

Прогнозирование параметров пылеобразования при взрывании скважинных зарядов взрывчатых веществ на карьерах

В.Н. Тюпин^{1, 2}, Ю.Н. Болотова^{2, 3}✉

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация

² Научный совет Российской академии наук по проблемам народнохозяйственного использования взрывов, г. Москва, Российская Федерация

³ Национальная организация инженеров-взрывников в поддержку профессионального развития, г. Москва, Российская Федерация

✉ bolotovayn@noiv.pro

Резюме: Экологическая проблема формирования и распространения пылевого облака и его параметров при ведении взрывных работ на открытых разработках в настоящее время остается довольно острой. Цель исследования – на основе механизма действия взрыва в трещиноватом массиве горных пород разработать формулы расчёта параметров пылеобразования при взрывании на карьерах в зависимости от детонационных характеристик взрывчатых веществ, физико-механических свойств пород и параметров трещиноватости массива. Обоснована формула для определения радиуса зоны мелкодисперсного дробления пород при взрыве цилиндрического заряда взрывчатых веществ в зависимости от размера частиц пыли и физико-технических параметров массива. Проведены численные расчёты удельного объема и удельной массы пыли, образуемых при взрывании скважины диаметром 0,25 м граммонитом М-21 на одном из железорудных карьеров Курской магнитной аномалии. Удельный объем пыли равен $(2,29–3,47) \cdot 10^{-3}$ м³ на 1 м заряда взрывчатых веществ. Удельная масса пыли: 0,18–0,25 кг на 1 кг взрывчатых веществ, что соответствует исследованиям на карьерах ОАО «Ингулецкий ГОК». Снижать количество пыли можно, применяя скважинные заряды уменьшенного диаметра и взрывчатых веществ с низкой скоростью детонации и плотностью заряжания. Данные исследования позволяют определять дисперсный состав пыли с размером частиц от 1,0 мкм до 500 мкм.

Ключевые слова: взрывные работы, скважинный заряд, пыль, дисперсный состав пыли, объем пыли, масса пыли, пылеобразование

Для цитирования: Тюпин В.Н., Болотова Ю.Н. Прогнозирование параметров пылеобразования при взрывании скважинных зарядов взрывчатых веществ на карьерах. *Горная промышленность*. 2026;(1):62–67. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-62-67>

Predicting dust generation parameters in blasting borehole charges in open-pit mines

V.N. Tyupin^{1, 2}, Yu.N. Bolotova^{2, 3}✉

¹ Belgorod State University, Belgorod, Russian Federation

² Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the Problems of the National Economic Use of Blasts, Moscow, Russian Federation

³ National Organization of Explosive Engineers in Support of Professional Development, Moscow, Russian Federation

✉ bolotovayn@noiv.pro

Abstract: The environmental issue of dust cloud generation and propagation and its parameters during blasting operations in open-pit mines still remains quite acute. The objective of the study was to develop equations for calculating dust generation parameters during blasting in open-pit mines based on the blast mechanism in fractured rock masses depending on the detonation characteristics of the explosives, physical and mechanical properties of the rocks, and fracturing parameters of the rock mass. A formula has been justified for determining the radius of the fine fragmentation zone of the rocks when blasting a cylindrical charge depending on the size of the dust particles and the physical and technical parameters of the rock mass. Numerical calculations have been performed for the specific volume and specific weight of the dust generated upon blasting a borehole of 0.25 m in size with the M-21 grammonite at one of the iron ore quarries of the Kursk Magnetic Anomaly. The specific volume of dust is equal to $(2.29–3.47) \times 10^{-3}$ m³ per 1 m of the explosive charge. The specific weight of the dust is 0.18–0.25 kg per 1 kg of the explosive charge, which matches the results of research conducted at the open-pit mines of the Ingulets Mining and Processing Plant. The amount of dust can be reduced by using borehole charges with a smaller diameter and explosives with

low detonation rates and packing degrees. These studies make it possible to determine the distribution of dust particles with the particle sizes ranging from 1.0 μm to 500 μm.

Keywords: blasting, borehole charge, dust, distribution of dust particles, dust volume, dust weight, dust generation

For citation: Tyupin V.N., Bolotova Yu.N. Predicting dust generation parameters in blasting borehole charges in open-pit mines. Russian Mining Industry. 2026;(1):62–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-62-67>

Введение

Экологическая проблема формирования и распространения пылегазового облака при ведении взрывных работ на открытых разработках в настоящее время остается довольно острой. Решением этой проблемы в плане появления и распространения пыли занимались ученые России [1–6] и зарубежных стран [7–11]. Исследования проводились в направлениях определения: количества пыли (объем, масса) при взрыве заряда взрывчатых веществ (ВВ); удельного количества пыли на 1 кг ВВ; дисперсного состава пыли; высоты подъема и радиуса распространения пыли в зависимости от размеров частиц, ветровой нагрузки; разработан ряд способов подавления пылевого облака и т.д.

Проведенные исследования позволяют определять параметры пылевого облака, динамику его распространения и используются для разработки нормативно-технической документации в производстве. Однако нерешенные вопросы имеются.

Анализ литературных источников и опыт работы открытых горных предприятий показывает, что пыль образуется при следующих технологических процессах: перемещение буровых станков с раздавливанием породы под гусеницами и бурение скважин; короткозамедленное взрывание скважин; перемещение экскаваторов и погрузка горной массы; взрывное или механическое дробление негабарита; транспортировка и разгрузка горной массы.

Производственный опыт и исследовательские работы показывают, что при взрыве ВВ в скважине, группе скважин и при массовых взрывах выделяется наибольшее количество пыли.

При массовом взрыве образование пыли в массиве происходит: вокруг взрывающей скважины под действием давления продуктов детонации (ПД); между гранями отдельных за счет их соударения или сдвига с разрушением неровных контактов, это происходит внутри блока и на расстоянии до 150 диаметров заряда от массового взрыва; между разлетающимися кусками породы за счет их соударения при выбросе отбиваемой горной массы; между выбрасываемой горной массой и подошвой уступа в результате её падения на горизонтальную плоскость; вблизи накладного заряда ВВ и на расстоянии от заряда за счет действия ПД на негабарит и ударной воздушной волны на подошву уступа.

При этом опыт показывает, что максимальное количество пыли выбрасывается при взрыве скважинных зарядов ВВ. Продукты детонации разрушают породу вблизи скважины и выбрасывают тонкодисперсную пыль вертикально вверх. Поэтому наиболее важным является вопрос: какое количество пыли образуется вокруг взрывающего скважинного заряда ВВ?

В работе [3] удельное количество пыли, выделяющееся при взрыве, изменяется в пределах 0,040–0,154 кг на 1 кг взорванного ВВ. Основными факторами, влияющими на количество и дисперсный состав пыли, являются тип ВВ и его удельный расход, крепость пород, высота уступов, диаметр скважин, степень обводненности горного массива [3].

В работе [5] приведены данные, согласно которым удельное количество пыли составляет 0,1–0,3 кг на 1 кг ВВ при диаметре частиц до 20 мкм. Доказано, что при использовании зарядов ВВ с воздушным промежутком выход пыли снижается в 2,5–3,0 раза по сравнению с взрывом сплошного цилиндрического заряда [5].

В работах [6; 7] приводятся данные, согласно которым при взрывании граммонита 79/21 на карьерах «Ингулецкого ГОКа» удельная масса пыли составляет 0,143–0,260 кг на 1 кг ВВ. При взрывании эмульсионных ВВ – 0,100–0,218 кг/кг.

Главными показателями при выбросе пыли из скважины являются её дисперсный состав, максимальный размер частиц пыли, а также расстояние от образующей цилиндрического заряда ВВ r_{II} до границы зоны, в пределах которой размер частиц не превышает определенного, равного d_{II} .

В работах [1; 8] представлена классификация микрочастиц пыли по размеру. Первая группа имеет размеры 100–10 мкм, где частицы видны невооруженным глазом и подчиняются в воздушном потоке закону Стокса. Вторая с размером 10–1,0 мкм осаждается из воздушного потока с постоянной скоростью. Третья группа пыли с размером частиц менее 1,0 мкм не выпадает из воздушных потоков, частицы не видны невооруженным глазом.

Зависимостей для определения радиуса зоны r_{II} от размера частиц d_{II} немного. В работе [5] приведена формула для определения величины среднего размера частиц с удалением от сферического заряда ВВ в виде:

$$d_{II} = 0,0012 \bar{R}^{1,3}, \quad (1)$$

где $\bar{R} = R/R_0$, R – расстояние от места взрыва, м; R_0 – радиус заряда, м

В работе [2] получена зависимость для определения размера зоны интенсивного пылеобразования при взрывании цилиндрического заряда ВВ:

$$r_{II} = \sqrt{\frac{\rho_3 \cdot r_3 \cdot D_{cp}}{3 \cdot \Delta q}}, \quad (2)$$

где ρ_3 – плотность потока энергии на внешней стенке зарядной камеры, Дж/м² (зависит от энергии заряда, радиуса и длины заряда); r_3 – радиус заряда ВВ, м; D_{cp} – размер частицы шарообразной формы, м; Δq – удельный расход энергии на образование единицы поверхности дезинтеграции, Дж/м² (величина определяется через предел прочности породы на сдвиг).

Анализ формулы (2) показал, что она правомерна, то есть с увеличением плотности потока энергии, радиуса заряда и размера частиц – r_{II} увеличивается. С увеличением предела прочности породы на сдвиг – уменьшается. Однако в работе не приведены численные расчеты по определению r_{II} , объема пылеватных фракций и удельного объема пыли на 1 кг ВВ, что не дает возможности говорить о достоверности методики.

Расчет радиуса зоны интенсивного пылеобразования, очевидно, необходимо производить на физических

процессах, происходящих при взрывании скважинных зарядов ВВ в трещиноватых массивах горных пород.

Цель исследования – на основе механизма действия взрыва в трещиноватом массиве горных пород обосновать формулу расчёта размера зоны пылеобразования в зависимости от детонационных параметров ВВ, физико-механических свойств пород и параметров трещиноватости массива.

Материалы и методы

Анализ литературных источников на предмет изучения закономерностей появления пыли при ведении ВР. Обоснование формул расчёта количественных показателей пылеобразования. Численные расчёты по формулам и доказательство правомерности.

Результаты

Теоретические и производственные исследования, проведённые учеными России [12–20] и зарубежных стран [9–11], указывают на то, что степень деформирования и разрушения трещиноватого массива зависит от детонационных параметров ВВ, физико-механических свойств пород и параметров трещиноватости массива. При этом механизм деформирования и разрушения трещиноватого массива взрывом цилиндрического заряда ВВ представляется следующим образом [17].

При взрыве заряда ВВ в трещиноватом массиве на контакте ВВ – порода создаётся волна напряжения, которая имеет большую амплитуду (давление продуктов детонации равно $P = 0,25\rho_b D^2$, где ρ_b – плотность заряжения; D – скорость детонации), но малую длительность ($\tau = 10^{-4} - 10^{-5}$ с). Поэтому волны напряжения теряют основную энергию на ближайших естественных макротрещинах, частично отражаясь от них. При этом происходит дробление пронизанных зарядом отдельностей на части (рис. 1). Далее вступает фаза квазистатического давления продуктов детонации: с гораздо меньшей амплитудой ($P = 0,25\rho_b D^2$), но с большей длительностью ($\tau = 10^{-2} - 10^{-3}$ с), что предполагает основное разрушение на контакте ВВ – порода и выброс пыли в атмосферу.

На данном механизме деформирования трещиноватого

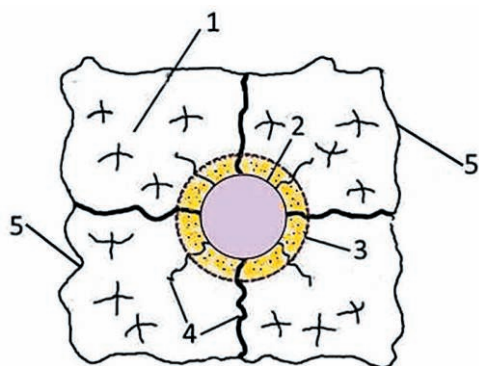


Рис. 1
Схема результатов действия взрыва скважинного заряда в отдельности массива горных пород: 1 – отдельность; 2 – заряд ВВ; 3 – зона появления пыли заданного размера; 4 – искусственные радиальные трещины; 5 – естественная трещиноватость

Fig. 1
A schematic drawing of the borehole charge blasting results in a separate joint of a rock mass: 1 – a joint; 2 – the explosive charge; 3 – the emergence zone of the dust with the specified particle sizes; 4 – artificial radial fractures; 5 – natural fracturing

массива взрывом получены основные формулы расчёта напряжений, деформаций, скоростей и времени смещения пород с расстоянием от заряда ВВ [17–19]. В работах [18; 19] получена зависимость среднего размера куска с расстоянием от цилиндрического заряда ВВ в виде:

$$d = r^2 d_e \Phi \left[\frac{20\sigma_p(1-v)}{D\rho_b d_3 c v} \right]^2, \tag{3}$$

где r – расстояние от заряда ВВ, м; d_e – размер отдельности, м; Φ – показатель трещиноватости массива; σ_p – предел прочности породы на растяжение, Па; v – коэффициент Пуассона; D – скорость детонации, м/с; ρ_b – плотность заряжения, кг/м³; d_3 – диаметр заряда ВВ, м; c – скорость продольной волны в образце породы, м/с.

Формула (3) получена для определения среднего размера куска при взрыве одиночного заряда ВВ в трещиноватом массиве. Соотношение $\sigma_p(1-v)v^{-1}$ определяет дальнюю границу зоны дробления отдельностей. При определении объёма и массы пылеватых частиц вблизи заряда ВВ, очевидно, величину $\sigma_p(1-v)v^{-1}$ необходимо заменить на $\sigma_{сжв}$ – предел прочности породы на всестороннее сжатие. Тогда зависимость для определения размера мелкодисперсных частиц с расстоянием от контакта ВВ – порода будет иметь вид:

$$d_n = r^2 d_e \Phi \left(\frac{20\sigma_{сжв}}{D\rho_b d_3 c} \right)^2. \tag{4}$$

Для расчёта объёма и массы пылеватых частиц размером менее d_n из формулы (4) получена формула для определения радиуса зоны мелкодисперсного дробления в виде:

$$r_{II} = \frac{D\rho_b d_3 c}{20\sigma_{сжв}} \sqrt{\frac{d_{II}}{d_e \Phi}}. \tag{5}$$

Объём пыли с размером не более d_n при взрыве цилиндрического заряда ВВ можно определить по формуле:

$$V_n = \pi \left[(r_3 + r_n)^2 - r_3^2 \right] l_3, \tag{6}$$

где $\pi = 3,14$; r_3 – радиус заряда ВВ, м; l_3 – длина заряда ВВ, м.

Масса пыли при взрыве одного цилиндрического заряда ВВ равна:

$$m_n = V_n \rho, \tag{7}$$

где ρ – объёмная масса взрывающей породы, кг/м³. Удельную массу пыли можно определить по формуле:

$$M_{yn} = m_n Q_3^{-1}, \tag{8}$$

где Q_3 – масса заряда ВВ в скважине, кг.

Общая масса пыли при массовом взрыве определена по формуле:

$$M_{общ} = m_n N, \tag{9}$$

где N – число скважин во взрываемом блоке.

Следует отдельно обратить внимание на численное значение $\sigma_{сжв}$ – предел прочности на всестороннее сжатие. Исследованиями [21–23] установлено, что предел прочности пород на трехосное сжатие увеличивается по сравнению с одноосным. Причем в работе [23] практически для всех восьми типов пород Кольского региона установлено увеличение предела прочности на сжатие в 2 раза, в условиях бокового давления 10 МПа.

Скорость продольных волн c в образцах гранита при увеличении всестороннего давления от 0 до 20 МПа изменяется с 5,0 км/с до 5,6 км/с, то есть незначительно, в 1,12 раза [21, с. 52].

Боковое давление в 10–20 МПа обеспечивается вблизи взрываемых скважин гравитационным горным давлением, если скважины находятся вблизи борта карьера, а также за счёт короткозамедленного взрывания групп зарядов при массовых взрывах. Расчёты гравитационного горного давления при глубине карьера 200 м дают $P = 5,1$ МПа. Согласно работе [17] сжимающее напряжение от взрыва группы скважин в районе последующей группы определяют по формуле:

$$\sigma_c(r) = \frac{D\rho_B d_c c}{20r\Phi^{0,5}} \left(1 - \frac{\mu\nu}{1-\nu}\right) K_{1-4} - \mu P + P, \quad (10)$$

где ν, μ – коэффициент Пуассона отдельности массива, коэффициент трения между гранями отдельностей соответственно; K_{1-4} – показатель, учитывающий действие взрыва; P – величина гравитационного горного давления, Па.

Расчёты по формуле (10) при $D = 3,6 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_B = 850$ кг/м³, $d_s = 0,25$ м, $c = 4 \cdot 10^3$ м/с, $\mu = 0,45$, $\nu = 0,25$, $\Phi = 5$, $K_{1-4} = 1,75$ дают: $\sigma_{сж}(r) = 102 \cdot 10^6 r^{-1} + 2,8 \cdot 10^6$.

То есть при взрыве группы скважин на расстоянии 10 м $\sigma_{сж}(r) = 13,0$ МПа, на расстоянии 5 м – 23,2 МПа. Следовательно, при расчётах параметров пылеватых частиц можно принимать $\sigma_{сжв} = 2\sigma_{сж}$ ($\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на одноосное сжатие).

Зависимость размера пылеватых частиц с расстоянием от контакта ВВ – порода построена по формуле (4) и приведена на рис. 2 при параметрах детонации, приведенных ранее, а также при: $d_s = 0,5$ м, $c = 4 \cdot 10^3$ м/с, $\sigma_{сжв} = 130; 260; 400$ МПа.

Анализ рис. 2 указывает на то, что частицы с размером не более 100 мкм и $\sigma_{сжв} = 65\text{--}200$ МПа расположены на расстоянии 2–5 мм от контакта ВВ – порода.

Численный анализ формулы (5) показал слабую зависимость радиуса пылеобразования r_n от параметров трещиноватости массива d_e, Φ . Существенно на величину r_n влияют физико-механические свойства пород $\sigma_{сжв}$ и c . На рис. 3 и 4 приведены зависимости $r_n = f(\sigma_{сжв})$ и $r_n = f(c/\sigma_{сжв})$,

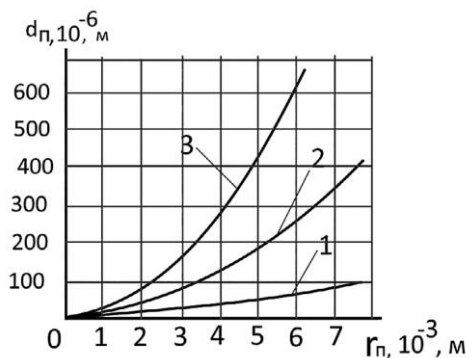


Рис. 2
Зависимость размера частиц пыли d_n с расстоянием r_n от контакта ВВ – порода при стандартных параметрах взрывания в породах при осжв: 1 – 130 МПа; 2 – 260 МПа; 3 – 400 МПа

Fig. 2
Dependence of the dust particle size d_n on the distance r_n from the contact surface of the explosives and the rock under standard blasting parameters in rocks at $\sigma_{сжв}$: 1 – 130 МПа; 2 – 260 МПа; 3 – 400 МПа

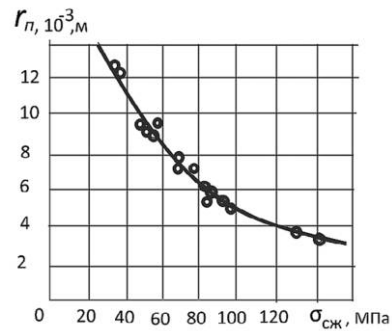


Рис. 3
Зависимость радиуса зоны мелкодисперсного дробления r_n от предела прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ пород Стрельцовской группы месторождений

Fig. 3
Dependence of the radius of the fine fragmentation zone r_n on the uniaxial compressive strength $\sigma_{сж}$ of the rocks from the Strel'tsovskaya group of deposits

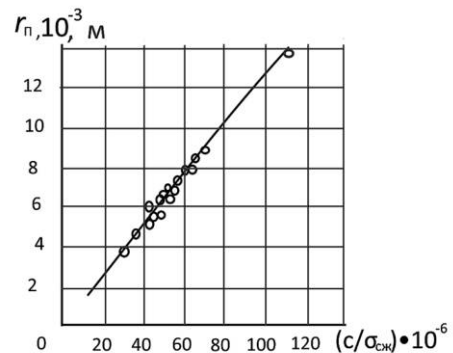


Рис. 4
Зависимость радиуса зоны мелкодисперсного дробления r_n от соотношения $c / \sigma_{сж}$ пород Стрельцовской группы месторождений

Fig. 4
Dependence of the radius of the fine fragmentation zone r_n on the $c / \sigma_{сж}$ index of the rocks from the Strel'tsovskaya group of deposits

полученные по формуле (5) при параметрах, приведенных ранее, и физико-механических свойствах пород Стрельцовской группы месторождений [17].

Анализ рис. 3, 4 указывает, что при стандартных параметрах взрывания в среднеблочных массивах радиус зоны пылеобразования от контакта ВВ – порода составляет от 3 до 13 мм при максимальном размере частицы пыли 100 мкм.

Ниже, в табл. 1, приведён расчёт объёма и удельной массы пыли при проведении массовых взрывов на одном из железорудных карьеров КМА в зависимости от степени трещиноватости и прочностных свойств пород при стандартных параметрах взрывания, приведенных ранее. Расчёты в табл. 1 проводились при $d_n = 100\text{--}10\text{--}6$ м. Численные значения $d_e, \Phi, \sigma_{сжв}, c, \rho$ в табл. 1 принимались в соответствии со степенью трещиноватости массива.

Расчёты по формулам (5)–(8) приведены в табл. 2.

Анализ численных данных табл. 2 показывает, что удельная масса пыли $M_{уп}$ при взрывании на железорудном карьере составляет 0,18–0,25 кг на 1 кг граммонита М-21. Это соответствует результатам исследований [6] при ведении ВР граммонитом 79/21 на карьерах ОАО «Ингулецкий ГОК», где удельные выбросы пыли составили 0,143–0,260 кг/кг.

При использовании эмульсионных ВВ и расчётах по формулам (4)–(5) скорость детонации необходимо определять по формуле [17]:

Таблица 1
Физико-технические параметры трещиноватого массива железорудного карьера

Table 1
Physical and technical parameters of the fractured rock mass in an iron ore open-pit mine

Категория трещиноватости	d_e , м	Φ	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{сжв}$, МПа	c , 103, м/с	ρ , 103, кг/м ³
I	< 0,1	> 10	< 90	< 180	< 2,0	< 3,0
II	0,1–0,5	10–5	90–130	180–260	2,0–3,0	3,0–3,3
III	0,5–1,0	5–2,5	130–170	260–340	3,0–4,0	3,3–3,6
IV	1,0–1,5	2,5–1,7	170–210	340–420	4,0–5,0	3,6–3,9
V	> 1,5	< 1,7	> 210	> 420	> 5,0	> 3,9

Примечание. Численные значения c и ρ в зависимости от категории трещиноватости приняты на основании [24; 25].
Note. The numerical values of c and ρ depending on the fracturing category are taken based on [24; 25].

Таблица 2
Расчётные параметры выброса пыли ($d_n = 100 \cdot 10^{-6}$ м) при ведении взрывных работ на железорудном карьере

Table 2
The calculated parameters of dust emission ($d_n = 100 \cdot 10^{-6}$ m) during blasting operations at an iron ore open-pit mine

Категория трещиноватости	d_e , м	r_n , 103, м	V_n , 10 ³ , м ³	m_n , кг	$M_{уп}$, кг/кг
I	< 0,1	< 4,25	< 3,47	< 10,4	< 0,25
II	0,1–0,5	4,25–2,79	3,47–2,29	10,4–7,6	0,25–0,18
III	0,5–1,0	2,49–2,85	2,29–2,34	7,6–8,4	0,18–0,20
IV	1,0–1,5	2,85	2,34	8,4–9,1	0,20–0,22
V	> 1,5	> 2,85	> 2,34	> 9,1	> 0,22

Примечание. Расчётные параметры получены при взрывании граммонита М-21, диаметре скважин 250 мм максимального размера частиц пыли 100·10⁻⁶ м. Объём пыли V_n и масса m_n пыли определены на 1 м заряда. Масса 1 м граммонита М-21 диаметром 0,25 м составляет 41,7 кг.
Note. The calculated parameters were obtained when blasting the M-21 grammonite with the borehole size of 250 mm and the maximum dust particle size of 100·10⁻⁶ m. The dust volume V_n and the dust weight m_n were determined for 1 m of the charge. The weight of 1 m of the M-21 grammonite with the diameter of 0.25 m is 41.7 kg.

$$D = 1,74\sqrt{Q} \tag{11}$$

где Q – теплота взрыва, Дж/кг.

Следует отметить, что при расчётах в табл. 2 учитывалось количество пыли диаметром менее 1 мкм, хотя согласно работе [1] данные частицы не видны и не выпадают из воздушных потоков. Расчёты показывают, что с учётом исключения из V_n частиц размером менее 1 мкм объём пыли уменьшается с $(2,29–3,47) \cdot 10^{-3}$ м³ до $(1,99–3,05) \cdot 10^{-3}$ м³.

Заключение и направления дальнейших исследований

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

Обоснована формула для определения радиуса зоны мелкодисперсного дробления пород при взрыве цилиндрического заряда ВВ в зависимости от размера частиц пыли.

Размер зоны формирования пыли определяется детонационными параметрами ВВ, физико-механическими свойствами пород и параметрами трещиноватости массива.

Проведены численные расчёты удельного объёма и удельной массы пыли, образуемых при взрывании скважины диаметром 0,25 м граммонитом М-21 на одном из железорудных карьеров КМА. Удельный объём пыли V_n равен $(2,29–3,47) \cdot 10^{-3}$ м³ на 1 м заряда ВВ. Удельная масса пыли: $M_{уп} = 0,18–0,25$ кг на 1 кг ВВ, что соответствует исследованиям на карьерах ОАО «Ингулецкий ГОК».

Снижать количество пыли можно, применяя скважинные заряды уменьшенного диаметра и ВВ с низкой скоростью детонации и плотностью заряжения.

Пользуясь данными исследованиями, в перспективе можно определять дисперсный состав пыли с размером частиц от 1,0 до 500 мкм.

Список литературы / References

- Чантурия В.А., Трубецкой К.Н., Викторов С.Д., Бунин И.Ж. *Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов*. М.: ИПКОН РАН; 2005. 216 с.
- Захаров В.Н., Галченко Ю.П., Федотенко В.С., Якушева Е.Д. О физической модели процесса пылеобразования при детонации скважинных зарядов на карьерах *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(S22):3–16. Zakharov V.N., Galchenko Y.P., Fedotenko V.S., Yakusheva E.D. The physical model of the dust formation process during detonation of borehole charges in quarries. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(S22):3–16. (In Russ.)
- Ганопольский М.И., Кантор В.Х., Пупков В.В. *Вредные эффекты промышленных взрывов. Разлет кусков при взрывах, укрытие мест взрывов, пылегазовое облако*. М.: Спутник+; 2022. 270 с.
- Ганопольский М.И., Барон В.Л., Белин В.А., Пупков В.В., Сивенков В.И. *Методы ведения взрывных работ. Специальные взрывные работы*. М.: Изд-во Московского государственного горного университета; 2007. 563 с.
- Тихонова О.В. *Обоснование параметров буровзрывных работ для снижения пылегазообразования при массовых взрывах на карьерах строительных материалов* [автореф. дис. ... канд. техн. наук]. СПб.: 2006. 20 с.
- Тыщук В.Ю. Проблемы экологии при ведении открытых горных работ. В кн.: *Проблемы экологии – 97: материалы науч.-практ. конф., г. Санкт-Петербург, 12–14 ноября 1997 г.* СПб.: НИЦЭБ РАН, БГТУ; 1997. С. 458–460.
- Колесник В.Е., Юрченко А.А., Литвиненко А.А., Павличенко А.В. *Способы и средства повышения экологической безопасности массовых взрывов в железорудных карьерах по пылевому фактору*. Днепропетровск: Литограф; 2014. 112 с.

8. Sweeney M.R. Formation of dust grains and dust emission processes. In: Elias S. (ed.) *Encyclopedia of Quaternary Science (Third Edition)*. Elsevier; 2025. Vol. 3, pp. 445–457. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99931-1.00154-9>
9. Qiu P., Yue Z., Ju Y., Zhao J. Characterizing dynamic crack-tip stress distribution and evolution under blast gases and reflected stress waves by caustics method. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2020;(108):102632. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102632>
10. Seccatore J.E., Cardu M., Marin T. Influence of blasting charge distribution on the energy required for comminution of rock. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2024;124(7):407–414. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2820/2024>
11. Wei X., Wang X., Cao M., Zhang Y., Shi J., Zhang Y., Zhang Y. Study on rock fracture mechanism based on the combustion and explosion characteristics of high-energy expansive agent. *Engineering Fracture Mechanics*. 2023;289:109428. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109428>
12. Ржевский В.В., Новик Г.Я. *Основы физики горных пород*. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Недра; 1984. 359 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/dW9RMoz4WvzWQ> (дата обращения: 27.11.2025).
13. Кутузов Б.Н. *Разрушение горных пород взрывом*. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Моск. горн. ин-та; 1992 (1993). 516 с.
14. Мосинец В.Н., Абрамов А.В. *Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород*. М.: Недра; 1982. 248 с.
15. Адушкин В.В., Спивак А.А. *Подземные взрывы*. М.: Наука; 2007. 578 с.
16. Ханукаев А.Н. *Физические процессы при отбойке горных пород взрывом*. М.: Недра; 1974. 222 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/35898> (дата обращения: 27.11.2025).
17. Тюпин В.Н. *Действие взрыва в трещиноватых массивах горных пород*. Белгород: НИУ БелГУ; 2025. 195 с.
18. Тюпин В.Н. Определение результатов дробления трещиноватого массива взрывом заряда ВВ. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 1981;(4):56–59.
Tyupin V.N. Assessment of the results of fractured rock mass fragmentation by an explosive charge. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 1981;(4):56–59. (In Russ.)
19. Тюпин В.Н. Прогнозирование параметров гранулометрического состава горной массы после взрывания трещиноватых массивов на карьерах. *Взрывное дело*. 2025;(147-104):23–43.
Tyupin V.N. Prediction of parameters of granulometric structure of rock mass after blasting of fractured massifs in quarry. *Explosion Technology*. 2025;(147-104):23–43. (In Russ.)
20. Шляпин А.В. О квазистатической фазе развития технологического взрыва. *Взрывное дело*. 2023;(139-96):5–15.
Shlyapin A.V. About the quasi-static phase of technological explosion development. *Explosion Technology*. 2023;(139-96):5–15. (In Russ.)
21. Пархоменко Э.И. (ред.) *Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах*. М.: Наука; 1974. 222 с.
22. Кузнецов Н.Н., Пак А.К. Исследование физико-механических свойств ийолит-уртита в условиях одноосного и трехосного сжатия. *Горная промышленность*. 2024;(2):127–133. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-127-133>
Kuznetsov N.N., Pak A.K. Investigation of physical and mechanical properties of ijolite-urtite under uniaxial and triaxial compression. *Russian Mining Industry*. 2024;(2):127–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-127-133>
23. Кузнецов Н.Н. Исследование прочностных свойств и удельной энергии деформирования горных пород в условиях трехосного сжатия. *Горная промышленность*. 2025;(2):140–145. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-140-145>
Kuznetsov N.N. Investigation of strength properties and specific strain energy of rocks under triaxial compression. *Russian Mining Industry*. 2025;(2):140–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-140-145>
24. Болотова Ю.Н. *Разработка сейсмобезопасных методов взрывания горных пород в приконтурной зоне железорудных карьеров* [дис. ... канд. техн. наук]. Белгород; 2023. 146 с.
25. Мельников Н.В., Ржевский В.В., Протодьяконов М.М. (ред.) *Справочник (кадастр) физических свойств горных пород*. М.: Недра; 1975. 279 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/e8uAPaiSgp40l> (дата обращения: 27.11.2025).

Информация об авторах

Тюпин Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация; член Научного совета Российской академии наук по проблемам народнохозяйственного использования взрывов, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-3709-0957>, e-mail: tyupinvn@mail.ru

Болотова Юлия Николаевна – кандидат технических наук, исполнительный директор, Национальная организация инженеров-взрывников в поддержку профессионального развития, ученый секретарь Научного совета Российской академии наук по проблемам народнохозяйственного использования взрывов, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: bolotovayn@noiv.pro

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.11.2025

Поступила после рецензирования: 26.01.2026

Принята к публикации: 27.01.2026

Information about the authors

Vladimir N. Tyupin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belgorod State University, Belgorod, Russian Federation; Member of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the Problems of the National Economic Use of Blasts, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-3709-0957>; e-mail: tyupinvn@mail.ru

Yuliya N. Bolotova – Cand. Sci. (Eng.), Executive Director, National Organization of Explosive Engineers in Support of Professional Development; Academic Secretary, National Organization of Explosive Engineers in Support of Professional Development, Moscow, Russian Federation; e-mail: bolotovayn@noiv.pro

Article info

Received: 29.11.2025

Revised: 26.01.2026

Accepted: 27.01.2026