

УДК 523.6

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ НА ФОРМИРОВАНИЕ И ПОДЪЕМ ГАЗОПЫЛЕВОГО ОБЛАКА ТРОТИЛОВОГО ВЗРЫВА В СКВАЖИНЕ

© 2025 г. В. В. Шувалов*, В. М. Хазинс, С. П. Соловьев

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: shuvalov@idg.ras.ru

Методами компьютерного моделирования рассматриваются образование и подъем газопылевого облака при проведении тротиловых взрывов массой 1 т каждый в скважинах, расположенных в центре и вершинах правильного шестиугольника. Распределение выбрасываемых частиц грунта по размерам описывается формулой Розина–Раммлера. В эту формулу входят два неизвестных параметра, которые определяются экспериментально и характеризуют особенности массива, в котором производятся взрывы. В работе исследуется влияние этих параметров на высоту подъема газопылевого облака и массу содержащейся в нем пыли.

Ключевые слова: взрыв, газопылевое облако, численное моделирование, гранулометрический состав.

Для цитирования: В. В. Шувалов, В. В., Хазинс, В. М., Соловьев С. П. Влияние гранулометрического состава пылевых частиц на формирование и подъем газопылевого облака тротилового взрыва в скважине // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 4. С. 22–29. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_4_22

Введение

При добыче полезных ископаемых в открытых карьерах с помощью взрывов в атмосферу выбрасывается большое количество пыли. Образование и подъем газопылевого облака после взрыва (или серии взрывов) в скважинах в большой степени определяется тем, как дробится порода и каково распределение выбрасываемых частиц грунта по размерам. При численном моделировании выброса и распространении пыли обычно используются либо экспериментальные данные, полученные при проведении взрывов, либо те или иные модельные распределения. Так, в работе [Шувалов и др., 2021] при моделировании взрывов в скважине использовалось степенное распределение частиц по размерам, которое часто используется при моделировании ударных явлений [Мелош, 1994]:

$$N(m) = am^{-b} \quad (1)$$

где $N(m)$ – количество частиц массой больше m , показатель степени b меняется от 0.4–0.6 при однократном разрушении до величины, близкой к единице при многократном. Константа a определяется массой рассматриваемого объема. Кроме того, для полной определенности распределения (1) необходимо задать максимальный размер кусков x_{\max} .

При рассмотрении взрывов чаще используется распределение Розина–Раммлера [Ефремов и др., 1990; 1992]:

$$m^+(x) = m_0 \exp\left(-\left(x/x_0\right)^n\right), \quad (2)$$

где $m^+(x)$ – масса кусков, размер которых превышает x , m_0 – общая масса исследуемой породы, x_0 и n – параметры распределения. Применительно к массовым взрывам на железорудных карьерах, где

удельный расход ВВ составляет приблизительно $1 \text{ кг}/\text{м}^3$, параметры в распределении Розина–Раммлера имеют следующие значения: $x_0 = 0.6 \text{ м}$ и $n = 0.8$ [Ефремов и др., 1992].

Нетрудно показать, что для частиц, которые много меньше x_0 или x_{\max} , распределения (1) и (2) совпадают. В частности распределение (1), использованное в расчетах [Шувалов и др., 2021], соответствует распределению (2) с $x_0 = 0.2 \text{ м}$ и $n = 1.0$. Различие между распределениями для крупных частиц не существенны, если мы рассматриваем образование и подъем газопылевого облака потому, что крупные частицы слабо взаимодействуют с воздухом, быстро улетают на большие расстояния и выпадают на поверхность.

Цель данной работы состоит в том, чтобы провести расчеты, аналогичные [Шувалов и др., 2021] с распределением выбрасываемых частиц по закону Розина–Раммлера, и посмотреть, как результаты расчета зависят от констант x_0 и n .

Метод расчета и начальные данные

Для численного расчета взрывов в скважине была использована численная модель взрыва в скважине [Шувалов и др., 2021], реализованная на основе гидродинамической программы SOVA [Shuvalov, 1999]. Особенностью модели является возможность превращения выброшенного из воронки взрыва грунта в дискретные частицы (пыль и камни) и расчета движения этих конденсированных частиц и их взаимодействия с газовым потоком в рамках уравнений движения многофазных сред [Nigmatulin, 1990]. При расчете образования воронки учитывалось влияние сухого трения на движение разрушенных ударной волной горных пород и, в отличие от [Шувалов и др., 2021], сцепление по модели аналогичной, описанной в [Melosh, Ivanov, 1999].

Термодинамические свойства ВВ описывались полуэмпирическим уравнением состояния продуктов детонации тротила [Фингер и др., 1981], для воздуха использовались таблицы [Кузнецов, 1965], для грунта – табличное уравнение состояния кварца, полученное по программе ANEOS [Tompson, Lauson, 1972]. Распределение плотности и давления воздуха по высоте в равновесной атмосфере Земли задавалось согласно модели CIRA (COSPAR International Reference Atmosphere, <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/atmospheric/cira/cira86/>).

В процессе расчета вещество, выбрасываемое из расширяющейся скважины на высоту более одного метра, заменялось дискретными частицами. Частицы равномерно распределялись в объеме, занимаемом замененным веществом, их скорость равна скорости замененного вещества, суммарная масса частиц равна массе замененного вещества. Распределение частиц по размерам задавалось по формуле (2). Для аккуратного описания этого распределения вводилась 71 группа частиц с размерами от 2×10^{-7} до 2 м с равномерным шагом по логарифму размера. Полное число частиц – около 500000 (около 7000 в каждой группе). Это число выбиралось так, чтобы в области расчетной сетки, занимаемой облаком, в каждой ячейке было хотя бы несколько частиц.

Были рассмотрены четыре варианта со значениями x_0 , равными 0.2 и 0.6 м, и значениями n , равными 0.8 и 1.0. Дальнейшее движение частиц определяется торможением в поле тяжести и обменом импульсом и энергией с воздухом. Подробности описаны в работах [Shuvalov, 1999; Shuvalov et al., 2023]. Модель ранее использовалась для расчетов тротилового взрыва мощностью 500 т [Khazins et al., 2020], взрывов на Лебединском и Ситовском карьерах [Хазинс и др., 2023]. Полученные результаты хорошо коррелируют с имеющимися экспериментальными данными.

Как и в работе [Хазинс и др., 2023] мы рассматривали систему из семи взрывов, расположенных в центре и вершинах правильного шестиугольника. На начальной стадии считался одиночный взрыв в скважине. После того, как горизонтальный размер облака продуктов ВВ и мелких частиц (которые движутся со скоростью газа) сравнивается с расстоянием между скважинами, масса ВВ и выброшенных частиц увеличивается в семь раз, а горизонтальные размеры – в $\sqrt{7}$ раз.

Результаты расчетов

На рис. 1 приведены массы частиц в газопылевом облаке в каждой из 71 групп через секунду после взрыва в семи скважинах. В этот момент выброс частиц уже закончился, а осаждение в поле тяжести еще не началось. Во всех вариантах (с разными значениями констант x_0 и n) полная масса выброшенной в атмосферу пыли одинакова, отличаются только распределения по размерам. В точках $x = x_0$ все кривые имеют максимум. Увеличение x_0 приводит к сдвигу кривой вдоль оси x и равномерному уменьшению массы пыли при всех $x \ll x_0$. Увеличение n тоже приводит к уменьшению массы мелкодисперсной пыли, но неравномерному. Чем меньше размер частиц x , тем больше различие между массами этих частиц при разных n .

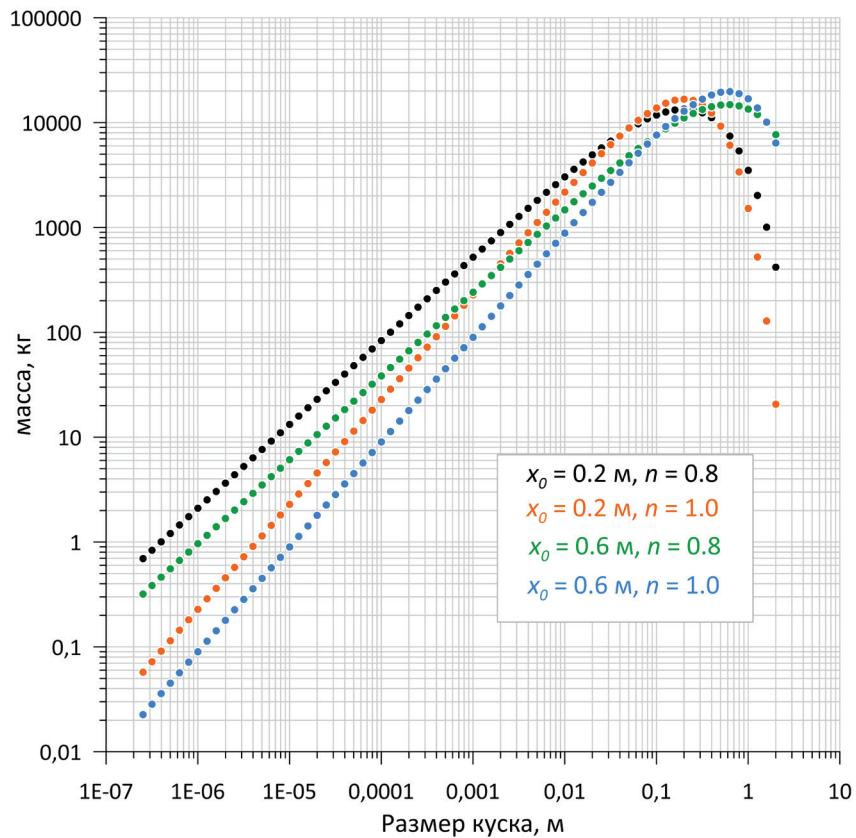


Рис. 1. Распределения по размерам массы частиц в газопылевом облаке через одну секунду после взрыва в семи скважинах для вариантов расчета с разными значениями параметров x_0 и n

На рис. 2 для всех вариантов показаны распределения частиц разного размера в газопылевом облаке через 5 с после взрыва. К этому моменту сформировалось плавучее облако-струя, состоящее из разреженного газа и мелкодисперсных частиц размером менее 100 мкм, которое быстро поднимается вверх. Скорость этих частиц близка к скорости газового потока. Скорость более крупных частиц заметно отличается от скорости газа. Они испытывают меньшее сопротивление воздуха и в первые секунды поднимаются за счет инерции выше мелких частиц. В дальнейшем крупные частицы тормозятся и постепенно осаждаются в поле тяжести. Чем меньше масса мелкодисперсных частиц, тем выше поднимается газопылевое облако.

На рис. 3 показаны аналогичные распределения через две минуты после взрыва. К этому моменту подъем газопылевого облака закончился. Практически все частицы размером более 200 мкм упали на землю. Заметно высотное расслоение оставшихся частиц, пылинки размером более 10 мкм сконцентрированы в нижней части облака. В этот момент в облаке содержится 418 кг

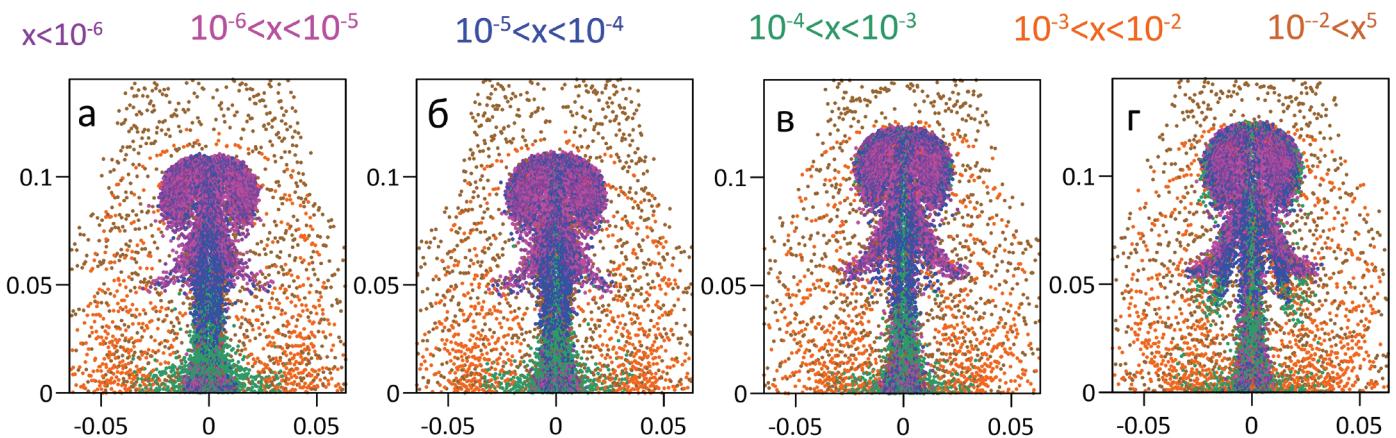


Рис. 2. Распределение конденсированных частиц в газопылевом облаке через 5 с после взрыва для разных вариантов: а – $x_0 = 0.2$ м, $n = 0.8$, б – $x_0 = 0.2$ м, $n = 1.0$, в – $x_0 = 0.6$ м, $n = 0.8$, г – $x_0 = 0.6$ м, $n = 1.0$. Точки разного цвета соответствуют конденсированным частицам разного размера r

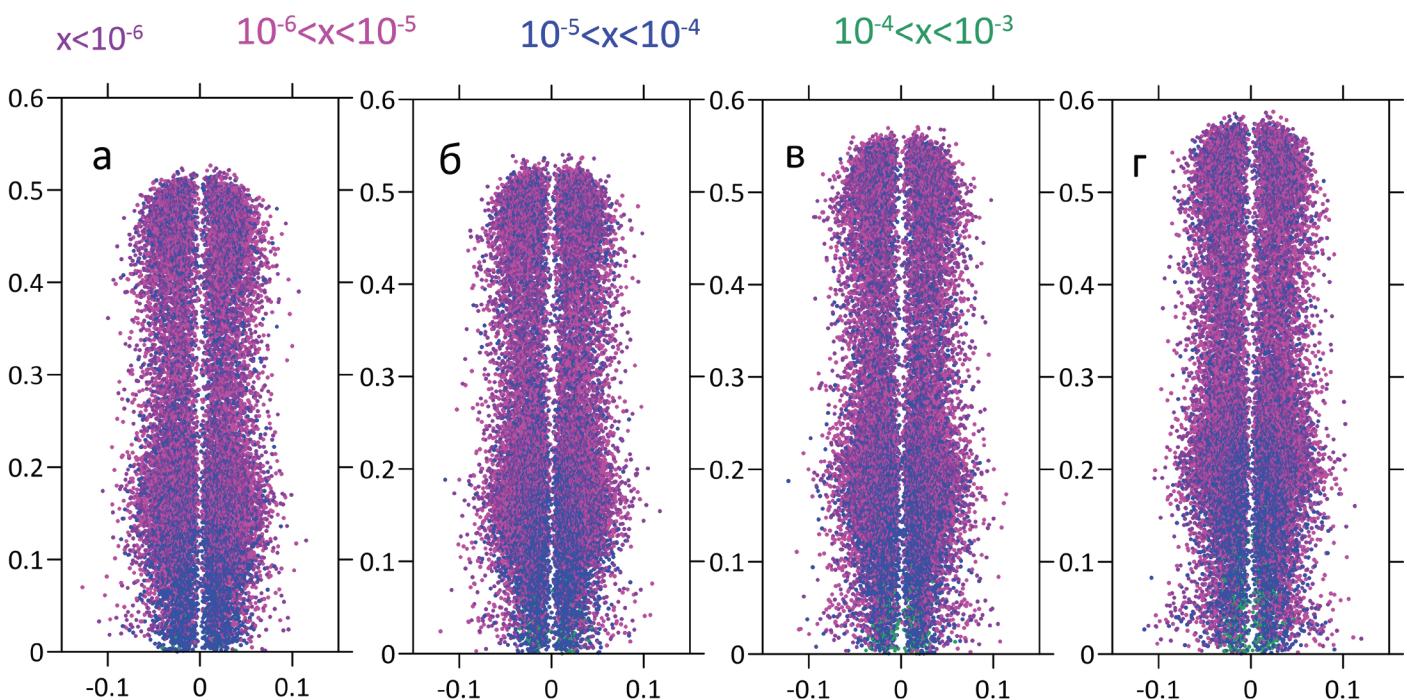


Рис. 3. Распределение конденсированных частиц в газопылевом облаке через 2 мин после взрыва для разных вариантов: а – $x_0 = 0.2$ м, $n = 0.8$, б – $x_0 = 0.2$ м, $n = 1.0$, в – $x_0 = 0.6$ м, $n = 0.8$, г – $x_0 = 0.6$ м, $n = 1.0$. Точки разного цвета соответствуют конденсированным частицам разного размера r

пыли при $x_0 = 0.2$ м, $n = 0.8$, 127 кг пыли при $x_0 = 0.2$ м, $n = 1.0$, 251 кг пыли при $x_0 = 0.6$ м, $n = 0.8$ и 54 кг пыли при $x_0 = 0.6$ м, $n = 1.0$. Несмотря на довольно сильное (почти на порядок) различие массы пыли в облаке, высота подъема изменяется не сильно, в пределах 10–15%.

На рис. 4 приведены массы частиц в газопылевом облаке в каждой из 71 групп через две минуты после взрыва. Видно, что в процессе подъема газопылевого облака масса мелкодисперсной пыли (< 100 мкм) изменилась не сильно, уменьшилась на 15–30%. Частицы размером более 200 мкм, как уже говорилось выше, практически полностью выпали на поверхность земли.

На рис. 5 приведены для всех вариантов распределения массы пыли по высоте через 2 мин после взрыва. Отметим, что увеличение показателя степени в распределении (1) с 0.8 до 1.0 заметно влияет

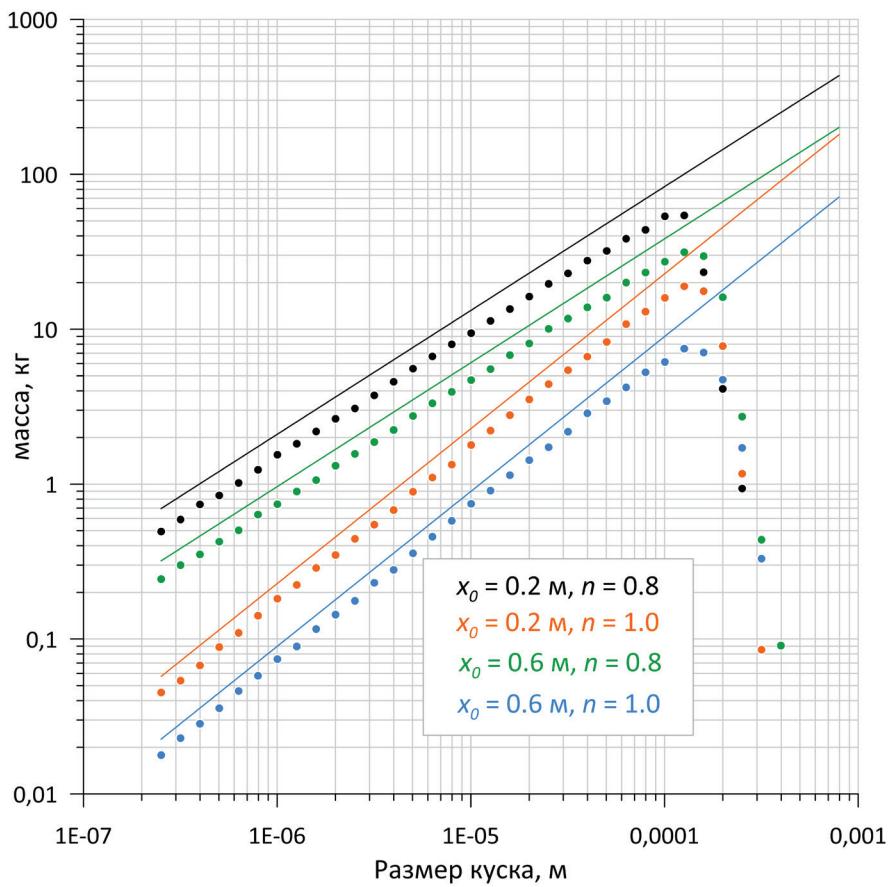


Рис. 4. Точками показаны распределения по размерам массы частиц в газопылевом облаке через 2 мин после взрыва в семи скважинах для вариантов расчета с разными значениями параметров x_0 и n . Тонкими линиями показаны те же распределения через секунду после взрыва

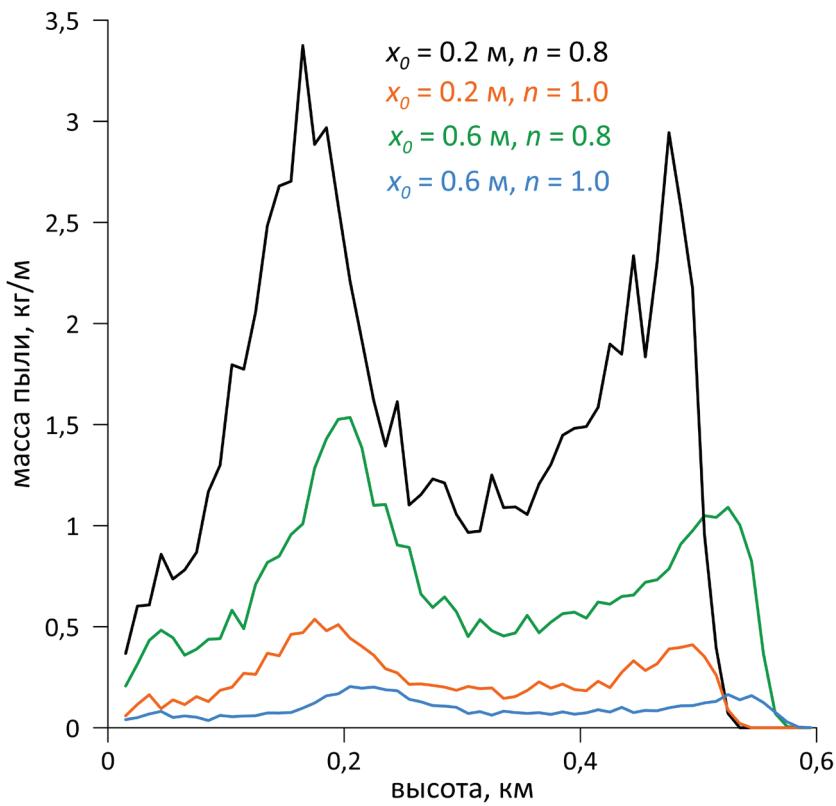


Рис. 5. Распределение массы пыли в облаке по высоте через 2 мин после взрыва в семи скважинах для вариантов расчета с разными значениями параметров x_0 и n

на массу пыли в облаке в этот момент, уменьшает ее в 3.3 раза для $x_0 = 0.2$ м и в 4.7 раза для $x_0 = 0.6$ м, но почти не влияет на высоту подъема облака. При увеличении x_0 с 0.2 до 0.6 м масса пыли уменьшается меньше, в 1.7 раза при $n = 0.8$ и в 2.4 раза при $n = 1.0$, но высота подъема облака заметно увеличивается. Причем это увеличение заметно уже через 5 с после взрыва (см. рис. 2). Объясняется это тем, что вылетающие из скважины продукты детонации заметно тормозятся частицами размером от 100 мкм до 1 см. На рис. 2 хорошо видно, что газопылевое облако (состоящее из продуктов детонации, разреженного воздуха и частиц размером менее 100 мкм) поднимается сквозь поток осаждающихся крупных (> 100 мкм) частиц. При увеличении x_0 масса частиц в диапазоне от 100 мкм до 1 см заметно уменьшается и, соответственно, уменьшается связанное с ними замедление подъема газопылевого облака. При увеличении n заметно уменьшается масса мелкодисперсных частиц (< 100 мкм), содержащихся в поднимающемся облаке, но слабо меняется масса частиц в диапазоне от 100 мкм до 1 см, которые тормозят подъем газопылевого облака. При этом массовая концентрация мелкодисперсной пыли даже в самом массивном газопылевом облаке при $x_0 = 0.2$ м и $n = 0.8$ не превышает 10^{-4} , поэтому она слабо влияет на плавучесть и подъем этого облака.

Заключение

Проведены расчеты тротиловых взрывов в семи скважинах, расположенных в центре и вершинах правильного шестиугольника с разными распределениями выброшенных частиц по размерам. Это распределение описывалось формулой Розина–Раммлера (2) с разными показателями степени n и характерного размера куска x_0 . Показано, что увеличение n слабо влияет на высоту подъема облака, но заметно уменьшает массу газопылевого облака. Увеличение x_0 также уменьшает массу газопылевого облака, но при этом и заметно увеличивает высоту его подъема. В целом можно сказать, что при изменении в разумных пределах параметров x_0 и n масса пыли в газопылевом облаке может изменяться на порядок, а высота его подъема на 10–20%.

Благодарности

Авторы благодарны анонимным рецензентам за внимательное прочтение работы и полезные замечания.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012700798-8).

Список литературы

- Ефремов Э.И., Петренко В.Д., Пастухов А.И. Прогнозирование дробления горных массивов взрывом. К. : Наукова думка. 1990. – 118 с.
- Ефремов Э.И., Петренко В.Д., Белоконь М.П. Экспериментальные исследования эффективности методов снижения пылегазовых выбросов при массовых взрывах на карьерах: Первая междунар. конф. «Буровзрывные работы в строительстве». М. 1992. С. 14–21.
- Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М. : Машиностроение. 1965. – 463 с.
- Мелош Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М. : Мир. 1994. – 336 с.
- Фингер М., Ли Е. и др. Влияние элементарного состава на детонационные свойства ВВ. В сб. Детонация и взрывчатые вещества. М. : Мир. 1981. С. 52–75.
- Хазинс В.М., Шувалов В.В., Соловьев С.П. Численное моделирование эволюции в атмосфере пыли, образующейся в результате взрывов в скважинах горнорудного карьера // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 2. С. 63–80. https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_2_63
- Шувалов В.В., Хазинс В.М., Соловьев С.П. Численное моделирование тротилового взрыва в скважине // Динамические процессы в геосферах. 2021. № 13. С. 140–147. https://doi.org/10.26006/22228535_2021_1_140

Khazins V.M., Shuvalo, V.V., Soloviev S.P. Numerical Modeling of Formation and Rise of Gas and Dust Cloud from Large Scale Commercial Blasting // Atmosphere. 2020. Vol. 11 (1112). <https://doi.org/10.3390/atmos11101112>

Melosh H.J., Ivanov B.A. Impact crater collapse // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1999. Vol. 27. P. 385–425. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.earth.27.1.385>

Nigmatulin R.I. Dynamics of Multiphase Media; Hemisphere Publishing Corporation: New York. NY. USA. 1990. Vol. 2. P. 507.

Shuvalov V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect // Shock Waves. 1999. Vol. 9. P. 381–390. <https://doi.org/10.1007/s001930050168>

Shuvalov Valery, Khazins Valery, Krasheninnikov Alexey, Soloviev Sergey. Formation and evolution of a dust cloud as a result of TNT detonation in a borehole: numerical simulation // Mining. 2023. Vol. 23. P. 261–270. <https://doi.org/10.3390/mining3020016>

Tompson S.L., Lauson H.S. Improvements in the Chart D Radiation-Hydrodynamic CODE III: Revised Analytic Equation of State; Report SC-RR-71 0714. Sandia National Laboratory: Albuquerque. NM. USA. 1972. – 121 p.

**AN INFLUENCE OF DUST PARTICLE SIZE DISTRIBUTION
ON THE FORMATION AND RISE OF GAS AND DUST CLOUD RESULTING
FROM TNT EXPLOSION IN A WELL**

© 2025 V. V. Shuvalov*, V. M. Khazins, S. P. Soloviev

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: shuvalov@idg.ras.ru*

Computer modeling is used to examine the formation and rise of a gas and dust cloud after one-ton TNT explosions in boreholes located at the center and vertices of a regular hexagon. The size distribution of ejected soil particles is described by the Rozin–Rammler formula. This formula includes two unknown parameters, determined experimentally and characterizing the specific features of rocks in which the explosions are performed. The study examines the influence of these parameters on the rise of the gas-dust cloud and the mass of dust contained within it.

Keywords: explosion, gas-dust cloud, numerical modeling, particle size distribution.