

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЗАБОЙКИ ВЗРЫВНЫХ СКАЖИН С УЧЕТОМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Аннотация: В статье представлен сравнительный анализ методов расчета параметров забойки взрывных скважин с учётом физико-механических свойств горных пород. Рассмотрены традиционные и современные материалы забойки, такие как песок, гидрозабойка, пеногелевые смеси и скважинные запирающие устройства, а также их влияние на эффективность взрывных работ. Особое внимание уделено методам расчёта: эмпирическим, аналитическим и численным (МКЭ, DEM). Выявлены их преимущества, недостатки и условия применения. Показано, что комбинированные и численные методы обеспечивают наибольшую точность, но требуют значительных вычислительных ресурсов и квалификации персонала.

Ключевые слова: забойка скважин, расчёт параметров, физико-механические свойства горных пород, эффективность взрыва, пеногелевая забойка, скважинные запирающие устройства, численное моделирование, эмпирические методы, дробление пород.

Забойка скважин — это технологический процесс заполнения верхней части взрывной скважины или шпура инертным материалом, расположенным непосредственно над зарядом взрывчатого вещества (ВВ). Также забойкой называют сам инертный материал, применяемый для изоляции заряда взрывчатого вещества [1].

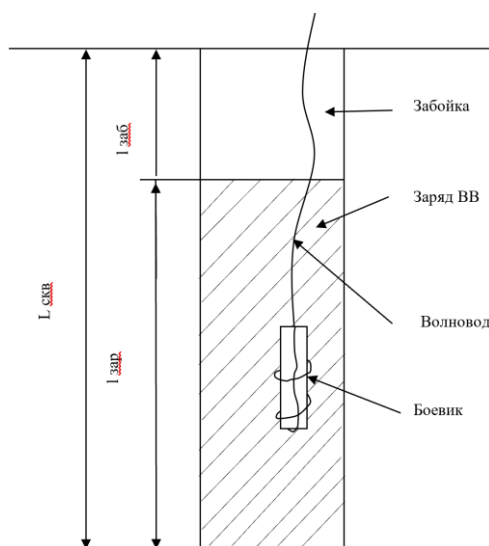


Рисунок 1 – Конструкция заряда скважины

К основным функциям и значениям забойки можно отнести:

- **"Запирание" продуктов детонации и повышение КПД взрыва.** Забойка изолирует заряд ВВ, предотвращая преждевременный выброс

газов. Это увеличивает давление в зарядной камере, обеспечивая полную детонацию ВВ и выделение максимальной энергии.

- **Увеличение продолжительности импульса взрыва.** Эксперименты Друкованого М.Ф. и других учёных показали рост длительности импульса на 35–40%, что улучшает дробление массива [6]. Это особенно важно для аммиачно-селитренных ВВ, требующих длительного воздействия для передачи энергии породе.
- **Снижение выброса пыли и токсичных газов.** Пеногелевые смеси (быстротвердеющие + нетвердеющие слои) снижают запылённость и нейтрализуют токсичные газы. Гидрозабойка с подкисленной водой (рН 4–5.5) уменьшает образование ядовитых газов [3].
- **Предотвращение разброса кусков породы.** При отсутствии забойки наблюдается интенсивное разрушение устья скважины и формирование негабаритных фракций. Подвесные забойки (патент RU2506533) обеспечивают длительное запираание газов до полного разрушения породы, сокращая разлёт кусков на 15–20% [2].

Для взрывных работ используют различные типы забоек — как сыпучие, так и жидкие. Их сравнительные характеристики, эффективность и среда применения зависят от материала забойки и условий взрывных работ.

Традиционные материалы (песок, буровая мелочь, щебень)

Песок применяют в шпурах, в том числе в смеси с мелким щебнем (30–40% по объёму). Забойка из песка удерживает продукты детонации, повышает КПД взрыва и снижает радиус разлёта осколков. Однако забойка из песка обеспечивает меньшее давление и длительность вылета взрывных продуктов по сравнению с забойкой из поглощающей смеси [8].

Буровая мелочь часто используют в качестве забойки на разрезах Кузбасса. Этот материал остаётся после проведения буровых работ и удерживается в скважине за счёт сил трения и веса самого материала. При использовании забойки из буровой мелочи напряжения во фронте ударной волны превышают напряжения при взрывании без забойки в 1,5 раза, а плотность потока энергии увеличивается более чем в 2,5 раза [9].

Щебень фракцией 20–40 мм применяют в качестве забойки, что положительно сказывается на увеличении времени удержания продуктов детонации во взрывной полости. Однако использование щебня увеличивает расходы на проведение взрывных работ за счёт применения готовой продукции в качестве забойки [1].

Гидрозабойка (вода, солевые растворы)

Обычно для гидрозабойки применяют воду. Это может быть:

Внутренняя гидрозабойка скважин — в скважину вводят полиэтиленовые ампулы, заполненные водой. При взрыве ампулы лопаются, вода орошает взорванную породу и частично уменьшает вредное действие газов и пылеобразование [3,10].

Внешняя гидрозабойка скважин — полиэтиленовый рукав диаметром около 1 м и более, который размещается по рядам скважин. Длина рукавов диктуется состоянием поверхности заряженного блока и контуром взрывааемых скважин. Наполнение рукава водой осуществляется с помощью поливочной машины, оборудованной гидронасосом [8].

Солевые растворы

В зимний период для гидрозабойки применяют водные растворы солей NaCl и CaCl₂. Это связано с тем, что применение гидрозабойки затруднено в период отрицательных температур [9].

Особенности:

- Оболочки ампул для воды изготавливают из полиэтиленового рукава диаметром на 1–3 мм меньше диаметра шпура.
- Используют специальные ампулы с обратным клапаном, длина — около 30 см.
- Иногда воду подают непосредственно в скважину, используя гидрозатворы или глиняные пробки.
- При взрыве заряда происходит связывание пылевых частиц жидкостью.

Пеногелевая забойка

Пеногелевая забойка — это низкоплотная многокомпонентная смесь (пенгель), которая используется при взрывных работах для снижения пылегазовых выбросов и повышения качества дробления горной породы. Такая забойка одновременно усиливает фугасное действие взрыва и подавляет пыль, инициируемую взрывом.

Состав данной забойки изготавливается из 1,5–3% водного раствора пеногелеобразующих веществ. Количество жидкости в забойке влияет на её пылеподавляющие свойства. В момент взрыва пеногелевая забойка выбрасывается в атмосферу вместе с продуктами взрыва в виде пузырьков и мелких капель, которые являются центрами коагуляции пыли. Иногда используют пеногелевую забойку переменного агрегатного состояния — смесь из быстротвердеющего и нетвердеющего пеногеля, заливаемую в незаряженную часть скважины слоями [3].

Скважинное запирающее устройство (СЗУ)

Скважинное запирающее устройство (СЗУ) — запатентованное изделие, предназначенное для увеличения эффективности буровзрывных работ (БВР) при добыче полезных ископаемых открытым способом. Цель — запирание продуктов детонации в зарядной полости до полного разрушения массива [2].

Конструкция СЗУ состоит из стержня и куполообразных элементов с прорезями. Некоторые особенности конструкции:

Стержень выполнен крестообразным в поперечном сечении, что позволяет использовать меньшее количество материала для изготовления стержня и снизить вес конструкции.

Куполообразные элементы могут быть выполнены в виде лепестков, в том числе симметричных относительно центральной оси. Лепестки разной длины, с расположением каждого длинного лепестка между короткими.

В конструкции предусмотрены каналы для средств инициации, чтобы исключить повреждение средств инициации при продвижении конструкции по скважине.

Канал сброса предназначен для выпуска первоначального давления (поршневого эффекта). В случае заряда скважины с избыточным давлением воды каналы сброса пропускают воду, но взрывчатое вещество остаётся в зарядной камере скважины.

Принцип работы СЗУ

После детонации заряда взрывчатого вещества в зарядной полости резко возрастает давление продуктов детонации. Динамический удар газов по нижней конической пробке приводит к дополнительному вдавливанию её в нижнее коническое расширение и окончательному заклиниванию цилиндра в скважине.

Таким положение запирающей забойки остаётся вплоть до прорыва продуктов детонации из зарядной полости в атмосферу через трещины в разрушенном массиве. Обеспечивая длительную замкнутость зарядной полости, запирающая забойка способствует более полному протеканию вторичных реакций в продуктах детонации и повышает энергию взрыва.

Ниже представлена детальная характеристика основных типов забоек по ключевым параметрам (таблица 1): состав, эффективность, применение, преимущества и ограничения. Данные основаны на научных исследованиях и практических рекомендациях

Таблица 1 – Сравнительная характеристика видов забойки

Вид забойки	Характеристика							
	Состав	Длина забойки	Энергоэффективность	Экология	Трудозатраты	Применение	Преимущества	Недостатки
Традиционные материалы (песок, буровая мелочь, щебень)	Щебень (5–20 мм), песок (35–40%), буровая мелочь, отсеvy ДСЗ	14–28 диаметров скважины (зависит от крепости породы)	Сокращает удельный расход ВВ на 10–15%	Снижение выбросов пыли на 20–25%	Высокие (Ручной труд, большое количество забойки)	Открытые/подземные работы в любых породах, включая трудновзрываемые	Низкая стоимость, доступность материалов	Риск повреждения детонаторов; требует ручного труда
Гидрозабойка (вода, солевые растворы)	Вода с pH 4–5.5, растворы NaCl/CaCl ₂ (для отрицательных температур)	6–12 диаметров скважины	Повышение дробления породы на 20–30%, КПД взрыва +25%	Снижение токсичных газов (NOx) на 25–30%, нейтрализация выбросов	Средние (требует насосного оборудования)	Угольные карьеры, регионы с морозами, обводнённые скважины	Защита от замерзания, улучшенная экология	Коррозия оборудования; низкая эффективность в трещиноватых породах
Пеногелевая забойка	Быстротвердеющий слой (жидкое стекло) + нетвердеющий слой (селитра)	8–15 диаметров скважины	Снижение расхода ВВ на 21%, увеличение дробления на 20–30%	Повышение дробления породы на 20–30%, КПД взрыва +25%	Низкие (механизированная заливка)	Метаноопасные шахты, экологически чувствительные зоны	Герметизация скважины, защита ВВ от влаги	Высокая стоимость; образование загрязнённых стоков
Скважинное запирающее устройство (СЗУ)	Полимерные/металлические конструкции с уплотнителями	Обычно 10–20 см	Уменьшение расхода ВВ на 15–20%	Снижение расхода ВВ на 21%, увеличение дробления на 20–30%	Низкие (быстрый монтаж)	Массовые взрывы на карьерах, обводнённые скважины	Универсальность, механизация процесса	Ограниченная совместимость с диаметрами скважин; высокая цена
Инновационные композиты (пористые смеси, полимеры)	Низкоплотные смеси переменного агрегатного состояния, полимерные "клин-фиксаторы"	5–10 диаметров скважины	Уменьшение расхода ВВ на 15–20%	Биоразлагаемость, снижение пыли на 50–70%	Минимальные (готовые модули)	Сложные геологические условия, зоны с жёсткими экологическими нормативами	Регулируемые свойства, долговечность	Ограниченная доступность; требуется спецоборудование

Методы расчёта забойки

Расчет оптимальных параметров забойки (длины, состава, плотности) является комплексной инженерной задачей, требующей учета динамики детонации, свойств пород и характеристик забойного материала. Существующие методы можно классифицировать следующим образом: эмпирические методы, численное моделирование, комбинированные методы.

В статье приведены основные методы расчёта забойки, которые широко применяются в горном деле и взрывных работах. Рассматриваются как классические подходы, основанные на эмпирических формулах и зависимости от параметров взрывчатых веществ, так и современные численные методы, включающие компьютерное моделирование [4,5,7].

Эмпирические методы

Данные методы основаны на статистических данных и полевых экспериментах. Основные формулы:

- **Зависимость от диаметра скважины (d):**

$$L_3 = k \cdot d$$

где L_3 – длина забойки (м), k – эмпирический коэффициент (зависит от свойств и типа ВВ), d – диаметр скважин (м).

- **Формула Мурина**

$$L_3 = \frac{P \cdot \sigma_{сж}}{\rho \cdot g}$$

где P – давление продуктов детонации (Па), $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы на сжатие (МПа), ρ – плотность материала забойки (кг/м^3), g – ускорение свободного падения (м/с^2).

- **Метод удельного импульса**

$$L_3 \geq \frac{t_d}{v_r}$$

где t_d – время детонационных газов (мс), v_r – скорость газов (м/с)

Эмпирические методы расчёта параметров забойки имеют серьёзные ограничения, поскольку не учитывают анизотропию и трещиноватость горного массива, что приводит к значительным погрешностям в расчётах — до 30% при изменении геологических условий [5].

Особенно критичным является то, что такие методы не адаптированы для работы с современными инновационными материалами, такими как полимеры и скважинные запирающие устройства (СЗУ). Это приводит к неэффективному использованию взрывчатых веществ, неравномерному дроблению горной массы и увеличению количества негабарита.

Аналитические методы

Методы расчёта параметров забойки, основанные на физико-механических свойствах пород и параметрах взрыва, учитывают комплекс важных характеристик горного массива.

- *Метод с учетом энергии взрыва*

$$L_3 = K \cdot \sqrt[3]{Q}$$

где K – коэффициент, зависящий от свойств породы (1,5–2,5); Q – масса заряда (кг).

- *Метод НИИ горной механики*

$$L_3 = 0,5 \cdot W \cdot \left(\frac{\rho_{\text{ВВ}}}{\rho_3}\right)^{0,5}$$

где W – линия сопротивления по подошве (м), $\rho_{\text{ВВ}}$ – плотность ВВ (г/см³), ρ_3 – плотность забойки (г/см³)

Преимущества методов расчёта:

Методы обеспечивают высокую точность расчётов за счёт учёта ключевых параметров (масса ВВ, плотность материалов, тип взрывчатки), что позволяет оптимизировать забойку и повысить эффективность взрыва.

Недостатки методов расчёта:

Их применение сложнее эмпирических подходов, так как требует точных исходных данных и дополнительной квалификации персонала, что не всегда реализуемо в полевых условиях.

Численные методы (компьютерное моделирование)

- *Метод конечных элементов (МКЭ, FEM)*

Применяется для моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород при взрыве.

Используемые программы:

1. ANSYS (Autodyn, Explicit Dynamics)
2. LS-DYNA
3. Abaqus

Процесс компьютерного моделирования параметров забойки начинается с создания детальной геометрической модели, включающей скважину, заряд взрывчатого вещества и окружающий горный массив. На следующем этапе задаются физико-механические характеристики всех компонентов системы.

Для горной породы определяются ключевые параметры: плотность материала, модуль Юнга, показатели прочности на сжатие и растяжение. Характеристики взрывчатого вещества включают скорость детонации и создаваемое давление. Свойства забойки описываются через плотность материала и гранулометрический состав частиц.

После построения модели задаются необходимые нагрузки и граничные условия. Основное внимание уделяется моделированию давления от детонации взрывчатого вещества и учёту естественной неоднородности горных пород.

Преимущества:

1. Высокая точность.
2. Возможность моделирования сложных геологических условий.

Недостатки:

1. Требуется значительных вычислительных ресурсов.
2. Сложность калибровки моделей.

- ***Метод дискретных элементов (DEM)***

Используется для моделирования забойки, состоящей из сыпучего материала

Используемые программы:

1. EDEM
2. PFC (Particle Flow Code)

При моделировании процесса забойки особое внимание уделяется представлению материала забойки как совокупности взаимодействующих частиц. Такой подход позволяет детально исследовать поведение забойки в скважине и её взаимодействие с окружающими структурами.

В процессе моделирования учитывается взаимодействие между частицами забойки и стенками скважины, что критически важно для понимания эффективности удержания продуктов детонации. Это взаимодействие влияет на распределение давления и способность забойки сопротивляться выбросу.

Практическое применение моделирования включает оптимизацию состава забойки, которая может состоять из песка, гравия или специальных смесей. Это позволяет подобрать наиболее эффективный состав для конкретных условий взрыва.

Преимущества:

1. Позволяет изучать микроуровневые процессы
2. Хорошо подходит для сыпучих материалов.

Недостатки:

1. Ограничен в моделировании волновых процессов.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика методов расчёта забойки

Метод	Формула/Подход	Точность	Учитываемые факторы	Преимущества	Недостатки
Эмпирические методы	Зависимость от диаметра скважины $L_3 = k \cdot d$	Низкая	Диаметр скважины, тип ВВ	Простота, быстрота расчетов	Не учитывает свойства пород, анизотропию, трещиноватость
	Формула Мурина $L_3 = \frac{P \cdot \sigma_{сж}}{\rho \cdot g}$	Средняя	Давление детонации, прочность пород, плотность забойки	Учет давления и прочности пород	Требует точных данных
	Метод удельного импульса $L_3 \geq \frac{t_D}{v_r}$	Низкая	Время детонации, скорость газов	Простота, быстрота расчетов	Не учитывает геологию массива
Аналитические методы	Метод энергии взрыва $L_3 = K \cdot \sqrt[3]{Q}$	Средняя	Масса заряда, свойства пород	Учет массы ВВ и свойств пород	Коэффициент K требует калибровки
	Метод НИИ горной механики $L_3 = 0,5 \cdot W \cdot \left(\frac{\rho_{ВВ}}{\rho_3}\right)^{0,5}$	Высокая	Линия сопротивления, плотность ВВ и забойки	Учет плотности материалов и геометрии заряда	Сложность расчета W и ρ_3
Численные методы	Метод конечных элементов (МКЭ, FEM): ANSYS, LS-DYNA, Abaqus	Очень высокая	Напряженно-деформированное состояние пород, динамика детонации, свойства материалов	Высокая точность, моделирование сложных условий	Требует значительных вычислительных ресурсов и экспертизы
	Метод дискретных элементов (DEM): EDEM, PFC	Высокая	Гранулометрический состав забойки, взаимодействие частиц	Подходит для сыпучих материалов, анализ микроуровневых процессов	Ограничен в моделировании волновых процессов
Комбинированные методы	Интеграция эмпирических, аналитических и численных подходов	Высокая	Все значимые факторы (геология, свойства ВВ, динамика взрыва)	Максимальная адаптивность и точность	Сложность реализации, требует больших ресурсов и данных

Список использованных источников

1. Забойка // Горная энциклопедия URL: <http://www.mining-enc.ru/z/zabojka>
2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ЗАБОЙКИ В СКВАЖИННОМ ЗАРЯДЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Умаров Ф.Я. [и др.]. 2024. 7(124). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17932>
3. Махмудов, Д. Р. Влияние конструкции забойки скважинных зарядов на эффективность дробления горных пород / Д. Р. Махмудов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 4. – С. 42-47. – EDN YJUCNV.
4. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением / Ю. И. Виноградов, С. В. Хохлов, Р. Р. Зигангиров [и др.] // Записки Горного института. – 2024. – Т. 266. – С. 231-245. – EDN RUUFNM.
5. Низкоплотная пористая забойка переменного агрегатного состояния / Г. С. Нутфуллоев, И. Б. Катанов, А. А. Ризаев, Р. Б. Хамидов // Universum: технические науки. – 2024. – № 12-4(129). – С. 22-29. – EDN OFOHDM.
6. Мурин, К. М. Забойка как фактор повышения эффективности и безопасности ведения взрывных работ / К. М. Мурин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 4. – С. 390-395. – EDN ONBMZJ.
7. Анализ влияния длины забойки в скважинном заряде взрывчатых веществ на процесс разрушения горных пород / Ф. Я. Умаров, У. Ф. Насиров, З. К. Ишанходжаев [и др.] // Universum: технические науки. – 2024. – № 7-2(124). – С. 62-67. – DOI 10.32743/UniTech.2024.124.7.17932. – EDN FTZFLH.
8. Лещинский А. В. Забойка взрывных скважин на карьерах / А. В. Лещинский, Е. Б. Шевкун. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. унта, 2008. – 224 с.
9. Заиров Ш.Ш., Тухташев А.Б., Норматова М.Ж., Рустамов О.И. Исследование влияния забойки скважинного заряда на эффективность разрушения и пылеподавления // Материалы Республиканской научно-технической конференции на тему: «Горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и перспективы инновационного развития». – Навои, 15-16 ноября 2016 г. – С. 41-42.
10. Левчик С.П. Масаев Ю.А. Влияние водяной забойки на разрушение горных пород взрывом // Взрывное дело. – М.: Недра, 1973. – №72(29). – С. 124–130.

ФБГОУ ВО «Владивостокский государственный университет»
(Владивосток, Россия), ул. Гоголя, 41, г. Владивосток, Приморский край,
Россия, 690014

Васянович В. Ю. Аспирант кафедры горного дела ВВГУ.
эл.почта: vitvas2006@mail.ru тел. +7 9147911264

Педан Н. Р. Аспирант. Специалист кафедры горного дела ВВГУ.
Эл.почта: MyName@NikPedan.ru тел. +79244352989

Васянович Ю. А. Профессор ДВФУ. Д-р техн. наук, Зав. кафедры
горного дела ВВГУ.
эл.почта: Vasyanovich_2011@mail.ru тел. +79020775988

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF BLASTING WELLS, TAKING INTO ACCOUNT THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF ROCKS

Abstract: The article presents a comparative analysis of methods for calculating the parameters of blasting wells, taking into account the physical and mechanical properties of rocks. Traditional and modern downhole materials such as sand, a water hammer, foam-gel mixtures and borehole locking devices, as well as their influence on the efficiency of blasting operations, are considered. Special attention is paid to the calculation methods: empirical, analytical and numerical (FEM, DEM). Their advantages, disadvantages and conditions of use are revealed. It is shown that combined and numerical methods provide the highest accuracy, but require significant computing resources and qualified personnel.

Аннотация: В статье представлен сравнительный анализ методов расчета параметров забойки взрывных скважин с учётом физико-механических свойств горных пород. Рассмотрены традиционные и современные материалы забойки, такие как песок, гидрозабойка, пеногелевые смеси и скважинные запирающие устройства, а также их влияние на эффективность взрывных работ. Особое внимание уделено методам расчёта: эмпирическим, аналитическим и численным (МКЭ, DEM). Выявлены их преимущества, недостатки и условия применения. Показано, что комбинированные и численные методы обеспечивают наибольшую точность, но требуют значительных вычислительных ресурсов и квалификации персонала.

Keywords: downhole drilling, calculation of parameters, physico-mechanical properties of rocks, explosion efficiency, foam-gel downhole, downhole locking devices, numerical modeling, empirical methods, rock crushing.

Downhole drilling is the technological process of filling the upper part of an explosive well or borehole with an inert material located directly above the explosive charge. An inert material used to isolate an explosive charge is also called a face [1].

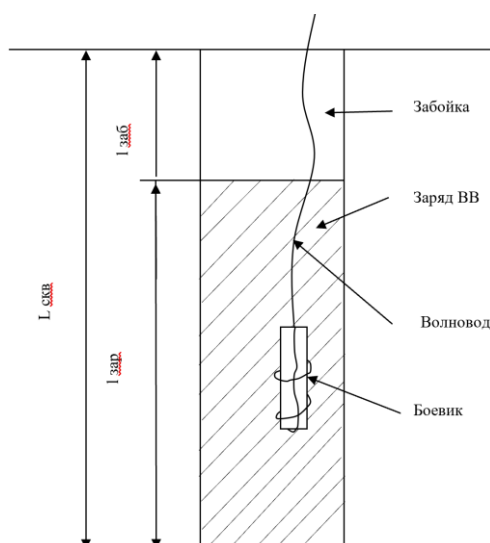


Figure 1 – Well charge design

The main functions and values of the face can include:

- "Locking" the detonation products and increasing the efficiency of the explosion. The plug isolates the explosive charge, preventing premature release of gases. This increases the pressure in the charging chamber, ensuring full detonation of explosives and the release of maximum energy.

- Increase the duration of the explosion pulse. Experiments by Drukovany M.F. and other scientists have shown an increase in pulse duration by 35-40%, which improves the fragmentation of the array [6]. This is especially important for ammonium nitrate explosives, which require long-term exposure to transfer energy to the rock.

- Reducing the emission of dust and toxic gases. Foam-gel mixtures (fast-setting + non-hardening layers) reduce dustiness and neutralize toxic gases. A hydrofoil with acidified water (pH 4-5.5) reduces the formation of toxic gases [3].

- Preventing the scattering of rock pieces. In the absence of a downhole, intensive destruction of the wellhead and the formation of oversized fractions are observed. Suspended slaughterhouses (patent RU2506533) provide long-term locking of gases until the rock is completely destroyed, reducing the spread of pieces by 15-20% [2].

Traditional materials (sand, drilling fines, crushed stone)

Sand is used in bores, including in a mixture with fine crushed stone (30-40% by volume). The sand face retains detonation products, increases the efficiency of the explosion and reduces the radius of fragmentation. However, the sand face provides less pressure and the duration of the departure of explosive products compared to the face from the absorbing mixture [8].

Drilling fines are often used as downholes in the Kuzbass mines. This material remains after drilling operations and is retained in the well due to friction forces and the weight of the material itself. When using a drill bit face, the stresses in the shock wave front exceed the stresses when exploding without a face by 1.5 times, and the energy flux density increases by more than 2.5 times [9].

Crushed stone with a fraction of 20-40 mm is used as a face, which has a positive effect on increasing the retention time of detonation products in the explosive cavity. However, the use of crushed stone increases the cost of blasting due to the use of finished products as a face [1].

Water extraction (water, salt solutions)

Usually, water is used for hydraulic fracturing. It can be:

Internal hydraulic drilling of wells — polyethylene ampoules filled with water are inserted into the well. During an explosion, ampoules burst, water irrigates the blasted rock and partially reduces the harmful effects of gases and dust formation [3].

The external hydraulic seal of wells is a polyethylene sleeve with a diameter of about 1 m or more, which is placed along the rows of wells. The length of the hoses is dictated by the condition of the surface of the charged block and the contour

of the wells being blown up. The sleeve is filled with water using a watering machine equipped with a hydraulic pump [8].

Salt solutions

In winter, aqueous solutions of NaCl and CaCl₂ salts are used for water treatment. This is due to the fact that the use of hydraulic breakers is difficult during periods of negative temperatures [9].

Features:

- The shells of ampoules for water are made of a polyethylene sleeve with a diameter 1-3 mm smaller than the diameter of the spur.
- Use special ampoules with a non—return valve, the length is about 30 cm.
- Sometimes water is supplied directly to the well using hydraulic seals or clay stoppers.
- When the charge explodes, dust particles bind to the liquid.

Foam gel face

A foam core is a low—density multicomponent mixture (foam gel) that is used in blasting operations to reduce dust and gas emissions and improve the quality of rock crushing. Such a blowout simultaneously enhances the explosive effect of the explosion and suppresses the dust initiated by the explosion.

The composition of this face is made from a 1.5–3% aqueous solution of foam-forming substances. The amount of liquid in the face affects its dust-suppressing properties. At the moment of the explosion, the foam gel face is released into the atmosphere along with the explosion products in the form of bubbles and small droplets, which are the centers of dust coagulation. Sometimes a foam gel face of variable aggregate state is used — a mixture of fast-hardening and non-hardening foam gel, poured into the uncharged part of the well in layers [3].

Borehole locking device (SCU)

The borehole locking device is a patented product designed to increase the efficiency of drilling and blasting operations in open—pit mining. The goal is to lock the detonation products in the charging cavity until the array is completely destroyed [2].

The design of the SZU consists of a rod and dome-shaped elements with slots. Some design features:

The rod is cross-shaped in cross-section, which allows using less material for the manufacture of the rod and reducing the weight of the structure.

Domed elements can be made in the form of petals, including symmetrical ones relative to the central axis. The petals are of different lengths, with each long petal positioned between the short ones.

Channels for the initiation means are provided in the structure to avoid damage to the initiation means during the movement of the structure through the well.

The discharge channel is designed to release the initial pressure (piston effect). If a well is charged with excessive water pressure, the discharge channels allow water to pass through, but the explosive remains in the charging chamber of the well.

The principle of operation of the (SCU)

After detonation of the explosive charge, the pressure of the detonation products increases sharply in the charging cavity. The dynamic impact of gases on the lower conical plug leads to its additional pressing into the lower conical expansion and the final jamming of the cylinder in the well.

This remains the position of the locking face until detonation products break through from the charging cavity into the atmosphere through cracks in the destroyed array. By ensuring a long-term closure of the charging cavity, the locking plug contributes to a more complete course of secondary reactions in detonation products and increases the energy of the explosion.

Below is a detailed description of the main types of slaughterhouses by key parameters (Table 1): composition, effectiveness, application, advantages and limitations. The data is based on scientific research and practical recommendations.

Table 1 – Comparative characteristics of the types of slaughter

Вид забойки	Characteristic							
	Composition	The length of the borehole	Energy efficiency	Ecology	Labor costs	Application	Advantages	Disadvantages
Traditional materials (sand, drilling fines, crushed stone)	Crushed stone (5-20 mm), sand (35-40%), drilling fines, sifting	14-28 borehole diameters (depends on rock strength)	Reduces the specific consumption of explosives by 10-15%	Reduction of dust emissions by 20-25%	High (Manual labor, large amount of slaughtering)	Open/underground work in any rock, including hard-to-explode	Low cost, availability of materials	Risk of damage to detonators; requires manual labor
Water extraction (water, salt solutions)	Water with pH 4-5.5, NaCl/CaCl ₂ solutions (for negative temperatures)	6-12 borehole diameters	Increased rock crushing by 20-30%, explosion efficiency +25%	Reduction of toxic gases (NO _x) by 25-30%, neutralization of emissions	Medium (requires pumping equipment)	Coal pits, regions with frosts, flooded wells	Frost protection, improved ecology	Corrosion of equipment; low efficiency in fractured rocks
Foam gel face	Fast-hardening layer (liquid glass) + non-hardening layer (saltpeter)	8-15 borehole diameters	Reducing explosive consumption by 21%, increasing crushing by 20-30%	Increased rock crushing by 20-30%, explosion efficiency +25%	Low (mechanized filling)	Methane-hazardous mines, environmentally sensitive areas	Sealing of the borehole, protection of explosives from moisture	High cost; formation of polluted effluents
Borehole locking device (SCU)	Polymer/metal structures with seals	Usually 10-20 cm	Reduction of explosive consumption by 15-20%	Reducing explosive consumption by 21%, increasing crushing by 20-30%	Low (fast installation)	Massive explosions in quarries, flooded wells	Versatility, mechanization of the process	Limited compatibility with borehole diameters; high price
Innovative composites (porous mixtures, polymers)	Low-density mixtures of variable aggregate state, polymer "wedge-fixators"	5-10 borehole diameters	Reduction of explosive consumption by 15-20%	Biodegradability, 50-70% reduction in dust%	Minimal (ready-made modules)	Difficult geological conditions, areas with strict environmental regulations	Adjustable properties, durability	Limited availability; special equipment required

Methods for calculating the face

Calculating optimal downhole parameters (length, composition, density) is a complex engineering task requiring consideration of detonation dynamics, rock properties, and downhole material characteristics. The existing methods can be classified as follows: empirical methods, numerical modeling, combined methods.

The article presents the main methods of downhole calculation, which are widely used in mining and blasting. Both classical approaches based on empirical formulas and dependence on the parameters of explosives, as well as modern numerical methods, including computer modeling, are considered [4,5,7].

Empirical methods

These methods are based on statistical data and field experiments. Basic formulas:

- *Dependence on the diameter of the well (d)*

$$L_3 = k \cdot d$$

where L_3 – the length of the borehole (m), k – the empirical coefficient (depends on the properties and type of explosives), d – the diameter of the wells (m).

- *Murin Formula*

$$L_3 = \frac{P \cdot \sigma_{\text{сж}}}{\rho \cdot g}$$

where P – the pressure of the detonation products (Pa), $\sigma_{\text{сж}}$ – the compressive strength of the rock (MPa), ρ – the density of the face material (kg/m^3), g – acceleration of gravity (m/s^2).

- *Specific impulse method*

$$L_3 \geq \frac{t_{\text{д}}}{v_{\text{r}}}$$

where $t_{\text{д}}$ – the time of detonation gases (ms), v_{r} – the velocity of gases (m/s)

Empirical methods for calculating downhole parameters have serious limitations, since they do not take into account the anisotropy and fracturing of the rock mass, which leads to significant errors in calculations — up to 30% when geological conditions change [5].

It is particularly critical that such methods are not adapted to work with modern innovative materials such as polymers and borehole locking devices. This leads to inefficient use of explosives, uneven crushing of the rock mass and an increase in the amount of oversized material.

Analytical methods

Methods for calculating the parameters of the face, based on the physical and mechanical properties of rocks and explosion parameters, take into account a complex of important characteristics of the mountain range.

- ***The method based on the energy of the explosion***

$$L_3 = K \cdot \sqrt[3]{Q}$$

where K – coefficient depending on the properties of the roc (1,5–2,5); Q – the mass of the charge (kg).

- ***The method of the Research Institute of Mining Mechanics***

$$L_3 = 0,5 \cdot W \cdot \left(\frac{\rho_{\text{BB}}}{\rho_3}\right)^{0,5}$$

where W – the line of resistance along the sole (m), ρ_{BB} - the density of explosives (g/ cm³), ρ_3 – the density of the face (g/ cm³)

Advantages of calculation methods:

The methods provide high accuracy of calculations by taking into account key parameters (explosive mass, material density, type of explosive), which allows to optimize the face and increase the efficiency of the explosion.

Disadvantages of calculation methods:

Their application is more complicated than empirical approaches, as it requires accurate initial data and additional personnel qualifications, which is not always feasible in the field.

Numerical methods (computer modeling)

- ***Finite Element Method (FEM)***

It is used to simulate the stress-strain state of a rock mass during an explosion.

Programs used:

1. ANSYS (Autodyn, Explicit Dynamics)
2. LS-DYNA
3. Abaqus

The process of computer simulation of the downhole parameters begins with the creation of a detailed geometric model, including the well, the explosive charge and the surrounding mountain range. At the next stage, the physical and mechanical characteristics of all system components are set.

Key parameters are determined for the rock: material density, Young's modulus, compressive and tensile strength. The characteristics of an explosive include the detonation rate and the pressure generated. The properties of the face are described through the density of the material and the particle size distribution.

After building the model, the necessary loads and boundary conditions are set. The main focus is on modeling the pressure from detonation of explosives and taking into account the natural heterogeneity of rocks.

Advantages:

1. High precision.
2. The ability to simulate complex geological conditions.

Disadvantages:

1. Requires significant computing resources.
2. The difficulty of calibrating models.

- ***The Discrete Element Method (DEM)***

It is used to simulate a face consisting of bulk material.

Programs used:

1. EDEM
2. PFC (Particle Flow Code)

When modeling the slaughtering process, special attention is paid to the representation of the slaughtering material as a set of interacting particles. This approach makes it possible to study in detail the behavior of the downhole and its interaction with surrounding structures.

The modeling process takes into account the interaction between the downhole particles and the borehole walls, which is crucial for understanding the effectiveness of detonation product retention. This interaction affects the pressure distribution and the ability of the face to resist ejection.

The practical application of modeling includes optimizing the composition of the face, which may consist of sand, gravel, or special mixtures. This allows you to select the most effective composition for specific explosion conditions.

Advantages:

1. Allows you to study micro-level processes
2. It is well suited for bulk materials.

Disadvantages:

1. Limited in modeling wave processes.

Table 2 – Comparative characteristics of scoring calculation methods

Method	Formula/Approach	Accuracy	Factors considered	Advantages	Disadvantages
Empirical methods	Dependence on the diameter of the spring $L_3 = k \cdot d$	Low	Borehole diameter, type BB	Simplicity and speed of calculations	It does not take into account rock properties, anisotropy, and fracturing
	The Murin Formula $L_3 = \frac{P \cdot \sigma_{CK}}{\rho \cdot g}$	Average	Detonation pressure, rock strength, slaughtering density	Consideration of rock pressure and strength	Requires accurate data
	Specific impulse method $L_3 \geq \frac{t_D}{v_r}$	Low	Detonation time, gas velocity	Simplicity and speed of calculations	Ignores the geology of the massif
Analytical methods	The explosion energy method $L_3 = K \cdot \sqrt[3]{Q}$	Average	Charge mass, rock properties	Accounting for explosive mass and rock properties	The K coefficient requires calibration
	The method of the Research Institute of Mining Mechanics $L_3 = 0,5 \cdot W \cdot \left(\frac{\rho_{BB}}{\rho_3}\right)^{0,5}$	High	Resistance line, explosive density, and backholes	Consideration of material density and charge geometry	The complexity of calculating W and ρ_3
Numerical methods	Finite Element method (FEM): ANSYS, LS-DYNA, Abaqus	Very high	Stress-strain state of rocks, detonation dynamics, material properties	High precision, simulation of difficult conditions	It requires significant computing resources and expertise
	Discrete Element Method (DEM): EDEM, PFC	High	Granulometric composition of the face, particle interaction	Suitable for bulk materials, micro-level process analysis	Limited in modeling wave processes
Combined methods	Integration of empirical, analytical and numerical approaches	High	All significant factors (geology, explosive properties, explosion dynamics)	Maximum adaptability and accuracy	The complexity of the implementation requires a lot of resources and data

Список использованных источников

1. Zabojka // Gornaya ehnciklopediya URL: <http://www.mining-enc.ru/z/zabojka>
2. ANALIZ VLIYANIYA DLINY ZABOJKI V SKVAZHINNOM ZARYADE VZRYVCHATYKH VESHCHESTV NA PROCESS RAZRUSHENIYA GORNYKH POROD (ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE LENGTH OF THE HOLE IN THE BOREHOLE CHARGE OF EXPLOSIVES ON THE PROCESS OF ROCK DESTRUCTION) // Universum: tekhnicheskie nauki : ehlektron. nauchn. zhurn. Umarov F.YA. [i dr.]. 2024. 7(124). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17932>
3. Mahmudov, D. R. Vliyanie konstrukcii zabojki skvazhinnykh zaryadov na ehffektivnost' drobleniya gornyx porod (The influence of the design of downhole charges on the efficiency of crushing rocks) / D. R. Makhmudov // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2017. – № 4. – S. 42-47. – EDN YJUCNV.
4. Optimizaciya udel'nykh ehnergozatrata na droblenie gornyx porod vzryvom na mestorozhdeniyakh so slozhnym geologicheskim stroeniem (Optimization of specific energy consumption for crushing rocks by explosion in deposits with complex geological structures) / YU. I. Vinogradov, S. V. Khokhlov, R. R. Zigangirov [i dr.] // Zapiski Gornogo instituta. – 2024. – T. 266. – S. 231-245. – EDN RUUFNM.
5. Nizkoplotnaya poristaya zabojka peremennogo agregatnogo sostoyaniya (Low-density porous face of variable aggregate state) / G. S. Nutfulloev, I. B. Katanov, A. A. Rizaev, R. B. Khamidov // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 12-4(129). – S. 22-29. – EDN OFOHDM.
6. Murin, K. M. Zabojka kak faktor povysheniya ehffektivnosti i bezopasnosti vedeniya vzryvnykh rabot (Mining as a factor in improving the efficiency and safety of blasting operations) / K. M. Murin // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2011. – № 4. – S. 390-395. – EDN ONBMZJ.
7. Analiz vliyaniya dliny zabojki v skvazhinnom zaryade vzryvchatykh veshchestv na process razrusheniya gornyx porod (Analysis of the influence of the length of the hole in the borehole charge of explosives on the process of rock destruction) / F. YA. Umarov, U. F. Nasirov, Z. K. Ishankhodzhaev [i dr.] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 7-2(124). – S. 62-67. – DOI 10.32743/UniTech.2024.124.7.17932. – EDN FTZFLH.
8. Leshchinskij A. V. Zabojka vzryvnykh skvazhin na kar'erakh (Downhole blasting in quarries) / A. V. Leshchinskij, E. B. Shevkun. – Khabarovsk : Izd-vo Tikhookean. gos. unta, 2008. – 224 s.
9. Zairov SH.SH., Tukhtashev A.B., Normatova M.ZH., Rustamov O.I. Issledovanie vliyaniya zabojki skvazhinного zaryada na ehffektivnost' razrusheniya i pylepodavleniya (Investigation of the impact of downhole charge on the efficiency of destruction and dust suppression) // Materialy Respublikanskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii na temu: «Gorno-metallurgicheskij kompleks: dostizheniya, problemy i perspektivy innovacionnogo razvitiYA». – Navoi, 15-16 noyabrya 2016 g. – S. 41-42.
10. Levchik S.P. Masaev YU.A. Vliyanie vodyanoj zabojki na razrushenie gornyx porod vzryvom (The effect of water slaughter on the destruction of rocks by explosion) // Vzryvnoe delo. – M.: Nedra, 1973. – №72(29). – S. 124–130.