

УДК 622.271:504.3.054

**ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБЛАКА ВЗВЕШЕННОЙ ПЫЛИ
ЗА ПРЕДЕЛАМИ ГОРНОРУДНОГО КАРЬЕРА ПРИ МАССОВЫХ ВЗРЫВАХ**

В. М. Хазинс, В. В. Шувалов, С. П. Соловьев

*Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН,
E-mail: khazins@idg.ras.ru, Ленинский проспект, 38, 119334, г. Москва, Россия*

Методами численного решения полной системы уравнений Навье–Стокса для сжимаемой жидкости в дозвуковом приближении исследован перенос ветром облака взвешенной пыли в атмосферном пограничном слое территории, прилегающей к горнорудному карьере. Источник пыли — массовый взрыв с суммарной массой заряда ~ 100 т тротила, расположенный на уступе борта карьера на глубине 250 м. В расчетах учитывается часть пыли источника, поднимающаяся в результате взрыва над дневной поверхностью карьера. Проведены оценки размеров области, где концентрация взвешенной пыли над поверхностью превышает предельно допустимые значения. Исследована зависимость этих размеров от угла α между направлением ветра и бортом карьера. Показано, что максимальное расстояние от борта карьера, на котором концентрация пыли превышает предельно допустимые значения, составляет 3 км. Длительность воздействия в фиксированных точках над поверхностью не зависит от угла α и растет от нескольких минут на расстоянии 500 м от центра взрыва до десятка минут на расстоянии 3 км.

Горнорудные карьеры, массовые взрывы, концентрация пыли, предельно допустимые значения, атмосферный пограничный слой, аэродинамика, численное моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20240402
EDN: HFYXLXQ

Добыча полезных ископаемых в горнорудных открытых карьерах сопровождается выносом в атмосферу огромного количества пыли в большинстве технологических процессов, сопровождающих добычу. Крупные частицы пыли довольно быстро удаляются из воздуха при гравитационном осаждении, а частицы размером до нескольких сот микрометров увлекаются потоками воздуха и переносятся внутри карьера и за его пределы [1]. Ухудшение качества воздуха — серьезная проблема горнодобывающих районов [2]. Существенный вклад (> 50 %) в поток твердых частиц вносят массовые взрывы, служащие для дробления породы на стадиях вскрыши и добычи полезного компонента в открытых карьерах [3]. Дисперсия пыли, поступающей во время массовых взрывов, динамика ее перераспределения внутри карьера и последующий вынос пыли воздушными потоками за его пределы, являются предметом теоретических исследований.

Изучение течений, возникающих при взаимодействии ветра с рельефом карьера, продемонстрировало отличие характера вихревых потоков в карьерах глубиной 500 м и более и относительно мелких (50–100 м) [4–9]. Взаимодействие ветра с рельефом глубокого карьера формирует объемную рециркуляционную зону между бортами карьера, из которой пыль долго не удаляется внешними потоками. Солнечная радиация способствует изменению стратификации воздуха внутри карьера и образованию инверсий, которые подавляют турбулентные потоки и служат запирающим устройством для вихрей, чем и определяется долгое существование рециркуляционной зоны.

Необходимость изучения динамики твердых частиц, инжектируемых массовыми взрывами, на фоне сложной аэродинамики взаимодействия ветра с рельефом глубокого карьера существенно усложняет решение задачи о распространении пылевого облака массового взрыва. Моделирование взрывных процессов требует решения уравнений механики сплошной среды с учетом переработки выброшенного из воронки взрыва вещества в дискретные частицы (пыль и камни), подъема этих конденсированных частиц и их взаимодействия с газовым потоком. Причем характерное время развития взрывных процессов значительно меньше времени диссипации пыли внутри карьера, а характерные размеры затронутой взрывом области намного меньше размеров карьера. В этих условиях при моделировании загрязнения от взрывов расчет инъекции обычно пропускают, задавая на основе экспериментальных данных гипотетический источник частиц [4–6].

Решение задач аэродинамики карьеров требует использования современных методов численного моделирования трехмерных вихревых газодинамических течений с учетом сложного рельефа карьера. Ввиду трудности разработки подобных моделей часто используются коммерческие коды аэродинамики, настраиваемые на конкретные задачи [10]. Подобный подход позволяет рассматривать течения в условиях конкретного карьера с реальным рельефом, но в силу ограниченности ресурсов современной вычислительной техники горизонтальные размеры расчетной области обычно близки к размерам карьера. Возможно, это одна из причин того, что численные исследования загрязнения пылью, инжектируемой массовыми взрывами, ограничены размерами карьеров.

Расширить представления о распространении пыли массовых взрывов за пределы карьера можно за счет упрощения постановки задачи. Рассмотрим характерные условия Лебединского карьера Курской магнитной аномалии [3, 11]. Массовые взрывы обычно проводятся на уступах бортов карьера. Несмотря на большую глубину локализации этих уступов в глубоких карьерах, мощность взрывов (1 т ВВ на скважину) настолько велика, что часть инжектируемой взрывом пыли может подниматься выше дневной поверхности карьера [12, 13]. С помощью численного моделирования оценен вклад в загрязнение прилегающих к карьере территорий этой частью пылевого облака.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача решалась в два этапа. На первом этапе рассматривалось взаимодействие ветра с подстилающей поверхностью. Предполагалось, что вдоль шероховатой плоской поверхности распространяется поток воздуха с заданными термодинамическими и кинематическими параметрами, определяемыми по значениям атмосферного пограничного слоя (АПС) [14]. В [14] приведены характеристики ветра в АПС в широком диапазоне широт и долгот. Выбор конкретного профиля принципиально не влияет на качество оценочных расчетов. Для определен-

ности выбран профиль скорости, температуры и плотности для летнего сезона в точке с координатами 55° СШ и 40° ВД. Параметры в АПС приведены для избранных высот с достаточно большими интервалами. Интерполяция на расчетную сетку термодинамических параметров не доставляла трудностей ввиду их слабой зависимости от высоты. Для интерполяции скорости, существенно меняющейся с высотой, использовались рекомендации [14], согласно которым выше 10 м (минимальная высота в [14]) применяются полиномиальные сплайны, ниже — логарифмический профиль:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0}. \quad (1)$$

Здесь k — константа Кармана (мера турбулентности потока). Масштабные множители: u_* — скорость трения (динамическая скорость); z_0 — высота слоя шероховатости. Константы $k = 0.4$, $u_* = 0.4$ м/с и $z_0 = 0.3$ м выбраны на основе [15, 16].

Расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед (рис. 1). Считалось, что в системе координат XYZ шероховатая поверхность Земли определяется плоскостью $Z=0$. Решение находилось в области параллелепипеда, внутри которого начальное распределение параметров атмосферы соответствует [14]. Анализ постановки граничных условий и их влияния на установление течения приведен в [17]. Ограничимся описанием использованных граничных условий. Грани расчетной области следующие: B_1 — область втекания потока воздуха (грань $AEMB$); B_2 — нижняя шероховатая поверхность (грань $ABCD$); B_3, B_4, B_5 — боковые грани $AEFD$, $EMKF$, $BMKC$; B_6 — область вытекания воздуха (грань $FKCD$). Нормали к граням B_i , $i = 1 \div 6$, обозначим l_i соответственно.

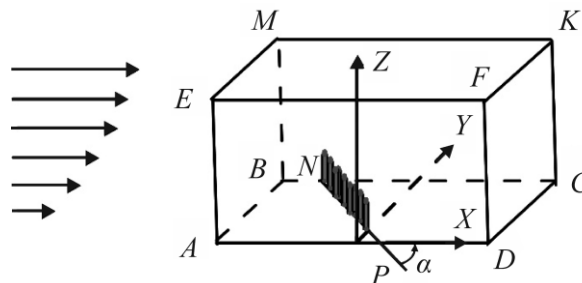


Рис. 1. Расчетная область в поле ветра: PN — гипотетический борт карьера на уровне дневной поверхности. Вдоль борта поднимаются инжектируемые массовыми взрывами газопылевые струи (вертикальные цилиндры). Направление ветра составляет угол α по отношению к борту карьера

На границе B_1 задавался стратифицированный по вертикали поток воздуха с параметрами: $\bar{U}|_{B_1} = \bar{U}_A$, $T|_{B_1} = T_A$, $\rho|_{B_1} = \rho_A$ ($\bar{U} = (u, v, w)$ — вектор скорости, T — температура, ρ — плотность); индекс “ A ” указывает, что соответствующие параметры определяются их стандартным распределением в АПС [14].

На границе B_2 для определения компоненты скорости u использовалась связь между этой компонентой и поверхностным напряжением Рейнольдса [18] в предположении, что напряжение направлено вдоль горизонтальной скорости. Поверхностное напряжение при совпадении направления с горизонтальной скоростью есть квадрат динамической скорости u_*^2 [15].

Эту связь можно рассматривать как способ задания скорости $u_* = u_*^m$ на поверхности (u_*^m — требующий определения численный аналог динамической скорости, индекс “ m ” введен, чтобы отличать модельное u_*^m от используемого u_* в (1)).

Тестовые расчеты [17] показали, что для распределения скорости в АПС будет приемлемым условие $u|_{B_2} = u_*^m = 1$ м/с. Остальные компоненты скорости на поверхности так же, как и в случае условия полного торможения потока на шероховатой поверхности, принимались равными нулю ($v|_{B_2} = w|_{B_2} = 0$). Производные по нормали к границе B_2 от всех термодинамических характеристик потока, включая и концентрацию примеси c , полагались равными нулю:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial l_i} \right|_{B_i} = \left. \frac{\partial \rho}{\partial l_i} \right|_{B_i} = \left. \frac{\partial c}{\partial l_i} \right|_{B_i} = 0, \quad (2)$$

где $i = 2$.

На границах B_3 , B_4 , B_5 реализовано условие отражения потока от “жесткой” стенки, т. е. нормальная к каждой из этих граней компонента скорости полагалась равной нулю ($v|_{B_3, B_5} = w|_{B_4} = 0$). Производные по нормали к рассматриваемым граням от всех остальных характеристик потока также полагались равными нулю:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial l_i} \right|_{B_i} = 0, \quad i = 3, 4, 5; \quad \left. \frac{\partial w}{\partial l_i} \right|_{B_i} = 0, \quad i = 3, 5; \quad \left. \frac{\partial v}{\partial l_4} \right|_{B_4} = 0.$$

Термодинамические параметры на границах B_3 , B_4 , B_5 определялись в соответствии с (2) для $i = 3, 4, 5$.

На границе B_6 задавалось условие свободного вытекания. Производные по нормали к грани B_6 от всех компонент скорости задавались равными нулю:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial l_6} \right|_{B_6} = \left. \frac{\partial v}{\partial l_6} \right|_{B_6} = \left. \frac{\partial w}{\partial l_6} \right|_{B_6} = 0.$$

Термодинамические параметры на границе B_6 определялись в соответствии с (2) для $i = 6$.

В описанных условиях проводилось численное решение задачи о взаимодействии ветра с шероховатой поверхностью. Расчет завершался нахождением момента времени, после которого характеристики течения стабилизировались. Согласно тестовым расчетам, время установления течения составляет несколько десятков минут. Полученные характеристики потока воздуха в расчетной области позволили оценить степень отличия сформировавшегося профиля ветра от профиля ветра втекающего потока.

На втором этапе моделировалось распространение облака пыли массового взрыва за пределами карьера. Предполагалось, что взрывы производятся на плоском уступе борта карьера по схеме, используемой на Лебединском карьере: скважины располагаются рядами; расстояние между скважинами в ряду ~ 5 м; расстояние между рядами скважин ~ 8 м. В расчетах схема расположения скважин была несколько изменена: указанные расстояния принимались одинаковыми и равными 10 м.

Для изучения выбросов пыли, инициированных массовыми взрывами в открытом карьере, используются как прогностические модели, так и прямые численные расчеты формирования и подъема облака пыли [19, 20]. В настоящей работе использовались результаты численного моделирования выброса пыли методом, изложенным в [12, 13] и схожим с [20].

В [13] исследована пространственная динамика твердых частиц различных размеров в результате одновременной детонации в скважинах семи зарядов ВВ массой 1 т ТНТ (тринитротолуол) каждый. Скважины диаметром ~ 30 см и глубиной 15 м располагались в центре и узлах правильного шестиугольника внутри окружности (рис. 2). Назовем такую структуру “взрывной модуль”. На начальной стадии считался одиночный взрыв в скважине [12] с учетом распространения инициированных подрывом ВВ ударных волн, поступления частиц грунта различного размера из формирующегося кратера, расширения продуктов взрыва и их перемешивания с воздухом и пылью в процессе торможения продуктов, понижения давления до атмосферного в окрестности точки подрыва и формирования расширяющегося горячего газопылевого объема, всплывающего под действием сил инерции и плавучести. После того, как горизонтальный размер облака продуктов ВВ и мелких частиц, которые движутся со скоростью газа, сравнивался с расстоянием между скважинами, масса ВВ и выброшенных частиц принудительно увеличивалась в 7 раз, горизонтальные размеры — в $\sqrt{7}$ раз. Подобная процедура позволяет продолжить расчет, оставаясь в рамках двумерной осесимметричной геометрии, до времени 1–2 мин, когда подъем и расширение облака пыли практически прекращается. К этому времени облако инжестируемой пыли поднимается на высоту ~ 500 м над уступом, его горизонтальный размер достигает 100 м, в воздухе остаются только частицы размером < 100 мкм (примерно 37 кг частиц размером $10 < r < 100$ мкм и 9 кг частиц размером $1 < r < 10$ мкм).

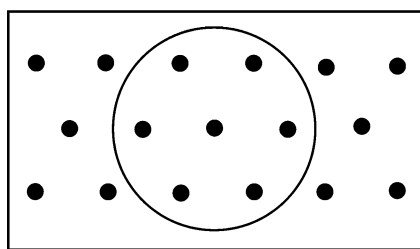


Рис. 2. Трехрядное распределение скважин с зарядами вдоль уступа борта карьера. Внутри окружности расположены семь взрывных скважин, рассматриваемые в численном эксперименте

Считалось, что уступ находится на глубине 250 м по отношению к уровню дневной поверхности. На рис. 3а приведено рассчитанное распределение массовой концентрации пыли выше дневной поверхности к 1 мин для одиночного взрывного модуля [13]. Так как взрывные модули находятся на расстоянии 20 м друг от друга, для расчета массовых взрывов результирующие поля концентрации расположены вдоль прямолинейного края борта карьера также на расстоянии 20 м друг от друга, а концентрация в перекрывающихся областях от разных взрывных модулей просуммирована (рис. 3б). Ниже рассмотрен случай одновременного подрыва 15 взрывных модулей, т. е. суммарная мощность массовых взрывов достигала 100 т ТНТ. При расчетах полей концентрации влияние ветра не учитывалось. Предполагалось, что установление воздушного потока в процессе его взаимодействия с шероховатой поверхностью и формирование воздушно-пылевой струи массового взрыва происходят независимо друг от друга. В какой-то момент времени, когда характеристики течения в расчетной области практически перестают меняться, в установившемся потоке размещается облако, геометрические размеры и концентрация пыли которого соответствуют воздушно-пылевой струе массового взрыва (рис. 3б).

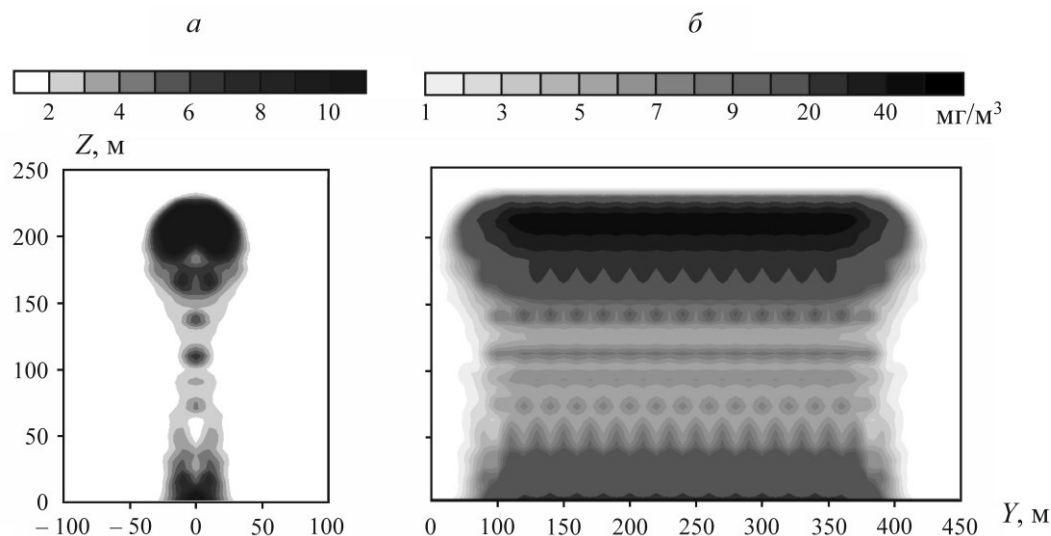


Рис. 3. Массовая концентрация пыли для частиц размером < 100 мкм в вертикальном сечении через ось Z и линию PN , имитирующую край борта карьера (рис. 1): a — для осесимметричного модуля из семи взрывов; b — для взрыва 15 модулей в случае, когда направление ветра перпендикулярно борту карьера

Расчеты осуществлялись на нерегулярных сетках с числом узлов по осям X , Y , Z $415 \times 100 \times 160$. Шаг сетки вдоль оси X на участке 1000 м от левой границы $AEMB$ (рис. 1) выбирался равным 5 м, затем увеличивался до 40 м. Полное расстояние от границы $AEMB$ до границы свободного вытекания потока $DFKC$ составляло ~ 5 км. Вдоль оси Y шаг сетки был постоянным (5 м), вдоль оси Z на участке до 250 м шаг выбирался постоянным (5 м), затем увеличивался до 20 м. Полная высота расчетной области составляла 1.2 км. Выбор мелкого шага (5 м) обусловлен начальными размерами инжектируемой массовой взрывами газопылевой струи (рис. 3).

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как и в [9], для расчета рассматриваемых течений использовалась полная система уравнений Навье – Стокса для сжимаемой жидкости в дозвуковом приближении [21], в безразмерных переменных имеющая вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{U} \nabla \rho = -\rho \nabla \bar{U}, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + (\rho \bar{U} \nabla) \bar{U} = -\nabla \left(\tau_{eff} + (\rho - \rho^*) \frac{\bar{g}}{g} \right), \quad (4)$$

$$\nabla \bar{U} = \frac{1}{C_p p^*} \left[\frac{1}{\text{Re Pr}} \left(\nabla (\lambda \nabla \tilde{T}) \right) \frac{\bar{g}}{g} + \varepsilon_g \left(\bar{U} \frac{\bar{g}}{g} \right) \rho^* \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} - C_p \right) \right]. \quad (5)$$

Здесь ρ — плотность; \bar{U} — вектор скорости с компонентами u_1 , u_2 , u_3 ; $\bar{g} = (0, 0, -g)$; g — ускорение свободного падения; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; λ — коэффициент теплопроводности; γ — показатель адиабаты; t — время; T^* , p^* , ρ^* — распределение температуры, давления и плотности по высоте в невозмущенной атмосфере.

Плотность, давление, температура, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности отнесены к их значениям у поверхности Земли (ρ_0 , T_0 , p_0 , C_p^0 , λ_0), скорости — к максимальной скорости невозмущенного ветра ($u_0 = 10$ м/с) в АПС, расстояния — к характерной глубине карьера ($d_0 = 500$ м). В (3)–(5) вошел параметр $\varepsilon_g = g\rho_0 d_0 / p_0$ и переменные:

$$\tilde{I}^* = \frac{\rho_0 u_0}{p_0}, \quad \tilde{I}^* = \frac{\rho_0 u_0}{p_0},$$

p , T — безразмерные величины давления и температуры.

Тензор напряжений находится из обобщенного закона Ньютона:

$$\tau_{eff} = 2\mu_{eff}S + \left[\left(-\frac{2}{3}\mu_{eff} \right) \nabla \bar{U} \right] E,$$

где $S = S_{ij} = [(\partial u_i / \partial x_j) + (\partial u_j / \partial x_i)] / 2$; E — единичный тензор; μ_{eff} — эффективный коэффициент вязкости, определяемый суммой его молекулярного и турбулентного значений.

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

$$\tau_T = (C_{sm}\Delta)^2 \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]^2 = (C_{sm}\Delta)^2 |\bar{S}| = \delta^2 |\bar{S}|. \quad (6)$$

Здесь Δ — размер сеточной ячейки; C_{sm} — константа Смагоринского; $|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$ (черта сверху означает отфильтрованные LES-методом величины).

В приповерхностном слое с уменьшением высоты вихревая вязкость уменьшается и становится пренебрежимо малой в слое шероховатости [15]. Один из простых способов учета этой тенденции — принудительное уменьшение длины смешения $\delta = C_{sm}\Delta$ по мере приближения к поверхности [22]. Предполагалось, что $\delta_0 = C_{sm}\Delta$ в области, на которую не влияет шероховатость поверхности (свободная атмосфера), достигается асимптотически по соотношению

$$\frac{1}{\delta^n} = \frac{1}{\delta_0^n} + \frac{1}{(kz)^n}, \quad (7)$$

k — константа Кармана; z — расстояние до поверхности.

В (7), как и в [22], выбрано $n=2$. Обзор ряда работ по численному моделированию АПС [18] показал, что длина смешения в свободной атмосфере $\delta_0 \approx 10$ м.

На стадии расчета дисперсии газопылевой смеси к системе уравнений (3)–(5) добавляется уравнение переноса пассивной примеси [23]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{U} \nabla c = \text{div } \rho D_T \nabla \left[\rho D_T \nabla \left(\frac{c}{\rho} \right) \right],$$

где c — концентрация примеси; D_T — турбулентный коэффициент диффузии, определяемый по вихревой вязкости τ_T из условия, что эти величины связаны между собой турбулентным числом Шмидта $Sc = \tau_T / D_T$ (Sc меняется от 0.1 до 2.5 в зависимости от рассматриваемой задачи [24]). В расчетах выбрано $Sc=1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ТЕЧЕНИЯ В АПС

Если характеристики втекающего в расчетную область потока воздуха (рис. 1) соответствуют теоретическим и экспериментальным значениям АПС, то “идеальная” численная модель должна сохранять эти характеристики в процессе расчета. Однако схемная вязкость, способ учета вихревых процессов, граничные условия модифицируют втекающий поток и в расчетной области вырабатывается АПС, соответствующий качеству численной модели. Для оценки параметров развивающегося в расчетной области течения результаты расчетов усреднялись по пространству в избранные моменты времени. Усреднение означает численное интегрирование какого-либо параметра по площади на плоскостях $z = z_i$, z_i — высота узлов разностной сетки вдоль оси Z , с последующим делением этого интеграла на площадь прямоугольника $ABCD$ (рис. 1). Согласно тестовым расчетам, формирование квазиустановившегося течения завершается через 10–20 мин после начала моделирования, и со временем усредненные по пространству характеристики течения перестают меняться.

На рис. 4 приведены распределения по вертикали горизонтальной компоненты скорости U , вертикальной компоненты скорости W и коэффициента вихревой вязкости τ_T . Распределение горизонтальной компоненты скорости вдоль оси Y не представлено, так как ее усредненные по пространству значения близки к нулю, а отклонения от усредненных значений малы по сравнению с U .

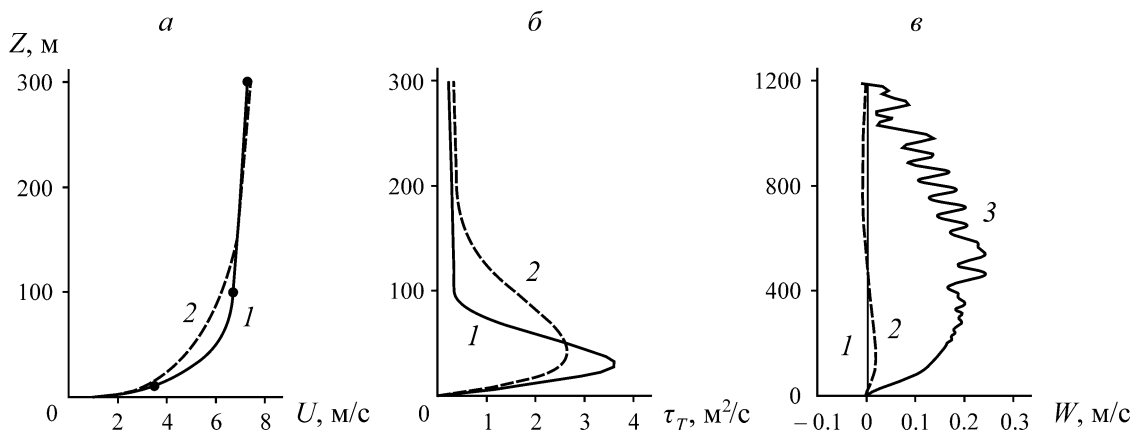


Рис. 4. Зависимость горизонтальной U (а) и вертикальной W (в) компонент скорости, коэффициента вихревой вязкости τ_T (б) от высоты z : 1 — распределение параметров АПС U , W , τ_T , вычисленных по [14]; 2 — распределения усредненных по пространству тех же параметров в установившемся течении; 3 — распределение W вдоль вертикальной линии, пересечение которой с плоскостью $ABCD$ (рис. 1) имеет координаты (500 м, 50 м) в момент $t = 30$ с

Основное отличие усредненной горизонтальной компоненты скорости U (кривая 2) от втекающего в расчетную область потока (кривая 1) наблюдается ниже высоты 100 м (рис. 4а). Данные [14] приведены в этом промежутке лишь для высот 10 и 100 м (на рис. 4а они обозначены жирными точками), а остальные точки кривой 1 — интерполяция полиномиальным сплайном между этими двумя значениями высоты. Отличие значений кривых 1 и 2 на высотах 10 и 100 м не превышает 10 %.

Поведение коэффициента вихревой вязкости τ_T (рис. 4б), рассчитанное по [14] и смоделированное в настоящей работе, соответствует теоретическим представлениям [15], однако есть заметное отличие этих кривых на высотах до ~ 150 м. Рассчитанные компоненты скоростей W

и V малы по сравнению с U и τ_T , согласно (6), определяется в основном производными компоненты скорости U в направлении оси X и, следовательно, значительно зависит от способа интерполяции скорости U .

Распределение горизонтальной скорости U и вязкости τ_T представлено на рис. 4 в диапазоне высот до 300 м. Это позволяет более детально рассмотреть распределения параметров в нижней части АПС. Распределение вертикальной составляющей скорости W приведено на рис. 4в во всем диапазоне z , чтобы продемонстрировать особенность развития течения в численном моделировании. Отличие значений усредненной вертикальной компоненты скорости W от нуля незначительно (рис. 4в). Если рассмотреть распределение $W(z)$ внутри установившегося потока, можно обнаружить, что скорости квазиустановившегося потока заметно отличаются от нуля. Для иллюстрации, в предположении, что начало осей системы координат XYZ совпадает с точкой A (рис. 1), на рис. 4в приведено распределение $W(z)$ в точке с координатами $x=500$ м и $y=50$ м в момент $t=30$ мин. Примерно такое же распределение $W(z)$ характерно в более поздние моменты времени, так и для других значений y при $x=500$ м. По всей высоте скорость $W(z)$ в плоскости $X=500$ м положительна. Так как усредненная скорость $W(z)$ равна нулю, то должны существовать области потока, в которых $W(z)$ отрицательна. Распределение W в направлении оси X в плоскости $Y=50$ м на нескольких высотах приведено на рис. 5.

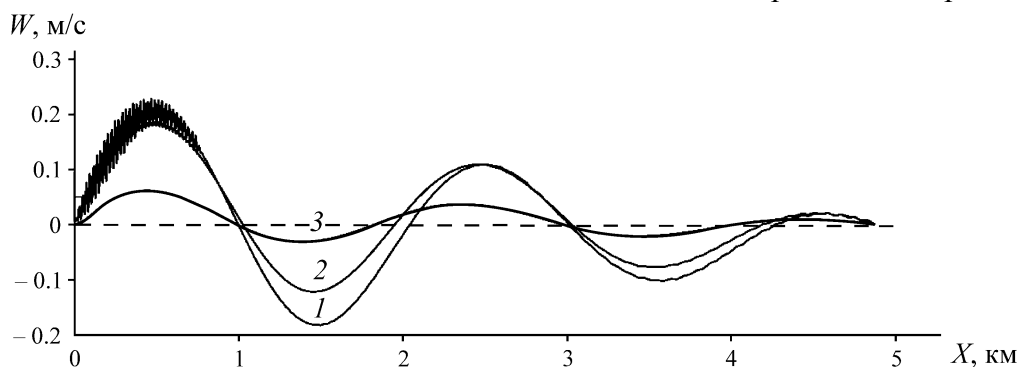


Рис. 5. Зависимость вертикальной компоненты скорости W от X в плоскости $Y=50$ м при установившемся течении на высотах 500 (1), 250 (2) и 50 м (3)

Значения W характеризуются стабильными во времени затухающими гармоническими колебаниями вдоль оси X с длиной волны ~ 2 км. Похожие колебания обычно возникают при вертикальном смещении частицы воздуха в потоке, распространяющемся с некоторой скоростью U_s . В рассматриваемой задаче вертикальные возмущения формируются в процессе модификации втекающего в расчетную область потока воздуха численной моделью и последующего распространения этого возмущения в вязком течении со стратифицированным по высоте распределением скорости. Синусоидальные колебания с такой же длиной волны проявляются и для горизонтальной компоненты скорости, но они малы по сравнению со значениями скорости U и не столь заметны, как при нулевом фоне W .

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБЛАКА ПЫЛИ МАССОВОГО ВЗРЫВА ЗА ПРЕДЕЛАМИ КАРЬЕРА

Пусть начало координат соответствует рис. 1. Полагаем, что время t отсчитывается от момента инъекции. Приведем результаты нескольких расчетов, отличающиеся направлением ветра по отношению к борту карьера для вариантов: 1 — направление ветра перпендикулярно борту карьера ($\alpha=90^\circ$, рис. 1); 2 — $\alpha=45^\circ$; 3 — $\alpha=30^\circ$, 4 — $\alpha=0^\circ$.

Введем некоторые геометрические характеристики области инъекции. Уравнение линии, имитирующей борт карьера, имеет вид

$$y = R_0 + x \operatorname{tg}(\alpha),$$

$R_0 = 100$ м — расстояние от начала координат до центра первого взрывного модуля.

Положение центра массового взрыва:

$$x_c = -R_c \cos(\alpha), \quad y_c = R_0 + R_c \sin(\alpha),$$

$R_c = 150$ м — расстояние от первого взрывного модуля до центра массового взрыва.

В связи с вытянутостью моделируемого облака пыли в направлении оси X , масштаб рисунков в направлениях Y и Z увеличен соответственно в 3 (рис. 6а) и 2 раза (рис. 6б). При визуальной оценке углов и наклонов следует учитывать различие отображенных масштабов.

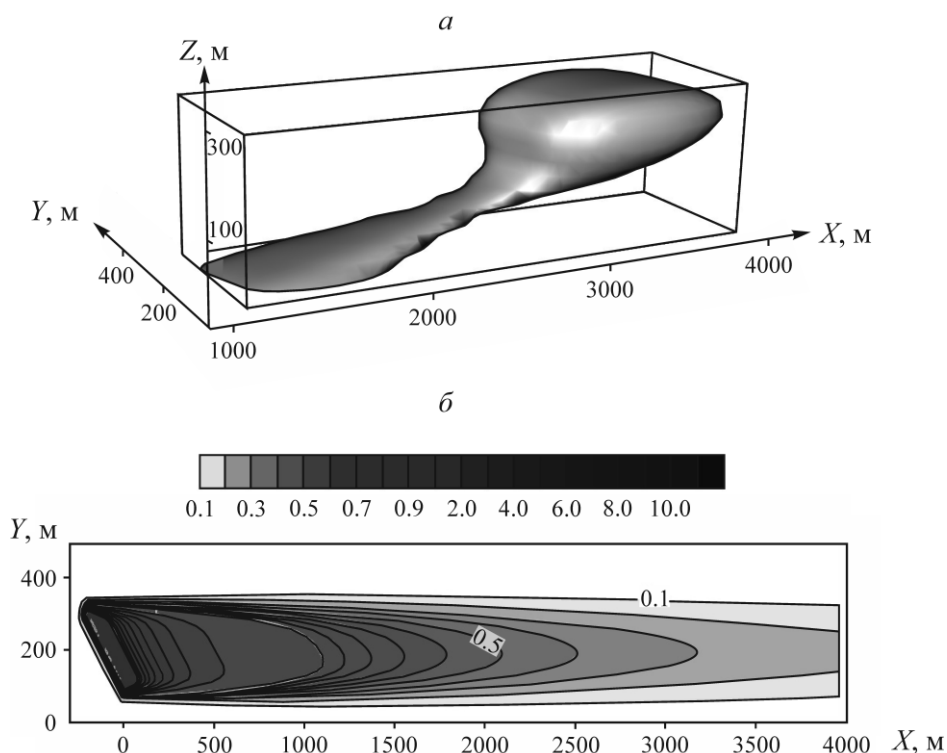


Рис. 6. Изоповерхность концентрации $c = 0.35$ мг/м³ в момент $t = 8$ мин (а) и максимальная концентрация взвешенной в воздухе пыли в мг/м³ над поверхностью в момент $t = 20$ мин для варианта 2 (б)

Далее будет использоваться термин “над поверхностью”. В расчетах это относится к параметрам, выбираемым в центрах первых по z от поверхности счетных ячеек. Высота этих центров 2.5 м.

Приведем результаты расчетов распространения облака пыли на примере варианта 2, т. е. $\alpha = 45^\circ$. К 8 мин облако пыли вытянулось в направлении X , передний край облака достиг расстояния ~ 4 км, задний — 1 км (рис. 6а). Концентрация пыли в верхней части облака оставалась высокой по сравнению с остальной частью облака, но к 8 мин на порядок упала по сравнению с начальной. Верхняя часть облака с достижением им границы свободного вытекания (~ 5 км) покинула расчетную область, в последующем отслеживалось лишь поведение нижней части облака до $t = 20$ мин. Поведение облака в остальных вариантах (для других значений угла α) качественно не отличалось от приведенного.

Одна из величин, характеризующая загрязнение воздуха, — максимальная концентрация пыли в воздухе над поверхностью в процессе распространения облака пыли (рис. 6б). Если ограничиться санитарно-гигиеническими нормами [25], максимальная предельно допустимая разовая концентрация взвешенных частиц в атмосфере составляет 0.5 мг/м^3 (на рис. 6б это область, граница которой отмечена изолинией 0.5). Передний край области с превышением предельно допустимого значения расположен на расстоянии $\sim 2.2 \text{ км}$ от центра x_c начальной локализации облака. Выявлено, что расстояние минимально в варианте 1 ($\sim 1.6 \text{ км}$), в котором направление ветра перпендикулярно борту карьера и достигает максимального значения $\sim 3 \text{ км}$ в варианте 4, где это направление параллельно борту. Вертикальный размер области превышения предельно допустимых значений с точностью до нескольких десятков метров оценивается как $R_0 + 2R_c \sin(\alpha)$.

Существенная характеристика загрязнения воздуха у поверхности — время воздействия взвешенной пыли. С удалением от борта карьера максимальная концентрация в фиксированных точках поверхности падает, а время воздействия на фоне нулевых значений концентрации не зависит от точки фиксации и составляет $\sim 5 \text{ мин}$ на расстоянии 1 км от борта карьера и $\sim 12 \text{ мин}$ на расстоянии 3 км (рис. 7). Превышение предельно допустимых значений наблюдается во всех вариантах расчета на расстояниях до 1 км , а на расстоянии 3 км и больше его превышение практически не наблюдается.

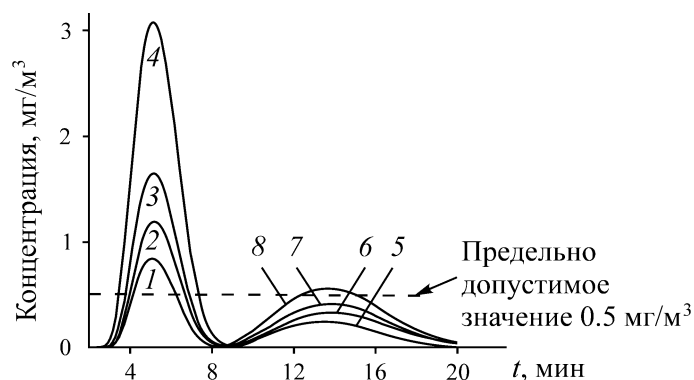


Рис. 7. Зависимость концентрации взвешенной в воздухе пыли над поверхностью от времени на разных фиксированных расстояниях от центра массового взрыва: 1–4 — варианты 1–4 для расстояния 1 км ; 5–8 — варианты 1–4 для расстояния 3 км

ВЫВОДЫ

Решена задача о распространении пыли от массовых взрывов за пределы глубокого карьера. Определены характеристики развивающегося квазистационарного течения в процессе взаимодействия втекающего в расчетную область потока воздуха с заданными характеристиками.

Рассчитанные распределения параметров не противоречат представлениям о характеристиках атмосферного пограничного слоя.

Проведены оценки размеров области, в которой концентрация пыли над поверхностью превышает предельно допустимые концентрации. Исследована зависимость этих размеров от угла α между направлением ветра и бортом карьера. Максимальное расстояние от борта карьера, на котором концентрация пыли превышает предельно допустимое значение, составляет 3 км . Длительность воздействия в фиксированных точках над поверхностью не зависит от α и растет от нескольких минут на расстоянии 500 м от центра массового взрыва до десятка минут на расстоянии 3 км .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В., Соловьев С. П., Спивак А. А., Хазинс В. М. Геоэкологические последствия проведения горных работ на карьерах с применением взрывных технологий // ФТПРПИ. — 2020. — № 2. — С. 164–178.
2. Patra A. K., Gautam G., and Kumar P. Emissions and human health impact of particulate matter from surface mining operation — A review, *Env. Technol. Innovat.*, 2016, Vol. 5. — P. 233–249.
3. 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.
4. Silvester S. A., Lowndes I. S., and Hargreaves D. M. A computational study of particulate emissions from an open pit quarry under neutral atmospheric conditions, *Atmos. Env.*, 2009, Vol. 43. — P. 6415–6424.
5. Torno S., Toraño J., Menéndez M., and Gent M. CFD simulation of blasting dust for the design of physical barriers, *Env. Earth Sci.*, 2010, Vol. 64. — P. 73–83.
6. Joseph G. M. D., Lowndes I. S., and Hargreaves D. M. A computational study of particulate emissions from Old Moor Quarry, UK, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2018, Vol. 172. — P. 68–84.
7. Wang Y., Du C., and Xu H. Key factor analysis and model establishment of blasting dust diffusion in a deep, sunken open-pit mine, *ACS Omega*, 2021, Vol. 6, No. 1. — P. 448–455.
8. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2021. — № 4. — С. 59–75.
9. 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.
10. Амосов П. В., Бакланов А. А. Разработка модели аэротермодинамики атмосферы для исследования процессов пыления на хвостохранилищах с использованием программы COMSOL // Вестн. МГТУ. — 2023. — Т. 26. — № 1. — С. 25–44.
11. 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” // Горн. журн. — 2017. — № 5. — С. 102–106.
12. Shuvalov V., Khazins V., Krasheninnikov A., and Soloviev S. Formation and evolution of a dust cloud as a result of TNT detonation in a borehole: numerical simulation, *Mining*, 2023, Vol. 3, No. 2. — P. 261–270.
13. 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.
14. 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.
15. Stull R. B. An introduction to boundary layer meteorology, Netherlands, Kluwer Acad. Publ., 1988. — 670 p.
16. Лыкосов В. Н. Взаимодействие атмосферы и подстилающей поверхности // Математическое моделирование Земной системы. — М.: МАКС Пресс, 2016. — С. 125–150.
17. Хазинс В. М. Численное моделирование течения при взаимодействии ветра с плоской шероховатой поверхностью // Динамические процессы в геосферах. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 1–14.

18. **Nieuwstadt F. T. M., Mason P. J., Moeng C.-H., and Schumann U.** Large-eddy simulation of the convective boundary layer: A comparison of four computer codes, *Turbulent Shear Flows 8*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1993. — P. 343–367.
19. **Bakhtavar E., Hosseini S., Hewage K., and Sadiq R.** Green blasting policy: simultaneous forecast of vertical and horizontal distribution of dust emissions using artificial causality-weighted neural network, *J. Clean. Prod.*, 2021, Vol. 283. — 124562.
20. **Huang Z., Ge S., Jing D., and Yang L.** Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines, *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 2019, Vol. 17, No. 5. — P. 10313–10333.
21. **Затевахин М. А., Кузнецов А. Е., Никулин Д. А., Стрелец М. Х.** Численное моделирование процесса всплытия системы высокотемпературных турбулентных термиков в неоднородной сжимаемой атмосфере // ТБТ. — 1994. — Т. 32. — № 1. — С. 44–56.
22. **Mason P. J. and Brown A. R.** On subgrid models and filter operations in large eddy simulations, *J. Atmospheric Sci.*, 1999, Vol. 56. — P. 2101–2114.
23. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Гидродинамика. — М.: Наука, 1986. — 736 с.
24. **Gualtieri C., Angeloudis A., Bombardelli F., Jha S., and Stoesser T.** On the values for the turbulent Schmidt number in environmental flows, *Fluids*, 2017, Vol. 2. — P. 1–27.
25. **ГН 2.1.6.3492-17.** Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. — М.: ФЦГиЭ Роспотребнадзора, 2019. — 57 с.

Поступила в редакцию 24/IV 2024

После доработки 08/VI 2024

Принята к публикации 27/VI 2024