

УДК 622.271: 504.3.054

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЛУБОКИХ КАРЬЕРАХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПЕРЕНОС ПЫЛИ

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

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: khazins@idg.ras.ru*

Использование массовых взрывов при добыче полезных ископаемых в горнорудных карьерах приводит к экологическому загрязнению воздуха как внутри карьера, так и за его пределами. Методами численного моделирования исследована динамика взаимодействия ветра с поверхностью карьера и распространение пыли отдельного блока массового взрыва с учетом этого взаимодействия. В модельной постановке (двухмерная геометрия, постоянный во времени набегающий стратифицированный ветер, модельный профиль глубокого (500 м) карьера) продемонстрировано расслоение по вертикали течения в области пространства, ограниченного бортами карьера, на нижнюю и верхнюю зоны различной вихревой структуры. Внутри карьера в окрестности границы между зонами формируется область температурной инверсии. Моделирование распространения облака пыли, сформированного массовым взрывом на уступе наветренного борта карьера, показало, что часть этого облака, расположенная изначально в нижней зоне, переносится вихревыми потоками в сторону противоположного борта и не выходит за пределы этой зоны, оставаясь внутри карьера. Единственный путь очистки карьера – медленное истечение воздуха вдоль верхней части наветренного борта. Поступающая этим путем пыль распространяется по ветру вдоль поверхности, влияя на загрязнение отдаленных от карьера территорий.

Ключевые слова: массовый взрыв, горнорудный карьер, пыль, ветер, вихри, численное моделирование.

Для цитирования: Хазинс В.М., Шувалов В.В., Соловьев С.П. Численное моделирование вихревых процессов в глубоких карьерах и их влияние на перенос пыли // Динамические процессы в геосферах. Т. 17. № 3. С. 1–14. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_3_1

Введение

Отбойка горных пород массовыми взрывами при открытой разработке полезных ископаемых приводит к выбросу в атмосферу значительной массы твердых частиц пыли различного размера, что приводит к превышению предельно допустимых концентраций пыли как внутри карьера, так и за его пределами. Ухудшение экологической обстановки вызывает долговременные перерывы добычи и обеспокоенность жителей прилегающих к карьере районов. Особенно актуальна проблема экологического загрязнения для карьеров глубиной в несколько сот метров [Гендлер, Борисовский, 2021; Silvester et al., 2009; Torno et al., 2011; Joseph et al., 2018; Wang et al., 2021]. Развитие инициированного ветром вихревого течения приводит к формированию температурного инверсионного слоя внутри карьера, который подавляет вертикальные турбулентные потоки. Между бортами карьера развиваются обширные рециркуляционные зоны, из которых пыль долго не удаляется внешними потоками. Исследования обычно проводятся численными методами в условиях, максимально приближенных к реальным, т.е. вихревое газодинамическое течение рассматривается в рамках 3D приближения с учетом рельефа конкретного карьера. Однако в силу ограниченности ресурсов современной вычислительной техники такой подход приводит к использованию достаточно крупных ячеек расчетной сетки, размер которых достигает нескольких десятков метров, что позволяет выявить лишь общую картину течения. Кроме того, в подобных расчетах горизонтальные

размеры расчетной области обычно близки к размерам карьера. Возможно, это одна из причин того, что численные исследования загрязнения пылью не распространяются на область за пределами карьеров.

Дополнительная сложность возникает при моделировании динамики твердых частиц, инжектируемых массовыми взрывами. Как показывают расчеты [Хазинс и др., 2023], после завершения инерционно-конвективного всплывания облака пыли при взрыве отдельного блока массового взрыва горизонтальный размер облака в одном из направлений не превышает 100 м. В этом направлении при размере счетной ячейки в несколько десятков метров на описание довольно сложной структуры облака пыли будет приходиться всего лишь 2–3 счетных точки в его горизонтальных сечениях, что явно недостаточно. В этих условиях при моделировании загрязнения от взрывов реальные характеристики облака пыли массового взрыва обычно не учитываются, и источник частиц задается на основе экспериментальных данных.

Качество расчетной сетки можно существенно улучшить, рассматривая задачу в двухмерной геометрии, т.е. предполагая, что карьер представляет собой протяженный глубокий ров, продольный размер которого много больше поперечного. Если вдоль поверхности поперек карьера дует ветер, однородный в продольном направлении, то течение будет определяться лишь газодинамическим потоком воздуха в плоскости поперечного сечения рва.

В рамках двухмерной геометрии рассмотрена задача, в которой набегающий ветер структурирован в соответствии с его параметрами в атмосферном пограничном слое [ГОСТ Р 54084-2010], профиль карьера – модельный, с плоским дном и плавно поднимающимися бортами. Характеристики карьера выбирались схожими с параметрами Лебединского горно-обогатительного комбината (ГОК), Курской магнитной аномалии [Адушкин и др., 2010; Угаров и др., 2017]: глубина карьера – 0.5 км, ширина карьера (рва) на уровне дневной поверхности – 4 км.

Для моделирования облака пыли, инициированного взрывом системы зарядов, использовались результаты численных расчетов [Shuvalov et al., 2023; Хазинс и др., 2023]. Схема подрыва зарядов массового взрыва в [Хазинс и др., 2023], согласно которой заряды с эквивалентной мощностью 1 т ТНТ располагаются на уступе борта карьера в скважинах в три ряда с примерно одинаковыми расстояниями между скважинами, выбрана в соответствии с технологией взрывных работ на Лебединском ГОКе.

Постановка задачи о взаимодействии ветра с поверхностью карьера

Будем считать, что ось Y направлена вдоль карьера (рва). Решение задачи ищется в плоскости поперечного сечения карьера (X, Z), рис. 1а. Центр системы координат был выбран в центре карьера на уровне дневной поверхности. Синей линией отмечена граница карьера между грунтом и воздухом. На бортах карьера предусмотрены уступы, на площадке одного из них инициируется подрыв зарядов.

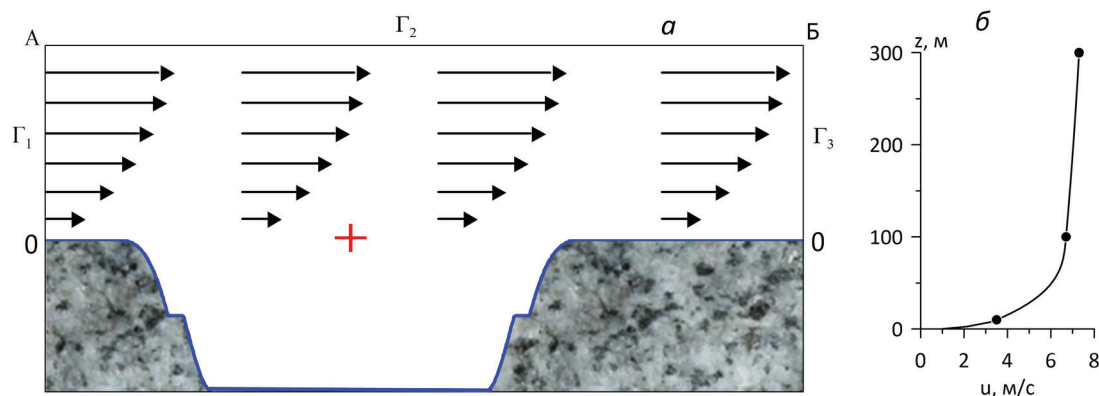


Рис. 1. Панель a : схема расчетной области, стрелками отмечено начальное поле ветра, закрашенные участки – грунт карьера, красным крестиком отмечен центр карьера на уровне дневной поверхности. Панель b : распределение скорости u по вертикали z в области существенного изменения параметров ветра. Точки – значения скорости из таблиц [ГОСТ Р 54084-2010], сплошная кривая – интерполяция скорости по рекомендациям [ГОСТ Р 54084-2010]

Через границу Γ_1 втекает поток воздуха, имитирующий ветер, скорость, температура и давление которого соответствуют параметрам атмосферного пограничного слоя (АПС) [ГОСТ Р 54084-2010], рис. 1б. Характеристики АПС приведены в [ГОСТ Р 54084-2010] в широком диапазоне широт и долгот. Выбор конкретной локализации не оказывает принципиального влияния на качество наших оценочных расчетов. Для определенности выше дневной поверхности были выбраны профили скорости, температуры и плотности для летнего сезона в точке с координатами 55° с. ш. и 40° в. д. Эти параметры задавались в начальный момент времени в расчетной области. Ниже дневной поверхности, внутри карьера, воздух в начальный момент времени считался неподвижным, а плотность и давление экстраполировались по экспоненциальному закону.

На границе Γ_2 было реализовано условие отражения потока от «жесткой» стенки, т.е. нормальная компонента скорости к этой границе полагалась равной нулю, также как и производные от всех остальных характеристик потока по нормали. Граница Γ_2 располагалась достаточно высоко, на расстоянии примерно 1.5 км от уровня дневной поверхности. На границе Γ_3 задавалось условие свободного вытекания, т.е. производные от всех параметров потока по нормали к Γ_3 задавались равными нулю. Положение границы Γ_3 выбиралось достаточно далеко от центра карьера, на расстоянии, приблизительно в 20 раз превышающем глубину карьера. Граница карьера, отмеченная на рис. 1а синей линией, рассматривалась как шероховатая поверхность, на которой происходит полное торможение потока. Для постановки граничного условия граница карьера аппроксимировалась вертикальными и горизонтальными отрезками, на которых обе компоненты скорости приравнивались нулю, также как и производные от всех термодинамических характеристик потока по нормали к отрезкам.

Центр карьера располагался на расстоянии 2.5 км от левой границы расчетной области. Расчеты задач проводились на нерегулярных сетках с числом узлов по осям X и Z 1300×300 . Шаг сетки по осям X и Z в прямоугольнике $-2500 < x < 3000$ м, $-500 < z < 500$ м выбирался равным 5 м. Вне этого прямоугольника шаг постепенно увеличивался, достигая 40 по оси X , и 15 м по оси Z .

Метод моделирования

Для моделирования динамики воздушных потоков со скоростями порядка скорости ветра полная система уравнений Навье–Стокса для сжимаемой жидкости записывается в дозвуковом приближении [Затевахин и др., 1994; Khazins et al., 2020; Хазинс и др., 2024]. С помощью характерных для рассматриваемой задачи параметров исходные уравнения приводятся к безразмерному виду, что позволяет выделить члены, содержащие в качестве множителя квадрат числа Маха $M^2 = u_0^2 / a^2$, где u_0 – характерная скорость течения в рассматриваемых процессах, a – характерная скорость звука. В предположении малости числа Маха эти члены исключаются из рассмотрения. В результате гиперболическая система уравнений Навье–Стокса приводится к параболическому виду.

Для учета турбулентных процессов уравнения Навье–Стокса в дозвуковом приближении были осреднены методом крупных вихрей *Large Eddy Simulations* (LES) [Lesier, Metais, 1996]. В LES модели большие вихри, т.е. вихри, размер которых сопоставим с размером ячейки разностной сетки, рассчитываются явно, а эффекты на малых масштабах моделируются с помощью турбулентной (вихревой) вязкости, кинематический коэффициент которой определяется соотношением:

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

где Δ – размер сеточной ячейки, C_{sm} – константа Смагоринского, S – тензор скорости деформации,

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

Черта сверху отмечает отфильтрованные LES методом величины.

Вблизи поверхности вследствие ее шероховатости [Stull, 1988] вихревая вязкость уменьшается и становится пренебрежимо малой в так называемом слое шероховатости. Один из простых способов учета этой тенденции – принудительное уменьшение длины смешения $\delta = C_{sm} \Delta$ по мере приближения к поверхности [Mason, Brown, 1999]. При этом предполагается, что величина длины смешения δ_0 в области, на которую не оказывает влияние шероховатость поверхности (свободная атмосфера), достигается асимптотически при стремлении z к бесконечности по соотношению:

$$\frac{1}{\delta^n} = \frac{1}{\delta_0^n} + \frac{1}{(kz)^n},$$

где k – константа Кармана, а z – расстояние до поверхности. Так же, как и в [Mason, Brown, 1999], было выбрано $n = 2$. Обзор [Neuwstadt et al., 1993] ряда работ по численному моделированию АПС показывает, что длина смешения δ_0 в свободной атмосфере порядка 10 м. Так как в постановке задачи присутствует полость, то расстояние до поверхности рассматривалось как расстояние до ближайшей точки поверхности карьера.

При расчете задач распространения пыли массовых взрывов, которые представлены ниже, совместно с уравнениями Навье–Стокса решалось уравнение переноса пассивной примеси [Ландау и Лифшиц, 1986]:

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

где c – концентрация примеси, $\mathbf{U}$ – вектор скорости, D_T – турбулентный коэффициент диффузии, определяемый по значениям вихревой вязкости τ_T из условия, что эти величины связаны между собой турбулентным числом Шмидта $Sc = \tau_T / D_T$. Так как турбулентное число Шмидта может меняться в широких пределах (от 0.1 до 2.5) в зависимости от рассматриваемой задачи [Gualtieri et al., 2017], то для определенности было выбрано значение, равное 1.

Характеристики течения, реализующегося при взаимодействии ветра с поверхностью карьера

Заданный в области $z > 0$ поток воздуха (рис. 1а), благодаря вязким силам, постепенно инициирует вихревое течение в полости карьера. Результирующее поле скорости приведено на рис. 2а.

Течение в верхней части области, включая и верхнюю часть полости, характеризуется отсутствием хаотичных колебаний скорости и преобладанием ее горизонтальной составляющей. Назовем эту

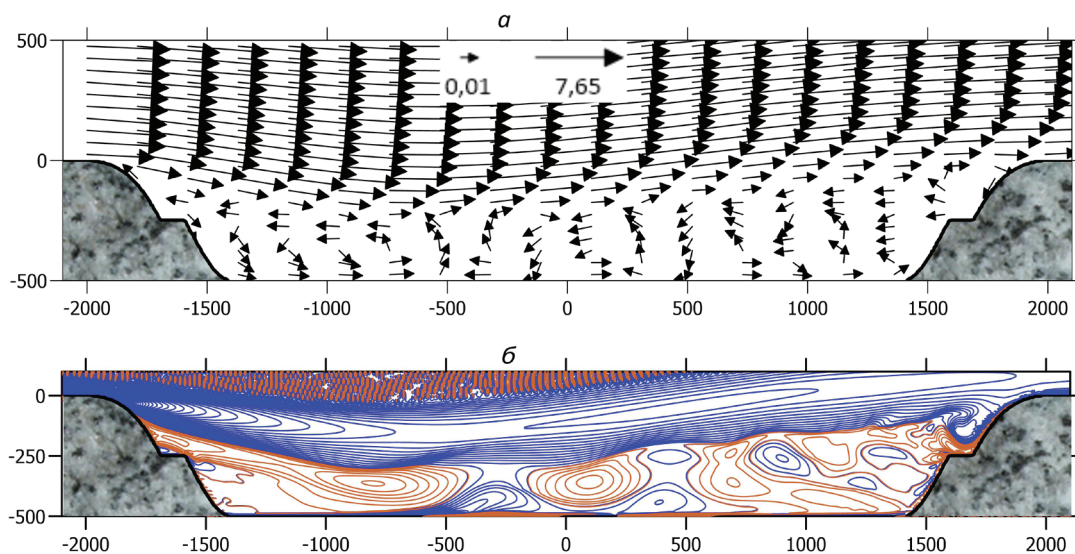


Рис. 2. Поле скорости $\mathbf{U}$ (панель а) и соответствующие ему изолинии $\text{rot}(\mathbf{U})$, (панель б) в момент времени $t = 1$ ч. В прямоугольнике на панели а отображены предельные значения скорости в м/с. Все расстояния по осям приведены в метрах

область – областью скольжения потока. Ниже области скольжения течение кажется беспорядочным, но это не совсем так. Способ представления течения в виде векторного поля нагляден, но не позволяет отобразить достаточно полно структуру течения в выбранном масштабе рисунка. Поэтому дополнительно было использовано описание векторного поля с помощью дифференциального оператора $rot(\mathbf{U})$, характеризующего вращательное движение элемента среды в данной точке пространства. Замкнутые изолинии значений $rot(\mathbf{U})$ свидетельствуют о развитии вихря. Ограничимся здесь анализом направления вращения вихрей, т.е. знаком их угловой скорости. На рис. 2б синими изолиниями отображены положительные значения $rot(\mathbf{U})$, коричневыми – отрицательные. Благодаря достаточно подробной разностной сетке, удастся явно разрешить вихри размером в несколько десятков метров. Завихренность поля течения в нижней части карьера продемонстрирована на рис. 2б. Отметим, что над уступом наветренного борта карьера, ширина которого составляет 100 м, развиваются локальные вихри.

Рис. 2 соответствует моменту времени $t = 1$ ч. Расчеты были проведены до $t = 4$ ч. Течение в области скольжения практически не меняется. Структура вихревого течения в нижней части карьера мобильна, вихри перемещаются, исчезают, возникают. Будем считать, что начиная с момента времени $t = 1$ ч, течение становится квазистационарным.

Взаимодействие ветра с поверхностью карьера вносит существенные изменения в распределение по вертикали скорости потока как в области карьера, так и за его пределами по ветру ($x > 2$ км). Течение за наветренным бортом быстро восстанавливается до горизонтального, однако распределения скорости по вертикали значительно отличаются от профиля скорости втекающего в расчетную область потока. На рис. 3 профиль скорости втекающего потока отражен кривой 1. На расстоянии -2.1 км от центра карьера (0.4 км от границы расчетной области) газодинамические процессы к моменту $t = 1$ ч слабо меняют профиль скорости втекающего потока (рис. 3, кривая 2). Напомним, что край подветренного борта карьера на уровне дневной поверхности находится на расстоянии $x = -2$ км, наветренного – $x = 2$ км. За наветренным бортом карьера распределения скорости по вертикали отличаются от профиля втекающего потока и характеризуются почти линейным ростом скорости до высот порядка 250 м (рис. 3, кривые 3–5). Наблюдается тенденция к приближению этих профилей к кривой 1 по мере удаления от центра карьера, но оценить предельное распределение в рамках настоящего исследования не представляется возможным.

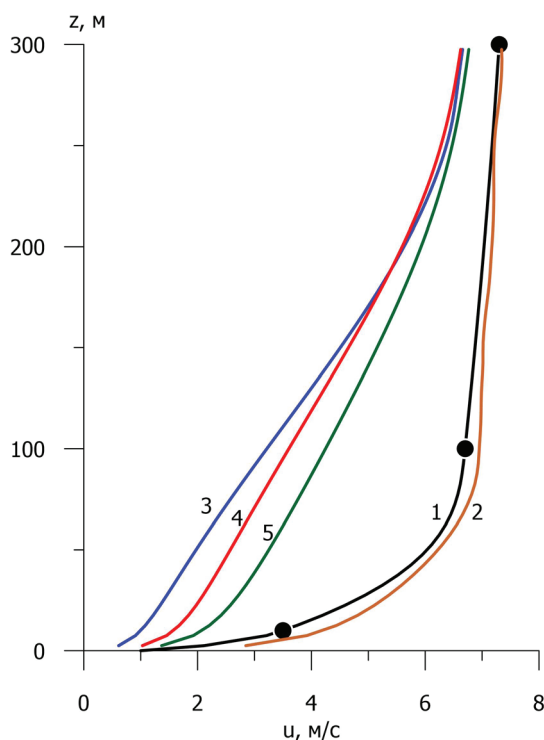


Рис. 3. Распределения горизонтальной компоненты скорости по вертикали на различных расстояниях x_d от центра карьера в момент времени $t = 1$ ч: $x_d = -2.5, -2.1, 3, 5$ и 7 км; кривые 1–5 соответственно

Распределение температуры в расчетной области в начальный момент времени характеризуется почти линейным убыванием с высотой, максимальное значение – у дна карьера (рис. 4а). Со временем формируется тепловое поле (рис. 4б), характерной особенностью которого в области скользящего потока является прилегающий к подветренному борту температурный «купол», внутри которого максимальная температура превышает начальную температуру у дна карьера (области, закрашенные голубым и зеленым цветом). Ниже области скользящего вихревые процессы приводят к выделению тепла и его переносу турбулентной теплопроводностью. Такая структура температурного поля сохраняется и в более поздние моменты времени: температурный «купол» имеет примерно те же размеры и значения температур, а в нижней части карьера температурное поле имеет пятнистую структуру и характеризуется флуктуациями (рис. 4в).

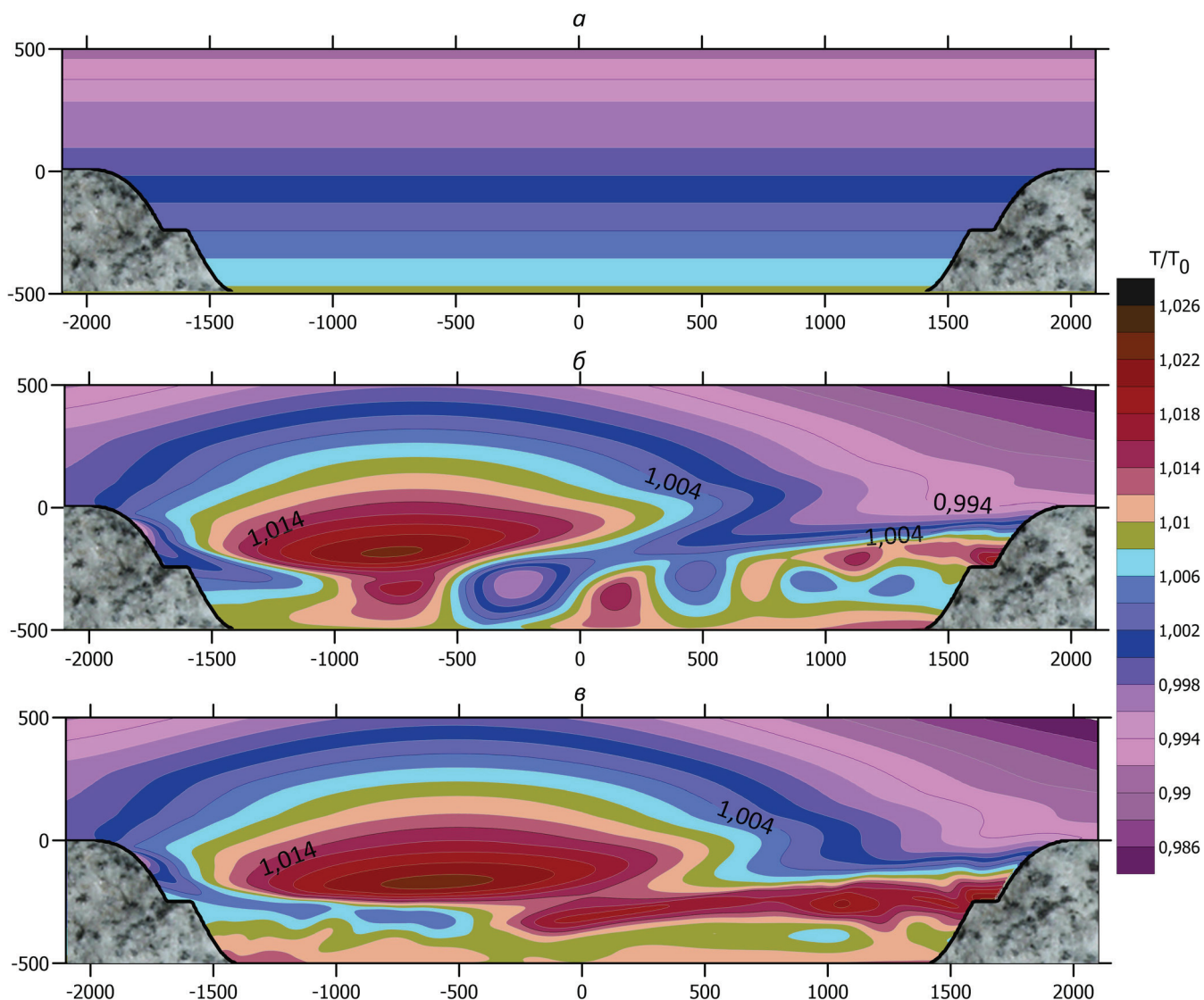


Рис. 4. Изолинии относительных температур T/T_0 в моменты времени 0, 1, 2 ч (панели а, б, в соответственно). T_0 – температура в центре карьера в начальный момент времени. Все расстояния по осям приведены в метрах

Образование температурного купола связано с затеканием воздуха в полость карьера вдоль поверхности подветренного борта, что приводит к его отражению как от самого борта, так и от границы вихревой зоны. В процессе отражения элементарные объемы воздуха (воздух в счетных ячейках) сжимаются, что приводит к выделению тепла. Процесс сжатия и растяжения элементарных объемов можно анализировать с помощью дифференциального оператора $\text{div}(\mathbf{U})$.

Значения $\text{div}(\mathbf{U}) < 0$ характеризуют сжатие элементарных объемов, $\text{div}(\mathbf{U}) > 0$ – растяжение. Из рис. 5 следует, что в момент времени $t = 1$ ч максимальное сжатие наблюдается вблизи верхней части подветренного борта и постепенно вниз по потоку оно уменьшается до тех пор, пока преобладающим процессом становится растяжение объемов. Из этого следует, что в квазиустановившемся течении воздух, распространяющийся по линиям тока зоны скольжения от верхнего края подветренного борта, будет постоянно греться, пока растяжение объемов не прекратит этот процесс. Отметим, что в нижней части области скольжения (рис. 5) наблюдается локальный максимум сжатия, который является следствием отражения втекающего в полость карьера воздуха от границы вихревой зоны.

Анализ вертикального распределения температуры для нескольких сечений x внутри карьера (рис. 6) показал, что в каждом из сечений есть область роста температуры по вертикали – температурная инверсия. Назовем величину повышения температуры в области инверсии амплитудой инверсии.

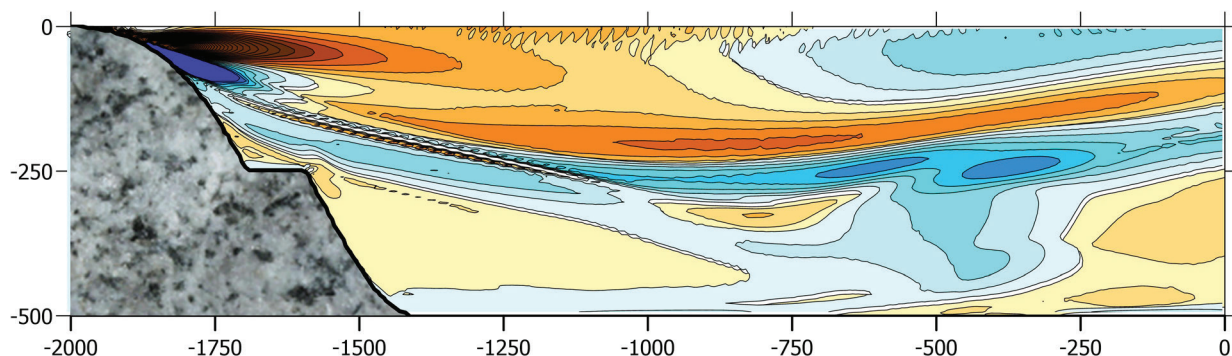


Рис. 5. Распределение значений $\text{div}(\mathbf{U})$ в окрестности подветренного борта карьера в момент времени $t = 1$ ч. Оттенки коричневого цвета – отрицательные значения $\text{div}(\mathbf{U})$, оттенки синего – положительные $\text{div}(\mathbf{U})$. Чем выше насыщенность цвета, тем выше абсолютное значение $\text{div}(\mathbf{U})$

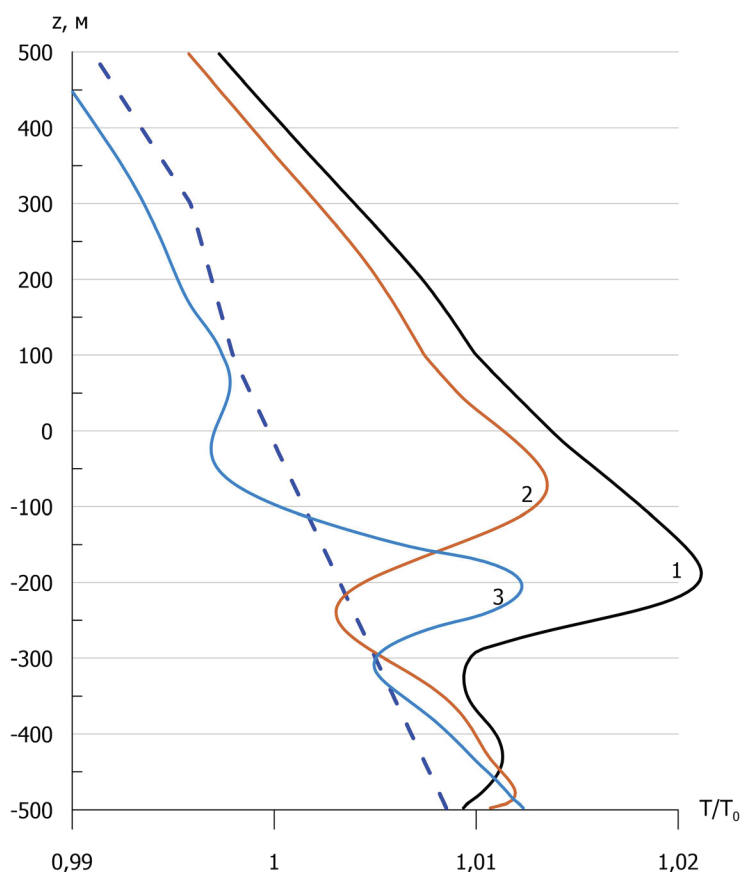


Рис. 6. Распределения температуры по вертикали на различных расстояниях x_d от центра карьера в момент времени $t = 1$ ч: $x_d = -1, 0$ и 1 км; кривые 1–3 соответственно. Пунктир – начальное распределение температуры

Наибольшая амплитуда в момент времени $t = 1$ ч наблюдается вблизи центра температурного купола ($x_d = -1$ км) на высотах от $z = -300$ до $z = -200$ м. Примерно такой же диапазон роста температуры отмечается и в центре карьера ($x_d = 0$), но на высотах от $z = -225$ до $z = -75$ м. Инверсия температуры с амплитудой несколько ниже, чем на линии $x_d = -1$ км, но в том же диапазоне высот видна и на распределении температур на линии $x_d = 1$ км. Таким образом, внутри карьера вихревыми процессами формируется инверсионный слой толщиной примерно 100 м с нижней границей на высотах от 200 до 300 м от дна карьера

Постановка задачи о распространении пыли при массовом взрыве на уступе борта карьера

Для пояснения способа расположения облака массового взрыва в расчетной области рассмотрим временно задачу в трехмерном представлении и допустим, что на уступе борта карьера в направлении Y располагается в три ряда вдоль борта система зарядов в скважинах. Пусть заряды в рядах расположены таким образом, что каждый заряд в среднем ряду окружен зарядами, расположенными в узлах правильного шестиугольника, расстояние между узлами которого составляет 10 м. В этих условиях по методике [Shuvalov et al., 2023] с некоторыми предположениями [Хазинс и др., 2023] было рассчитано в рамках осевой симметрии всплывающее под действием конвективных и инерционных сил облако пыли для кластера из 7 зарядов, расположенных в центре и вершинах правильного шестиугольника. Расчет доведен до завершения подъема облака, время – порядка минуты. К этому времени облако инжектируемой пыли поднимается на высоту около 500 м над уступом, его горизонтальный размер достигает примерно 100 м, а в воздухе остаются только частицы размером менее 100 мкм. Концентрация пыли в сечении этого облака в радиальном направлении r представлена на рис. 7а. На рис. 7 значение 0 на оси Z соответствует высоте уступа, а значение 0 на оси X – центру уступа.

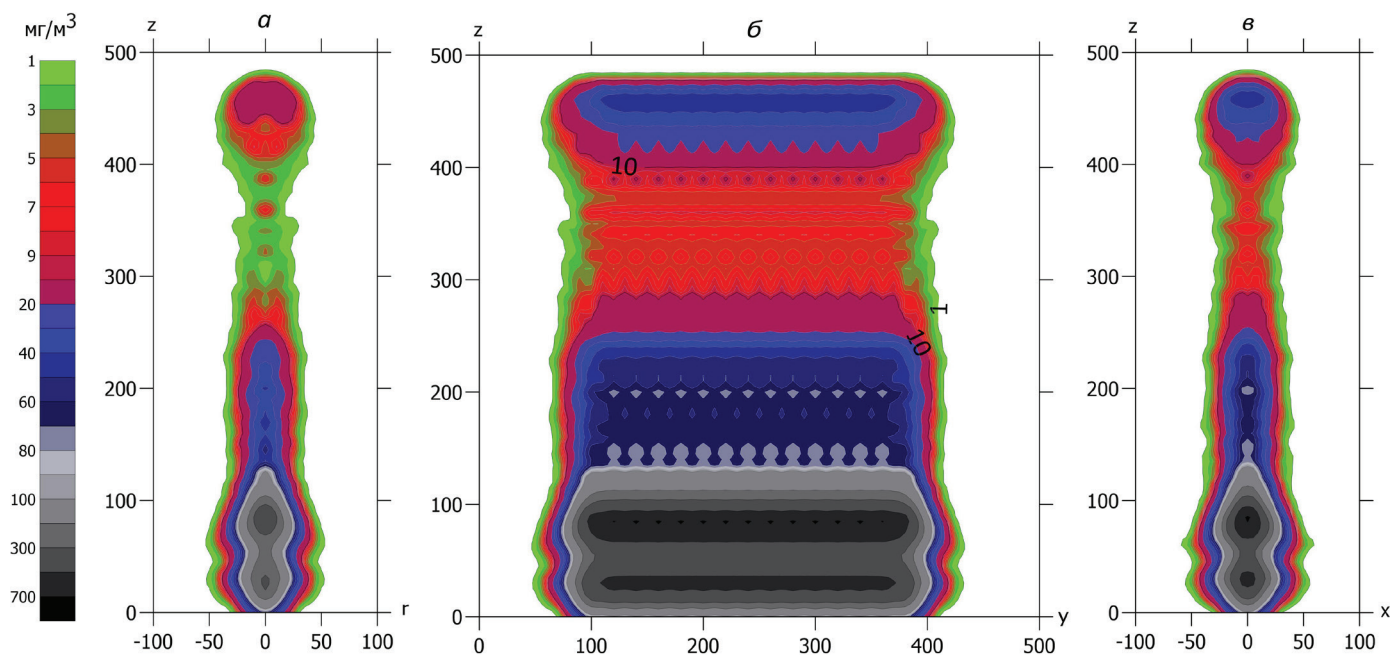


Рис. 7. Концентрация пыли через минуту после подрыва: а – кластера из 7 зарядов; б – 15 кластеров, продольное сечение облака пыли вдоль линии расположения центров кластеров; в – 15 кластеров, поперечное сечение облака пыли. Расстояния по осям – в метрах

Основная масса пыли сосредоточена в нижней части облака, здесь концентрация достигает 400 мг/м³. В верхней части облака концентрация примерно 20 мг/м³. На следующем этапе кластеры располагались в ряд вдоль борта карьера на расстоянии 20 м между центрами кластеров, и концентрация

в перекрывающихся областях суммировалась. Результирующее поле концентрации показано на рис. 7б для 15 кластеров. Концентрация в нижней части облака выросла до 700 мг/м^3 , а в верхней – до 50 мг/м^3 . При достижении некоторого количества кластеров в ряду концентрация пыли в сечениях (X, Z) перестает зависеть от числа кластеров и поле концентрации приобретает вид, показанный на рис. 7в.

Вернемся к двумерной геометрии. Так как даже в двумерной постановке совместный расчет взаимодействия ветра с поверхностью карьера и быстропротекающих процессов детонации ВВ, распространения ударных волн и волн разрежения, переработки выброшенного из воронки грунта в дискретные частицы и т.д. представляется практически невыполнимым в настоящее время, то полученное облако пыли (рис. 7в) просто размещалось на уступе наветренного борта (рис. 8). При этом предполагалось, что процесс всплытия облака взрыва не влияет на характеристики квазиустановившегося течения.

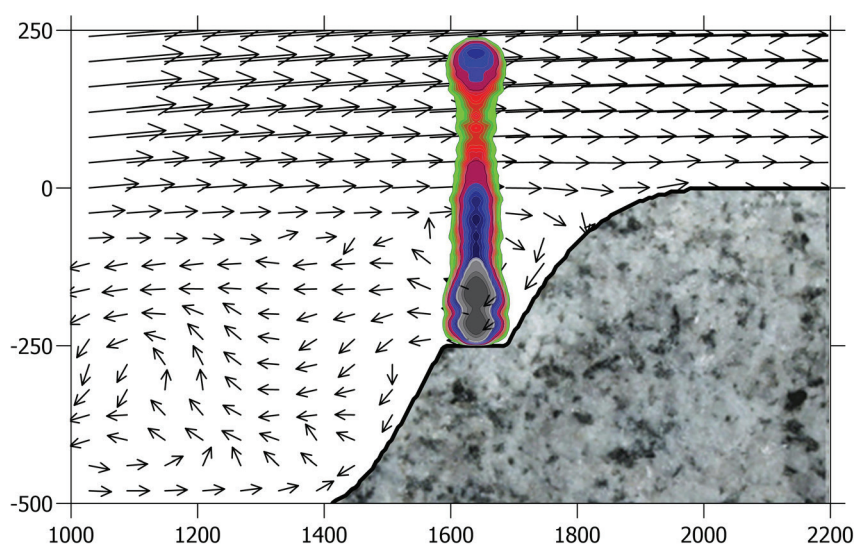


Рис. 8. Начальное расположение облака пыли в квазиустановившемся потоке воздуха. Расстояния по осям – в метрах

Высота уступа была выбрана на 250 м ниже уровня дневной поверхности, а его центр располагался на расстоянии 1650 м от центра карьера. Ниже при анализе течения будем считать, что время отсчитывается от момента размещения облака пыли в потоке воздуха. В расчетах оседание частиц пыли под действием силы тяжести не учитывалось.

Динамика облака пыли массового взрыва

Достаточно высокая скорость течения в верхней части облака пыли (рис. 8) обеспечивает быстрое его распространение в область за наветренным бортом (рис. 9а,б). Наклон облака определяется почти линейным вертикальным распределением скорости (рис. 3).

Нижняя часть облака расширяется под действием вихревых потоков, в основном, вглубь карьера. Несмотря на противоположные направления распространения пыли, связь между верхней и нижней частью облака со временем не прерывается и относительно медленное поступление пыли все более низкой концентрации из внутренней области карьера наблюдается в течение всего расчета (рис. 9в,г,д).

Высокая начальная концентрации пыли в окрестности уступа и относительно низкие скорости вихревого течения инициируют длительный процесс снижения концентрации, и только через три часа расчетного времени можно считать, что концентрация в области технологической площадки уступа стала меньше максимальной разовой предельно допустимой концентрации (ПДК) – 0.5 мг/м^3 [ГН 2.1.6.3492-17]. При этом область загрязнения частицами пыли внутри карьера вытягивается в направлении подветренного борта, но ее верхний край не проникает в область скольжения потока и пыль не вымывается из карьера в течение расчетного времени естественным путем. Единственный

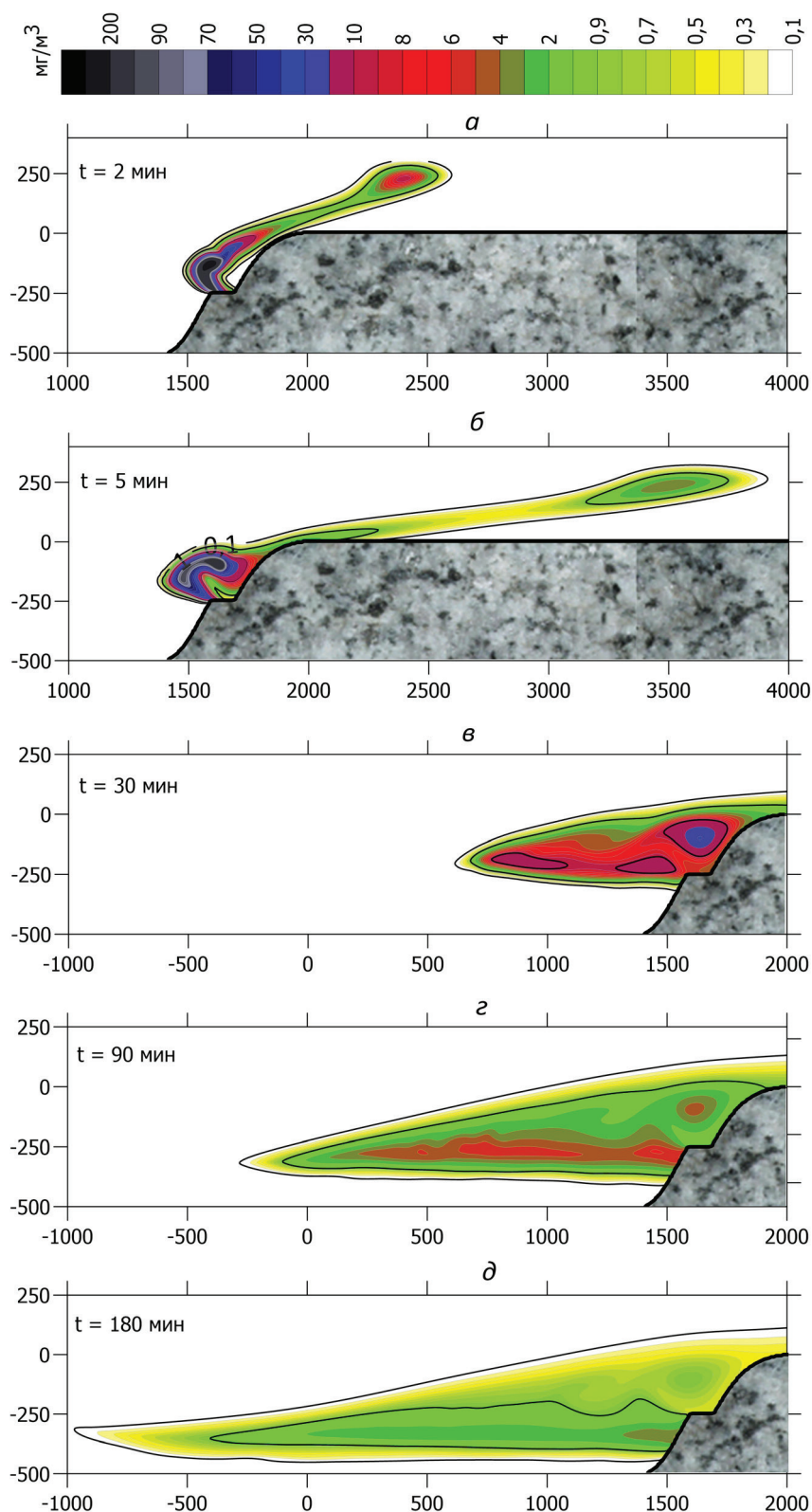


Рис. 9. Концентрация пыли в облаке в различные моменты времени. Панели в, г, д отражают характеристики облака только внутри карьера. Расстояния по осям – в метрах

путь очистки карьера – медленное истечение воздуха вдоль верхней части наветренного борта. Поступающая этим путем пыль распространяется вдоль поверхности, влияя на загрязнение отдаленных от карьера территорий.

На рис. 10 приведены концентрации пыли в центрах первой линии счетных ячеек, прилегающих к поверхности, т.е. на высоте 2.5 м. Локальный максимум кривой 1 (рис. 10) в момент времени 15 мин возникает, как показал численный анализ, в результате достижения наклонным столбом облака (рис. 9б) расстояния в 3 км у поверхности. Последующий рост концентрации и дальнейшие ее вариации определяются поступлением пыли из карьера, и именно этот процесс определяет долговременное, более полутора часов, превышение ПДК. С увеличением расстояния от центра карьера концентрация падает, и на расстоянии в 5 км превышение ПДК наступает лишь через 1 ч после взрыва и длится примерно 30 мин.

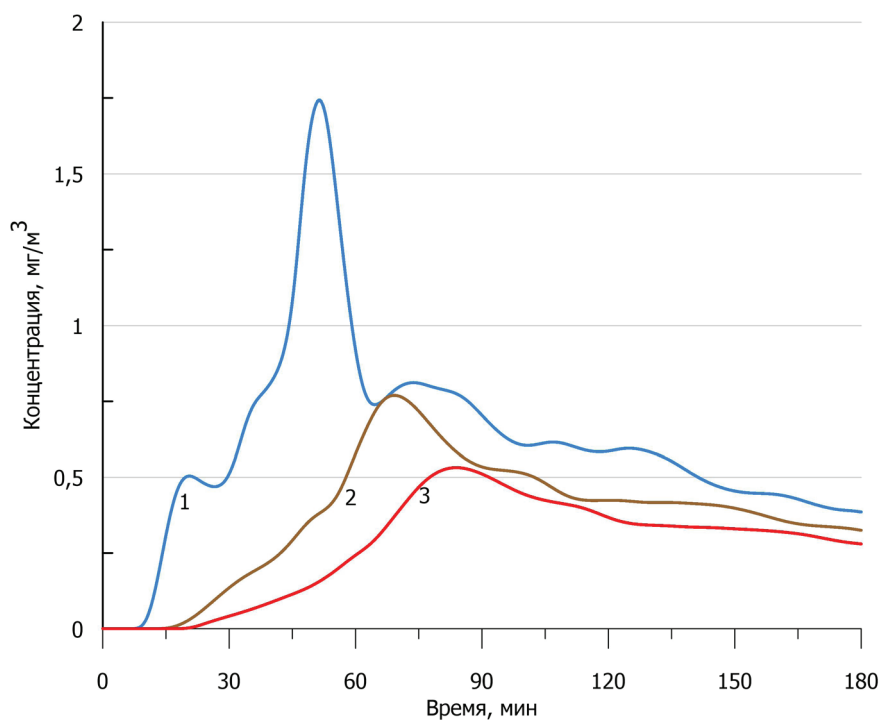


Рис. 10. Концентрация пыли вблизи поверхности на расстояниях от центра карьера 3, 5 и 7 км; кривые 1, 2, 3 соответственно

Обсуждение и выводы

В рамках ряда предположений (двухмерная геометрия, постоянный во времени набегающий стратифицированный ветер, модельный профиль глубокого карьера) численным моделированием уравнений Навье–Стокса в гипозвуковом приближении на достаточно подробной разностной сетке продемонстрировано вертикальное расслоение течения воздуха в области пространства, ограниченного бортами карьера, на две части. Течение в верхней части области, включая и верхнюю часть полости карьера, характеризуется отсутствием хаотичных колебаний скорости и преобладанием ее горизонтальной составляющей (область скольжения потока). В нижней части области развивается вихревое течение с размером явно разрешаемых вихрей в несколько десятков метров. Воздух нижней части области практически не перемешивается с воздухом верхней, и поэтому нижнюю часть можно рассматривать как застойную зону для пыли.

За наветренным бортом карьера распределения скорости по вертикали отличаются от профиля втекающего потока и характеризуются почти линейным ростом до высот 250–300 м. По мере удаления от наветренного борта карьера наблюдается тенденция к приближению распределения скорости по вертикали к профилю втекающего в расчетную область потока, но оценить предельное распределение в рамках настоящего исследования не представляется возможным. Следует отметить, что перенос пыли за наветренным бортом карьера определяется вертикальным распределением скорости, определение

характеристик которого возможно лишь путем численного моделирования с учетом процессов в полости карьера.

Взаимодействие ветра с поверхностью карьера модифицирует температурное поле. На фоне начального почти линейного вертикального распределения температуры формируется температурный купол, занимающий по горизонтали более чем половину карьера, начиная от подветренного борта карьера. Формирование купола связано как с затеканием воздуха ниже уровня дневной поверхности за подветренным бортом карьера и последующим его отражением от борта карьера и вихревой зоны, так и переносом тепла процессами теплопроводности. Следствием модификации начального температурного поля является формирование инверсии в профилях вертикального распределения температуры внутри карьера, начиная от высот примерно 200 до 300 м над дном.

В квазиустановившийся поток воздуха, сформированный в результате взаимодействия ветра с профилем карьера, на уступе наветренного борта было размещено облако пыли, характеристики которого в поперечном сечении блока зарядов ВВ были рассчитаны как с помощью численного моделирования, так и нескольких дополнительных предположений. Концентрация пыли в облаке взрыва крайне неоднородная, в нижней его части она более чем на порядок выше, чем в верхней. Нижний край облака с размером по вертикали примерно 500 м располагался на уступе, который на 250 м ниже уровня дневной поверхности, и тем самым большая часть пыли попадала в области вихревого течения ниже области скольжения. Расчеты показали, что нижняя часть расширяющегося облака взрыва распространяется, в основном, от наветренного борта карьера к подветренному. При этом пыль не выходит за область вихревой зоны и не попадает в зону скольжения потока. В результате формируется обширная долгоживущая застойная зона. Единственный путь очистки карьера – медленное истечение воздуха вдоль верхней части наветренного борта. Поступающая этим путем пыль распространяется по ветру вдоль поверхности, влияя на загрязнение отдаленных от карьера территорий. На расстоянии 1 км от наветренного борта загрязнение воздуха с превышением ПДК начинается примерно через 30 мин после массового взрыва и продолжается более полутора часов. На больших расстояниях загрязнение воздуха наступает позже и длится меньшее время.

Задачи рассмотрены в модельном представлении, их решение направлено, в основном, на изучение качественных характеристик течения, реализующегося в процессе взаимодействия ветра с поверхностью глубокого карьера. Представленные количественные оценки носят ориентировочный характер.

Финансирование

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

Список литературы

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. Т. 52. № 5. С. 418–426. <https://elibrary.ru/mwjusun>

Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2021. № 4. С. 59–75. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75>

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.

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

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М. : Наука. 1986. – 736 с.
- Угаров А.А., Исмагилов Р.И., Бадтиев Б.П., Борисов И.И. Состояние и перспективы развития комплекса буровзрывных работ на горнорудных предприятиях ООО УК «Металлоинвест» // Горный журн. 2017. № 5. С. 102–106. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.05.24>
- 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
- Хазинс В.М., Шувалов В.В., Соловьев С.П. Трехмерное моделирование распространения облака взвешенной пыли за пределами горнорудного карьера при массовых взрывах // ФТПРПИ. 2024. № 4. С. 29–41. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240402>
- Gualtieri C., Angeloudis A., Bombardelli F., Jha S., Stoesser T. On the values for the turbulent Schmidt number in environmental flows // Fluids. 2017. Vol. 2 (2). P. 1–27. <https://doi.org/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. Vol. 172. P. 68–84. <https://doi.org/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. Vol. 11 (10). P. 1112. <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/10/1112>
- Lesier M., Metais O. New trends in large-eddy simulations of turbulence // Annu. Rev. Fluid Mech. 1996. Vol. 28. P. 45–82. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.28.010196.000401>
- Mason P.J., Brown A.R. On subgrid models and filter operations in large eddy simulations // J. of Atmospheric Sciences. 1999. Vol. 56. P. 2101–2114. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<2101:OSMAFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<2101:OSMAFO>2.0.CO;2)
- Nieuwstadt F.T.M., Mason P.J., Moeng C.H., Schumann U. Large-eddy simulation of the convective boundary layer: a comparison of four computer codes. In: Durst F., Friedrich R., Launder B.E., Schmidt F.W., Schumann U., Whitelaw J.H. (Eds), Turbulent Shear Flows 8: Springer, Berlin, Heidelberg. 1993. P. 343–367. https://doi.org/10.1007/978-3-642-77674-8_24
- 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. Vol. 43. P. 6415–6424. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.006>
- Shuvalov V., Khazins V., Krashenninnikov A., Soloviev S. Formation and evolution of a dust cloud as a result of TNT detonation in a borehole: numerical simulation // Mining. 2023. Vol. 3 (2). P. 261–270. <https://doi.org/10.3390/mining3020016>
- Stull R.B. An introduction to boundary layer meteorology. Netherlands : Kluwer Academic Publishers. 1988. – 670 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- Torno S., Toraño J., Menendez M., Gent M. CFD simulation of blasting dust for the design of physical barriers // Environ. Earth Sci. 2011. Vol. 64. P. 73–83. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0818-6>
- Wang Y., Du C., Xu H. Key factor analysis and model establishment of blasting dust diffusion in a deep, sunken open-pit mine // ACS Omega. 2021. Vol. 6 (1). P. 448–455. <https://dx.doi.org/10.1021/acsomega.0c04881>

NUMERICAL SIMULATIONS OF VORTEX PROCESSES IN DEEP OPEN PIT MINES AND THEIR INFLUENCE ON DUST SPREAD

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

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

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

The use of powerful blasts during mining operations in open pit mines results in environmental pollution of the air both inside and outside the pit. The dynamics of wind interaction with the pit surface and the spread of blast dust are investigated by numerical methods. The vertical stratification of the flow in the area of space bounded by the pit sides into lower and upper zones of different vortex structures is demonstrated in a model setting (two-dimensional geometry, constant incoming stratified wind, model profile of a deep (500 m) open pit mine). It is shown that the temperature inversion region is formed inside the pit in the vicinity of the boundary between the zones. The propagation of the dust cloud formed by a powerful explosion on the bench of the windward side of a pit is investigated. It is shown that part of this cloud, initially located in the lower zone, is carried by vortex flows towards the opposite side and does not go beyond this zone, remaining inside the pit. The only way to clean the pit is by slowly flow of air escape along the top of the windward side. Dust from this pathway travels downwind along the surface, contributing to pollution in areas away from the pit.

Keywords: powerful blast, open pit mine, dust, wind, vortexes, numerical simulation.