официален вестник на Европейския съюз е публикуван регламент на Европейския съюз (ЕС) 2024/1252 на Европейския парламент и на съвета от 11 април 2024 година за създаване на рамка за гарантиране на сигурни и устойчиви доставки на суровини от критично значение и за изменение на регламенти (ЕС) № 168/2013, (ЕС) 2018/858, (ЕС) 2018/1724 и (ЕС) 2019/1020. Общата цел на регламента е да се подобри функционирането на вътрешния пазар чрез създаване на рамка за гарантиране на достъпа на Съюза до сигурни, стабилни и устойчиви доставки на суровини от критично значение, включително чрез насърчаване на ефикасността и кръговостта по цялата верига за създаване на стойност. Вземайки предвид съществуващите разнородни нормативни уредби на държавите членки, икономическите условия в общността и необходимостта от единомислие по отношение на добива и доставките на суровините от критично значение, Европейския парламент и Съветът на Европейския съюз приеха единен акт за създаване на рамка за гарантиране на сигурни и устойчиви доставки на суровини от критично значение [6]. Стратегическите суровини и суровините от критично значение са представени в таблица 1.

Табл. 1 Стратегически и критични суровини

Стратегически суровини	Суровини от критично значение
а) боксит/диалуминиев триоксид/алуминий б) бисмут в) бор — с металургична чистота г) кобалт д) мед	а) антимон б) арсен в) боксит/диалуминиев триоксид/алуминий г) барит д) берилий

да носят своята отговорност, с прилагане на най-добрите практики да добиват и преработват добития ресурс и отговарят за бъдещето на минните отпадъци. Последните, при наличие на остатъчни минерали и метали, които във времето могат да бъдат добивани, трябва да се разглеждат като техногенни находища.

За добива на подземни природни богатства този пакт има голямо значение. Според него минните предприятия трябва да търсят възможности за по-пълно изучаване на находищата на полезни изкопаеми и по-ефективното им разработване.

В областта на геологията следва да има усъвършенстване на геоложкия състав, геоложката база и методика, за по-пълното – комплексно изучаване на находищата на подземни природни богатства. Вида на полезните и съпътстващи минерални компоненти и техният химически и минерален състав. Разширяване на геоложката, инженерно-геоложката, геотехнологичната, миннотехнологичната и миннотехническата информация за геоложкия и минен обект.

По преработката на добитата минна маса се очаква развитие на техниката е технологиите за първична и вторична -дълбока преработка на подземните природни богатства и възможното най-пълно оползотворяване на природния ресурс. В това направление трябва внимателно да се следят и изследват възможностите за прилагане на нови материали във вид на смоли и реагенти създавани по направление на материалознанието и инженерството / Material Sciences and Engineering /.

Необходимо е развитие на техниката и технологиите за добив на подземни природни богатства при спазване на изискванията: за прилагане на съвременни технологии с най-пълно отработване на природния ресурс; за най-безопасно за хората и социалната среда разработване и за пълно екосъобразно разработване. За подземното разработване на полезни изкопаеми това означава използването на съвременни добивни технологии в т.ч., най вече за селективен добив, със съвременни технически средства в т.ч. хуманоидни роботи, роботизирани средства за изкопаване, натоварване и транспорт. Използване на модерни решения за вътрешно руднични системи за частично натрошаване и предварителен контрол на изкопаната минна маса, подъем, транспорт и логистика. Вътрешно руднична система за подготовка на излишната-непродуктивна минна маса за запълване, транспортирането и разполагането и в иззетите пространства. В рамките на общорудничната система да се използва стройна система за мониторинг, управление и контрол. Натрупване, систематизиране и използване на цялата информация за създаване и трениране на локална невронна мрежа, като основа на локален изкуствен интелект, а в бъдеще и глобален.

Друга важна цел на Европейската комисия е постигането на затворени цикли за оползотворяване на суровини, включвайки рециклирането като част от цикъла. В тази връзка отпадъчните и остатъчни продукти от първичното разработване на полезни изкопаеми може да се превърне в източник за добив на вторични и/или съпътстващи основната суровина елементи.

Особено важно за изпълнението на целите посочени по-горе, са изискванията и задълженията посочени в публикувания регламент на Европейския съюз (ЕС) 2024/1252, на Европейския парламент и на съвета от 11 април 2024 година, както следва:

Член 27 - Оползотворяване на суровини от критично значение от миннодобивни отпадъци

- 1. Операторите, задължени да изготвят планове за управление на отпадъците в съответствие с член 5 от Директива 2006/21/ЕО, предоставят на компетентния орган, определен в член 3, точка 27 от посочената директива, **проучване за предварителна икономическа оценка на потенциала за оползотворяване на суровини от критично значение от:**
 - а) миннодобивните отпадъци, съхранявани в съоръжението; както и**
 - б) миннодобивните отпадъци, които се генерират, или, когато се счита за по-ефективно, от извлеченото количество, преди то да се превърне в отпадък.****

Операторите се освобождават от задължението, предвидено в първа алинея от настоящия параграф, ако могат да покажат с висока степен на сигурност пред компетентния орган съгласно

определението в член 3, точка 27 от Директива 2006/21/ЕО, че миннодобивните отпадъци не съдържат суровини от критично значение, които са технически оползотворими.

2. В проучването, посочено в параграф 1, се включват най-малко измерване на количествата и концентрациите на суровини от критично значение, съдържащи се в миннодобивните отпадъци и в извлеченото количество, както и оценка на техническите и икономическите възможности за тяхното оползотворяване. Операторите определят методите, използвани за оценка на количествата и концентрациите.
3. До 24 ноември 2026 г. операторите на съоръжения за миннодобивни отпадъци представят проучването, посочено в параграф 1, на компетентния орган съгласно определението в член 3, точка 27 от Директива 2006/21/ЕО. Операторите на нови съоръжения за миннодобивни отпадъци представят това проучване на компетентния орган съгласно определението в член 3, точка 27 от Директива 2006/21/ЕО, при представянето на своите планове за управление на отпадъците в съответствие с член 7 от посочената директива.
4. Държавите членки създават база данни за затворените съоръжения за миннодобивни отпадъци, разположени на тяхната територия, включително за изоставените съоръжения за миннодобивни отпадъци, с изключение на затворени съоръжения за миннодобивни отпадъци, в които особени характеристики на депата за отпадъци или геоложките условия правят малко вероятно наличието на потенциално технически оползотворими количества суровини от критично значение. В тази база данни се съдържа информацията относно:
 - а) местоположението, площта и обема на отпадъците или, когато е целесъобразно, прогнозния обем във връзка със съоръжението за миннодобивни отпадъци;
 - б) оператора или бившия оператор на съоръжението за миннодобивни отпадъци и, когато е приложимо, техния правопреемник;
 - в) приблизителните количества и концентрации на всички суровини, съдържащи се в миннодобивните отпадъци и, когато има данни, съдържащи се в първоначалното находище на полезни изкопаеми, в съответствие с параграф 7;
 - г) всякаква допълнителна информация, която държавата членка счита за уместна, за да се даде възможност за оползотворяване на суровини от критично значение от съоръжението за миннодобивни отпадъци.
5. До 24 ноември 2027 г. държавите членки приемат и прилагат мерки за насърчаване на оползотворяването на суровини от критично значение от миннодобивни отпадъци, по-специално от затворени съоръжения за миннодобивни отпадъци, идентифицирани в базата данни, посочена в параграф 4, като съдържащи потенциално икономически оползотворими суровини от критично значение.
6. Базата данни, посочена в параграф 4, се създава до 24 ноември 2026 г., като цялата информация се въвежда в базата данни до 24 май 2027 г. Тя се предоставя в публично достъпна и цифрова форма и се актуализира най-малко на всеки три години, за да се включи допълнителна налична информация и нови затворени съоръжения или нови идентифицирани съоръжения.
7. За да предоставят информацията, посочена в параграф 4, буква в), държавите членки предприемат най-малко следните дейности:
 - а) за затворени съоръжения за миннодобивни отпадъци 24 ноември 2026 г. държавите членки правят цялостен преглед на наличните преписки за издаване на разрешителни или на друга налична документация, когато не съществуват преписки за издаване на разрешителни;
 - б) за съоръжения за миннодобивни отпадъци, за които наличната информация би могла да указва наличието на потенциал за икономически оползотворими количества суровини от критично значение, държавите членки допълнително провеждат до 24 май 2026 г. вземане на представителни геохимични проби;

в) за съоръжения за миннодобивни отпадъци, за които дейностите, описани в букви а) и б) от настоящия параграф, са показали потенциал за икономически оползотворими количества суровини от критично значение, държавите членки допълнително извършват до 24 март 2027 г. по-подробна извадка, включваща последваща химическа и минералогична характеристика чрез картаж или равностойни техники, когато това е екологосъобразно в съответствие с приложимите екологични изисквания на равнището на Съюза и, когато е приложимо, в съответствие с изискванията на Директива 2006/21/ЕО.

8. Дейностите, посочени в параграф 7, се извършват в рамките на националните правни системи относно минералните ресурси, отпадъците, правата на собственост, собствеността върху земята, въздействието върху околната среда и здравето, както и всички други относими разпоредби. В случай че такива фактори възпрепятстват дейностите, органите на държавата членка търсят съдействието на оператора или собственика на съоръжението за миннодобивни отпадъци. До резултатите от дейностите, посочени в параграф 7, се предоставя достъп под формата на част от базата данни, посочена в параграф 4. Когато е възможно, държавите членки включват в базата данни класификация на затворените съоръжения за миннодобивни отпадъци в съответствие с Рамковата класификация на Организацията на обединените нации за ресурсите.

Целите, които ЕС [6] си поставя в рамките на този нормативен документ, са постигането на - най-малко 10% от годишното потребление на ЕС за добив; най-малко 40% от годишното потребление на ЕС за преработка; най-малко 25% от годишното потребление на ЕС за рециклиране; • не повече от 65% от годишното потребление на ЕС от една трета държава.

Член 49 - Влизане в сила

Регламент (ЕС) 2024/1252 влиза в сила на двадесетия ден след публикуването му в Официален вестник на Европейския съюз. На 23 май 2024 влезе в сила Регламент (ЕС) 2024/1252 на Европейския парламент и на Съвета на Европа (CRMA) във връзка с гарантиране на доставките на критични суровини в Европейския съюз

Регламента е задължителен в своята цялост и се прилага пряко във всички държави членки. Съставено в Брюксел на 11 април 2024 година.

За постигането на тези амбициозни цели е необходимо създаване на съвременни проекти, знаещи и можещи минни специалисти, които да управляват и при необходимост усъвършенстват.

Поради сложността на подземната минна дейност, проектите им са по-сложни за проектиране, изпълнение и контрол. Затова проектантите трябва да притежават всички качества и отговорности за поставяне и решаване на всички задачи включени в нормативните документи.

Наблюденията от представянето, обсъждането и приемането на различните проекти за подземна минна дейност показват, че проектантите, най-често минни инженери от предприятието, водени от идеята да спестят средства на собственика за заплащане на външни проектни услуги, нямат необходимата подготовка, опит и лиценз за извършване на инвестиционна проектна дейност. Допускат много грешки и неточности от терминологичен и технически характер, а много и решения, които нямат нищо общо с добрата минна практика и нормативни документи.

В добре организирани минни предприятия младите, добре обучени и амбициозни минни инженери израстват много по отношение на знания и опит и се справят с много отговорни практически задачи от областта на планирането, управлението и контрола на минните дейности. Внедряват съвременни технически и комуникационни средства за ефективно и безопасно разработване на природни ресурси по подземен начин.

Подпомагани сериозно от ръководството на мините, тези решения се представят с успех на различни форуми, организирани от предприятията и Научно-техническия съюз по минно дело, геология и металургия. На тези форуми младите специалисти получават съвети, признание, награди и стимули от водещи специалисти за по-нататъшно развитие чрез допълнителна специализация и научна дейност.

Амбициите в минното инженерство и особено в специализация „Подземен добив“ не се формират и реализират без сигурната и стабилна основа от знания и умения. Затова е необходимо да е налице добра и специализирана подготовка по специалността, минно предприятие с добра практика и добри мениджъри. Надяваме се в бъдеще да има специализирана подготовка на кадри в това направление, което да бъде водено от хабилитирани преподаватели с тази специализация, както и от водещи специалисти от практиката, а също и да се запази специализираното обучение в направление „Подземен добив“ на магистърско ниво.

Заклучение

За постигане на целите и задачите поставени в посочените нормативни документи е необходимо широкото използване на държавните органи, минната камара и университета за организиране и обучение на минната инженерна общност за внедряване и използване на най-добрите практики за добив на полезни изкопаеми по подземен начин. Усъвършенстване на минното образование и привличане на младежи за обучение, специализация и наука. За отговорното опазване, управление и използване на минните отпадъци в рамките на минната стриктно да се спазват действащите нормативни изисквания, регламенти, директиви и наредби.

Използвана литература

- [1] Закон за подземните богатства (обн. ДВ, бр. 23 от 1999 г., последно изм. и доп., ДВ, бр. 17 от 2021 г.).
- [2] Наредба за управление на минните отпадъци, приета с ПМС № 1 от 07.01.2016 г. (обн., ДВ, бр. 5 от 2016 г., изм. и доп., ДВ, бр. 58 от 2019 г.).
- [3] Решение за изпълнение (ЕС) 2020/248 на Комисията от 21 февруари 2020 г. за определяне на технически насоки за инспектирането в съответствие с член 17 от Директива 2006/21/ЕО на Европейския парламент и на Съвета.
- [4] Регламент на Европейския съюз (ЕС) 2024/1252 на Европейския парламент и на съвета от 11 април 2024 година за създаване на рамка за гарантиране на сигурни и устойчиви доставки на суровини от критично значение и за изменение на регламенти (ЕС) № 168/2013, (ЕС) 2018/858, (ЕС) 2018/1724 и (ЕС) 2019/1020.
- [5] Е. Тодорова, Г. Дачев, Прилагане на нормативната уредба в областта на управлението на минните отпадъци, мониторинга, контрола и инспектирането на съоръженията за минни отпадъци – основни аспекти и насоки при прилагането „IX международна конференция по геомеханика“ 08.09. – 11.09.2020 г. гр. Варна, к.к. „Св. Св. Константин и Елена“
- [6] РЕГУЛАТОРНА РАМКА НА ЕВРОПЕЙСКИЯ СЪЮЗ ЗА УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ НА МИНЕРАЛНО-СУРОВИННАТА БАЗА, Г. Дачев, Л. Московска, сп. Минно дело и геология 2025 г.

ДЕФОРМАЦИОННО РАЙОНИРАНЕ И СТРОИТЕЛЕН КОНТРОЛ НА ЗЕМНАТА ОСНОВА ПРИ ПЛОЩНИ ИНЖЕНЕРНИ ОБЕКТИ

Веселин Балев¹ email: veselinbalev@mgu.bg

¹ МГУ „Св. Иван Рилски“, кат. „Подземно строителство“

РЕЗЮМЕ

При площни инженерни обекти върху рекултивирани, насипни и ненарушени терени определящ проектен показател е не единичната носимоспособност, а пространствената изменчивост на деформационното поведение на земната основа. Работата представя методика, при която изпитването с динамична щампа се използва за деформационно райониране на площадката и за насочен строителен контрол. Разгледани са организацията на изпитвателната мрежа, критериите за обособяване на зони и начинът, по който зоналната карта се превръща в диференцирани изисквания към изпълнението. Методиката е илюстрирана с 49 изпитвания върху площадка за фотоволтаична централа.

DEFORMATION ZONING AND CONSTRUCTION CONTROL OF THE SUBGRADE FOR AREAL ENGINEERING FACILITIES

Veselin Balev¹ email: veselinbalev@mgu.bg

¹ UMG „St. Ivan Rilski“, dep. „Underground Construction“

ABSTRACT

For areal engineering facilities built on reclaimed, filled or undisturbed ground, the governing design property is not the local bearing capacity but the spatial variability of the deformation behaviour of the subgrade. The paper presents a methodology in which light weight deflectometer testing is used for deformation zoning of the site and for targeted construction control. The organisation of the testing grid, the criteria for delineating zones and the way a zonal map is converted into differentiated execution requirements are discussed. The methodology is illustrated by 49 tests on a photovoltaic plant site.

I. Увод

Площните инженерни обекти се различават от компактните сгради по това, че носещите им елементи се повтарят многократно в план и взаимодействат с различни части от земната основа. Фотоволтаичните централи, технологичните площадки, складовите зони, обслужващите пътища и леките промишлени съоръжения попадат в този клас. При тях проектната надеждност зависи не толкова от най-ниската измерена стойност на деформационния модул, колкото от това как тази стойност се разпределя по площта и дали се повтаря в участъците, където ще стъпят конструктивните елементи.

Еврокод 7 изисква геотехническото проектиране да отчита изменчивостта на основата и да определя характеристични стойности с оглед на обхвата, в който работи конструкцията [1]. При обект с една фундаментна плоча този обхват е малък. При няколкостотин опорни елемента върху десетки декари той обхваща цялата площадка. Оттук следва и различната логика на проучването: необходима е площна картина, а не набор от единични определяния. Задачата се изостря при рекултивирани и насипни терени с променлив зърнометричен състав и изразена зависимост от водния режим; при ненарушените терени изменчивостта има друг произход, но същата методическа тежест.

Изпитването с динамична щампа е подходящо за такава задача, защото дава бърз и повторяем показател за деформируемостта на повърхностния пласт и позволява гъста мрежа от определяния. Класическата практика за оценка на еластичен и деформационен модул с натискова плоча [2] остава

референтната рамка; настоящата работа я разширява от точково определяне към площно райониране и към насочен контрол при изпълнението.

Целта на работата е да се формулира методика, при която резултатите от динамична щампа се превръщат в деформационни зони с различни изисквания към изпълнението, и да се очертаят границите на приложимост на този подход. Референтният пример с 49 изпитвания служи за илюстрация, а не за обобщение.

II. Обект и изходни данни

Като референтен пример е използвана площадка за фотоволтаична централа в района на Пирдоп. За нея са налични инженерно-геоложки данни от предходно проучване: шурфове, лабораторни проби, пенетрационни изпитвания и проби за агресивност на средата.

Земната основа е представена основно от насип от разнородни чакъли с песъчливо-прахово-глинест запълнител. Зърнометричният състав на пробите показва различия, които не позволяват пластът да се приеме за хомогенна инженерна среда въз основа на осреднени лабораторни стойности. Праховата и глинестата фракция варират, а с тях и чувствителността към промяна на водното съдържание. Степента на водонасищане е с медиана 0,77, което поставя част от площадката в диапазон, при който валеж или повърхностно задържане на вода може да промени измервания отклик.

Насипните пластове върху рекултивирани и техногенно изменени площадки се изпълняват на етапи и от различни източници на материал. Това е допълнителен довод изменчивостта на такъв пласт да се установява площно, а не да се приема по осреднени показатели.

Пробите за агресивност имат самостоятелно значение за разглеждания клас обекти. Опорните елементи на площните съоръжения се вкопават в насипния пласт, а при агресивна среда изискванията към защитата на вкопаните стоманобетонни елементи се определят отделно от изискванията към деформируемостта. Двете оценки се извършват върху една и съща основа и е целесъобразно да ползват едно и също райониране.

III. Метод и измервани величини

Динамичната щампа (Light Weight Deflectometer, LWD) е подвижна измервателна система за определяне на деформируемостта на земната основа при краткотрайно динамично натоварване. Падаща тежест предава импулс през демпфериращ елемент към кръгла натоварваща плоча, а вертикалното преместване на плочата се регистрира от вграден датчик.



Фиг. 1. Устройство на динамичната щампа.

В използваната конфигурация плочата е с диаметър 300 mm, падащата тежест е 10 kg, а височината на падане е около 700 mm. Максималната динамична сила е 7,07 kN при продължителност на импулса около 18 ms [3], [4]. Тези стойности характеризират конкретната апаратура и методика, а не всички системи от този тип.

Изпитването включва подготовка на контактната повърхност, предварителни удари за осигуряване на равномерен контакт и последващи измервателни удари. От осреднената вертикална деформация s се определя динамичният деформационен модул:

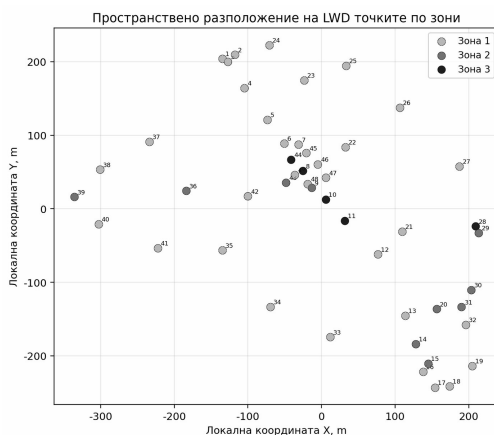
$$E_{vd} = 22,5 / s \quad (1)$$

където E_{vd} е динамичният деформационен модул, МПа, а s е средната вертикална деформация, mm. Изразът е валиден за плоча с диаметър 300 mm при описаната конфигурация [3].

Полученият E_{vd} не е еквивалент на статичните деформационни модули Ev_1 и Ev_2 по DIN 18134 [5] и не бива да се представя като такъв. Той е сравнителен показател по стандартизирана процедура [6], чиято стойност е в бързината и повторемостта на определянето. Съотношението между динамичния и статичния модул зависи от типа материал, от дебелината на повлияната зона и от водното съдържание [7], [8]. Точността зависи и от контакта между плочата и основата, поради което не се допуска изпитване върху единични непредставителни точки, а водният режим се описва задължително в полевия протокол.

IV. Изпитвателна мрежа и критерии за райониране

Изпитвателната мрежа определя какво може да се твърди за площадката. В референтния пример е приложен растер приблизително 100×100 m, съгъстен в участъците с инженерна инфраструктура и с видими особености на терена. Разположението на точките е дадено на фиг. 2.



Фиг. 2. Разположение на изпитвателните точки с означена зонална принадлежност.

При рекултивирани площи мрежата се обвързва с границите на технологичните карти, зоните на насипване, дренажните линии и видимите промени в повърхностното състояние. При ненарушени терени тя следва геоложките граници, морфологията и естественото отводняване. Строго геометричната мрежа е по-слабо решение от мрежата, съобразена с инженерната значимост на отделните участъци.

Достатъчността на мрежата се проверява по следните условия: обхваната ли е цялата площ; попадат ли точки във всички характерни участъци и при бъдещите опорни елементи; съпоставени ли са точките с шурфовете и лабораторните проби; може ли мрежата да бъде повторена по време на строителството. Последното условие превръща предпроектното райониране в основа за проследим контрол.

За обособяване на зоните е използвано отношението Ev_2/Ev_1 , изведено по корелационна зависимост от резултатите на динамичната щампа. То се разглежда като показател за степента на уплътненост и за структурната устойчивост на основата при повторно натоварване. Приетата схема е дадена в табл. 1.

Таблица 1. Критерии за деформационно райониране и изисквания към изпълнението

Зона	Ev2/Ev1	Инженерна характеристика	Изисквания към изпълнението
1	под 2,0	Относително добре уплътнена основа	Стандартно изпълнение; проверка при овлажняване
2	от 2,0 до 2,2	Преходна	Повишен контрол; повторно изпитване след уплътняване
3	над 2,2	Потенциално проблемна	Доуплътняване; проверка на водния режим; при нужда статична калибрация

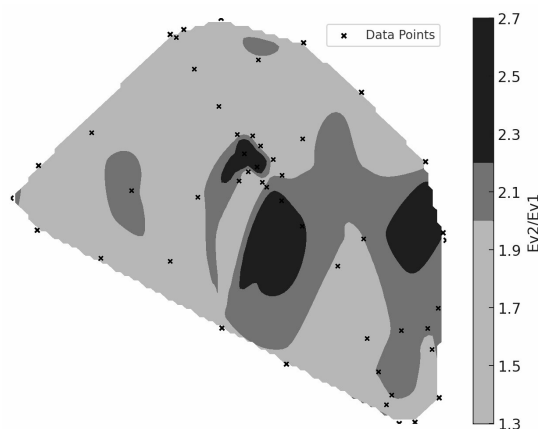
Граничните стойности 2,0 и 2,2 произхождат от практиката за статично изпитване с натискова плоча при земни работи [5]. Приложени към величина, изведена по корелация, те не могат да се използват като самостоятелно нормативно доказателство. В настоящата методика те служат за относително сравнение между участъци на една и съща площадка, изпитани с една и съща апаратура и процедура, което е и обичайното приложение на метода при контрол на уплътняването [9].

Районирането се извършва на три етапа с различна тежест на извода. В предпроектния етап то разпознава изменчивостта и дава първична карта на участъците; в проектния въвежда инженерни зони с различни изисквания; в строителния служи за проверка след земните работи и за решение за приемане или коригиращо действие.

V. Резултати

Обработени са 49 точки. Средната стойност на Evd за набора е 56,2 МПа при минимум 24,9 МПа и максимум 84,3 МПа. Средното отношение Ev2/Ev1 е 1,98 при диапазон от 1,82 до 2,67. Разликата между най-високата и най-ниската стойност на динамичния модул е повече от трикратна, което показва, че осреднена характеристика за цялата площадка би била подвеждаща.

Пространственото разпределение на отношението Ev2/Ev1 е показано на фиг. 3. Обособяват се три области с различно поведение, като неблагоприятните участъци са локализирани и не обхващат цялата площ.



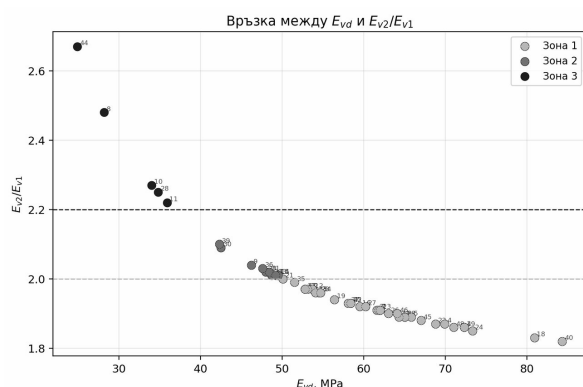
Фиг. 3. Пространствено разпределение на отношението Ev2/Ev1 по изолинии.

Преобладава диапазонът 50–75 МПа, а отклоняващите се точки са малко на брой и групирани. Обобщената статистика по зони е дадена в табл. 2.

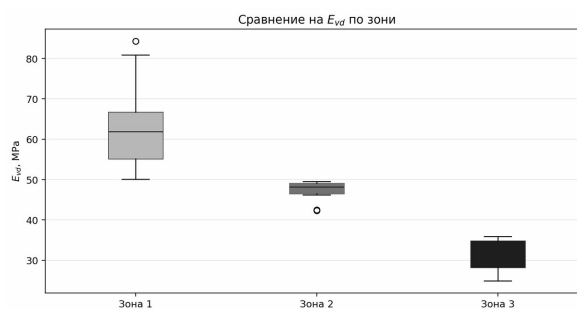
Таблица 2. Обобщена статистика по геотехнически зони

Зона	Брой точки	Evd, MPa (средно)	Evd, MPa (min – max)	Ev2/Ev1 (средно)	s, mm (средно)	Дял от площта, %
1	34	62,4	50,1 – 84,3	1,91	0,370	64
2	10	47,2	42,3 – 49,5	2,03	0,480	27
3	5	31,6	24,9 – 35,9	2,38	0,730	9

Връзката между двата показателя е показана на фиг. 4. Точките с нисък Evd съответстват на високо отношение Ev2/Ev1, тоест двата показателя дават съгласувана картина. Това е важна вътрешна проверка: ако районирането по Ev2/Ev1 не се потвърждаваше от динамичния модул, зоналната карта щеше да отразява по-скоро особености на изчислителната зависимост, отколкото състояние на основата. Съпоставката на Evd по зони (фиг. 5) потвърждава, че зоните имат реално различаващ се деформационен отклик, а не само различни изчислени отношения.



Фиг. 4. Връзка между Evd и отношението Ev2/Ev1.



Фиг. 5. Сравнение на Evd по геотехнически зони.

VI. Инженерна интерпретация и строителен контрол

Практическата стойност на районирането е в това, че превръща еднакво изискване към цялата площадка в диференцирани изисквания по участъци. Изискванията по зони са дадени в табл. 1: стандартно изпълнение в зона 1, повишен контрол и повторно изпитване в зона 2, доуплътняване и проверка на водния режим в зона 3.

Този подход е в съответствие с общото правило контролът на изпълнението да се извежда от измерими технологични показатели, свързани с конкретното технологично решение, а не от единична приемна стойност [10]. Показател, който не подкрепя решение, оскъпява контрола, без да намалява риска.

Повторяемостта на мрежата превръща изпитването в елемент от мониторинга на обекта: резултатите се проследяват във времето и се обвързват с конкретни строителни действия. При подземното градско строителство геотехническият и конструктивният мониторинг се разглеждат като част от управлението на риска при изпълнение [11]. Възможностите за цифрово документиране и надеждно споделяне на геотехнически данни правят такава проследимост практически осъществима [12].

При плоски обекти интерпретацията следва да отчита и взаимодействието в системата „връхна конструкция, фундамент, земна основа“ [13]. Дори малки абсолютни слягания придобиват значение, когато конструктивната схема се повтаря многократно и съседни опори стъпват в участъци с различна коравина. Когато районирането покаже необходимост от подобряване, изборът на метод и

обхватът му се определят по зони, а не за цялата площадка. Съществуват както методи за площно уплътняване [14], така и методи за локално заздравяване чрез инжектиране [15].

Водният режим остава водещ фактор при тълкуването. При насип с пясъчливо-прахово-глинест запълнител повишената влажност понижава E_{vd} и може да премести точка от една зона в друга. Затова всяко изпитване се придружава от отчет за състоянието на терена (сухо, влажно, след валеж, преовлажнено), а изпитвания при различен воден режим не се сравняват пряко.

VII. Ограничения и заключение

Ограниченията на методиката са дълбочинно, нормативно и приемателно. Динамичната щампа характеризира повърхностен пласт с дебелина от порядъка на диаметъра на плочата и не замества проучване на по-голяма дълбочина. Отношението E_{v2}/E_{v1} тук е изведено по корелация и служи за относително сравнение, а не за приемане. Окончателното приемане изисква калибрация със статична щампа и съпоставка с инженерно-геоложките данни. Представеният пример е от една площадка с един тип насип, поради което числените стойности и зоналните граници не се пренасят пряко към друг обект; пренася се структурата на подхода.

Определящият проектен показател при този клас обекти е пространствената изменчивост на деформационното поведение, а не единичната стойност на носимоспособността. Референтният пример показва, че при 49 точки в мрежа около 100×100 m се обособяват три зони с трикратна разлика в средния динамичен деформационен модул. Деветдесет и един процента от площта попада в зони със стандартно изпълнение или с повишен контрол, а 9 % изискват целенасочени мерки. Това дава възможност за локални действия вместо консервативно третиране на целия обект.

Приложимостта на подхода е висока за предпроектно ориентиране и за оперативен строителен контрол и ограничена като самостоятелно основание за окончателно приемане. Условието за надеждност е измерването да се извършва по еднаква процедура, при документиран воден режим и в мрежа, която може да бъде повторена.

ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1997-1. Еврокод 7: Геотехническо проектиране. Част 1: Общи правила. София: Български институт за стандартизация.
2. Павлов, П., Ив. Митев, Л. Тотев. Определяне на еластичен и деформационен модул при строителство с натискова плоча. В: Сборник доклади по проект „Rifren Safety Environment – Working and Ambient“. София: Издателска къща „Св. Иван Рилски“, 2007, с. 79–83. ISBN 978-954-353-083-0.
3. FGSV. TP BF-StB, Part B 8.3. Dynamic Plate Load Testing with the Light Drop-Weight Tester. Cologne: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2012 (English translation, 2018).
4. TERRATEST GmbH. Instruction Manual – Light Weight Deflectometer: TERRATEST 7000 STREAM / TERRATEST 8000 WIRELESS. Berlin: TERRATEST GmbH, 2025.
5. DIN 18134:2012-04. Plate load test – Determining the deformation and strength characteristics of soil. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2012.
6. ASTM E2835-21. Standard Test Method for Measuring Deflections Using a Portable Impulse Plate Load Test Device. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.
7. Fleming, P. R., M. W. Frost, J. P. Lambert. Review of Lightweight Deflectometer for Routine In Situ Assessment of Pavement Material Stiffness. Transportation Research Record, 2007, Vol. 2004(1), pp. 80–87. DOI: 10.3141/2004-09.
8. Mooney, M. A., P. K. Miller. Analysis of Lightweight Deflectometer Test Based on In Situ Stress and Strain Response. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2009, Vol. 135(2), pp. 199–208. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:2(199).
9. Duddu, S. R., H. Chennarapu. Quality control of compaction with lightweight deflectometer (LWD) device: a state-of-art. International Journal of Geo-Engineering, 2022, Vol. 13, Article 6. DOI: 10.1186/s40703-021-00171-2.

10. Борисов, Б. Технологични особености и контрол на качеството при изпълнение на изливни стоманобетонни шлицови стени. 10-та младежка научно-практическа сесия, ФНТС, София, 2013, с. 48–54. ISSN 1314-8931.
11. Борисов, Б. Геотехнически и конструктивен мониторинг в подземното градско строителство. XII Международна конференция по геомеханика, к.к. Св. св. Константин и Елена, Варна, 7–10.09.2026. София: НТС по МДГМ, 2026, с. 63–71. ISSN 1314-6467.
12. Hristova, T., I. Mitev, V. Balev. Monitoring of geotechnical facilities through DLT solution. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, Vol. 970, Article 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/970/1/012011.
13. Милев, Н. Подходи за отчитане на взаимодействието в системата „връхна конструкция – фундамент – земна основа“. Годишник на УАСГ – София, 2014, Т. 46, № 4, с. 29–48. ISSN 1310-814X.
14. Милев, Н., И. Иванов, П. Дюлгеров, Г. Георгиев. Подобряване на механичните параметри на земната основа чрез импулсно уплътняване – практически пример с еднофамилна къща в гр. София. Годишник на УАСГ, 2019, Т. 52(S1), с. S1269–S1276. ISSN 1310-814X.
15. Митев, И., М. Петров. Укрепване на земна основа (лъос) под съществуващи фундаменти на сгради посредством инжектиране с циментови разтвори. Минно дело и геология, 2018, бр. 1, с. 36–40. ISSN 0861-5713.

Водеща компания в добива на оловно-цинкови руди



Минстрой Холдинг АД
бул. „Д-р Г. М. Димитров“ №57
1700 София
tel.: +359 2 963 55 55
fax: +359 2 962 50 85
www.minstroy.com