

OPTIMISATION OF FRAGMENTATION IN A HORNFELS SCHIST ROCK MASS THROUGH MODELLING OF INDUSTRIAL DRILLING AND BLASTING OPERATIONS USING SPECIALISED SOFTWARE: *PARADIGM* (AUSTIN POWDER)

Radoslav Asenov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia
“Ellatzite-Med” AD, 2086 Mirkovo; E-mail: r.asenov@ellatzite-med.com

ABSTRACT. The report examines the possibilities for improving fragmentation in drilling and blasting operations in heterogeneous rock masses composed of hornfelsed shales and hornfels. The influence of key parameters is analysed, such as the drilling pattern and borehole diameter, blasting material charges, initiation intervals, and blast configuration. The strong variability of the physico-mechanical properties of the rocks is taken into account, which makes it difficult to achieve uniform fragmentation. Optimisation approaches are proposed using specialised software, *Paradigm*, through adaptive design and control of blasting operations, with the aim of increasing efficiency and improving subsequent technological processes.

Key words: hornfels, drilling and blasting, *Paradigm* software, Kuz-Ram model, fragmentation.

ОПТИМИЗИРАНЕ НА ФРАГМЕНТАЦИЯТА В МАСИВ ОТ ХОРНФЕЛЗУВАНИ ШИСТИ ЧРЕЗ МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОМИШЛЕНИ ПРОБИВНО-ВЗРИВНИ РАБОТИ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА СПЕЦИАЛИЗИРАН СОФТУЕР – *PARADIGM* (AUSTIN POWDER)

Радослав Асенов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София
“Елаците-Мед” АД, 2086 Мирково

РЕЗЮМЕ. Докладът разглежда възможностите за подобряване на фрагментацията при пробивно-взривни работи в хетерогенни скални масиви от хорнфелзувани шисти и хорнфелзи. Анализира се влиянието на ключови параметри, като сондажна мрежа и диаметър на сондажите, заряди от ВВ, интервали на инициране и конфигурация на взрива. Отчита се силната изменчивост на физико-механичните свойства на скалите, която затруднява постигането на равномерно натрошаване. Предлагат се оптимизационни подходи с помощта на специализирания софтуер - *Paradigm* (Austin Powder), чрез адаптивно проектиране и контрол на взривяването, с цел повишаване на ефективността и подобряване на последващите технологични процеси.

Ключови думи: хорнфелзи, ПВР, *Paradigm* - софтуер, Куз-Рам модел, фрагментация.

1. Въведение

Ефективността на пробивно-взривните работи играе ключова роля в находища, характеризиращи се със сложна геоложка структура. В тези условия качеството на фрагментацията е от съществено значение за оптимизиране на последващите технологични процеси и повишаване на общата ефективност на минното производство. Настоящото изследване е насочено към анализ на целенасочена оптимизация на параметрите на пробивно-взривните работи в условията на хетерогенни масиви от хорнфелзувани шисти/хорнфелзи.



Фиг. 1. Образци на метаморфна скала- хорнфелзувани шисти

2. Влияние на хорнфелзуваните шисти върху процеса на фрагментация при прилагане на ПВР

Скалните масиви, изградени от хорнфелзувани шисти и хорнфелзи, представляват особен инженерно-геоложки интерес поради тяхната променлива структура, механични свойства и степен на метаморфизъм. Тази хетерогенност води до различно поведение при въздействие от взривни заряди, което затруднява постигането на равномерна и контролирана фрагментация.

Физико-механичните показатели на скалите оказват съществено влияние върху ефективността и начина на провеждане на промишлените пробивно-взривни работи тъй като определят както съпротивлението на скалния масив при разрушаване, така и необходимите технологични параметри. По-високата якост на скалите налага използването на по-големи количества взривно вещество и по-гъста сондажна мрежа.

Таблица 1. Основни физико-механични показатели, характеризиращи якостта и устойчивостта на хорнфелзуваните шисти

№	Показател	Дименсия	Минимална стойност	Максимална стойност	Средна стойност
1	Плътност	kg/m ³	2600	3200	2900
2	Якост на едноосов натиск UCS	MPa	80	250	150
3	Якост на опън	MPa	5	25	12
4	Модул на еластичност E	GPa	20	80	45
5	Коефициент на Поасон	-	0,15	0,3	0,22
6	Порьозност	%	0,5	5	2,5
7	Индекс на якост PLI (Point Load Index)	MPa	2	10	6
8	Трайност SDI (Slake Durability Index)	%	85	98	92
9	Скорост на разпространение на надлъжни вълни- Vp	m/s	4500	6500	5500
10	Скорост на разпространение на напречни вълни- Vs	m/s	2500	3700	3100

2.1. PLI (Point Load Index) или индекс на якост при точково натоварване

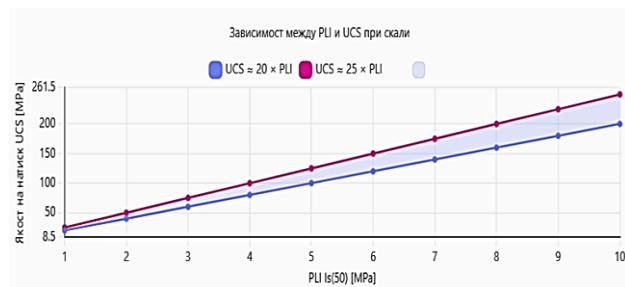
Индексът на якост при точково натоварване (Point Load Index) представлява емпиричен показател за якостта на скалния материал, определян чрез разрушаването му под въздействие на концентрирано натоварване между два твърди накрайника.

Таблица 2. Класификацията на скалите според индекса на трайност SDI (Slake Durability Index) и съответното им поведение при овлажняване и механично въздействие.

SDI (%)	Класификация	Поведение
> 95%	Много устойчива	много здрава скала
85 – 95%	Устойчива	добра механична устойчивост
60 – 85%	Средна	частично се разрушава
30 – 60%	Слаба	значително разпадане
< 30%	Много слаба	бързо разрушаване

2.2. Зависимост между PLI и UCS

Връзката между индекса на якост при точково натоварване и едноосовата якост на натиск показва линейна зависимост, при която UCS нараства пропорционално с увеличаването на PLI.



Фиг. 2. Емпирична зависимост между PLI и UCS

Оцветената зона е реалният диапазон на възможните стойности. Графиката на фиг.2. доказва, че при високи стойности на PLI има високи стойности и при UCS, което води до незадоволителна фрагментация и висок разход на взривно вещество.

3. Теоретична основа на фрагментацията

Теоретичната основа на този процес се базира на взаимодействието между енергията на взривното вещество и физико-механичните свойства на скалния масив. При детонацията на взривното вещество се генерират ударни вълни с високо налягане и температура, които се разпространяват радиално от заряда в скалата. Тези вълни предизвикват интензивни напрежения, водещи до разрушаване на скалата.

Един от моделите за изчисляване на фрагментация е моделът на „Kuz-Ram“. Той е един от най-предпочитаните методи, тъй като се отличава с простота при въвеждане на данни и осигурява пряка връзка между параметрите на взривното проектиране и резултатите от разрушаването на скалата.

$$X_{50} = A \cdot \left(\frac{V}{Q}\right)^{0.8} \cdot Q^{0.167} \cdot (115/RWS)^{0.3} \quad (1)$$

където:

X_{50} – среден размер на късовете, mm

A – коефициент на скалата (rock factor)

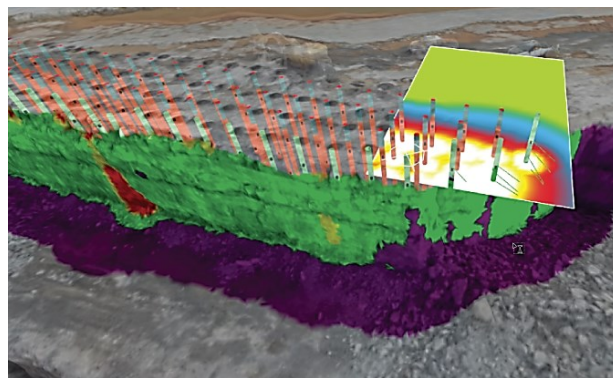
V – обем на разрушената скална маса, m³

Q – маса на заряда, kg

RWS – относителна работоспособност на BB

4. Специализиран софтуер- “Paradigm” за оптимизация на пробивно-взривни работи

„Paradigm“ е специализиран софтуер по лиценз на “Austin Powder” за проектиране, анализ и оптимизация на пробивно-взривни работи (ПВР) в открити и подземни минни обекти. Той позволява моделиране на сондажно-взривни схеми, изчисляване на основни параметри на взрива и прогнозиране на фрагментацията на скалната маса.



Фиг. 3. 3D модел на взривно поле в „Paradigm“ (по лиценз на Austin Powder) с визуализация на зарядите от BB и зони на въздействие

5. Вариант №1 за ПВР в масив, представен от хорнфелзувани шисти

Приложените пробивно-взривни работи са изпълнени в шахматна сондажна мрежа с цел постигане на равномерно

раздробяване и оптимално използване на енергията на взрива.

- при сондажи с диаметър 165 mm се използва мрежа 6 × 5 m
- при сондажи с диаметър 250 mm се прилага мрежа 8 × 7 m

Таблица 3. Геометрични и технологични параметри на сондажите и сондажната мрежа, използвани при проектиране на пробивно-взривни работи във Вариант №1

Вид сондажи	Количество, бр.	Проектна дълбочина, m	Проектен ъгъл, °	Преддълбаване, m	Сондажна мрежа, m	
					a	b
Сондажи с d = 165 mm	30	17	90	2	6	5
Буферни сондажи (d = 165 mm)	31	16	90	1	6	-
Сондажи с d = 250 mm	67	17	90	2	8	7



Фиг. 4. „Paradigm“ - План при проектиране на сондажно-взривна схема, изпълнена в шахматна конфигурация. Вариант №1 за ПВР

Зареждането на сондажите се извършва механизирано с емулсионно взривно вещество.

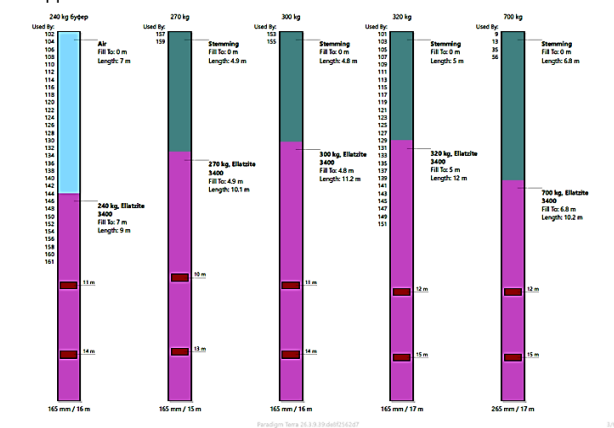
Таблица 4. Параметри на зареждане на сондажите – вид взривни вещества, конструкция и количествени характеристики на зарядите

Тип сондажи	Диаметър, mm	Проектен ъгъл, °	Дълбочина, m	Донорни заряди, бр.	Количество ВВ в 1 сондаж, kg	Конструкция на заряда	Дължина на заряда, m	Забивка, m
буферни	165	90	16	2	240	непрекъсната	9	-
производствени	165	90	17	2	320		12	5
	250	90	17	2	760		11	6

Таблица №4, характеризира енергийното осигуряване на взрива, което в комбинация със сондажната мрежа определя качеството на фрагментация на скалния масив.

Приложена е неразсредоточена конструкция на зарядите с цел осигуряване на по-голямо количество енергия за раздробяване на скалния масив. Забивката се изпълнява също механизирано, чрез използване на инертен

материал (обикновено трошена фракция), като буферните сондажи нямат забивка.

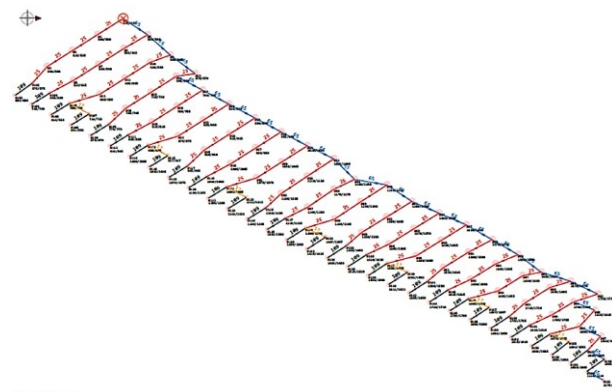


Фиг. 5. „Paradigm“ – Конструкция на зарядите от взривно вещество при приложението по диаметър и вид взривни сондажи

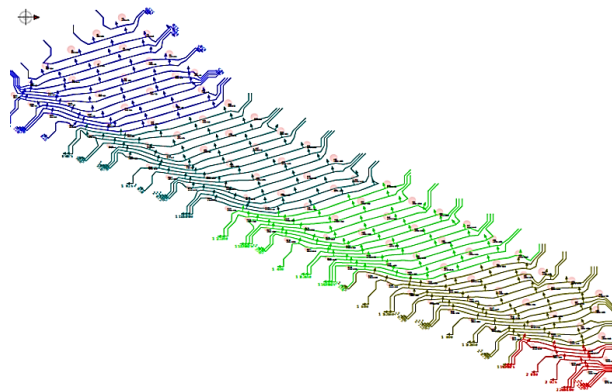
При взривните работи се прилага неелектрическа (NONEL) иницираща система с капсул-детонатори с основно закъснение - 475 ms.

За формиране на оптимална последователност на взривяване са приложени повърхностни релета със закъснения:

- 65 ms - между редовете
- 25 ms - между отделните сондажи в ред



Фиг. 6. „Paradigm“ – Схематично представяне на повърхностната взривна мрежа и времевата последователност на взривяване на отделните заряди от ВВ



Фиг. 7. „Paradigm“ – Схема на детонационната мрежа при пробивно-взривни работи във Вариант №1, показваща групиране на сондажите в зони и поетапно взривяване чрез милисекундни закъснения

В предбуферния ред са използвани допълнително релета със закъснение 17 ms с цел намаляване на вибрациите, контрол върху фронта на разрушение и подобряване на откъртането в челната зона.

Гранулометричният състав на взривената скална маса в хорнфелзувани шисти е оценен чрез анализ по модела „Kuz-Ram“, представен на фиг. 8. Получените резултати показват равномерна и контролирана фрагментация, характеризираща се със среден размер $X_{50} \approx 199$ mm и характерен размер $X_{80} \approx 369$ mm.

Analysis		
Oversize Definition	(mm)	750
Rock Factor (A50)		5.22
Rock Volume	(m ³)	71 245.40
Explosive Weight	(kg)	67 580.0
Powder Factor	(kg/m ³)	0.95
Powder Factor (Rec.)	(kg/m ³)	1.07
Optimum I.H. Timing	(ms/m)	2.42
Actual I.H. Timing	(ms/m)	3.45
10% Size	(mm)	50
50% Size	(mm)	199
80% Size	(mm)	369
Max Size	(mm)	799

Фиг. 8. „Paradigm“- Резултат от анализ на фрагментацията на скалния масив при Вариант №1 за ПВР

6. Вариант №2 за ПВР в масив представен от хорнфелзувани шисти

Приложените пробивно-взривни работи се изпълняват отново в шахматна сондажна мрежа с цел постигане на равномерно раздробяване и оптимално използване на енергията на взрива.

Таблица 5. Геометрични и технологични параметри на сондажите и сондажната мрежа, използвани при проектиране на пробивно-взривни работи във Вариант №2

Вид сондажи	Количество, бр.	Проектна дълбочина, m	Проектен ъгъл, °	Преудълбаване, m	Сондажна мрежа, m	
					a	b
Сондажи с d = 165 mm	35	17	90	2	5	4
Буферни сондажи (d = 165 mm)	36	16	90	1	5	-
Сондажи с d = 250 mm	95	17,3	90	2,3	6,8	5,9

Коригиране на разстоянието м/у сондажите от 1-ви ред:

$$a_k = \frac{Q_{\max}}{c.H.W}, m \quad (2)$$

където:

$Q_{\max}$ – максимално количество ВВ за един сондаж, kg

c – специфичен разход на ВВ, kg/m³

H – височина на стъпалото, m

W – линията на най-малко съпротивление в основата на стъпалото, m

$$a_k = \frac{780}{1.15.7.6} = 6,8 m$$

Разстояние м/у сондажните редове при шахматна сондажна мрежа:

$$b = 0,866.a, m \quad (3)$$

където a е разстояние между сондажите в реда, m.

$$b = 0,866.6,8 = 5,9 m$$

В този вариант преудълбаването на сондажите с d = 250 mm е коригирано предвид физико-механичните показатели на хорнфелзуваните шисти.

$$\ell_{np.} = p.W, m \quad (4)$$

където:

p – коефициент на преудълбаване на взривните сондажи

W – линията на най-малко съпротивление в основата на стъпалото, m

$$\ell_{np.} = 0,3.7,6 = 2,28 m \approx 2,3 m$$

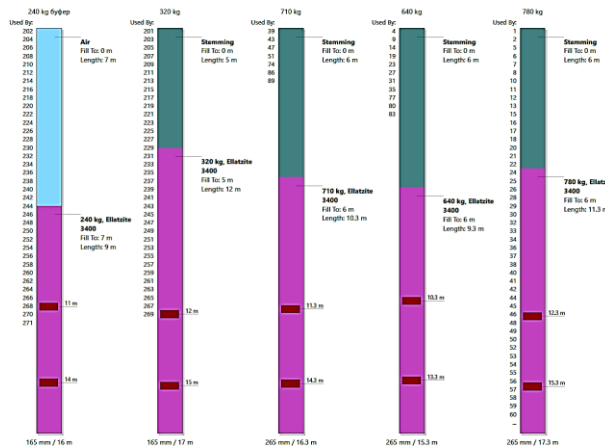


Фиг. 9. „Paradigm“- План при проектиране на сондажно-взривна схема, изпълнена в шахматна конфигурация. Вариант №2 за ПВР

Таблица 6. Параметри на зареждане на сондажите – вид взривни вещества, конструкция и количествени характеристики на зарядите

Тип сондажи	Диаметър, mm	Проектен ъгъл, °	Дълбочина, m	Донорни заряди, бр.	Количество ВВ в 1 сондаж, kg	Конструкция на заряда	Дължина на заряда, m	Забивка, m
буферни	165	90	16	2	240	непрекъсната	9	-
производствени	165	90	17	2	320		12	5
	250	90	17,3	2	780		11,3	6

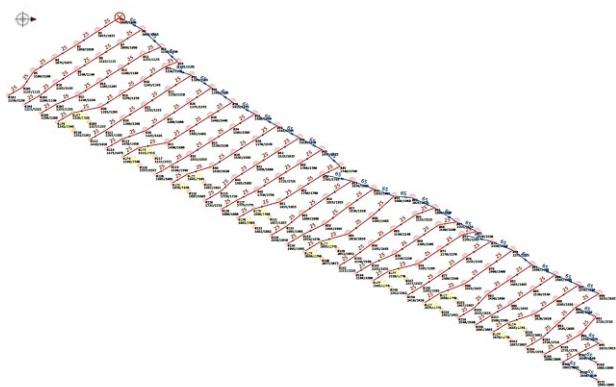
Както при Вариант №1 и тук при взривяването се използва неелектрическа (NONEL) иницираща система с капсул-детонатори с основно закъснение- 475 ms.



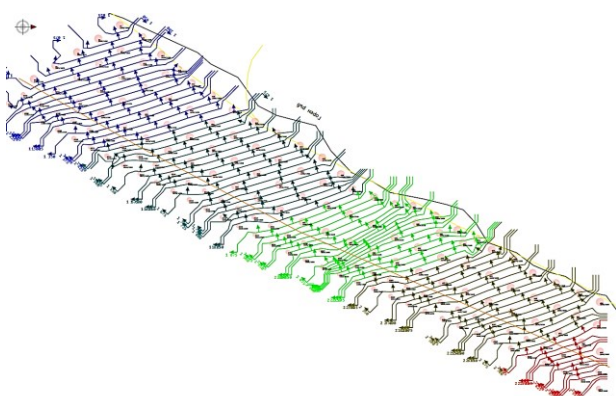
Фиг. 10. „Paradigm“- Конструкция на зарядите от взривно вещество при приложените по диаметър и вид взривни сондажи

За формиране на оптимална последователност на взривяване са приложени повърхностни релета със закъснения:

- 65 ms - между редовете,
- 25 ms - между отделните сондажи в реда.



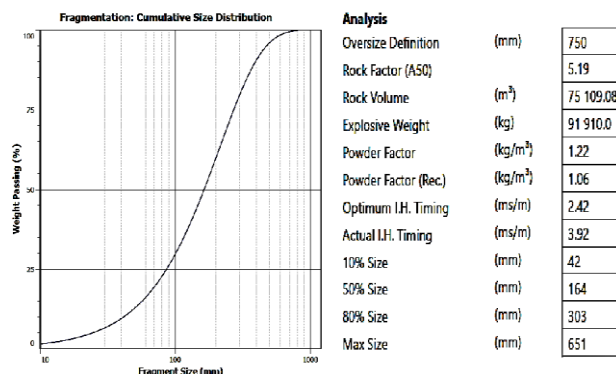
Фиг. 11. „Paradigm“- Схематично представяне на повърхностната взривна мрежа и времевата последователност на взривяване на отделните заряди от ВВ



Фиг. 12. “Paradigm“- Схема на детонационната мрежа при пробивно-взривни работи във Вариант №2, показваща групиране на сондажите в зони и поетапно взривяване чрез милисекундни закъснения

Анализът на гранулометричния състав, представен на фиг. 13., показва равномерно оформена S-образна крива, характерна за контролирано раздробяване. Основните параметри на гранулометричния състав са: $X_{10} \approx 42$ mm, $X_{50} \approx 164$ mm и $X_{80} \approx 303$ mm. Максималният размер на късовете достига около 651 mm.

Полученото раздробяване се характеризира с добра равномерност и сравнително ниско съдържание на прекомерно едри фракции. Общата оценка е, че взривните работи са проведени ефективно при условия на твърда скална маса, с постигане на стабилно и предвидимо гранулометрично разпределение.



Фиг. 13. „Paradigm“- Резултат от анализ на фрагментацията на скалния масив при Вариант №2 за ПБР

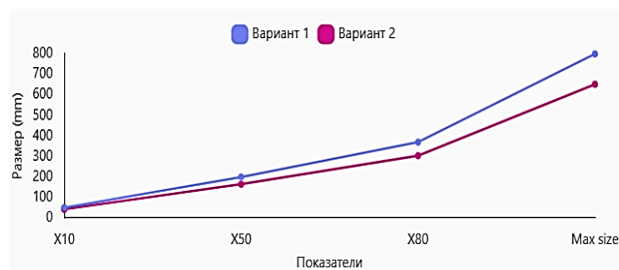
7. Сравнителен анализ на фрагментацията от Вариант №1 и Вариант №2 за ПБР в хорнфелзувани шисти

Сравнителният анализ на резултатите от моделирането на пробивно-взривните работи с „Paradigm“ е проведен с цел количествена оценка на влиянието на оптимизираните параметри върху гранулометричния състав на взривената скална маса.

Таблица 7. Сравнителна оценка на основните гранулометрични показатели, характеризиращи качеството на фрагментацията при двата анализирани варианта на пробивно-взривни работи

Показател	Вариант 1	Вариант 2
X10	≈ 50 mm	≈ 42 mm
X50	≈ 199 mm	≈ 164 mm
X80	≈ 369 mm	≈ 303 mm
Максимален размер	≈ 799 mm	≈ 651 mm
Oversize (>750 mm)	наличен	значително ограничен
Характер на кривата	S-образна	S-образна

Резултатите показват, че и при двата варианта е постигната устойчива S-образна крива на гранулометричното разпределение. Независимо от това, между двата варианта се наблюдават съществени количествени различия.



Фиг. 14. Сравнителна оценка на гранулометричните показатели при Вариант №1 и Вариант №2

Вариант №2 се характеризира със системно по-ниски стойности на всички основни гранулометрични показатели. Тези резултати свидетелстват за по-висока степен на раздробяване и по-добро усвояване на взривната енергия.

8. Икономически ефект

За оценка на икономическата ефективност на двата варианта е извършен сравнителен анализ на основните разходообразуващи елементи при пробивно-взривните работи

8.1. Сондажни работи

При Вариант №2 се прилага по-оптимизирана сондажна мрежа с редуцирани разстояния между сондажите ($a \approx 6.8$ m; $b \approx 5.9$ m), което води до увеличаване на броя сондажите на единица площ. При Вариант №2 увеличението на сондажните разходи е с 30%.

8.2. Взривни вещества

По-големият брой сондажи при Вариант №2 води до по-добро разпределение на енергията, но в резултат на това специфичният разход на ВВ се повишава с 38 %.

8.3. Вторични взривни работи

Това е ключовият икономически фактор. При Вариант №2 се реализира намаление на максималния размер с ~18%. В резултат на това ще има намаление на вторичното раздробяване с ≈ 10 –20%.

8.4. Товаро-транспортни разходи

По-добрата фрагментация води до по-добро запълване на кофите на товарачната техника, по-бързо товарене, по-малко престои на техниката в изчакване за товарене и повишена производителност с 5 до 15%.

Таблица 8. Сравнение на технологично-икономическите показатели при прилагане на двата варианта на ПВР

Показател	Мярка	Вариант №1	Вариант №2	Разлика, %
Взривен обем минна маса,	m ³	85297	85297	0
Сондажи 165 mm	брой	61	71	+16
Сондажи 250 mm	брой	67	95	+41
Сондажни работи	m	2129	2785,5	+30
ВВ (специфичен разход),	kg/m ³	0,796	1,101	+38
Инициращи средства	брой	129	167	+30
Вторично раздробяване	%	10-15	4-8	-53
Производителност на товарачно-транспортна техника	%	- 5 до -10	+8 до +15	+25

Намалението на разходите за вторично раздробяване (≈ 10 –20%) и повишената производителност на товаро-транспортните процеси (≈ 5 –15%) водят до съвкупно намаляване на оперативните разходи на тон добитата скална маса.

9. Заключение

Въпреки увеличението на преките разходи за сондажни работи и инициращи средства при Вариант №2, постигнатото значително подобрене на фрагментацията води до съществени икономии в последващите технологични процеси. Намаляването на вторичното раздробяване, оптимизираният разход на взривни вещества и повишената производителност на товаро-транспортната техника компенсират първоначалните разходи и водят до по-ниска себестойност на добитата скална маса.

Литература

- Камбурова, Г. (2007). *Взривни явления и експлозиви*. София.
- Митков, В. (2020). *Взривна техника и технология*. София.
- Паунов, Н., Барбулов, Б. (1989). *В помощ на взривника*. София
- Шишков, П. (2019). *Справочник на взривника*. София.
- Cunningham, C.V.B. (1983). *The Kuz-Ram Model for Prediction of Fragmentation from Blasting*.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1997). *Practical Estimates of Rock Mass Strength*.
- Stig O Olofsson. *Applied explosives technology for construction and mining*. Sweden.