НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.235.527 EDN: UGUFZF

Тохтамыш М. А.
Донецкий национальный технический университет
E-mail: tokhtamysh19@yandex.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА КАРЬЕРАХ КОМСОМОЛЬСКОГО РУДОУПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ

Работа посвящена сравнению методик расчета параметров БВР, направленных на определение ожидаемого выхода фракций и энергетической работы взрыва. Проведено сравнение методик различных авторов, показавшее неоднородность получаемых результатов. Предложено направление совершенствования и синтеза расчетных методик для внедрения на производстве.

Ключевые слова: *буровзрывные работы, расчет параметров буровзрывных работ, удельный расход, гранулометрический состав, работа взрыва.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Флюсовые известняки, являющиеся скальными породами, подготавливаются к выемке методом взрывной отбойки. Этот процесс во многом определяет итоговый выход товарной продукции. Дробление пород в различных зонах действия взрыва определяет гранулометрический состав взорванной породы в развале горной массы. По данным Комсомольского РУ (КРУ), после дробления на дробильно-обогатительной фабрике (ДОФ) только 70–85 % горной массы составляют готовую продукцию, отправляемую потребителю, а 15–30 % составляют потери полезного ископаемого. Как известно, область применения флюсовых известняков весьма широка и включает в себя металлургию (доменные печи и агломерационные фабрики), строительную и дорожную отрасли, сахарное производство и др. Каждая из них имеет свои требования к гранулометрическому и химическому составу поступающих известняков. В частности, аглофабрики могут использовать так называемую мелочь — щебень фракций 3–25 мм, ввиду измельчения в ходе технологического процесса производства агломерата. Прочие отрасли нуждаются в более крупных фракциях (20–60 мм, 40–80 мм, 60–120 мм). Возможность их производства определяется наличием соответствующего оборудования на ДОФ. Для поступающей на ДОФ горной массы определяющим является результат взрывного дробления массива. Экономические условия не всегда позволяют обеспечить равномерный спрос на мелкие и крупные фракции, в результате чего склады готовой продукции горнодобывающего предприятия оказываются заполнены «отсевом» (фракции 0–5 мм, 3–10 мм, 3–25 мм). В то же время эти фракции составляют существенное количество произведенного известняка, оставляя лишь порядка 55 % на долю крупных фракций. Учитывая, что выход мелких фракций происходит на стадии взрывоподготовки, это влечет за собой необходимость поиска направления, в котором может быть произведена корректировка паспортов буровзрывных работ (БВР) с целью уменьшения выхода мелких и повышения выхода средних и крупных фракций во взорванной горной массе (ВГМ).

Постановка задачи. Наибольшее влияние на все последующие технологические процессы на карьерах оказывает процесс БВР. Он определяет выход различных фракций горной породы. Для повышения выхода товарной продукции, что напрямую влияет на экономические показатели работы предприятия, необходимо тщательно подойти к процессу проектирования взрыва

с целью снижения выхода мелких фракций и переизмельчения. В связи с этим ***целью*** настоящей работы явилось сравнение известных расчетных методик параметров БВР, обеспечивающих получение требуемого гранулометрического состава взорванной горной массы.

Объект исследования — процесс буровзрывных работ на карьере по добыче флюсовых известняков.

Предмет исследования — прогнозирование результатов взрывных работ на основе теоретических расчетов.

Задачи исследования:

– оценка известных расчетных методик на их применимость в условиях карьеров по добыче флюсовых известняков;

– расчет параметров БВР по известным методикам эталонного блока, взятого на основе горно-геологических условий предприятия;

– выявление способов совершенствования методики расчета параметров БВР для условий конкретного предприятия.

Методика исследования. Исследование проведено методом автоматизированного расчета формул с применением таблиц MS Excel. Исходные параметры выбраны на основе практики производства и обзора научных работ по тематике исследований.

Изложение материала. Специалистами в области взрывных работ разработано множество методик расчета параметров взрыва, которые в основе имеют различные подходы к определению ключевых параметров БВР. По основным учитываемым признакам возможно выделить две группы методик: энергетические и объемные. В основе энергетических методик лежит принцип оптимального энергонасыщения взрываемого массива энергией взрыва. Объемные методы расчета основываются на соответствии работоспособности взрыва и объема дробимого массива. Практически все методики в конечном результате определяют величину удельного расхода ВВ и параметры сетки скважин. В некоторых расчетных моделях пытаются прогнозировать гранулометрический состав отбитой породы, что является весьма актуальным для флюсовых карьеров.

В современных условиях автоматизации расчетов не составляет труда рассчитать параметры БВР по какой-либо из методик. Основным фактором становится набор исходных данных, доступных и возможных к получению в конкретных условиях. Предприятия не обладают возможностью оценки конкретных физических параметров породы на определенном горизонте карьера, для которого в тот или иной момент времени необходимо составить паспорт БВР. Схожие ограничения имеются и по расчету конкретного ВВ. Широко распространено использование простейших ВВ [1], изготовляемых на месте в смесительно-зарядных машинах. Для них доступен некоторый набор параметров, получаемый в ходе их сертификации. Поэтому в основном используются методы, не учитывающие какие-либо сложные для исследования геомеханические и физические параметры. Кроме того, на качество проводимых взрывных работ влияют параметры, не учитываемые напрямую при проектировании БВР (табл. 1).

При обосновании мероприятий по оптимизации параметров БВР на карьерах имеет смысл сравнить некоторые из существующих методик для определения наиболее полезных и применимых в реальных условиях производства для расчета параметров взрывного блока.

Для производимого теоретического расчета примем в качестве ВВ Аммонит 6ЖВ, Граммонит 79/21 (гранулированный аналог Аммонита 6ЖВ с отличием по плотности ВВ [2]), Игданит. Параметры расчетного взрывного блока: уступ высотой $H_у = 10$ м, сложенный одним типом известняков (крепость по шкале М. М. Протодьяконова $f = 8–10$, категория III–IIIа, объемный вес $\rho = 2{,}5$ т/м^3, коэффициент разрыхления $k_р = 1{,}5$). Третий класс пород по взрываемости по шкале Ржевского В. В. Диаметр скважин $d_{скв} = 0{,}25$ м, предельный размер куска по приемной способности воронки дробильно-обогатительной фабрики $d_м = 1{,}0$ м.

Сетка скважин типовая, применяемая для данных параметров на карьерах КРУ: расстояние между скважинами и рядами скважин a×b = 7×7 м, линия сопротивления по подошве (ЛСПП) W = 7 м. Дополнительно рассчитаем параметры линии наименьшего сопротивления (ЛНС) и сетки скважин по формулам, приведенным в рассматриваемых методиках [3]. Конструкция скважин (на основе практики): глубина $L_{скв} = 11{,}5$ м, длина заряда $l_{зар} = 7$ м; длина забойки $l_{заб} = 4{,}5$ м, величина перебура $l_{пер} = 1{,}5$ м. Недостающие данные примем по аналогии из работ [4–6]. Прочность $\sigma_{сж}$ для известной плотности определим согласно аппроксимирующей зависимости из работы [5], $\sigma_{сж} = 82$ МПа. Примем объем взрывного блока $V = 8900$ м^3.

Для сравнения рассчитаем параметры БВР на основании энергетической методики И. И. Клочко, а также по применяемой на карьерах Комсомольского РУ объемной методике для расчета паспортов БВР (далее — методика Комсомольского РУ) в силу наличия известных типовых параметров, в частности, среднего значения удельного расхода $q = 0{,}6$ кг/м^3, (в соответствии с объемной гипотезой С. Вобана). Кроме того, проверим удельный расход и произведем выбор ВВ на основе формул из работы [7].

Проведем расчет параметров БВР по рассматриваемым методикам, по возможности вне взаимосвязи их между собой, затем последовательно рассчитаем параметры комплекса БВР (удельный расход ВВ, ЛНС, параметры зон дробления и средневзвешенного размера куска ВГМ на основе выбранных ВВ и горно-геологических условий). Результаты расчета по методике Комсомольского РУ приведены в таблице 2.

В первую очередь производится расчет параметров линии наименьшего сопротивления (ЛНС) и удельного расхода ВВ (q), на них влияют требуемые размеры куска породы в развале. Результаты расчета данных параметров по формулам различных авторов приведены в таблице 3.

Несмотря на то, что идея расчета заданного выхода фракций не нова [8–12], предлагаются различные методы, направленные на получение заданного гранулометрического состава [13–15]. В зарубежных источниках распространено изучение прогноза развала горной массы и расчета выхода фракций на основе эмпирических моделей [16–19].

Таблица 1

Параметры, влияющие на результаты и качество БВР

Контролируемые параметры		**Неконтролируемые исходные параметры**	
Расчетные	**Исходные**		
ЛНС	Тип ВВ	Генезис горной породы	Прочность на сжатие и растяжение
Сетка скважин	Плотность ВВ	Трещиноватость	Коэффициент Пуассона
Удельный расход	Высота уступа	Состав породы	Модуль упругости
Интервалы замедлений	Энергия ВВ	Обводненность	Коэффициент крепости по Протодьяконову
Величина заряда	Скорость детонации	Пористость и водопоглощаемость	Коэффициент взрываемости
Вместимость скважины	Диаметр скважины	Средний размер отдельности в массиве	Скорость продольной волны в горной породе
Конструкция заряда	Тип забойки	Наличие карстов	Плотность породы

Таблица 2

Параметры БВР по методике Комсомольского РУ

Параметр / Тип ВВ	Удельный расход $q_р$, кг/м^3	ЛСПП w, м	Расстояние между рядами и скважинами a=b, м	Длина заряда $L_{зар}$, м	Длина забойки $L_{заб}$, м
Аммонит 6ЖВ	0,675	8,038	7,235	7,196	4,304
Граммонит 79/21	0,678	8,038	7,235	8,765	2,74
Игданит	0,719	8,038	7,235	9,013	2,486
Параметр / Тип ВВ	Объем ГМ со скважины 1 ряда, v_1, м^3	Объем ГМ со скважины 2 ряда, v_2, м^3	Масса заряда скважины 1 ряда Q_1, кг	Масса заряда скважины 2 ряда Q_2, кг	Вместимость ВВ в 1 п. м. скважины, $p_з$, кг
Аммонит 6ЖВ	399,3	523,4	269,49	353,24	49,08
Граммонит 79/21	399,3	523,4	270,52	354,59	40,49
Игданит	399,3	523,4	286,90	376,07	41,72

Таблица 3

Определение удельного расхода ВВ (q) и ЛСПП (W) по данным различных авторов

Источник	Кузнецов В. А. [7]		КРУ (табл. 2)	По «Гипроруде» [4]	Давыдов С. А. [3, 22]	Формулы «Союзвзрывпрома», (на основе $d_{зар}$ и $p_з$ соответственно) [23]		Степанов А. В., Гдалин А. Д. [24]
Параметр / Тип ВВ	$q_р$, кг/м^3	$q_р$, кг/м^3	$q_р$, кг/м^3	$q_р$, кг/м^3	W, м	W, м	W, м	W, м
Аммонит 6ЖВ	0,765	0,547	0,675	0,6	13,91	7,74	8,13	7,97
Граммонит 79/21	0,769	0,549	0,677	0,602	12,64	7,02	7,37	7,22
Игданит	0,869	0,620	0,749	0,639	12,43	6,92	7,27	7,12

Представляет интерес рассмотренный Б. Р. Ракишевым и др. усовершенствованный аналитический метод определения грансостава для скважинного взрывания на уступах [14, 20], основанный на учете размеров зон интенсивного дробления и содержания естественных отдельностей в массиве пород. Данный метод дал высокие показатели идентичности теоретических и практических результатов. Важным здесь является вывод о необходимости учета действительных влияющих параметров, и показана возможность автоматизации процесса расчета. Кроме того, положение о перераспределении содержания фракций в силу механических процессов (соударения и раздробления), вводимое авторами, также необходимо в приближении к действительности теоретических итогов вычислений. Результатом расчета здесь становится процентное содержание фракций разных классов в развале горной массы после взрыва.

К недостаткам практического применения данного метода расчета следует отнести сложность получения данных по естественному состоянию отдельностей в массиве, для чего на предприятии необходимо иметь соответствующее оборудование, так как в противном случае расчет принимает весьма условный характер. Результаты расчета по данной методике приведены в таблице 4.

Таблица 4

Определение параметров БВР по методике Б. Р. Ракишева

Параметр / Тип ВВ	$V'(x_1)$, м^3	$V'(x_2)$, м^3	$V'(x_3)$, м^3	$V'(x_4)$, м^3	$V'(x_5)$, м^3
Аммонит 6ЖВ	2799,74	1767,69	1489,41	1249,27	775,41
	2817,96	1775,38	1745,26	1067,25	747,08
Граммонит 79/21	2789,74	1770,14	1491,71	1251,57	776,84
	2806,02	1778,74	1748,66	1069,41	748,59
Игданит	2793,13	1769,98	1491,15	1250,40	776,11
	2809,83	1778,94	1747,83	1068,09	747,66

Примечания: 1) $V'(x_i)$ — объём интенсивно раздробленной породы n класса, где 1-й класс — 0–0,2 м, 2-й — 0,2–0,4 м и т. д. (до класса 5 — 0,8–1,0 м); 2) значения в числителе — на основе проектных параметров БВР из практики, в знаменателе — на основе расчетных параметров.

Применение в горном деле вероятностных распределений, в частности на основе модели Кузнецова — Раммлера (в зарубежной литературе также используется обозначение Kuz-Ram), позволяет описать грансостав взорванной горной массы. В работе [21] предлагается подход с учетом значений ЛНС и параметров сетки скважин, также принимаются во внимание изохроны инициирования (на примере схем массового взрыва). Ключевыми параметрами на выходе являются средневзвешенный (т. н. характерный) размер куска x_c и индекс однородности n, характеризующий равномерность распределения ВГМ.

Недостатком метода стоит считать так называемый rock factor в качестве переменной определения x_c, о несогласованности в принятии которого и низкой вариативности упоминается в работе. Он может быть получен как с помощью расчетных формул, физико-механических характеристик массива, так и в виде твердости по шкале Мооса (для расчета в данной работе принято значение A = 9).

В работе [15] П. С. Симонов предлагает метод наименьших квадратов для определения логарифмически нормального распределения, указывая на возможность построения распределения с использованием встроенных функций Excel и Mathcad. Для расчета требуется знание размера медианного куска d_{50} в массиве и развале, определяемого непосредственно из эксперимента.

В работе [13] проанализированы три инварианта процесса дробления (1 — совокупность кусков взорванной и механически раздробленной горной массы подчиняется логарифмически нормальному закону распределения, 2 — энергопоглощающая способность взрываемого участка зависит от удельных энергозатрат и ЛНС, 3 — КПД взрыва определяется через удельную поверхность контакта заряда с массивом горных пород), а для оценки затрат энергии на дробление принималась вероятностно-статистическая гипотеза разрушения. Авторами получены зависимости относительного значения КПД взрывного дробления от диаметров зарядов [13, 25], предложен метод расчета параметров БВР на заданный грансостав в виде решения системы уравнений, в которых определяется математическое ожидание размера куска, КПД взрывного дробления, удельный расход ВВ.

Учет действия КПД взрыва является важным и сложным вопросом. В указанной работе для расчетного КПД необходимо получить значение КПД при опытном взрыве. Известно, что этот показатель зависит от теплоты взрыва ВВ.

При этом не были получены достоверные размеры куска путем расчета соответствующей формулы из работ [13, 25], что говорит о необходимости принимать значения соотношения прочностной характеристики и КПД с учетом эмпирического результата. Этот недостаток данного метода требует введения дополнительных коэффи-

циентов и их нахождения для данных условий, с проверкой достоверности результата.

Для реализации исследуемых методик на предприятии результаты работы [6] важны определением работоспособности ВВ без проведения эксперимента, что позволяет провести более точный расчет коэффициентов работоспособности ВВ, на основе имеющихся данных испытаний ВВ и характеристик предлагаемых производителями ВВ в ходе решения задачи изменения параметров БВР и замены ВВ для снижения себестоимости полезного ископаемого.

Модель Кузнецова — Раммлера широко изучена зарубежными учеными, кроме того, ими разработаны весьма известные модели взрывного дробления под общим названием JKMRC (по названию создавшей их организации): CZM (модель зоны разрушения), TCM (двухкомпонентная модель), направленные на устранение недооценки выхода мелких фракций в исходной модели [18]. Кроме того, на основе исследований Кузнецова была создана модель KCO (по фамилиям основных создателей — Кузнецов, Cunningham, Outcherloni). Модель Swebrec представляет интерес в части учета выхода мелких фракций, что полностью совпадает с рассматриваемыми условиями [19]. В ней был введен параметр максимального размера куска, в остальном модель сходная с данными по уравнениям Кузнецова на основе уравнений Розина — Раммлера [18].

Результаты расчета различных статистических методик приведены в таблице 5.

Модель CZM позволяет использовать исходные уравнения Кузнецова — Раммлера, а также функцию Розина — Раммлера для описания грубой части распределения фрагментов по размерам, которая обусловлена трещинами растяжения и уже существующими трещинами в массиве.

В то же время при очевидных достоинствах по результатам расчета усовершенствованной модели Кузнецова — Раммлера на практике ее результаты не получили подтверждения [18] в силу особенностей работы буровых и взрывных участков и снижения заметности отличий за счет геологии массива, как предполагается авторами работы [18]. На основе рассмотренных выше методик следует указать важность таких процессов, как фотографирование развала с обработкой в специализированном ПО, ситовый анализ, планиметрический и линейный методы.

Разработанная И. И. Клочко методика [3] представляет интерес ввиду учета энергетики и работы взрыва и их связанности с ЛНС и параметрами скважин (синтез данных, применяемых производственниками, и физико-механических характеристик). Методика основана на результатах исследований буровзрывных работ в условиях карьеров Донбасса. Также примечательна направленность методики на управление дроблением посредством изменения давления взрыва (из работы [1] очевидно, что для указанной в данной статье задачи необходим процесс понижения пикового давления).

Таблица 5

Статистические методики на получение заданного гранулометрического состава взорванной горной массы

Параметр	d_i, мм [13]	X_c, мм [21]	X_c (модель Kuz-Ram, 1987 г.), мм [18]	X_c (модель Kuz-Ram, 2005 г.), мм	X_c (Swebrec), мм [18,19]
Аммонит 6ЖВ	295,0	344,3	341,77	339,13	349,75
	351,0	345,86	343,32	340,68	351,34
Граммонит 79/21	359,0	332,99	330,51	327,96	338,17
	350,0	345,57	343,04	340,40	350,99
Игданит	394,0	324,7	322,32	319,84	329,03
	374,0	338,65	336,65	333,58	343,15

Примечание: значения в числителе — на основе проектных параметров БВР из практики, в знаменателе — на основе расчетных параметров.

Энергетический подход А. Н. Ханукаева [26, 27], наряду с методикой И. И. Клочко по расчету параметров БВР с целью оптимального расходования энергии взрыва, учитывает работу взрыва, позволяет оценить энергию, затраченную на дробление. Рассчитываемая энергия ударной волны по методике из работы [27] позволяет оценить эффективность применяемого ВВ и конструкции заряда. В данной работе, ввиду отсутствия требуемых данных, по методике А. Н. Ханукаева расчет не производился. Результаты расчета по методике И. И. Клочко с указанием значений акустического импеданса горной породы и рассматриваемых ВВ приведены в таблице 6.

Наглядным итогом расчета параметров БВР виден взаимоучет величин, входящих в расчетные формулы и принимаемых в различных методиках.

Создается возможность взаимосвязанного расчета параметров БВР, в частности, конструкции скважины с учетом методики И. И. Клочко [3], ЛНС и удельного расхода из методики КРУ, которая основана на формулах «Союзвзрывпрома» для расчета удельного расхода ВВ [4, 7].

Ввиду схожести данных формул для расчета удельного расхода ВВ с представленными в методике Кутузова — Рубцова (из которых, в свою очередь, выведены формулы В. А. Кузнецова [7]), на основании сравнительного расчета показывающих схожие результаты, стоит подчеркнуть, что результат по методике И. И. Клочко [3] является демонстрацией различной энергетики ВВ, что важно в цели перехода к увеличению энергии взрыва, направленной на повышение крупности при одновременном снижении диссипативных потерь, что приводит к сокращению выхода переизмельченных фракций.

Разброс параметров, получаемый в результате расчетов, во многом зависит от учета основных параметров (сетка скважин, ЛНС и удельный расход) как по типовым данным предприятия, по которым соответствующие производственные участки проводят подготовку блока, так и по многократно проверенным и использующимся расчетным формулам. В то же время критерием достоверности расчетных методик может считаться именно практический опыт, обеспечивающий стабильный и известный выход товарной продукции, негабарита и переизмельчения, так как именно на корректировку этих показателей направлены проводимые расчеты.

Таблица 6

Определение параметров БВР по энергетической методике

Название ВВ / Параметр	Аммонит 6ЖВ	Игданит	Граммонит 79/21
R, м	5,29	4,27	5,15
Сетка скважин a=b, м	10,6	8,5	10,3
Объем отбитой породы $V_{дроб}$, $м^3$	330,1	214,9	313,5
Критерий соответствия типу горной породы $P_{скв} \geq \sigma_{дин}$	Да	Нет	Да
Импеданс породы, МПа·с/м	8,75	8,75	8,75
Импеданс ВВ, МПа·с/м	4,2	3,018	2,97
Коэффициент прохождения УВ	0,877	0,763	0,757

Использование эмпирических расчетов в текущих условиях является вынужденной мерой в отсутствие возможности проведения опытного взрывания, а потому следует учитывать некоторую условность полученных данных, для которых лишь частично применены данные массовых взрывов.

Для уточнения расчетов необходима фотопланиметрия массива, опытное взрывание, дополнительный учет геологических и физико-механических параметров [28]. Также на достоверность расчета при проверке будут указывать зависимости, аналогичные по строению уже известным из других работ [10–12, 29 и др.]. Кроме того, нельзя не принимать во внимание карст, ввиду наличия которого возможен «отвод» действия детонационной волны по пути наименьшего сопротивления и существенное снижение качества взрыва. Для решения последнего ввиду сложности прогноза карста возможным является контроль процесса бурения по осевой нагрузке на долота.

Отдельно стоит подчеркнуть, что несмотря на существующий ассортимент ВВ для различных условий взрывания, выбор его ограничивается фактором себестоимости, что крайне важно для карьеров по добыче флюсового сырья и строительных материалов. ВВ местного изготовления, требующие наличия смесительно-зарядной машины, значительно снижают расходы на ВВ, с учетом применения в них тех или иных компонентов, доступных конкретному предприятию (пример — широкое разнообразие гранулитов, стоимость отдельных компонентов которых не является высокой).

Однако не стоит полагаться лишь на этот фактор по причине того, что такие ВВ обеспечивают энергетические характеристики определенного диапазона значений, который в некоторых условиях может быть недостаточен или наоборот избыточен (в том числе для добычи известняков).

Таким образом, рассмотренные методики представляют собой в массе опробованные и применяемые практически способы получения основных проектных параметров паспорта БВР. Возможность их совместного расчета для получения совокупности параметров позволит на этапе формирования паспорта БВР анализировать получаемый результат взрыва, достаточность проработки массива взрывом и определять целесообразность корректировки применяемых средств и их параметров.

В части применимости расчетных методик заметны спорные и сложные для учета величины, которые, несомненно, искажают результат в сторону снижения его дальнейшей сходимости с потенциальной практикой.

Выводы и направление дальнейших исследований. По результатам выполненных исследований, при сравнении различных методов расчета, подтверждается важность учета комплексного влияния на показатели взрыва прочностных характеристик массива и энергетических характеристик ВВ, что позволяет сделать следующие выводы:

1. Обеспечение экономически стабильной работы предприятия связано с обеспечением востребованности его продукции, на что оказывает существенное влияние процесс БВР, который непосредственно определяет выход готовой продукции и распределение ее по фракциям. Существующие методики учитывают множество параметров, влияющих на результат взрыва.

2. Для наиболее наглядного теоретического представления итогов взрывной подготовки горных пород необходимо объединение расчета параметров скважин на основе объемных методик, учета строения массива и зон дробления, расчета статистических моделей, а также инвариантов взрывного дробления на основе данных опытных взрывов. Наиболее перспективным является комплексный автоматизированный расчет указанных методик во взаимоучете проектируемых параметров на основе энергетического подхода к выбору ВВ.

3. Результаты выполненных исследований могут быть применены на предприятии при проектировании и обосновании технологии буровзрывных работ при условии

проверки рекомендуемой методики на серии опытных взрывов.

4. Регулируя точность расчета и реализации параметров сетки БВР, глубины взрывных скважин и зарядов в них, возможно приблизить средневзвешенный размер куска ВГМ к требуемым значениям без изменения технологии.

5. Направлением дальнейших исследований является изучение вопроса рационального выбора конструкции взрывных скважин, в полной мере удовлетворяющих условиям экономичности, применимости и качества взрыва для условий карьеров флюсовых известняков.

Список источников

1. Ефремов Э. И., Пономарев А. В., Николенко Е. В. Эффективность использования взрывчатых веществ простейшего состава при разрушении пород флюсовых карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 2. С. 69–72. EDN MURHVH

2. Клочко И. И., Пирич Э. И., Монастырев Н. В. Повышение выхода готовой продукции на карьерах строительных материалов и флюсового сырья на стадии взрывоподготовки // Донбасс — 2020: наука и техника — производству : материалы научно-практической конференции. Донецк : ДонНТУ, 2002. С. 200–203.

3. Клочко И. И., Монастырев Н. В. Методические указания по расчету параметров буровзрывных работ на карьерах с учетом оптимального расходования энергии взрыва. Донецк, 2005. 18 с.

4. Зырянов И. В., Бондаренко И. Ф., Жариков С. Н. Определение параметров буровзрывных работ на кимберлитовых карьерах криолитозоны : учебное пособие. Якутск : Издательский дом СВФУ, 2019. 96 с. EDN CIQJBF

5. Супрун В. И., Левченко Я. В., Стромоногов А. В. Опыт исследования основных физико-механических свойств известняков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 5. С. 5–27. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_5 EDN DTJJRC

6. Афанасенков А. Н. О работоспособности взрывчатых веществ. Метод Трауцля // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 1. С. 132–139. DOI: 10.1023/B:CESW.0000013674.96586.b9 EDN HRPCZD

7. Кузнецов В. А. Обоснование удельного расхода ВВ в условиях уступной отбойки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № S7. С. 53–62. EDN KYQQXZ

8. Авдеев Ф. А., Барон В. Л., Блейман И. Л. Производство массовых взрывов. М. : Недра, 1977. 312 с.

9. Барон Л. И. Кусковатость и методы ее измерения. М. : Изд-во АН СССР, 1960. 124 с.

10. Рубцов В. К. Расчеты заданного выхода крупных и мелких кусков породы на карьерах // Взрывное дело. 1967. № 62/19. С. 84–99.

11. Управление степенью дробления горных пород и шириной развала на флюсовых карьерах Донбасса / М. Ф. Друкованый, В. М. Комир, В. И. Ильин, А. И. Пастухов // Взрывное дело. 1967. № 62/19. С. 121–131.

12. Барон Л. И., Сиротюк Г. Н. Проверка применимости уравнения Розина — Раммлера для исчисления диаметра среднего куска при взрывной отбойке горных пород // Взрывное дело. 1967. № 62/19. С. 111–120. EDN WZGBTB

13. Виноградов Ю. И., Хохлов С. В. Метод расчета параметров буровзрывных работ на заданный гранулометрический состав взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S1-4. С. 20–29. EDN VQWAZZ

14. Гранулометрический состав взорванных пород при различных условиях взрывания / Б. Р. Ракишев, А. А. Орынбай, А. М. Ауэзова, А. Е. Куттынбаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 8. С. 83–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94 EDN ZBUDEY

15. Симонов П. С. Особенности определения размера среднего куска и выхода негабарита при взрывных работах на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 320–327. EDN YJUCZT

16. Applications of Kuz–Ram Models in Mine-to-Mill Integration and Optimization — A Review / M. Saldana [et al.] // Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 11. Art. 1162. DOI: 10.3390/min14111162 EDN ZQXVDO

17. Hall J., Brunton I. Critical comparison of Kruttschnitt mineral research center (JKMRC) blast fragmentation models // Fragblast, Int. J. for Blasting and Fragmentation. 2002. Vol. 6. P. 207–220. DOI: 10.1076/frag.6.2.207.8670

18. Ouchterlony F., Sanchidrián A. A review of development of better prediction equations for blast fragmentation // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 5. P. 1094–1109. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.03.001 EDN GCBOFB

19. Ouchterlony F. The Swebrec© function: linking fragmentation by blasting and crushing // Mining Technology. 2005. Vol. 114. Iss. 1. P. 29–44. DOI: 10.1179/037178405x44539

20. Ракишев Б. Р. Формирование гранулометрического состава взорванных пород при уступной отбойке // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 1. С. 41–53. DOI: 10.15372/FTPRPI20200105 EDN CCZPTZ

21. Опыт применения модели Кузнецова — Раммлера при описании распределения грансостава взорванной горной массы / М. А. Маринин [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 96–109. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_96 EDN FYZBMA

22. Кутузов Б. Н. Взрывные работы. М. : Недра, 1988. 382 с.

23. Нормативный справочник по буровзрывным работам / Ф. А. Авдеев, В. Л. Барон, Н. А. Гуров, В. Х. Кантор. 5-е изд., перераб. и доп. М. : Недра, 1986. 511 с.

24. Степанов А. В., Гдалин А. Д. Буровзрывные работы на предприятиях строительных материалов. М. : Недра, 1982. 288 с.

25. Виноградов Ю. И., Хохлов С. В., Аникин В. В. Методика оценки эффективности дробления массива горных пород различными типами ВВ // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2018. Вып. 1. С. 142–149. EDN YTFWZM

26. Ханукаев А. Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. М. : Недра, 1974. 224 с.

27. Ханукаев А. Н. Методика расчета полной энергии ударной волны в скальных породах // Записки Горного института. 1984. № 99. С. 36–39.

28. Брухавецкая А. О. Анализ современных разработок в области оценки качества дробления взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 5. С. 18–31. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_18 EDN AMOZYC

29. Тангаев И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. М. : Недра, 1986. 231 с.

© Тохтамыш М. А., 2026

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. СЗПСиГ ДонНТУ Лабинским К. Н., к.т.н., доц. каф. ГТиПБ ДонГТУ Смекалиным Е. С.

Статья поступила в редакцию 08.09.2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Тохтамыш Максим Александрович, *аспирант каф. разработки месторождений полезных ископаемых*
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Россия, e-mail: tokhtamysh19@yandex.ru

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Tokhtamysh M. A. *(Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia, e-mail: tokhtamysh19@yandex.ru)*

METHOD FOR CALCULATING DRILL AND BLAST PARAMETERS AT THE KOMSOMOLSK MINE GROUP QUARRIES TO OBTAIN THE SPECIFIED GRANULOMETRIC STRUCTURE OF THE BLASTED ROCK MASS

The paper is devoted to comparing methods for calculating drill and blast parameters aimed at determining the expected yield of fractions and the energy performance of an explosion. A comparison of methods developed by various authors was carried out, showing the heterogeneity of the obtained results. A direction for improving and synthesizing calculation methods for industrial implementation is proposed.

Key words: *drill and blast, calculating drill and blast parameters, specific consumption, granulometric structure, performance of an explosion.*

References

1. Efremov E. I., Ponomarev A. V., Nikolenko E. V. Efficiency of using explosives of simple composition for rock fragmentation in flux quarries [Effektivnost' ispol'zovaniya vzryvchatyh veshchestv prostejshego sostava pri razrushenii porod flyusovyh kar'erov]. Mining informational and analytical bulletin. 2000. No. 2. Pp. 69–72. EDN MURHVH

2. Klochko I. I., Pirich E. I., Monastyrev N. V. Increasing the yield of finished products at construction material and flux raw material quarries at the blasting preparation stage [Povyshenie vyhoda gotovoj produkcii na kar'erah stroitel'nyh materialov i flyusovogo syr'ya na stadii vzryvopodgotovki]. Donbass — 2020: nauka i tekhnika — proizvodstvu : materialy nauchno-prakticheskoj konferencii. Donetsk : DonNTU. 2002. Pp. 200–203.

3. Klochko I. I., Monastyrev N. V. Methodological guidelines for calculating drill and blast parameters in quarries, considering the optimal use of explosion energy [Metodicheskie ukazaniya po raschetu parametrov burovzryvnyh rabot na kar'erah s uchetom optimal'nogo raskhodovaniya energii vzryva]. Donetsk. 2005. 18 p.

4. Zyryanov I. V., Bondarenko I. F., Zharikov S. N. Determination of drill and blast parameters for kimberlite quarries in the cryolithozone : a study guide [Opredelenie parametrov burovzryvnyh rabot na kimberlitovyh kar'erah kriolitozony : uchebnoe posobie]. Yakutsk : Izdatel'skij dom SVFU. 2019. 96 p. EDN CIQJBF

5. Suprun V. I., Levchenko Ya. V., Stromonogov A. V. Experience in investigating the basic physicomechanical properties of limestones [Opyt issledovaniya osnovnyh fiziko-mekhanicheskih svojstv izvestnyakov]. Mining informational and analytical bulletin. 2025. No. 5. Pp. 5–27. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_5 EDN DTJJRC

6. Afanasenkov A. N. On the brisance of explosives. The Trauzl method [O rabotosposobnosti vzryvchatyh veshchestv. Metod Trauclya]. Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2004. Vol. 40. No. 1. Pp. 132–139. DOI: 10.1023/B:CESW.0000013674.96586.b9 EDN HRPCZD

7. Kuznecov V. A. Justification of specific explosive consumption for bench blasting operations [Obosnovanie udel'nogo raskhoda VV v usloviyah ustupnoj otbojki]. Mining informational and analytical bulletin. 2007. No. S7. Pp. 53–62. EDN KYQQXZ

8. Avdeev F. A., Baron V. L., Blejman I. L. Execution of mass blasting operations [Proizvodstvo massovyh vzryvov]. M. : Nedra. 1977. 312 p.

9. Baron L. I. Lumpiness and methods for measuring it [Kuskovatost' i metody ee izmereniya]. M. : Izd-vo AN SSSR. 1960. 124 p.

10. Rubcov V. K. Calculations of the specified yield of large and small rock fragments at quarries [Raschety zadannogo vyhoda krupnyh i melkih kuskov porody na kar'erah]. Vzryvnoe delo. 1967. No. 62/19. Pp. 84–99.

11. Drukovanyj M. F., Komir V. M., Il'in V. I., Pastuhov A. I. Management of the degree of rocks fragmentation and the width of fracture at the Donbass flux quarries [Upravlenie stepen'yu drobleniya gornyh porod i shirinoj razvala na flyusovyh kar'erah Donbassa]. Vzryvnoe delo. 1967. No. 62/19. Pp. 121–131.

12. Baron L. I., Sirotyuk G. N. Verification of the applicability of the Rosin-Rammler equation for calculating the mean fragment diameter in the blasting of rocks [Proverka primenimosti uravneniya Rozina - Rammlera dlya ischisleniya diametra srednego kuska pri vzryvnoj otbojke gornyh porod]. Vzryvnoe delo. 1967. No. 62/19. Pp. 111–120. EDN WZGBTB

13. Vinogradov Yu. I., Khokhlov S. V. Method for calculating drill and blast parameters to achieve a specified particle size distribution of blasted rock mass [Metod rascheta parametrov burovzryvnyh rabot na zadannyj granulometricheskij sostav vzorvannoj gornoj massy]. Mining informational and analytical bulletin. 2015. No. S1-4. C. 20–29. EDN VQWAZZ

14. Rakishev B. R., Orynbaj A. A., Auezova A. M., Kuttynbaev A. E. Particle-size distribution of blasted rock under various blasting conditions [Granulometricheskij sostav vzorvannyh porod pri razlichnyh usloviyah vzryvaniya]. Mining informational and analytical bulletin. 2019. No.8. Pp. 83–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94 EDN ZBUDEY

15. Simonov P. S. Features of determining average dimension and yield of oversize under blasting in open pit mines [Osobennosti opredeleniya razmera srednego kuska i vyhoda negabarita pri vzryvnyh rabotah na kar'erah]. Mining informational and analytical bulletin. 2017. No. 4. Pp. 320–327. EDN YJUCZT

16. Saldana M. [et al.]. Applications of Kuz–Ram Models in Mine-to-Mill Integration and Optimization — A Review. Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 11. Art. 1162. DOI: 10.3390/min14111162 EDN ZQXVDO

17. Hall J., Brunton I. Critical comparison of Kruttschnitt mineral research center (JKMRC) blast fragmentation models. Fragblast, Int. J. for Blasting and Fragmentation. 2002. Vol. 6. Pp. 207–220. DOI: 10.1076/frag.6.2.207.8670

18. Ouchterlony F., Sanchidrián A. A review of development of better prediction equations for blast fragmentation. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 5. Pp. 1094–1109. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.03.001 EDN GCBOFB

19. Ouchterlony F. The Swebrec© function: linking fragmentation by blasting and crushing. Mining Technology. 2005. Vol. 114. Iss. 1. Pp. 29–44. DOI: 10.1179/037178405x44539

20. Rakishev B. R. Generation of particle size distribution in fragmentation of broken rocks in bench blasting [Formirovanie granulometricheskogo sostava vzorvannyh porod pri ustupnoj otbojke]. Journal of Mining Science. 2020. No. 1. Pp. 41–53. DOI: 10.15372/FTPRPI20200105 EDN CCZPTZ

21. Marinin M. A. [et al.]. Experience of using the Kuz-Ram model in describing of grain size distribution of blasted rock mass [Opyt primeneniya modeli Kuznecova — Rammlera pri opisanii raspredeleniya gransostava vzorvannoj gornoj massy]. Mining informational and analytical bulletin. 2023. No. 9-1. Pp. 96–109. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_96 EDN FYZBMA

22. Kutuzov B. N. Blasting operations [Vzryvnye raboty]. M. : Nedra. 1988. 382 p.

23. Avdeev F. A., Baron V. L., Gurov N. A., Kantor V. Kh. Reference manual on drill and blast operations [Normativnyj spravochnik po burovzryvnym rabotam]. 5th ed. repr. and add. M. : Nedra. 1986. 511 p.

24. Stepanov A. V., Gdalin A. D. Drill and blast operations at construction material enterprises [Burovzryvnye raboty na predpriyatiyah stroitel'nyh materialov]. M. : Nedra. 1982. 288 p.

25. Vinogradov Yu. I., Khokhlov S. V., Anikin V. V. Technique of estimating efficiency of rocks crushing various types by explosives [Metodika ocenki effektivnosti drobleniya massiva gornyh porod razlichnymi tipami VV]. News of the Tula state university. Sciences of Earth. 2018. Iss.1. Pp. 142–149. EDN YTFWZM

26. Khanukaev A. N. Physical processes during rock fragmentation by blasting [Fizicheskie processy pri otbojke gornyh porod vzryvom]. M. : Nedra. 1974. 224 p.

27. Khanukaev A. N. Methodology for calculating the total energy of a shock wave in rock masses [Metodika rascheta polnoj energii udarnoj volny v skal'nyh porodah]. Journal of Mining Institute. 1984. No. 99. Pp. 36–39.

28. Bruhaveckaya A. O. Analysis of modern developments in assessing the fragmentation quality of blasted rock mass [Analiz sovremennyh razrabotok v oblasti ocenki kachestva drobleniya vzorvannoj gornoj massy]. Mining informational and analytical bulletin. 2023. No. 5. Pp. 18–31. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_18 EDN AMOZYC

29. Tangaev I. A. Energy intensity of mineral extraction and processing operations [Energoemkost' processov dobychi i pererabotki poleznyh iskopaemyh]. M. : Nedra. 1986. 231 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tokhtamysh Maksim Aleksandrovich, *Postgraduate student of the Department of Mineral Deposits Development*
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Russia, e-mail: tokhtamysh19@yandex.ru