

УДК 622.271: 504.3.054

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ В АТМОСФЕРЕ ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЗРЫВОВ В СКВАЖИНАХ ГОРНОРУДНОГО КАРЬЕРА

© 2023 г. В. М. Хазинс^{1, *}, В. В. Шувалов¹, С. П. Соловьев¹¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: v_hazins@yahoo.com

Описывается численная модель для расчета взрывов ВВ в скважинах, которая предусматривает возможность превращения выброшенного из воронки взрыва вещества в дискретные частицы (пыль и камни) и расчета движения этих конденсированных частиц и их взаимодействия с газовым потоком в рамках уравнений движения многофазных сред. Приводятся результаты расчета нескольких взрывов ВВ массой 1000 кг в скважинах глубиной 15 м, демонстрирующие образование и эволюцию газопылевого облака, изменение со временем массы частиц разного размера в воздухе и их распределение по пространству. Проведен численный анализ поведения в поле ветра газопылевого облака после завершения его подъема, и получена в первом приближении зависимость поверхностной концентрации мелкодисперсных частиц от времени на расстояниях до нескольких километров от борта карьера. Согласно расчетам, в условиях рассмотренной задачи превышение предельно допустимой концентрации взвешенных частиц в атмосфере на расстояниях, превышающих 500 м от борта карьера по ветру, достигнуто не будет.

Ключевые слова: Тротиловый взрыв, дискретные частицы, диссипация пыли, ветер, численное моделирование.

Для цитирования: Хазинс В.В., 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. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_2_63

Введение

Минерально-сырьевой комплекс является одним из значимых источников техногенного загрязнения среды обитания твердыми частицами, которые образуются в процессе разрушения горной породы. По имеющимся оценкам [Викторов, 2015; Трубецкой, Галченко, 2015], уже в начале 21 века из литосферы ежегодно добывалось от сотен миллиардов до триллиона тонн твердого вещества, при этом основная доля переработанной горной массы приходится на добычу полезных ископаемых открытым способом. Выбросы твердых частиц в атмосферу, в том числе и особо вредных для здоровья – долгоживущих в атмосфере микрочастиц – непосредственно связаны с общим объемом переработанной горной массы открытых карьеров [Адушкин, Соловьев, 2021]. Среди технологических процессов, связанных с добычей крепких горных пород на открытых карьерах и являющихся источниками пыли, особо выделяется взрывная отбойка горной массы, на долю которой приходится 50% и более от общего количества выбрасываемых в атмосферу твердых частиц [Адушкин и др., 2010]. Интенсификация горных работ приводит к увеличению общей массы применяемых взрывчатых веществ (ВВ) и, в частности, одновременно используемого ВВ. Так, на карьерах Курской магнитной аномалии количество помещаемого в скважины ВВ при массовом взрыве возросло до 2–3 тысяч т на один взрыв [Угаров и др., 2017]. Соответственно увеличивается область загрязнения атмосферы и прилегающих к карьере территорий твердыми частицами в результате применения взрывной технологии.

Достаточно мощный взрыв в скважине с массой заряда, превышающей 1 т, приводит к формированию облака пыли, которое может подниматься выше дневной поверхности карьера [Шувалов и др., 2021;

Shuvalov et al., 2023]. Не исключено, что одновременный подрыв ВВ в близко расположенных друг от друга скважинах, как это обычно бывает при массовых взрывах, приведет к увеличению высоты верхней кромки облака взрыва. Поэтому часть облака пыли попадает под действие ветра независимо от процессов, протекающих внутри карьера. Экспериментально определить массу пыли, содержащейся в пылевых облаках взрыва, распределение пылевых частиц по размерам, перенос и осаждение пыли чрезвычайно трудно. Теоретическое моделирование процессов, сопровождающих формирование, подъем и распространение в поле ветра облака пыли, также крайне непростая задача, но оставляет существенно больше возможностей. Как отмечается в [Shuvalov et al., 2023], моделирование даже отдельных этапов этого процесса сопряжено со значительными трудностями, связанными как с недостатком знаний о параметрах физических процессов, так и со сложностью реализации численных моделей. Так, стадию формирования частиц при взрыве в скважине и перераспределения этих частиц по размерам в процессе подъема облака пыли в численном моделировании обычно пропускают, задавая на основе экспериментальных данных гипотетический источник частиц [Silvester et al., 2009; Torno et al., 2011; Joseph et al., 2018].

В процессе разработки физико-математической модели, которая должна последовательно описывать все этапы выноса микрочастиц в атмосферу, начиная со стадии разрушения горной породы до стадии подъема пылегазового облака и его переноса в атмосфере, мы развиваем новые подходы и методы. В работе [Khazins et al., 2020] была построена численная модель поверхностного взрыва ВВ, описывающая образование и подъем газопылевого облака. В работе [Шувалов и др., 2021] модель развития взрыва была модифицирована для расчета одиночного взрыва в скважине и приведены результаты тестового расчета.

В настоящей работе продолжено совершенствование методик и моделей. В результате получена оценка влияния совокупности нескольких взрывов в скважинах, расположенных согласно реальной схеме взрывов на Лебединском ГОКе, на формирование облака выбрасываемых из скважин частиц. Полученные в результате моделирования характеристики газопылевого облака ко времени завершения его подъема, позволили провести численный анализ поведения этого облака в поле ветра в [Хазинс и др., 2021; 2022]. В процессе анализа существенное внимание было обращено на процессы установления течения при взаимодействии ветра с подстилающей поверхностью и формирования Атмосферного пограничного слоя (АПС); оценено влияние параметров модели на результаты.

В первой части статьи описывается постановка задачи расчета комплекса взрывов в скважинах и методы, используемые при ее решении, во второй – результаты расчета серии взрывов зарядов ВВ массой 1000 кг каждый в скважинах глубиной 15 м, в третьей – постановка задачи о переносе в поле ветра облака пыли, сформированного при взрыве системы зарядов в скважинах, приводятся численный анализ применяемых методов и результаты расчетов; в заключении приведены основные выводы, обсуждаются использованные приближения и оставшиеся невыясненными вопросы.

Метод расчета комплекса взрывов в скважинах и начальные данные

Также как и в работах [Шувалов и др., 2021; Shuvalov et al., 2023], при постановке задачи моделирования взрывов в скважинах мы ориентировались на параметры взрывов, которые проводятся на Лебединском карьере (Курская магнитная аномалия). Краткое описание промышленных взрывных работ на Лебединском карьере приведено в [Адушкин и др., 2000; 2010; Угаров и др., 2017]. Для проведения промышленных взрывных работ в карьере заряды ВВ размещаются в вертикальных скважинах, пробуренных в железистых кварцитах. С 2003 г. для бурения взрывных скважин используются станки с диаметром долота 295.5–311 мм [Угаров и др., 2017]. Масса заряда ВВ, помещаемого в одну скважину, составляет 0.5–1.5 тонны. Скважины располагаются рядами вдоль уступа карьера. Одновременно взрывают ВВ в группе из 3–5 скважин. Расстояние между скважинами в ряду составляет примерно 5 м, а расстояние между рядами скважин – примерно 8 м. Схема размещения заряда взрывчатого вещества в отдельной скважине [Shuvalov et al., 2023] приведена на рис. 1.

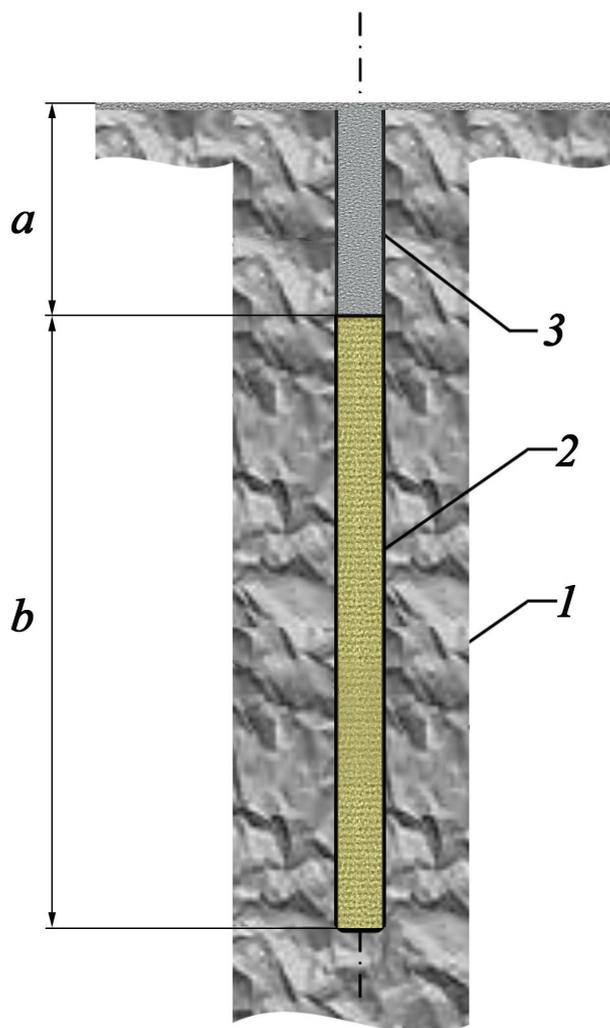


Рис. 1. Схема размещения заряда ВВ в скважине: 1 – массив горных пород (железистые кварциты), 2 – заряд ВВ, 3 – забойка, мелкие частицы и камни железистых кварцитов. Для численного моделирования значения a и b задавались равными 3.5 и 11.5 м соответственно

Для численного расчета взрыва в скважинах была модернизирована численная модель взрыва заряда химического ВВ в скважине [Шувалов и др., 2021; Shuvalov et al., 2023], реализованная на основе гидродинамической программы SOVA [Shuvalov, 1999]. Эта модель позволяет рассчитывать в рамках уравнений Эйлера сложные взрывные течения с сильными разрывами давления и плотности и аккуратным описанием границ между веществами, описываемыми разными уравнениями состояния (в данном случае грунтом, продуктами детонации и воздухом). Как и в [Шувалов и др., 2021; Shuvalov et al., 2023], модель предусматривает возможность превращения выброшенного из воронки взрыва вещества в дискретные частицы (пыль и камни) и расчета движения этих конденсированных частиц, их взаимодействия с газовым потоком в рамках уравнений движения многофазных сред [Nigmatulin, 1987]. 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].

Лебединский ГОК стал одним из первых в России производителей эмульсионных взрывчатых веществ типа Тован по технологии ETI, Канада [Угаров и др., 2017]. Несмотря на то, что вопросам инициирования и распространения детонации в эмульсионных ВВ посвящен ряд современных исследований [Горинов, 2020], данные об уравнении состояния продуктов детонации этих

ВВ практически отсутствуют. Поэтому термодинамические свойства ВВ описывались нами полуэмпирическим уравнением состояния продуктов детонации тротила [Фингер и др., 1981].

Для воздуха использовались таблицы [Кузнецов, 1965], для массива горных пород и вещества забойки – табличное уравнение состояния кварца, полученное по программе ANEOS [Tompson, Lauson, 1974]. Учитывалось действие силы тяжести, распределение плотности и давление воздуха по высоте в равновесной атмосфере Земли задавалось согласно модели CIRA (COSPAR International Reference Atmosphere), <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/atmospheric/cira/cira86/>.

После выхода взрывной волны на поверхность разрушенный грунт над скважиной начинает подниматься и расширяться, при этом его плотность уменьшается. Объемы грунта, которые поднимаются на высоту более одного метра и имеют при этом плотность в два раза меньшую, чем начальная, превращаются в дискретные частицы так же, как в [Шувалов и др., 2021].

Типичное распределение на ступеньке карьера скважин с зарядами ВВ показано на рис. 2. Расстояние между ближайшими скважинами составляет 10 метров. Для того, чтобы смоделировать одновременный взрыв в нескольких скважинах необходимо решать трехмерную задачу. Однако даже для расчета двумерной задачи с достаточно подробным описанием загрузки пылевого облака частицами разного размера нужен мощный компьютер с большой памятью. Провести трехмерный расчет с необходимой степенью подробности не представляется возможным. Поэтому мы попробовали оценить влияние множественности приближенно. Мы рассматривали семь взрывов, которые на рис. 2 находятся внутри окружности. На начальной стадии считался одиночный взрыв в скважине (как в [Шувалов и др., 2021]). 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.

В качестве начальных данных задавалась система скважин глубиной 15 м и диаметром 0.3 м, до глубины -3.5 м, заполненные тротилом, плотностью 1.2 г/см^3 , выше – заполненные грунтом. Процесс распространения детонационной волны не рассматривался, считалось, что начальная энергия неподвижных в начальный момент продуктов детонации равна 4.18 кДж/г . Начальная плотность грунта (в том числе в верхней части каждой скважины) была равна 2.65 г/см^3 , сцепление – $2 \times 10^{10} \text{ Па}$, коэффициент внутреннего трения – 0.6.

Высокое давление в продуктах взрыва вызывает распространение взрывной волны в грунте, его деформацию и перемещение. Диаметр каждой скважины при этом увеличивается. После выхода взрывной волны на поверхность разрушенный грунт над каждой скважиной начинает подниматься и расширяться, при этом его плотность уменьшается. Объемы грунта, которые поднимаются на высоту более одного метра и имеют при этом плотность в два раза меньшую, чем начальная, превращаются в дискретные частицы. Суммарная масса частиц равна массе грунта в рассматриваемом объеме, а распределение частиц по размерам задается степенным законом

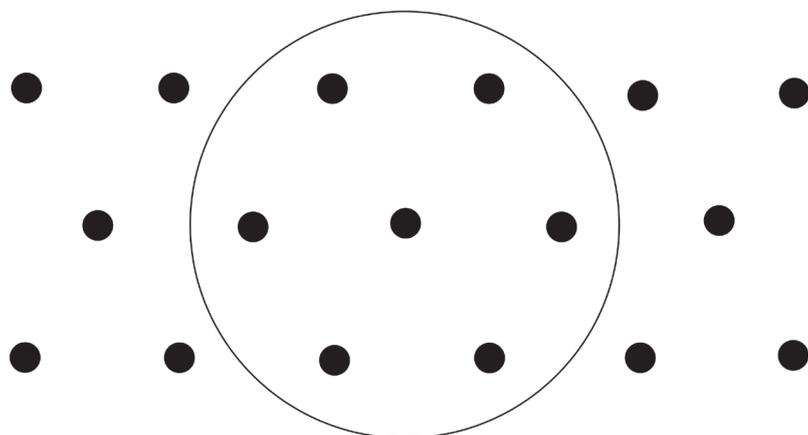


Рис. 2. Трехрядное распределение скважин с зарядами вдоль ступеньки карьера. Внутри окружности расположены семь взрывов, которые рассматриваются в численном эксперименте

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

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 [Мелощ, 1994]. В данных расчетах считалось что $b = 0.7$. Константа a определяется массой рассматриваемого объема. Максимальный размер частицы принимался равным 0.1 м (в три раза меньше начального диаметра скважины), минимальный – 10^{-6} м. Выбор степенного распределения выбрасываемых частиц по размерам позволил нам в работах [Khazins et al., 2020; Шувалов и др., 2021] смоделировать поверхностный взрыв мощностью 500 т ТНТ и одиночный взрыв в скважине. В то же время, часто при рассмотрении взрывов используют распределения Розина – Раммлера и распределение Колмогорова. В дальнейшем мы предполагаем детально исследовать влияние выбранного закона распределения частиц по размерам на формирование газопылевого облака. Движение конденсированных частиц и их взаимодействие с газовым потоком описывается в рамках обычных уравнений движения многофазных сред [Nigmatulin, 1990]; подробности представлены в работе [Khazins et al., 2020; Шувалов и др., 2021]. Коэффициент диффузии частиц считался равным $10(r_0/r) \text{ м}^2/\text{с}$, где $r_0 = 10^{-5}$ м, а r – размер частицы. Такое значение позволяет получить размер облака, соответствующий реальным взрывам на открытых горных карьерах [Адушкин и др., 2000; Krashennnikov et al., 2021].

Результаты расчета комплекса взрывов в скважинах

Начальная стадия взрыва показана на рис. 3. Высокое давление в продуктах детонации приводит к расширению скважины и распространению ударной волны в грунте.

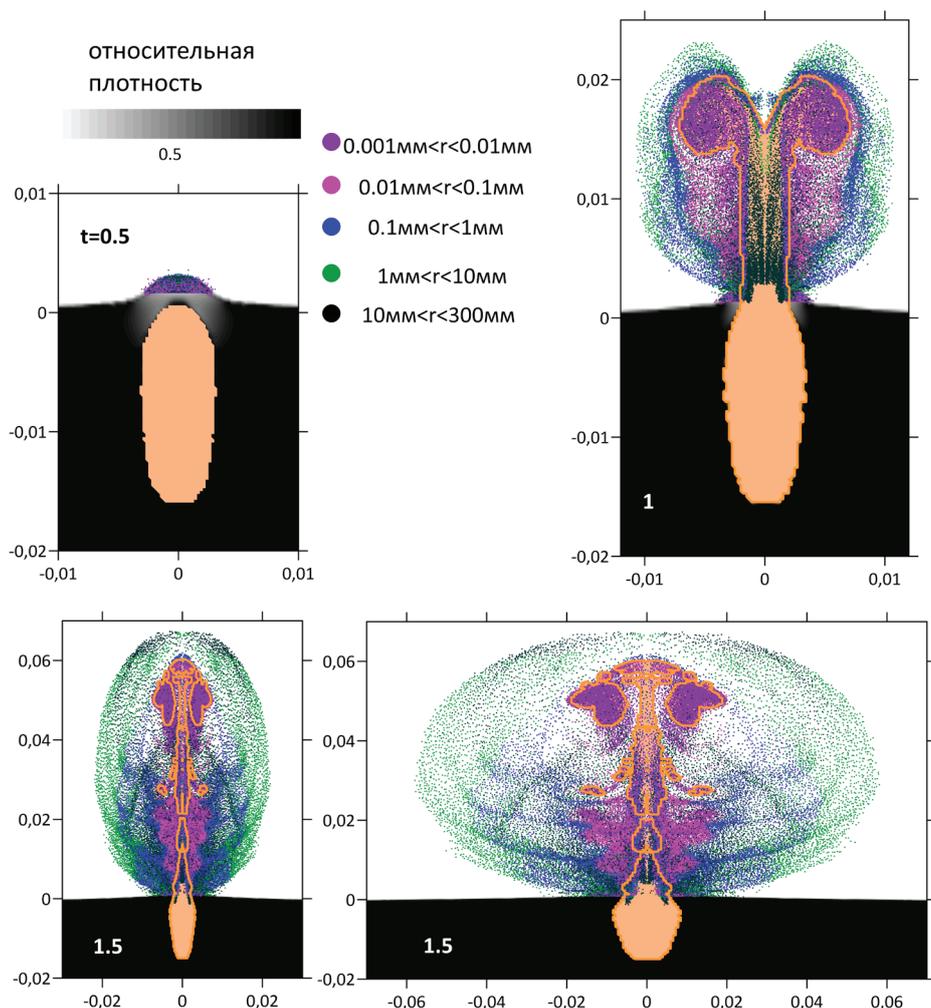


Рис. 3. Начальная стадия взрыва в скважине. Грунт показан черным цветом (более светлые области у поверхности соответствуют уменьшению плотности грунта), продукты детонации – оранжевым цветом, точки разного цвета соответствуют конденсированным частицам разного размера r , оранжевая линия показывает границу продуктов детонации в области, заполненной конденсированными частицами. Значения времени в секундах указаны на каждом фрагменте рисунка. В момент времени 1.5 с горизонтальные размеры увеличены в $\sqrt{7}$ раз. Все расстояния указаны в километрах

После выхода ударной волны на поверхность грунт разуплотняется и выбрасывается в атмосферу. Как и в [Шувалов и др., 2021], разуплотненный грунт на высотах более метра превращается в набор частиц (осколков, пыли) разного размера. Продукты детонации проникают сквозь облако частиц и дополнительно ускоряют частицы, особенно мелкие. Затем самые мелкие частицы тормозятся в воздухе и вперед вырываются более тяжелые. Самые крупные частицы слабо ускоряются разлетающимися продуктами детонации и почти не тормозятся в воздухе.

Как и в [Шувалов и др., 2021; Shuvalov et al., 2023], в момент времени $t = 1.5$ с продукты детонации были заменены воздухом с той же плотностью и тем же давлением. Это делалось из-за того, что размер расчетных ячеек, который при $t > 1.5$ с составлял 20 см, не позволял аккуратно описывать перемешивание продуктов детонации с воздухом. Кроме того, при $t > 1.5$ с не рассматривалось движение грунта, который считался, начиная с этого момента, неподвижным. Это позволило не только сократить вычисления, но и значительно увеличить временной шаг, который до этого определялся, главным образом, большой скоростью звука в грунте. В этот же момент все горизонтальные расстояния увеличены в $\sqrt{7}$ раз, что в некотором приближении соответствует одновременному взрыву в семи скважинах, расположенных как на рис. 2.

На рис. 4 показано дальнейшее развитие пылевого облака. Через 20 с большая часть крупных частиц (размером миллиметр и более) оседает на поверхность. Более мелкие частицы поднимаются вверх. В первые 20 с этот подъем напоминает больше направленную вверх струю, чем всплытие легкого объема под действием сил плавучести. Начальная плотность продуктов детонации (после расширения до атмосферного давления) на 5 – 10% меньше плотности окружающего воздуха.

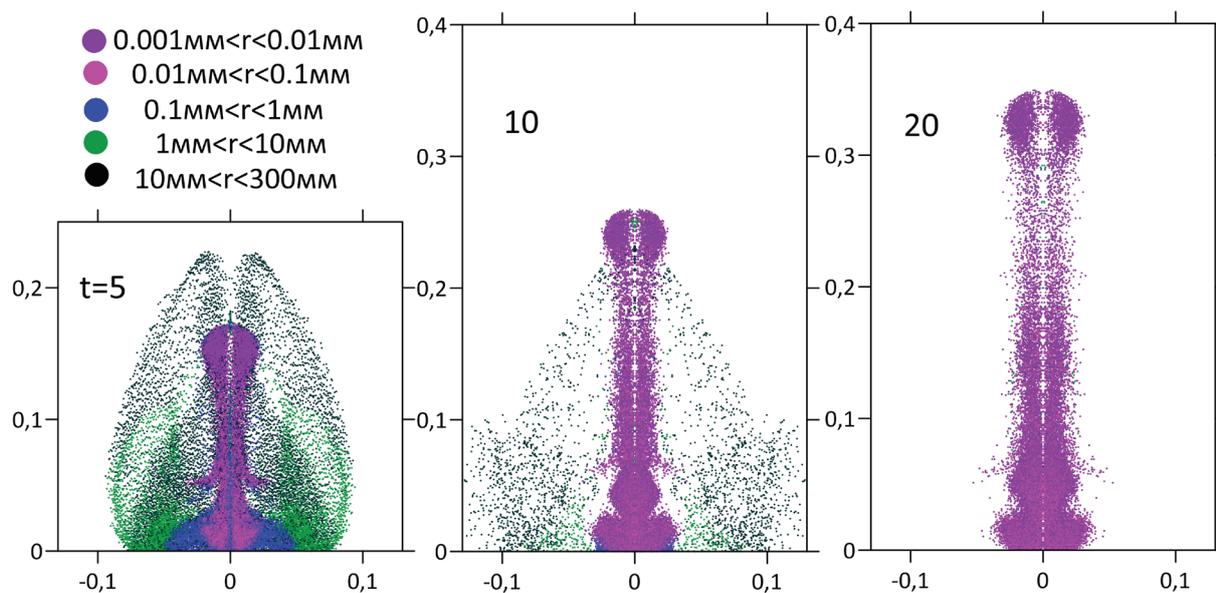


Рис. 4. Эволюция газопылевого облака-струи с 5 до 20 секунд. Точки разного цвета соответствуют конденсированным частицам разного размера r . Значения времени t в секундах указаны на каждом фрагменте рисунка, все расстояния указаны в километрах

Через 2 минуты газопылевое облако поднимается на высоту около 500 м (см. рис. 5), его дальнейшая эволюция определяется, в основном, диффузией и ветрами. Более того, ветер с самого начала может оказывать заметное влияние на формирование и эволюцию газопылевого облака-струи. Однако двумерная осесимметричная модель, используемая в данных расчетах, не позволяет учесть и изучить это влияние.

Изменение со временем содержания в атмосфере пыли разного размера показано на рис. 6.

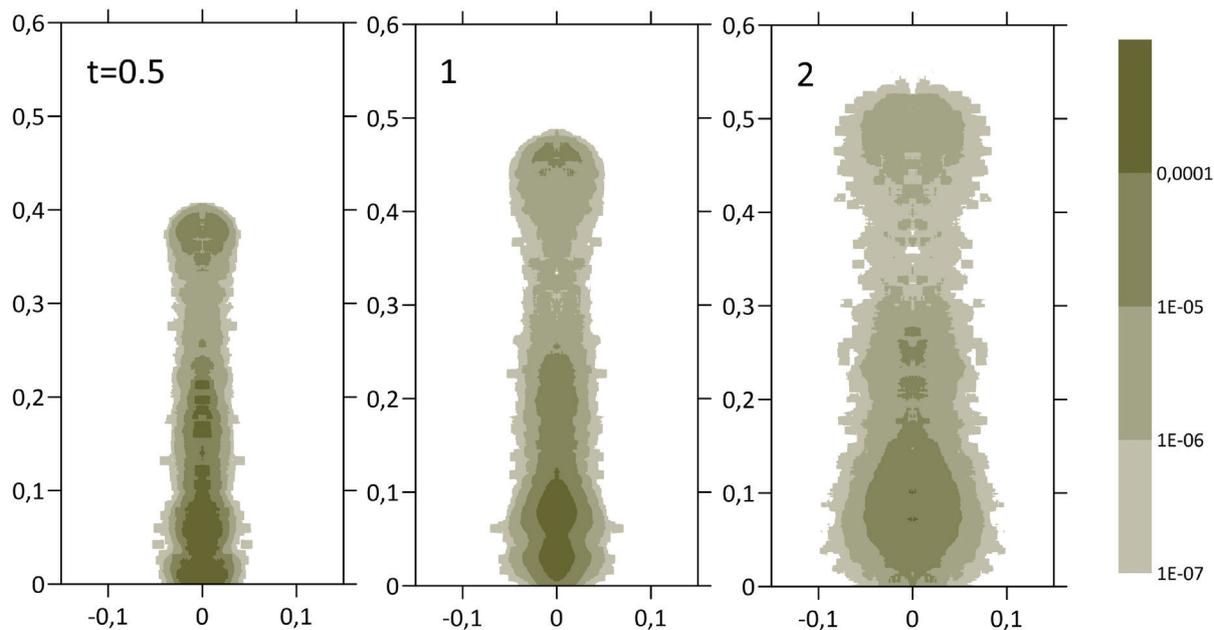


Рис. 5. Эволюция газопылевого облака-струи с 30 до 120 секунд. Цветом разной интенсивности показано распределение по пространству массовой концентрации пыли. Значения времени в минутах указаны на фрагменте рисунка. Все расстояния указаны в километрах

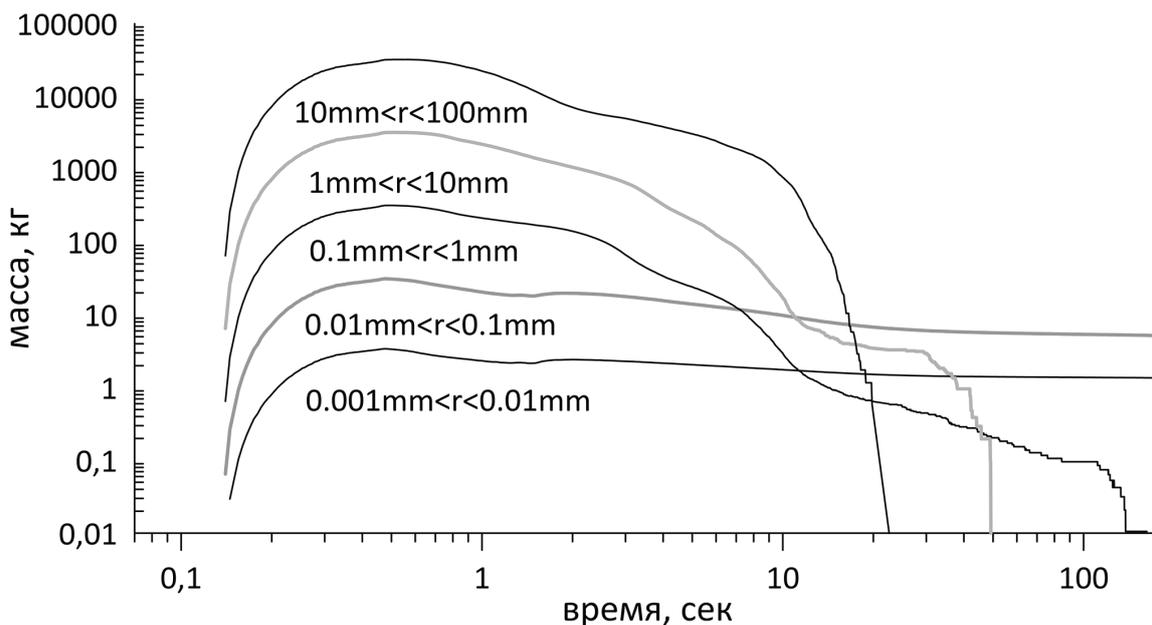


Рис. 6. Зависимость от времени массы частиц разного размера, содержащихся в атмосфере (на высоте более одного метра)

Самые крупные осколки, размером более сантиметра, вылетающие со скоростью 20–30 м/с, через 20 с выпадают на поверхность. Потом осаждаются более мелкие частицы. Через две минуты в воздухе остаются только частицы размером менее 100 мкм: примерно 6 кг частиц размером $10\text{ мкм} < r < 100\text{ мкм}$ и 1.5 кг частиц размером $1\text{ мкм} < r < 10\text{ мкм}$. На рис. 7 показана зависимость массы пыли в облаке от высоты. Видно, что значительная масса пыли сосредоточена на высотах до 200 м, скорее всего эта часть облака оказывается внутри карьера. Также повышенная концентрация пыли наблюдается на высотах порядка 400–500 м.

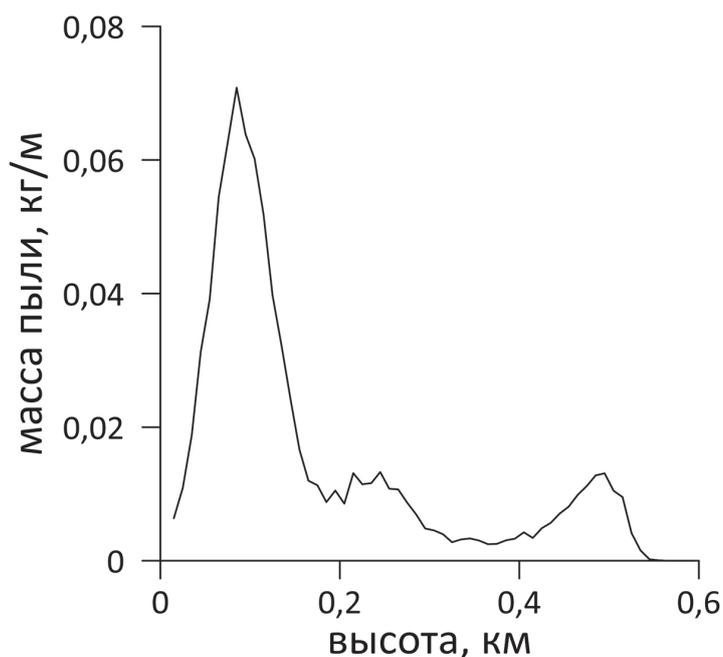


Рис. 7. Распределение массы пыли в облаке по высоте через 2 минуты после взрыва

Постановка задачи о распространении пылевого облака и метод моделирования

Полученные в предыдущем разделе результаты были использованы для изучения поведения в ветровом потоке пылевого облака, инициированного одновременным подрывом ВВ в нескольких скважинах. С учетом сложности трехмерного моделирования была выбрана простейшая постановка задачи, которая позволила, с одной стороны, выявить характерные особенности численного моделирования, а с другой — получить в первом приближении зависимость концентрации мелкодисперсных частиц от времени на расстояниях до нескольких километров от центра взрывов.

Мы исключили из рассмотрения сложные процессы взаимодействия ветра с рельефом карьера и предположили, что взрывы происходят на плоском уступе внутри карьера, верхняя граница уступа ниже на 250 м уровня дневной поверхности, и уступ расположен вблизи борта карьера. Ветер выносит верхнюю часть 500-метрового облака (рис. 5) на дневную поверхность и поведение этой части облака в поле ветра является предметом нашего рассмотрения. Влияние нижней части облака в дальнейшем не учитывается. Схема расчетной области и положение в ней облака представлены на рис. 8.

Расчетная область заполнена ячейками, прямоугольными параллелепипедами с минимальным размером ребра — 5 м. В представленных ниже расчетах использована сетка 315×40×160 узлов в направлениях X, Y, Z соответственно. Вдоль оси Y размер всех ячеек составлял 5 м; размер ячеек вдоль оси X на интервале $-480 \text{ м} < X < 270 \text{ м}$ — 5 м (-480 м — положение левой границы области АЕМВ), а далее вдоль положительного направления оси X шаг был увеличен по геометрической прогрессии с коэффициентом 1.02 до достижения им значения 40 м, и затем шаг оставался постоянным, равным 40 м, вплоть до правой границы области DFКС, расположенной на расстоянии ~ 4.5 км от центра; размер ячеек вдоль оси Z на интервале $0 < Z < 250 \text{ м}$ — 5 м, а далее вдоль положительного направления оси Z шаг увеличивался так, что верхняя граница области ЕМКФ располагалась на высоте ~ 1.25 км.

Считалось, что вдоль поверхности $Z = 0$ дует, постоянный во времени, горизонтальный ветер с вертикальным распределением, соответствующим нейтрально стратифицированному атмосферному пограничному слою (АПС). Мы выбрали стандартную зависимость скорости ветра в АПС [ГОСТ Р 54084-2010, 2013]. Характеристики ветра в АПС представлены в [ГОСТ Р 54084-2010, 2013] в широком диапазоне широт и долгот. Выбор конкретного профиля не оказывает принципиального влияния на качество наших оценочных расчетов. Для определенности мы выбрали профиль скорости, температуры и плотности для летнего сезона в точке с координатами 55° СШ и 40° ВД.

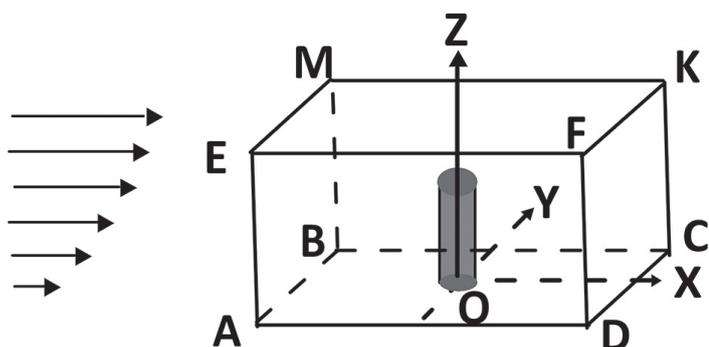
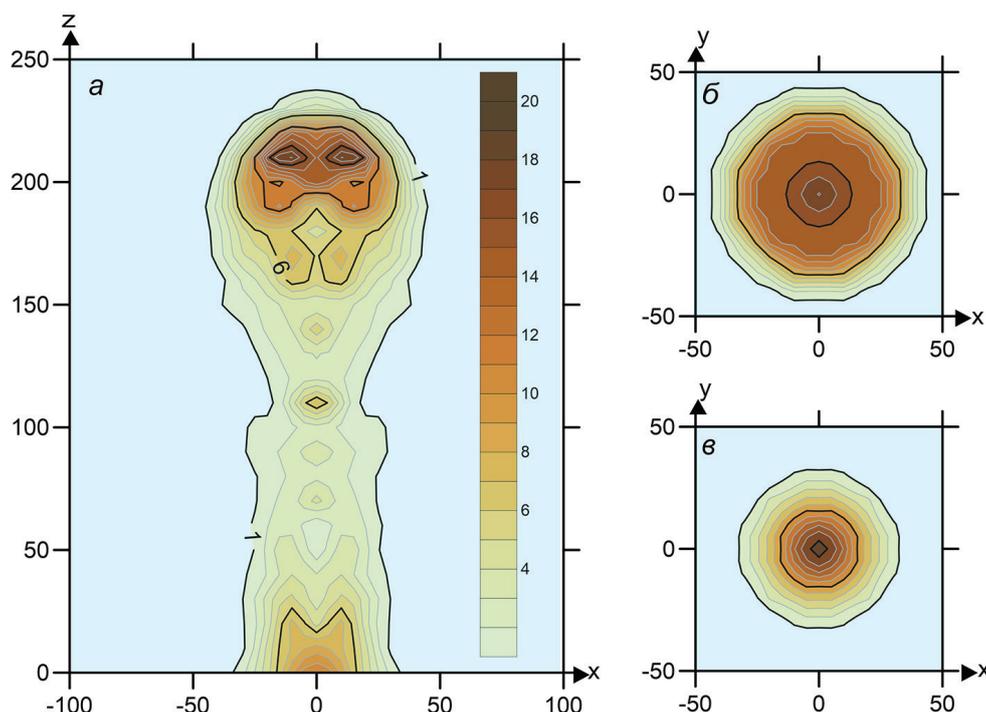


Рис. 8. Схематическое изображение расчетной области в поле ветра и начальное положение в этой области облака пыли (серый цилиндр)

Через левую границу расчетной области АЕМВ поступает воздух с выбранными характеристиками АПС. Вблизи плоскости $Z = 0$ поток в реальных условиях тормозится из-за взаимодействия с шероховатой поверхностью. Мы моделировали этот процесс достаточно распространенным способом расчета АПС – полным торможением потока воздуха у поверхности грунта, [Wang et al., 2020; Wang, Benson, 2021], часто называемого условием «прилипания», т.е. на плоскости ABCD выбиралось условие $U = V = W = 0$, где U, V, W – компоненты скорости в направлениях X, Y, Z соответственно. Численное моделирование формирует собственное вертикальное распределение горизонтальной скорости у поверхности, что приводит к дисбалансу с аналогичными характеристиками поступающего в расчетную область воздуха, полученных в результате расчетов и измерений в реальных условиях [ГОСТ Р 54084-2010, 2013]. По этой причине мы отодвинули центр расчетной области от левой границы, чтобы демпфировать процессы полного торможения набегающего потока у поверхности. По этой же причине мы помещаем облако пыли в расчетную область по истечении некоторого промежутка времени – порядка нескольких десятков минут с момента начала расчета.

Боковые грани расчетной области AEFD и BMKS, также как и верхняя грань EMKF, интерпретировались нами как жесткие стенки, скорость в нормальном направлении к соответствующей грани и производные от остальных скоростей в этом же направлении выбирались равными нулю. Газодинамический поток, формирующийся в процессе численного моделирования, свободно вытекает через правую границу расчетной области FKCD. В начальный момент времени характеристики потока в расчетной области соответствовали распределению параметров в АПС.

Рис. 9. Массовая концентрация пыли для частиц размером меньше 100 мкм: а – в сечении ZOХ, б – в сечении YOХ на поверхности, в – в сечении YOХ на высоте 200 м. Все размеры на осях приведены в метрах, значения концентрации – в мг/м³



Как уже упоминалось выше, по истечении некоторого промежутка времени, соответствующего установлению квазистационарного течения в расчетной области, в поток «вставлялся» столб мелкодисперсной пыли с массовой концентрацией частиц, меньших 100 мкм (рис. 9). Рис. 9 представляет собой часть панели для момента 1 мин рисунка (4) в диапазоне высот от 250 до 500 м.

Для расчета течений была использована полная система уравнений Навье – Стокса для сжимаемой жидкости в дозвуковом приближении [Затевахин и др., 1994; Khazins et al., 2020], модифицированная для расчета течений воздуха в поле ветра [Хазинс и др., 2022]. Переход к дозвуковому приближению, в той или иной степени, подробно представлен в этих работах. Поэтому мы ограничились здесь лишь теми уравнениями и соотношениями, которые непосредственно обсуждаются в настоящей статье.

Для учета турбулентных процессов уравнения Навье – Стокса в дозвуковом приближении были осреднены методом крупных вихрей (LES-методом, Large Eddy Simulations). В LES-модели большие вихри рассчитываются явно, а эффекты на малых масштабах моделируются с помощью турбулентной (вихревой) вязкости, кинематический коэффициент которой определяется соотношением:

$$\tau_T = (C_{sm} \Delta)^2 \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = (C_{sm} \Delta)^2 |\bar{S}|, \quad (2)$$

где \bar{u}_i – одна из трех компонент скорости, x_i – одна из трех пространственных координат, Δ – характерный размер сеточной ячейки, C_{sm} – константа (Smagorinsky constant), и

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_j \bar{S}_j}, \quad S_j = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

Здесь \bar{S}_j – тензор скорости деформации, а черта сверху отмечает отфильтрованные LES методом величины. Значение константы Смагоринского, определенное [Lilly, 1967], равно 0.17. В более поздних работах при использовании LES модели значения этой константы в зависимости от рассматриваемой задачи, численной модели, шага разностной сетки несколько отличались, но чаще всего значения константы Смагоринского оказывались в диапазоне 0.1–0.2.

Динамика облака мелкодисперсной пыли рассматривалась в предположении, что частицы пыли не оказывают влияния на характеристики воздушного потока, а их скорость равна местной скорости потока. В расчет было включено уравнение переноса концентрации пылевой примеси [Ландау и Лифшиц, 1986]

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{U} \nabla c = \text{div}(\rho D_T \nabla(c/\rho)), \quad (3)$$

где ρ – плотность газопылевой смеси, c – концентрация примеси, \mathbf{U} – вектор скорости потока, t – время, D_T – турбулентный коэффициент диффузии, определяемый по значениям вихревой вязкости τ_T из условия, что эти величины связаны между собой турбулентным числом Шмидта $S_c = \tau_T / D_T$. Турбулентное число Шмидта может меняться в широких пределах (от 0.1 до 2.5) в зависимости от рассматриваемой задачи [Gualtieri et al., 2017]. Мы выбрали значение равное 1.

Моделирование течения, развивающегося при взаимодействии ветра с поверхностью

Процессы, сопровождающие взаимодействие втекающего через левую границу расчетной области (рис. 8) воздуха с подстилающей поверхностью, приводят к развитию флуктуаций в потоке. Со временем устанавливается квазистационарный режим течения с близкими, в среднем, распределениями параметров в вертикальном направлении. Течение считалось нами установившемся при достижении стабильных во времени средних значений компонент скорости в расчетной области. Будем характеризовать здесь установившееся течение распределением осредненных по времени параметров вдоль вертикальной оси в центре координат (рис. 10). Отметим, что на рис. 10а кривая

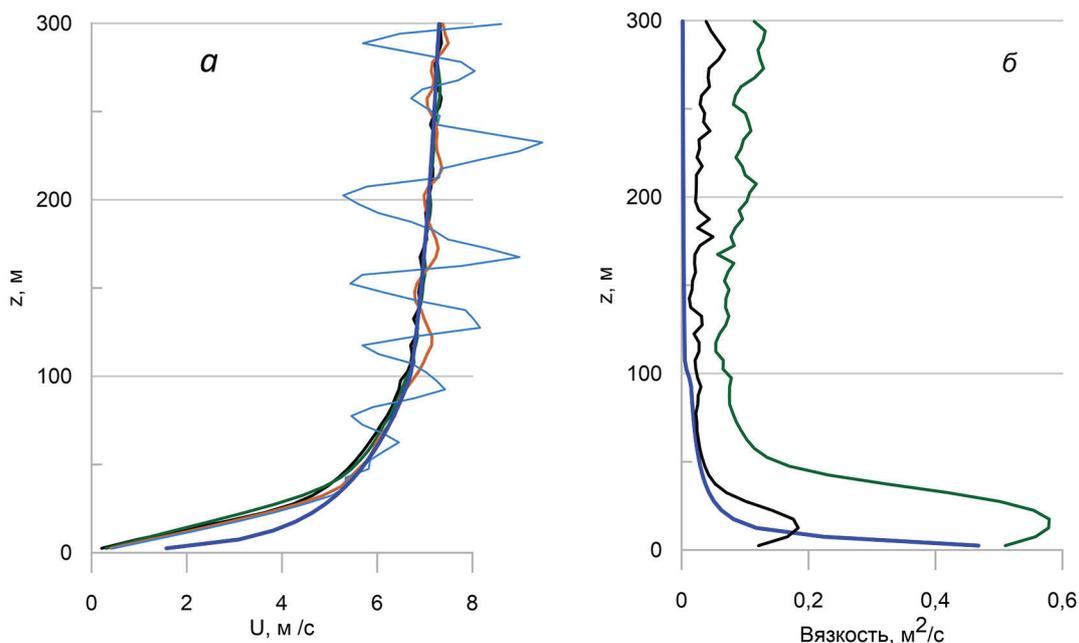


Рис. 10. Распределения осредненных по времени характеристик течения в квазиустановившемся потоке вдоль оси Z в центре координат: a – горизонтальные скорости (кривые: коричневая – $C_{sm} = 0.4$, $\delta t = 0.1$ с, зеленая – $C_{sm} = 0.4$, $\delta t = 0.0125$ с, черная – $C_{sm} = 0.2$, $\delta t = 0.00625$ с); b – кинематическая (вихревая) вязкость τ_T , цветами отмечены кривые с теми же параметрами, что и для кривых рис. 10а. Синими кривыми отмечены зависимости от высоты горизонтальной скорости (рис. 10а) и τ_T для $C_{sm} = 0.2$ (рис. 10б) в момент времени $t = 0$. Голубая кривая, рис. 10а – зависимость горизонтальной скорости от z для варианта $C_{sm} = 0.4$, $\delta t = 0.1$ с в момент времени $t = 10$ мин

синего цвета соответствует одновременно распределению скорости вдоль оси Z в центре координат в начальный момент времени и распределению скорости во втекающем в расчетную область потоке, т.е. в АПС. Результаты представлены для двух значений C_{sm} – 0.2 и 0.4, с целью оценки влияния константы Смагоринского на характеристики течения.

Из рис. 10а следует, что осредненные по времени горизонтальные скорости течения неплохо описывают распределение скорости во втекающем в расчетную область потоке (синяя кривая) на высотах, больших 50 м. Однако мгновенное распределение горизонтальной скорости для варианта, рассчитанного с шагом по времени δt , выбранном из соображений устойчивости численной модели ($t \approx 0.1$ с, голубая кривая), демонстрирует достаточно сильные отклонения скоростей. Первоначально, анализ поля скоростей привел нас к выводу, что колебания являются следствием развития вихревого течения в потоке [Хазинс и др., 2022]. Однако в процессе уменьшения шага по времени колебания постепенно уменьшаются в амплитуде, и при уменьшении δt на порядки больше (рис. 10а), практически, исчезают даже в мгновенных распределениях. Аналогично ведут себя и другие компоненты скорости, их отклонение от нуля становится малым по сравнению с горизонтальной скоростью. Таким образом, расчет по нашей модели требует обращать внимание не только на численную устойчивость разностной схемы, но и на точность решения. Это является дополнительным ограничением на применение модели.

Наибольшее отличие горизонтальной составляющей скорости от соответствующих значений скорости втекающего потока (рис. 10а) достигается на высотах до 50 м. Причем, независимо от значений C_{sm} и δt , численный расчет приводит почти к одним и тем же значениям горизонтальной скорости в этом диапазоне высот. Поведение скорости влияет на значения вязкости в прилегающих к поверхности областях (рис. 10б), которые наиболее интересны в наших расчетах. Сопоставление синей и черной кривых рис. 10б, отображающих поведение вязкости τ_T для $C_{sm} = 0.2$ в АПС и численном решении, демонстрирует отличие, достигающее, примерно, двух раз на высотах до 50 м. Причем, в численном решении у вязкости появляется локальный максимум, характеризующий точку перегиба в распределении скорости (рис. 10а), что связано, скорее всего, с тем, что ниже этой точки на расчет

существенное влияние оказывает граничное условие (прилипание), а выше – это влияние постепенно уменьшается.

Таким образом, при соответствующем выборе шага по времени численная модель позволяет добиться установления течения с распределением скоростей, близким к заданным параметрам АПС, за исключением области, прилегающей к поверхности. В этом случае расчетные динамические параметры потока не зависят от вихревой вязкости при рассмотренных значениях C_{sm} .

2D расчеты распространения пылевого облака в поле стратифицированного по высоте ветра

Расчет уравнения переноса концентрации пылевой примеси (3) в эйлеровых координатах приводит к сильной схемной диффузии, существенно превышающей диффузию, определяемую правой частью уравнения (3). В результате облако растягивается в направлении ветра. Если поместить облако мелкодисперсной пыли в поле ветра с однородными характеристиками, то такое облако должно перемещаться со скоростью ветра, не меняя своих параметров. Так и было бы, если бы уравнение (3) решалось в переменных Лагранжа. Расчет в переменных Эйлера приводит к постепенному перетеканию вещества из одной ячейки в другую в соответствии с градиентами концентрации. Наиболее простой метод уменьшения численной диффузии – увеличение числа расчетных ячеек. Такой подход весьма проблематичен в двухмерном случае, и тем более – в трехмерном. Поэтому для оценки схемной диффузии мы использовали обходной путь, реализацию которого продемонстрируем на задаче в двухмерном приближении.

Пусть облако пыли представляет собой бесконечный прямолинейный горизонтальный цилиндр вдоль оси Y с сечением в плоскости $Y = 0$, совпадающим с сечением в плоскости $Y = 0$ заданного вертикального цилиндрического облака (рис. 9), выделенного условно серым цветом на рис. 8. Пусть в каждом вертикальном сечении, параллельном плоскости XOZ , начальное распределение концентрации соответствует рис. 9. И, наконец, пусть ребра AB и EM левой границы расчетной области, также как и ребра DC и FK правой границы (рис. 8), имеют бесконечный размер. Через левую границу втекает воздух с характеристиками, соответствующими АПС и зависящими, по определению, только от X и Z . В этих условиях решение зависит от двух переменных – X и Z , и результаты можно рассматривать, например, в плоскости XOZ (или в любой другой плоскости, параллельной XOZ).

Рассмотрим случай $C_{sm} = 0.4$, $\delta t = 0.0125$ с. Расчет проводился на сетке с такими же размерами ячеек, как и в трехмерном случае (315 узлов вдоль оси X и 160 – вдоль Z). Назовем эту сетку – оригинальной. В один из моментов времени после установления квазистационарного режима в поле течения в плоскость XOZ помещалось облако мелкодисперсной пыли с распределением концентрации рис. 9. Динамика облака пыли рассчитывалась по уравнению (3) как на оригинальной разностной сетке, так и на более подробной разностной сетке, размер ячеек которой мы выбирали из соображений точности расчета. В последнем случае необходимые для расчета уравнения (3) значения термодинамических параметров в ячейках более подробной сетки рассчитывались их интерполяцией по значениям на оригинальной сетке.

Из рис. 11, на котором представлены два распределения, полученные на сетках различной степени грубости, следует, что развитие верхней части облака существенным образом зависит от шага сетки, на которой решается уравнение диффузии. Начальный размер облака (рис. 9) не превышал 80 м в диаметре (16 расчетных интервалов), а к 2 мин область, где сосредоточена основная масса пыли, растянулась на несколько сот метров при расчете на грубой (оригинальной) сетке. Уменьшение пространственного шага по X в 8 раз и по Z – в 4 привело к уменьшению отмеченной области до сотни метров.

Сильная зависимость горизонтального размера облака от шага сетки характерна для верхней части облака, где скорости потока достаточно велики. Иное дело нижняя часть, в которой по мере приближения к поверхности скорость потока стремится к нулю. Продемонстрируем влияние шага сетки на расчет концентрации во времени в различных фиксированных точках у поверхности (рис. 12).

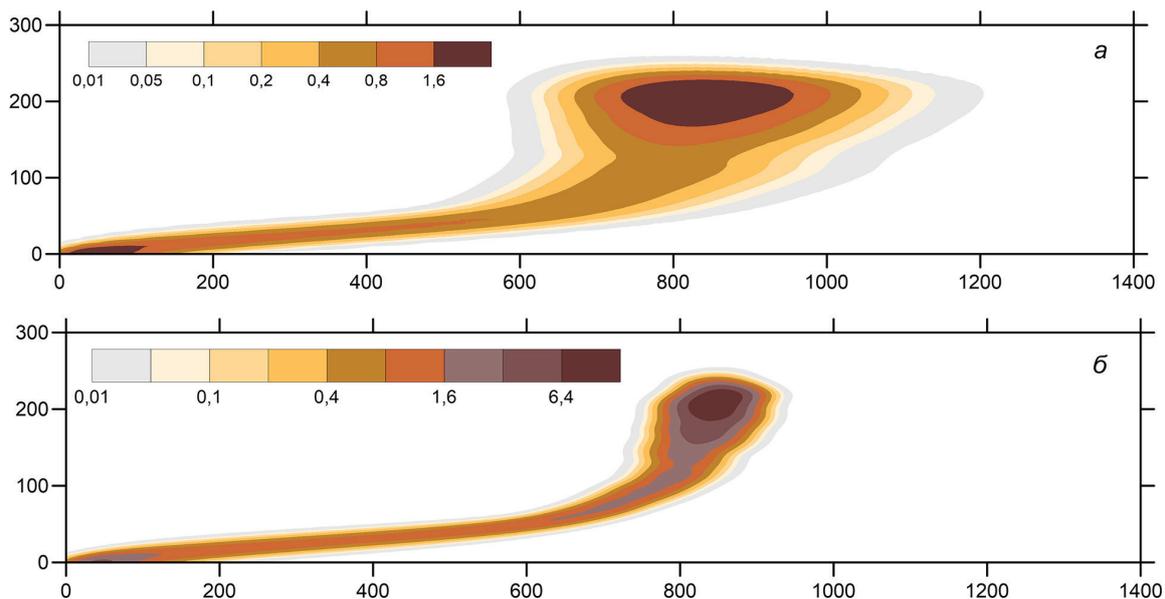


Рис. 11. Концентрация мелкодисперсной пыли через две минуты после начала распространения облака: *a* – расчет на оригинальной разностной сетке с шагом по пространству 5 и более метров, *б* – расчет на равномерной по X и по Z сетке с шагом по X – 0.625 м, и по Z – 1.25 м. Все размеры на осях представлены в метрах

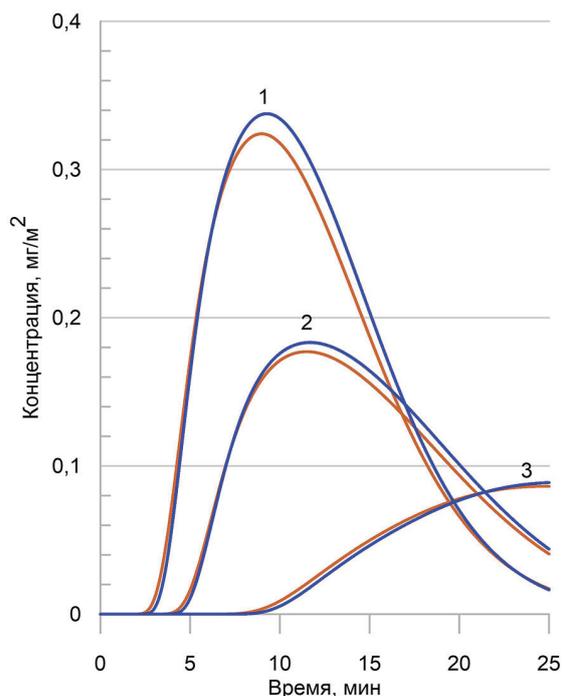


Рис. 12. Зависимость концентрации мелкодисперсной пыли от времени у поверхности на различных расстояниях от центра начального облака: 1 – 500 м, 2 – 1000 м, 3 – 2000 м. Расчет на оригинальной сетке отмечен коричневым цветом, на сетке с размером ячейки 1.25×2.5 м – синим

Зависимость от шага сетки, практически, не наблюдается. Таким образом, расчет уравнения (3) на грубой сетке вполне приемлем для описания поведения мелкодисперсной пыли у поверхности. Это обстоятельство позволяет нам проводить анализ изменения концентрации пыли у поверхности в трехмерном случае на грубой сетке.

3D расчеты распространения пылевого облака в поле стратифицированного по высоте ветра

Проведенные 2D исследования продемонстрировали возможность оценки концентрации пыли вблизи поверхности при расчетах уравнения (3) совместно с уравнениями Навье – Стокса на относительно

грубых сетках. Приведенные ниже результаты получены на сетке $315 \times 40 \times 160$ узлов. На рис. 13 показана эволюция облака мелкодисперсной пыли с характеристиками, соответствующими рис. 9, которое было помещено в расчетную область (рис. 8, серый цилиндр) в один из моментов времени после установления течения в процессе взаимодействия ветра с поверхностью. В соответствии со структурой ветра облако вытягивается в направлении ветра, формируя вблизи поверхности область повышенной концентрации пыли, которая расширяется и перемещается вместе с облаком. Оценим горизонтальные размеры этой области и концентрацию пыли в ней по значениям концентрации пыли в первой расчетной ячейке над поверхностью (след). Из рис. 13 следует, что перемещение следа, его размеры и концентрация зависят от вихревой вязкости потока вблизи поверхности, которая растет с увеличением C_{sm} (см. рис. 10). Чем больше C_{sm} (панели *a* и *б* по сравнению с панелями *в* и *г*) тем быстрее перемещается область максимальных значений концентрации и тем сильнее расширяется след в поперечном направлении.

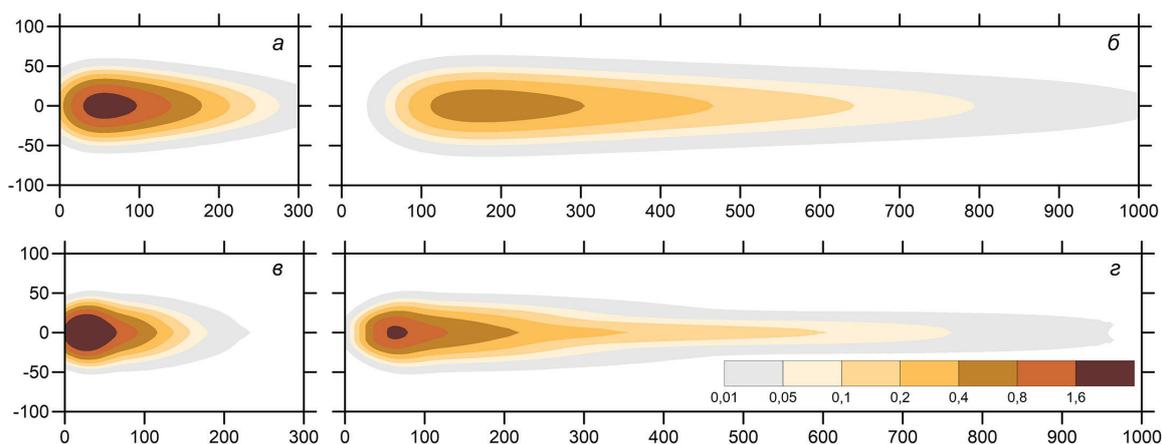


Рис. 13. След мелкодисперсной пыли на поверхности XOY после формирования облака через две минуты (панели *a* и *в*) и пять минут (панели *б* и *г*) для двух значений коэффициента вязкости: $C_{sm} = 0.4$ (панели *a* и *б*) и $C_{sm} = 0.2$ (панели *в* и *г*). Все размеры на осях представлены в метрах

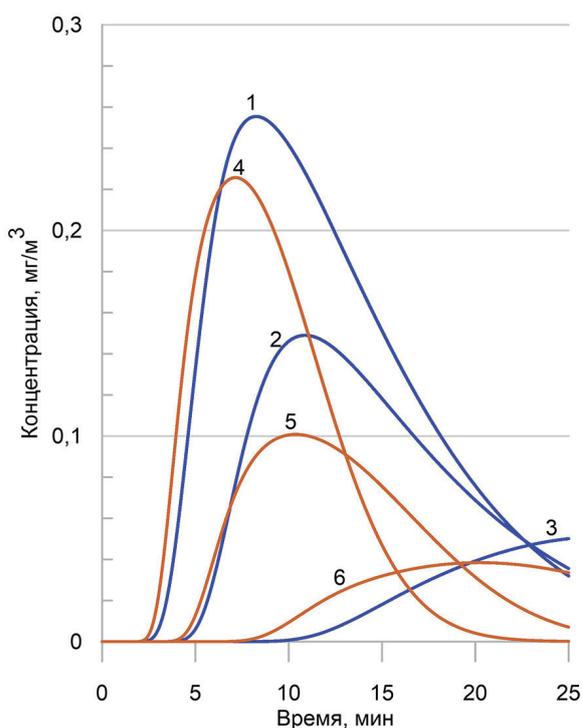


Рис. 14. Зависимость концентрации мелкодисперсной пыли от времени у поверхности на различных расстояниях от центра начального облака: 1, 4 – 500 м, 2, 5 – 1000 м, 3, 6 – 2000 м для двух значений коэффициента вязкости: $C_{sm} = 0.2$ (коричневые кривые) и $C_{sm} = 0.4$ (синие кривые)

Вязкость влияет и на зависимость концентрации мелкодисперсной пыли от времени у поверхности на различных расстояниях от центра начального облака. С уменьшением вязкости (уменьшением C_{sm}) растет ширина импульса концентрации (рис. 14) и несколько увеличиваются максимальные значения концентрации.

Обсуждение и выводы

Проведенные расчеты позволили описать образование и эволюцию газопылевого облака, образовавшегося после взрыва в семи скважинах, получить распределения частиц разного размера по пространству в разные моменты времени. Однако использованная модель содержит ряд предположений и упрощений. В первую очередь это связано с приближенным переходом от одной скважины к семи, заданностью распределения частиц по размерам и учетом турбулентного перемешивания. Распределение по размерам задавалось по степенному закону (1), который сам по себе является неким приближением. Влияние турбулентной вязкости на газодинамическое течение в расчетах не учитывалось (хотя схемная вязкость отчасти моделирует мелкомасштабную турбулентность), учитывалась только турбулентная диффузия частиц. Еще одно отличие от реальных взрывов состоит в том, что в расчетах рассматривался взрыв тротила, для которого есть апробированное уравнение состояния, в то время как на карьерах используется более дешевая и менее мощная взрывчатка. И, наконец, не учитывался ветер, который может заметно влиять на формирование и подъем газопылевого облака.

Несмотря на указанные приближения и упрощения, модель качественно правильно описывает эволюцию и подъем газопылевого облака-струи и позволяет оценить количественные характеристики (массу частиц разного размера и их распределения по пространству в разные моменты времени), которые невозможно или очень трудно определить экспериментально.

Рассмотрено движение полученного газопылевого облака в атмосферном пограничном слое (АПС). Выявлены характерные особенности численного моделирования течения, развивающегося при взаимодействии ветра с поверхностью. Показано, что при соответствующем выборе шага по времени в численной модели можно добиться установления течения со скоростями, близкими к заданным в АПС. Распределения осредненных по времени скоростей течения в квазиустановившемся потоке не зависят от вихревой вязкости при рассмотренных значениях коэффициента Смагоринского C_{sm} . Наибольшее отличие средней скорости потока от соответствующих заданных значений АПС достигается на высотах до 50 м. Связано это, скорее всего, с граничным условием на поверхности – полным торможением потока. По-видимому, следует выработать более «мягкие» условия на поверхности, учитывающие ее шероховатость и логарифмический характер вертикального распределения горизонтальной скорости в АПС.

Оценено влияние схемной диффузии при расчете уравнения переноса мелкодисперсной пыли на значения концентрации вблизи поверхности при распространении облака пыли в поле ветра. Влияние оказалось незначительным, что позволяет использовать грубые пространственные расчетные сетки в трехмерном моделировании для этого уравнения.

Получена в первом приближении зависимость концентрации мелкодисперсных частиц от времени на расстояниях до нескольких километров от центра взрывов и продемонстрировано влияние вязкости. Для оценки этих зависимостей будем считать, вслед за рядом авторов, что корректное значение коэффициента вязкости $C_{sm} = 0.2$. В связи с отклонением горизонтальной составляющей скорости установившегося потока в наших расчетах от соответствующих заданных значений АПС средняя вязкость вблизи поверхности несколько отличается от вязкости, определяемой соотношением (2) по данным АПС. Расчетные значения средней по времени вихревой вязкости вблизи поверхности для случая $C_{sm} = 0.2$. (рис. 10б, черная кривая), меньше соответствующих значений для АПС (рис. 10б, синяя кривая) и, в то же время, расчетные значения средней по времени вихревой вязкости вблизи поверхности для случая $C_{sm} = 0.4$. (рис. 10б, зеленая кривая), больше соответствующих значений для АПС. Исходя из этого можно предположить, что если бы граничные условия модели на поверхности

более удовлетворительно описывали динамические характеристики АПС вблизи поверхности, то значения концентрации занимали бы промежуточные значения между коричневыми и синими кривыми рис. 14 для одних и тех же расстояний от центра.

Согласно нормативным санитарно-гигиеническим данным [ГН 2.1.6.3492-17 2019] максимальная предельно допустимая разовая концентрация (ПДК) взвешенных частиц в атмосфере составляет 0.5 мг/м^3 , и в условиях рассмотренной задачи превышение ПДК на расстояниях, превышающих 500 м от борта карьера по ветру, достигнуто не будет.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900185-5).

Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания, исправления и рекомендации.

Список литературы

Адушкин В.В., Спивак А.А., Соловьев С.П., Перник Л.М., Кишкина С.Б. Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах // Геоэкология. 2000. № 6. С. 554–563.

Адушкин В.В., Вайдлер П.Г., Дубовской А.Н., Перник Л.М., Попель С.И., Фридрих Ф. Свойства нано- и микромасштабных частиц, поступающих в окружающую среду при открытой разработке железорудных месторождений // Геология рудных месторождений. 2010. № 52(5). С. 418–426.

Адушкин В.В., Соловьев С.П. Микрочастицы в атмосфере от литосферных источников техногенного происхождения // Физика Земли. 2021. № 5. С. 120–132. DOI:10.17580/gzh.2017.05.24.

Викторов С.Д. Взрывное разрушение массивов горных пород — основа прогресса в горном деле // ГИАБ. 2015. № S1. С. 63–75.

Горинов С.А. Иницирование и детонация эмульсионных взрывчатых веществ. Йошкар-Ола : Стринг. 2020. – 214 с.
ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. Москва. 2019. – 57 с.

ГОСТ Р 54084-2010. Модели атмосферы в пограничном слое на высотах от 0 до 3000 м для аэрокосмической практики. Параметры. М. : Стандартинформ. 2013. – 130 с.

Затевяхин М.А., Кузнецов А.Е., Никулин Д.А., Стрелец М.Х. Численное моделирование процесса всплывания системы высокотемпературных турбулентных термиком в неоднородной сжимаемой атмосфере // ТВТ. 1994. № 32(1). С. 44–56.

Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М. : Машиностроение. 1965. – 463 с.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М. : Наука. 1986. – 736 с.

Мелош Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М. : Мир. 1994. – 336 с.

Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П. Методология оценки перспективной парадигмы развития минерально-сырьевого комплекса // ФТПРПИ. 2015. № 2. С. 177–187.

Угаров А.А., Исмагилов Р.И., Бадтиева Б.П., Борисов И.И. Состояние и перспективы развития комплекса буровзрывных работ на горнорудных предприятиях ООО УК «Металлоинвест» // Горный журнал. 2017. № 5. С. 102–106. DOI:10.17580/gzh.2017.05.24.

Фингер М., Ли Е., Хелм Ф., Хейес Б., Хорниг Х., Макгайр Р., Кахара М., Гидри М. Влияние элементарного состава на детонационные свойства ВВ. В сб. Детонация и взрывчатые вещества. М. : Мир. 1981. С. 52–75.

Хазинс В.М., Соловьев С.П., Локтев Д.Н., Крашенинников А.В., Шувалов В.В. Перенос микрочастиц пыли ветром в планетарном пограничном слое // Динамические процессы в геосферах: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М. : Графитекс, 2021. Вып. 13. С. 147–156. DOI: 10.26006/22228535_2021_1_147.

Хазинс В.М., Соловьев С.П., Локтев Д.Н., Крашенинников А.В., Шувалов В.В. Загрязнение приповерхностного слоя атмосферы частицами пыли микронного размера в результате массовых взрывов на открытых карьерах // ФТПРПИ. 2022. № 4. С. 170–185. DOI: 10.15372/FTPRPI20220416.

Шувалов В.В., Хазинс В.М., Соловьев С.П. Численное моделирование тротилового взрыва в скважине // Динамические процессы в геосферах: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М. : Графитекс, 2021. Вып. 13. С. 140–147. DOI: 10.26006/22228535_2021_1_140.

Gualtieri C., Angeloudis A., Bombardelli F., Jha S., Stoesser T. On the values for the turbulent Schmidt number in environmental flows // Fluids. 2017. No 2. P. 1–27. DOI: 10.3390/fluids2020017.

Joseph G., Lowndes I.S., Hargreaves D. A computational study of particulate emissions from Old Moor Quarry, UK. J. Wind // Eng. Ind. Aerodyn. 2018. No 172. P. 68–84. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.10.018.

Khazins V.M., Shuvalov V.V., Soloviev S.P. Numerical Modeling of Formation and Rise of Gas and Dust Cloud from Large Scale Commercial Blasting // Atmosphere. 2020. No 11. P. 1112. DOI: 10.3390/atmos11101112.

Krasheninnikov A.V., Loktev D.N., Soloviev S.P., Khazins V.M. Transport of microparticles as stated by observation data in the open mining pit: Proceedings, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. P. 119165Y. DOI: 10.1117/12.2603277.

Lilly D.K. The representation of small-scale turbulence in numerical simulations. In: Proc. IBM scientific computing symposium on environmental sciences, Yorktown Heights, NY, IBM form No. 320–1951. 1967. P. 195–210. DOI: 10.5065/D62R3PMM.

Melosh H.J., Ivanov B.A. Impact crater collapse // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1999. 27. P. 385–425. DOI: 10.1146/annurev.earth.27.1.385.

Nigmatulin R.I. Dynamics of Multiphase Media ; Hemisphere Publishing Corporation: New York, NY, USA. 1990. No 2. P. 507.

Silvester S., Lowndes I.S., Hargreaves D. A computational study of particulate emissions from an open pit quarry under neutral atmospheric conditions // Atmos. Environ. 2009. No 43. P. 6415–6424. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.07.006.

Shuvalov V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect // Shock Waves. 1999. No 9. P. 381–390. DOI: 10.1007/s001930050168.

Shuvalov V., Khazins V., Krasheninnikov A., Soloviev S. Formation and evolution of a dust cloud as a result of TNT detonation in a borehole: numerical simulation // Mining. 2023. No 3(2). 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. 1974. P. 121.

Torno S., Torano J., Menendez M., Gent M. CFD simulation of blasting dust for the design of physical barriers // Environ. Earth Sci. 2011. No 64. P. 73–83. DOI: 10.1007/s12665-010-0818-6.

Wang Y., MacCall B.T., Hocut C.M., Zeng X., Fernando H.J.S. Simulation of stratified flows over a ridge using a lattice Boltzmann model // Env. Fluid Mech. 2020. No 20. P. 1333–1355. DOI: 10.1007/s10652-018-9599-3.

Wang Y., Benson M.J. Large-eddy simulation of turbulent flows over an urban building array with the ABLE-LBM and comparison with 3D MRI observed data sets // Env. Fluid Mech. 2021. No 21. P. 287–304. DOI: 10.1007/s10652-020-09770-6.

NUMERICAL SIMULATION OF THE ATMOSPHERIC EVOLUTION OF DUST PRODUCED BY EXPLOSIONS IN BOREHOLES OF A MINING QUARRY

© 2023 V. M. Khazins^{1,*}, V. V. Shuvalov¹, S. P. Soloviev¹

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: v_hazins@yahoo.com*

A numerical model for calculating explosive detonation in boreholes is described. The model provides for the possibility of converting ejecta from the explosion crater into discrete particles (dust and stones) and calculating the motion of these condensed particles and their interaction with the gas flow within the framework of the equations of motion of multiphase media. The results of the calculation of 1000 kg TNT explosions in several boreholes 15 m deep are presented. These calculations demonstrate the formation and evolution of a gas and dust cloud, the change in the mass of particles of different sizes in the air with time, and their spatial distribution. A numerical analysis of the behavior of a gas and dust cloud in the wind field after completion of its rise was carried out, and the first approximation of dependence of the surface concentration of fine particles on time was obtained at distances up to several kilometers from the quarry wall. According to the calculations, the excess of the maximum permissible concentration of suspended particles in the atmosphere at downwind distances exceeding 500 m from the pit will not be achieved under the conditions of the considered problem.

Keywords: TNT explosion, discrete particles, dust dissipation, wind, numerical simulation.