

УДК 622.85:622.235 © В.Н. Захаров✉, Ю.П. Галченко, В.С. Федотенко, 2024

UUDC 622.85:622.235 © V.N. Zakharov✉, Yu.P. Galchenko, V.S. Fedotenko, 2024

Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН (ИПКОН РАН), 111020, г. Москва, Россия  
✉ e-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru

Mel'nikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, 111020, Russian Federation  
✉ e-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru

# Обоснование физической модели процесса пылегазового выброса в атмосферу при отбойке горных пород на карьерах\*

## Substantiation of the physical model of the process of dust and gas emission into the atmosphere during the breaking rocks in quarry

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11S-76-81>

### ЗАХАРОВ В.Н.

Доктор техн. наук, академик РАН, профессор, директор Института проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, 111020, г. Москва, Россия, e-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru

### ГАЛЧЕНКО Ю.П.

Доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, 111020, г. Москва, Россия, e-mail: schtrek33@mail.ru

### ФЕДОТЕНКО В.С.

Доктор техн. наук, заместитель директора по научной работе Института проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, 111020, г. Москва, Россия, e-mail: victorfedotenko@gmail.com

В работе выдвинута и разработана гипотеза о разделении процесса выделения и поглощения энергии взрыва технологического заряда на три качественно различные ступени, относящиеся к разным масштабам времени: в зоне бризантного, дробящего и пассивного действия взрыва. Рассмотрена возможность определения высоты подъема пылегазовой струи до превращения ее в пылегазовое облако. Обоснована и предложена гибридная модель процесса пылегазового выброса в атмосферу при отбойке горных пород на карьерах, применение которой позволяет прогнозировать движение тонкодисперсной фракции в атмосфере и дать количественную оценку распределения объемов этих фракций по вертикали. Рассмотрены процессы трансформации потока продукта детонации в пылегазовое облако при достижении предельной высоты.

**Ключевые слова:** взрывная отбойка, атмосфера, пылегазовый выброс, гибридная модель, газодинамика, струя, тонкодисперсная составляющая, пылегазовое облако.

**Для цитирования:** Захаров В.Н., Галченко Ю.П., Федотенко В.С. Обоснование физической модели процесса пылегазового выброса в атмосферу при отбойке горных пород на карьерах // Уголь. 2024;(11S):76-81. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-76-81.

\* Исследования проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках мероприятия № 1 комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 года № 1144-р и соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации № 075-15-2022-1185 от 28 сентября 2022 года.



**Abstract**

The article proposes and develops a hypothesis about the separation of the process of release and absorption of the energy of the explosion of a technological charge into three qualitatively different stages related to different time scales: in the zone of high-explosive, rending and passive explosion action. The possibility of determining the height of the rise of a dust and gas jet before its transformation into a dust and gas cloud is considered. A hybrid model of the process of dust and gas emission into the atmosphere during the breaking rocks in quarries is substantiated and proposed, the use of which makes it possible to predict the movement of a fine fraction in the atmosphere and to quantify the vertical distribution of the volumes of these fractions. The processes of transformation of the detonation product flow into a dust and gas cloud upon reaching the maximum height are considered.

**Keywords**

Blasting breaking, atmosphere, dust-and-gas outburst, hybrid model, gas dynamics, jet, fine-dispersed component, dust and gas cloud.

**Acknowledgements**

The research was performed with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of Activity No.1 of the Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle, approved by Order No. 1144-p of the Government of the Russian Federation as of May 11, 2022, and Agreement No. 075-15-2022-1185 as of September 28, 2022, on providing grants from the federal budget in the form of subsidies in accordance with Item 4 of Article 78.1 of the Budget Code of the Russian Federation.

**For citation**

Zakharov V.N., Galchenko Yu.P., Fedotenko V.S. Substantiation of the physical model of the process of dust and gas emission into the atmosphere during the breaking rocks in quarry. *Ugol'*. 2024;(115):76-81. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-76-81.

**ВВЕДЕНИЕ**

Дробление горных пород взрывом (отбойка) является основным технологическим процессом большинства гор-

ных технологий, применяемых при всех способах разработки месторождений твердых полезных ископаемых и при строительстве подземных сооружений различного назначения. В рамках традиционного пути развития буровзрывного комплекса постоянно существующая потребность повышения количественных показателей взрывной отбойки удовлетворялась путем чисто механического увеличения диаметра (и массы) применяемых зарядов ВВ с пропорциональным увеличением нагрузок на этот заряд (линии наименьшего сопротивления – ЛНС). Обозначенная тенденция к постоянному увеличению диаметра зарядов порождает и второе неизбежное противоречие между общим расходом энергии на отбойку и требуемым качеством дробления. Чем больше становится диаметр заряда, тем больше становятся размер и объем зоны его бризантного действия, где энергия взрыва бесполезно расходуется на переизмельчение геоматериала до размеров пылевидных фракций [1]. Выброс этой части отбиваемого массива в атмосферу вместе со взрывными газами создает дополнительные экологические проблемы, связанные как с воздействием на здоровье горнорабочих в карьере, так и с переносом пыли за его пределы и ее депонированием в биоте природных экосистем.

**ОБЩАЯ МЕТОДИКА**

Выполненный анализ результатов исследований по данному направлению прикладной газовой динамики [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] показал, что подходы к рассматриваемой задаче достаточно противоречивы как в отношении закономерностей изменения давления, так и по скоростным параметрам потока при различных типах струй.

При экстенсивной форме развития технологии дробления руд и пород на каждом иерархическом уровне организации функциональной системы всегда существуют процессы, протекающие в разных временных масштабах и потому описываемые «...разными научными теориями...» [1]. Поэтому процесс выделения и поглощения энергии взрыва единичного технологического заряда может быть разделен на три качественно различные ступени, относящиеся к разным масштабам времени (рис. 1). В зоне бризантного действия заряда (см. 1 на рис. 1), где форми-

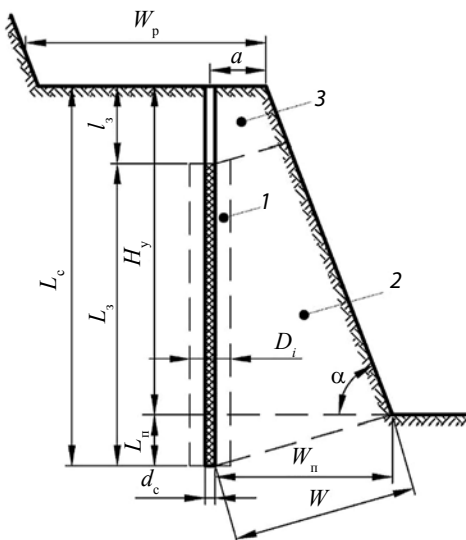


Рис. 1. Принципиальная схема расположения зон влияния единичного заряда:

1 – зона бризантного действия заряда; 2 – зона активного дробления; 3 – зона пассивного воздействия на массив;  $d_c$  – диаметр скважины (заряда), м;  $d_i = 2r_i$  – диаметр зоны активного пылеобразования, м;  $W$  – линия наименьшего сопротивления, м;  $L_s$  – длина заряда, м;  $L_c$  – глубина скважины, м;  $l_s$  – длина забойки, м;  $H_y$  – высота уступа, м;  $W_p$  – линия сопротивления по подошве уступа, м;  $a$  – удаление скважины от бровки уступа, м;  $\alpha$  – угол наклона борта уступа, градус;  $W_p$  – ширина рабочей площадки уступа, м;  $L_n$  – перебур, м.

Fig. 1. A schematic map of the impact zones of an individual charge:

1 – zone of the charge shattering action; 2 – zone of the active crushing; 3 – zone of the passive impact on the rock mass;  $d_c$  – diameter of the hole (charge), m;  $d_i = 2r_i$  – diameter of the active dust formation zone, m;  $W$  – line of least resistance, m;  $L_s$  – charge length, m;  $L_c$  – borehole depth, m;  $l_s$  – stemming length, m;  $H_y$  – bench height, m;  $W_p$  – line of resistance along bench toe, m;  $a$  – borehole distance from the bench edge, m;  $\alpha$  – angle of the bench slope, degrees;  $W_p$  – the bench width, m;  $L_n$  – overdrill, m.

руется основное количество пылевидных фракций, все процессы развиваются в масштабе времени, определяемом величиной скорости детонации взрывчатого вещества (от 2-3 до 5-6 км/с). В зоне дробящего действия заряда (см. 2 на рис. 1) время развития процесса дробления отбиваемого массива адекватно величине скорости волны напряжений в горной породе (это сотни метров в секунду до 1 км/с).

В зоне же пассивного действия заряда (см. 3 на рис. 1) все процессы развиваются в режиме реального масштаба времени. В рамках этой гипотезы механизм поступления в атмосферу минеральной пыли из зоны активного пылеобразования принимается идентичным известному в газодинамике механизму истечения газов из отверстия (рис. 2) [13].

Развитие процесса поступления, образовавшейся при взрыве отбойной скважины, пылегазовой смеси в атмосферу полностью соответствует содержанию понятия струи газа как формы его движения в окружающем пространстве, заполненном газом с отличающимися от струи параметрами (скоростью, температурой, плотностью и т.д.). Поэтому в рамках современных классификаций выброс техногенной пыли можно рассматривать как осевую двухфазную затопленную струю, способную смешиваться с внешней средой [13].

Тогда общий объем образованной пылегазовой смеси ( $V_{\Sigma}$ ) и ее плотность ( $\rho_{\Sigma}$ ) в момент завершения детонации соответственно составят:

$$V_{\Sigma} = V_r + V_{nr} \text{ [м}^3\text{]},$$

$$\rho_{\Sigma} = \frac{V_{nr}\rho_{nr} + V_r\rho_r}{V_{\Sigma}} \text{ [кг/м}^3\text{]},$$

где  $\rho_{nr}$  и  $\rho_r$  – соответственно, плотность вещества в обоих компонентах пылегазовой смеси, кг/м<sup>3</sup>.

Если принять исходное давление в объеме активного пылеобразования ( $V_x$ ) равным атмосферному ( $P_0 = 1$  атм), то согласно закону Бойля – Мариотта при образовании в этой полости пылегазовой смеси с объемом  $V_{\Sigma}$  и плотностью  $\rho_{\Sigma}$  давление ( $P_x$ ) в ней составит:

$$P_x = \frac{V_{\Sigma}P_0}{V_x} \cdot k_{раз} \text{ [МПа]},$$

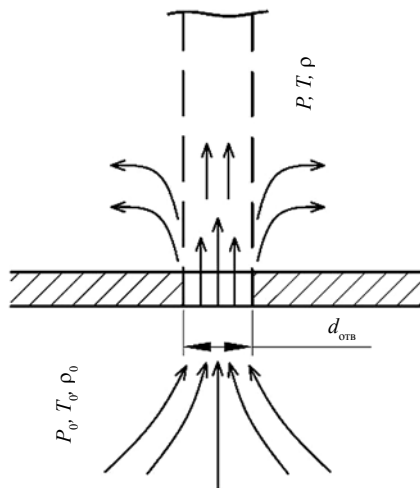


Рис. 2. Типичная конфигурация струи из отверстия в стенке [13]

Fig. 2. A typical configuration of a jet streaming from a hole in the wall [13]

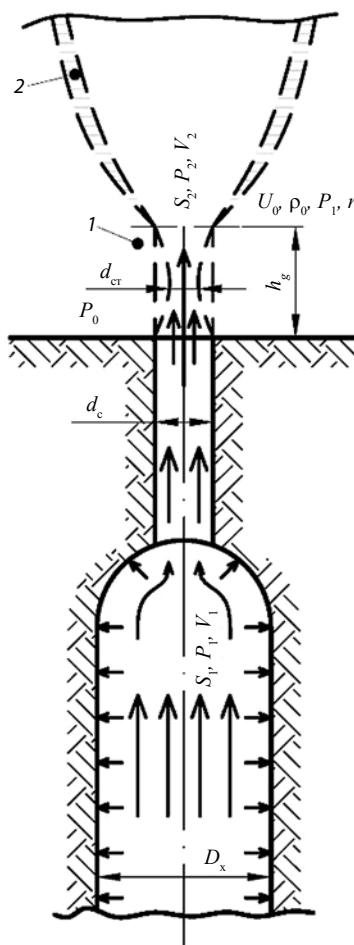


Рис. 3. Типичная схема истечения из «резервуара» ограниченного сечения (несовершенное сжатие струи): 1 – зона «дальнобойности» струи; 2 – область вязкого перемешивания [14]

Fig. 3. Typical scheme of the outflow from a 'reservoir' of a limited cross-section (imperfect jet contraction): 1 – zone of the jet range; 2 – region of viscous mixing [14]

где  $k_{раз} = 0,0981$ , [МПа/атм] – коэффициент размерности.

Значительная задержка во времени третьего этапа предопределяет необходимость использования для описания процесса поступления пылегазовой смеси в атмосферу схемы истечения газов через отверстие из «резервуара» ограниченного объема (рис. 3). В этом случае выброс пылегазовой смеси из полости активного пылеобразования в атмосферу при взрыве единичной скважины можно рассматривать как процесс истечения с несовершенным сжатием струи [14]. Так как расположение отверстия является осесимметричным, то коэффициент сжатия струи ( $\epsilon_c$ ) определяется по формуле Н.Е. Жуковского [13, 14]:

$$\epsilon_c = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - \frac{d_c^2}{D_x^2}},$$

где  $D_x$  и  $d_c$  – соответственно, диаметр полости активного пылеобразования и диаметр скважины, м.

Структура такой струи характеризуется наличием двух динамических зон, отличающихся по характеру взаимодействия с воздушной средой окружающего пространства. Непосредственно от среза отверстия (устья скважины) формируется зона движения пылегазовой смеси, в которой струя сохраняет монолитность. Длину этого участка, обозначаемого как «дальнобойность» струи ( $L_D$ ), определяют из выражения [8, 14]:

$$L_D = D \cdot \epsilon_c \cdot \frac{0,67\rho_0}{P_i} \cdot \frac{U^2}{t^0 + 273,15} \text{ [м]},$$

где  $D$  – диаметр отверстия, м;  $\rho_0$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $P_i$  – давление в пылегазовой смеси, Па;  $U$  – скорость струи, м/с;  $t^0$  – температура окружающей среды, °С.

Физическая модель второй динамической зоны представляет собой круглую осесимметричную вертикальную струю пылегазовой смеси со средней плотностью  $\rho_{\Sigma}$ , свободно смешивающуюся с веществом внешней среды. В этом случае течение пылегазовой смеси в этой среде будет определяться развитием монотонно расширяющейся области вязкого перемешивания, которая являет-

ся струйным пограничным слоем. Для описания данной физической модели образования и перемещения пылегазовой смеси в атмосфере наилучшим образом соответствует методический подход, использованный в работе [15], где движение потока при истечении из отверстия рассмотрено в рамках квазиодномерного приближения, когда параметры и потери энергии струи пропорциональны кинетической энергии, а уравнение Бернулли для сечений до отверстия и после него в общем случае имеет вид:

$$\frac{U^2}{2} + \int_{P_0}^P \frac{dp}{\rho} + \delta \cdot \frac{U^2}{2} = 0,$$

где  $U$  – скорость газа в струе;  $\delta$  – коэффициент сопротивления отверстия;  $P$  и  $\rho$  – давление и плотность газа в выходном сечении.

Для решения поставленной задачи в конкретных условиях необходимо сделать ряд допущений.

1. Газовая смесь подчиняется уравнениям состояния идеального газа  $P/\rho = RT$ .

2. Процесс истечения – адиабатный и описывается уравнениями Лапласа – Пуассона  $P/\rho^k = P_0/\rho_0^k$  при сохранении постоянной температуры ( $T_0 = \text{const}$ ).

3. Все параметры газовой смеси по сечению распределены равномерно, где  $P$  и  $P_0$  – соответственно, абсолютное статическое и полное давление газа;  $\rho$  и  $\rho_0$  – соответственно, статическая и полная плотность газа;  $R = 8314/\mu$  – газовая постоянная;  $\mu$  – молекулярная масса газа;  $T$  – температура газа, °K;  $k$  – показатель адиабаты.

Коэффициент скорости ( $\varphi$ ) в этом случае мало зависит от соотношения сечений отверстия и полости. Его величину можно найти по известной номограмме Альтшуля в зависимости от числа Рейнольдса [13]. Тогда коэффициент сопротивления отверстия ( $\delta$ ) определяется по формуле:

$$\delta = \frac{1 - \varphi^2}{\varphi^2},$$

где  $\varphi$  – коэффициент скорости.

Уравнение Бернулли для сечения полости активного пылеобразования и сжатой части струи истечения пылегазовой смеси в окружающую среду примет вид:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = \frac{P_0}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + \delta \frac{U_2^2}{2g}.$$

После необходимых преобразований получаем величину скорости ( $U_2$ ) движения струи пылегазовой смеси после зоны дальнотойности струи:

$$U_2 = \frac{2}{(1 + \delta)\varepsilon_c} \cdot \sqrt{\frac{P_1 - P_0}{\rho} + \frac{U_1^2}{2}}, \text{ [м/с]}.$$

Так как давление в окружающей среде равно атмосферному ( $P_{\text{ат}}$ ), а в момент завершения детонации заряда пылегазовая смесь еще неподвижна ( $U_1 = 0$ ), то выражение для определения начальной скорости струи ( $U_0$ ) примет окончательный вид:

$$U_0 = \frac{2}{(1 + \delta)\varepsilon_c} \cdot \sqrt{\frac{P_x - P_{\text{ат}}}{\rho_x}}, \text{ [м/с]}.$$

Согласно ГОСТ Р58196-2018 дискретный состав рудничной пыли включает в себя следующие количественные характеристики:

- макроскопическая пыль – частицы крупнее 10 мкм;
- микроскопическая пыль – частицы от 0,25 до 10 мкм;
- ультрамикроскопическая пыль – частицы от 0,01 до 0,25 мкм;
- субмикроскопическая пыль – частицы менее 0,01 мкм.

Рассматриваемая на данном этапе работы минеральная пыль имеет размеры частиц от 100 до 0,25 мкм. Для этого диапазона крупности формирование собственно пылегазового облака можно представить в виде трансформации «монолитного» участка струи после ее выхода из скважины со скоростью  $U_0$  в расширяющуюся осесимметричную вертикальную пылегазовую струю, на внешней поверхности которой развивается слой вязкого перемешивания с атмосферным воздухом – пылегазовый факел. На начальной стадии своего существования это атмосферное новообразование представляет собой условный объект, имеющий высокую плотность и температуру. Он имеет незначительный размер, соизмеримый с «дальнотойностью» струи [14], но характеризуется большим запасом как кинетической, так и тепловой энергии. На втором этапе развития пылегазовое облако можно представить в виде атмосферного объекта, постепенно теряющего свою динамическую оболочку, а также плотность и температуру. В конечном состоянии этот объект обретает значительные геометрические размеры и температуру, равную температуре окружающей среды. Третий этап динамики пылегазовой струи характеризуется началом формирования пылегазового облака взрыва с собственной тепловой эволюцией, определяемой торможением и рассеиванием в атмосфере компонентов смеси [14].

Условная граница между вторым и третьим этапами определяет значение основного экологического параметра этого техногенного новообразования – высоты подъема минеральной пыли над поверхностью рабочей площадки уступа карьера.

Краткий анализ выполненных исследований этого вопроса [16, 17, 18, 19, 20] показал, что их конечные результаты имеют весьма противоречивый характер, затрагивают много частных вопросов, но не дают единого перехода к решению вопроса о геометрических параметрах пылегазовых выбросов при ведении взрывной отбойки руд и пород. При этом, существенное значение для настоящей работы имеет вывод о том, что продолжительность и характер развития эпицентров практически не связаны с метеорологическими параметрами атмосферы. Приняв во внимание эти выводы, рассмотрим возможности определения высоты подъема пылегазовой струи до превращения ее в пылегазовое облако.

Согласно второму закону Ньютона элементарный импульс силы всегда равен элементарному изменению количества движения. Тогда уравнение движения частицы запишется в виде:

$$m_x a = \Sigma F,$$

где  $m_x$  – масса частицы, кг;  $a$  – ускорение ее движения, м/с<sup>2</sup>;  $\Sigma F$  – сумма сил, действующих на частицу, Н.

Рассмотрим силы, действующие одновременно на единичную минеральную частицу в пылегазовой струе (рис. 4):

1. Сила сопротивления воздуха ( $F_b$ ):

$$F_b = 0,5\rho_b k_r U_i^2 S_i \text{ [Н]},$$

где  $\rho_b$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $k_r$  – коэффициент сопротивления, определяемый числом Рейнольдса,  $R_b$ ;  $S_i$  – площадь сечения частицы, м.

Для стоксовских частиц, осаждающихся в атмосфере,  $k_r = 24/R_b$ . В нашем случае величина  $R_b$  определяется из выражения:

$$R_b = \frac{\rho_b U_0 D_i}{\mu_b},$$

где  $\mu_b = 18,2 \cdot 10^{-6}$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с. После всех подстановок и преобразований имеем:

$$F_b = 3\pi\mu_b D_i U_i.$$

Сила аэродинамического сопротивления частицы направлена навстречу вектору скорости ее движения. Так как в начале второго этапа развития пылегазового облака скорость частицы равна  $U_0$ , а на завершающей стадии равна нулю, то для простоты примем среднюю скорость ( $U_{cp}$ ) подъема частицы равной  $U_0 / 2 = U_{cp}$ . Тогда приведенное выше выражение примет окончательный вид:

$$F_b = 1,5\pi D_i U_0 \mu_b.$$

Сила тяжести ( $F_t$ ) действует на частицу против вектора скорости:

$$F_t = m_i g.$$

Сила, обусловленная разностью температур взрывных газов и окружающего воздуха, формирующая под действием разности температур продуктов детонации ВВ и окружающего воздуха ( $T_2$ ) конвективный поток в пылегазовом факеле, действует на частицу в направлении вектора скорости, вызывая их перемещение вверх за счет силы лобового давления ( $F_d$ ) [21].

В общем виде величина этой силы определяется из выражения:

$$F_d = \Delta\rho g h S_c \text{ [Н]},$$

где  $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$  – разница между плотностью газов детонации и воздуха, Н/м<sup>3</sup>;  $h$  – высота подъема пылегазовой смеси, м;  $S_c$  – площадь поперечного сечения частицы, м<sup>2</sup>.

Величина  $\Delta\rho$  определяется как разница между плотностью продуктов детонации ( $\rho_2$ ) в конечной точке формирования пылегазового факела при текущей температуре воздуха  $T_2$  и плотностью продуктов детонации ( $\rho_1$ )

в начальной точке формирования пылевого факела (рис. 5) при температуре выброса продуктов детонации  $T_1$ :

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = \rho_b \frac{P_2}{1,013 \cdot 10^5} \cdot \frac{293}{T_2} - \rho_0 \frac{P_1}{1,013 \cdot 10^5} \cdot \frac{293}{T_1},$$

где  $\rho_0$  и  $\rho_b$  – соответственно, плотность продуктов детонации и воздуха при нормальном давлении, кг/м<sup>3</sup>;  $P_1$  и  $P_2$  – соответственно, статическое давление продуктов детонации и атмосферное давление при температурах  $T_1$  и  $T_2$ , Па.

Поскольку статическое давление ( $P_1, P_2$ ) по мере развития процесса формирования пылегазового факела быстро приближается к атмосферному ( $P_0$ ), то после подстановки всех значений окончательно получим выражение:

$$F_d = \frac{293\pi g}{4 \cdot 1,013 \cdot 10^5} H_n D_i^2 P_0 \left( \frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right) \text{ [Н]}.$$

На конечной стадии развития пылегазового факела количество движения единичной пылевой минеральной частицы становится равным нулю. Поэтому исходное уравнение движения частицы примет вид:

$$m_x a = F_d - F_t - F_b = 0.$$

Отсюда следует:

$$F_d = F_t + F_b.$$

После подстановки значений всех членов этого уравнения получаем:

$$\begin{aligned} \frac{293\pi g}{4 \cdot 1,013 \cdot 10^5} H_n D_i^2 P_0 \left( \frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right) &= \\ &= m_i g + 1,5\pi D_i U_0 \mu_b. \end{aligned}$$

Отсюда следует:

$$\begin{aligned} H_n &= \frac{m_i g + 1,5\pi D_i U_0 \mu_b}{\frac{293\pi g}{4 \cdot 1,013 \cdot 10^5} \pi g D_i P_0 \left( \frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right)} = \\ &= \frac{1,33 D_i^2 g + 1,5 U_0 \mu_b}{40,5 \cdot 10^7 g P_0 \left( \frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right)} \text{ [м]}. \end{aligned}$$

Общая высота ( $H_\Sigma$ ) пылегазового факела, с учетом размера зоны устойчивой «дальнобойности» струи ( $L_D$ ), составит:

$$H_\Sigma = H_n + L_D.$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная гибридная модель начальной стадии формирования пылегазового облака технологического взрыва на карьере, с одной стороны, учитывает все основные особенности применяемой технологии взрывной отбойки на открытых горных работах, а с другой, дает возможность достаточно точно определить количество техно-

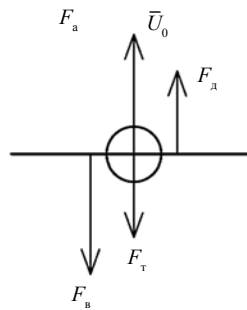


Рис. 4. Схема сил, определяющих движение единичной частицы [21]

Fig. 4. A pattern of forces defining the motion of a single particle [21]

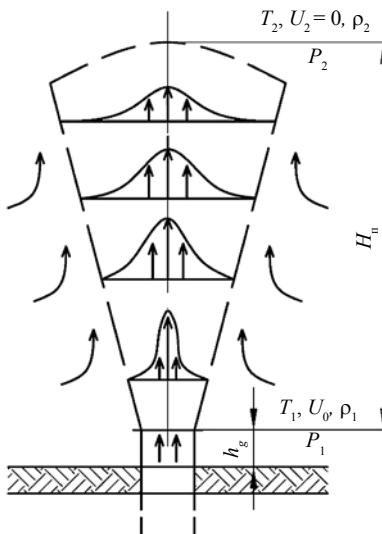


Рис. 5. Схема формирования пылегазового выброса при взрыве скважины [21]

Fig. 5. A schematic diagram of dust and gas emission forming during a borehole blast [21]

логической пыли, поступающей в воздушные потоки и определяющей впоследствии интенсивность экологического воздействия на элементы окружающей природной среды.

### Список литературы • References

1. Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 1999. 335 с.
2. Виноградов Б.С. Прикладная газовая динамика. М.: Транспортная компания, 2021. 325 с.
3. Истечение газов с различными показателями адиабаты / Г.А. Филиппов, Г.А. Салтанов, В.А. Сивобород и др. // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1982. № 1. С. 121-126.  
Filippov G.A., Saltanov G.A., Sivoborod V.A., Kosolapov Yu.S. Flow of gases with different adiabatic parameters. *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Energetika & Transport.* 1982;(1):121-126. (In Russ.).
4. Amartey Ernest Nii Laryea, Onibudo Oluwasegun Oluwaseun, Anamor Samuel Kofi, Nkansah Benjamin Oduro. Dust Sources and Impact: A Review. *North American Academic Research.* 2022;5(9):17-37. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7068922>.
5. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974. 592 с.
6. Deng Y., Wu H., Zhao T. et al. Microscopic characteristics and sources of atmospheric dustfall in open-pit mining coal resource-based city in the arid desert area of Northwest China. *Sci Rep.* 2024;(14):6272. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56892-8>.
7. Pedro Trechera, Teresa Moreno, Patricia Cordoba, Natalia Moreno, Xinguo Zhuang, Baoqing Li, Jing Li, Yunfei Shangguan, Ana Oliete Dominguez, Frank Kelly, Xavier Querol. Comprehensive evaluation of potential coal mine dust emissions in an open-pit coal mine in Northwest China. *International Journal of Coal Geology.* 2021;(235):103677. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103677>.
8. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1970. 568 с.
9. Лухтура Ф.И. О потерях энергии при течении газа в соплах. Часть I // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2004. Вып. 14. С. 287-292.  
Luhtura F.I. On energy losses during gas flow in nozzles. Part I. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2004;(14):287-292. (In Russ.).
10. Лухтура Ф.И. О потерях энергии при течении газа в соплах. Часть 2 // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2005. Вып. 15. С. 167-172.  
Luhtura F.I. On energy losses during gas flow in nozzles. Part II. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2005;(15): 167-172. (In Russ.).
11. Лухтура Ф.И. О потерях энергии при течении газа в соплах. Часть 3 // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2007. Вып. 17. С. 187-185.  
Luhtura F.I. On energy losses during gas flow in nozzles. Part III. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2007;(17):187-185. (In Russ.).
12. О критических режимах истечения перегретого и влажного пара из сопел, щелей и отверстий / М.Е. Дейч, В.К. Шанин, В.И. Соломко и др. // Теплоэнергетика. 1973. № 4. С. 83-85.  
Deitch M.E., Shanin V.K., Solomko V.I., Doroshenko V.A. On critical modes of superheated and wet vapour flow from nozzles, slots and orifices. *Teploenergetika.* 1973;(4):83-85. (In Russ.).
13. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Ч. 1. М.: Наука, 1991. 600 с.
14. Зуев Ю.П., Лепешинский И.А. Особенности распространения газовых и двухфазных коаксиальных струй // Математическое моделирование. 2016. Т. 28. № 12. С. 95-106.  
Zuev Yu.P., Lepeshinsky I.A. Features of spread of gas and two-phase double-circuit coaxial jets. *Matematicheskoe modelirovanie.* 2016;28(12):95-106. (In Russ.).
15. Лухтура Ф.И. К вопросу об установившемся режиме истечения газа из осесимметричных отверстий // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2015. Вып. 30. Т. 1 С. 213-225.  
Lukhtura F.I. On the question of set gas expiration through axisymmetrical holes and nozzles. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2015;30(1):213-225. (In Russ.).
16. Ляхов Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974. 192 с.
17. Тюрин М.П., Бородина Е.С. Газодинамика. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2018. 147 с.
18. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Ч. 1. М.: Наука, 1991. 600 с.
19. Fenain M., Dutouquet L., Solignac J.-L. Calcul des performances d'une tuyere propulsive convergente. Comparaison avec l'expérience. *Recherche Aerospaciale.* 1974;(5):261-276.
20. Peng Qiu, Zhongwen Yue, Yang Ju, Jian Zhao. 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>.
21. Голинько В.И., Лебедев Я.Я., Литвиненко А.А., Муха О.А. Аэрология горных предприятий. Д.: НГУ, 2015. 206 с.
22. Калиева К.Б., Ишкенов Б.Т. Воздействие на окружающую среду открытых горных работ // Международный научный журнал «Инновационная наука». 2017. № 11. С. 33-37.  
Kalieva K.B., Ishkenov B.T. Environmental impact of open-pit mining operations. *Innovatsionnaya nauka.* 2017; (11):33-37. (In Russ.).

### Authors Information

**Zakharov V.N.** – Doctor of Engineering Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Director of the Mel'nikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, 111020, Russian Federation, e-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru

**Galchenko Yu.P.** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Researcher of the Mel'nikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, 111020, Russian Federation, e-mail: schtrek33@mail.ru

**Fedotenko V.S.** – Doctor of Engineering Sciences, Deputy Director for research, the Mel'nikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, 111020, Russian Federation, e-mail: victorfedotenko@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.10.2024

Принята к публикации: 31.10.2024

### Paper info

Received September 15, 2024

Reviewed October 21, 2024

Accepted October 31, 2024