2022

<u>№</u> 4

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.271:504.3.054

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ЧАСТИЦАМИ ПЫЛИ МИКРОННОГО РАЗМЕРА В РЕЗУЛЬТАТЕ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ НА ОТКРЫТЫХ КАРЬЕРАХ

В. М. Хазинс, С. П. Соловьев, Д. Н. Локтев, А. В. Крашенинников, В. В. Шувалов

Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, E-mail: v_hazins@yahoo.com, Ленинский проспект, 38, 119334, г. Москва, Россия

Изучено развитие пылегазовых облаков массовых взрывов на Ситовском карьере в Липецкой области и их влияние на загрязнение окрестностей ближайших населенных пунктов. В режиме реального времени с помощью современного оборудования определена концентрация твердых частицы размером менее 2.5 мкм в пунктах наблюдения. Результаты видеосъемки массового взрыва и переноса облака пыли ветром в пределах карьера позволили рассмотреть теоретически частную задачу о распространении частиц мелкодисперсной пыли из верхней части облака с высоты 50–100 м к пунктам фиксации на поверхности вне пределов карьера. Методами вычислительной гидродинамики смоделировано течение, которое развивается в нижней части атмосферного пограничного слоя, возмущенного взаимодействием ветра с рельефом карьера. Показано, что турбулентная диффузия способна обеспечить вертикальную дисперсию микрочастиц вплоть до пунктов фиксации, предложено объяснение обнаруженной при измерениях немонотонности максимальной концентрации пыли вдоль поверхности при удалении от карьера.

Горнорудные карьеры, массовые взрывы, микрочастицы пыли, численное моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20220416

Практически все технологические процессы при добыче полезных ископаемых на открытых карьерах сопровождаются образованием твердых частиц размером от нескольких нанометров до нескольких миллиметров и выносом их в приземный слой атмосферы [1]. Существенный выброс твердых частиц связан со взрывной отбойкой горной массы, являющейся основной технологией при подготовке горных пород к выемке на карьерах по добыче железной руды, ряда руд цветных металлов, большинства строительных материалов, а также на многих уголь-

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-50050).

ных карьерах. При разработке прочных горных пород на открытых карьерах на долю массовых взрывов приходится 50% и более от общего количества твердых частиц, выбрасываемых в приземный слой атмосферы [2].

Размеры частиц, достаточно долго удерживаемых воздухом, находятся в диапазоне от нанометров до десятков микрометров. В результате атмосферных процессов частицы переносятся не только во внутрикарьерном пространстве, но и на прилегающие к карьеру территории. Попадая в организм человека вместе с вдыхаемым воздухом, твердые частицы негативно влияют на здоровье. Наиболее вредны частицы размером менее 3–5 мкм, так как они легко проникают сквозь биологические барьеры и представляют наибольшую угрозу для организма [3]. В качестве маркеров этого диапазона часто используются частицы менее 2.5 мкм (PM2.5).

Современные требования к охране окружающей среды обусловливают более детальный анализ геоэкологических последствий массовых промышленных взрывов и всех технологических процессов на открытых карьерах с целью снижения негативного влияния горнодобывающего производства на среду обитания [4, 5]. Сами массовые взрывы среди источников загрязнения занимают особое место, так как сейсмические и акустические возмущения достигают прилегающих к карьеру населенных пунктов и вызывают у населения беспокойство в связи с очередным выбросом загрязняющих веществ. Прогноз загрязнения приземных слоев атмосферы в окрестности карьера в результате массовых взрывов требует долговременных инструментальных наблюдений, либо основанных на наблюдениях теоретических расчетов. Результаты работы относятся к сложившейся ситуации в конкретном карьере, так как они во многом зависят от его рельефа и ветровых потоков. Перенос частиц пыли ветром с учетом возмущений, создаваемых сложным рельефом карьера, успешно исследуется численным моделированием уравнений газовой динамики чаще всего с использованием мощных коммерческих пакетов прикладных программ [6-8]. Серия численных исследований, связанных с дисперсией загрязняющих веществ внутри естественно вентилируемых карьеров и загрязнением атмосферы пылью хвостохранилищ, представлена в [9, 10].

Цель настоящей работы — изучение загрязнений приземных слоев атмосферы пылью при массовых взрывах на Ситовском известняковом карьере в Липецкой области. В качестве инструментов исследования использовалась видеосъемка, фиксирующая развитие пылевого облака в пределах карьера, и лазерные датчики твердых частиц в сочетании с планшетами для сбора выпадающей пыли в пунктах фиксации частиц на поверхности грунта вне карьера. Применение компактных лазерных датчиков [11] позволило обеспечить мобильность, необходимую для их установления во временных пунктах фиксации частиц. Основное внимание сосредоточено на измерении концентрации частиц РМ2.5.

Из наблюдений за развитием начальной стадии облака массового взрыва, когда оно еще не покинуло пределы карьера, следует, что основная часть пыли сосредоточена на высоте 50–100 м над уровнем дневной поверхности. Гравитационная скорость осаждения частиц размером в несколько микрометров, определяемая балансом веса частицы и силы сопротивления Стокса [12], крайне мала (<2 м/ч для PM2.5). Этот механизм не может обеспечить поступление подобных частиц к пунктам фиксации, расположенных на поверхности за пределами карьера. Облако пыли, покидая карьер, распространяется в нижней части атмосферного пограничного слоя (АПС) с его крутыми вертикальными градиентами горизонтальной составляющей ветра. Задача осложняется искажениями ветрового потока, вносимыми взаимодействием ветра с рельефом карьера. В этих условиях вертикальное расширение распространяющегося по ветру пылевого облака, определяемое турбулентной диффузией, может обеспечить альтернативный осаждению механизм переноса мелкодисперсной пыли, которая изначально локализована в верхней части облака, — к поверхности.

Формирование распространяющегося по ветру облака, отделенного от подстилающей поверхности, не является спецификой рассматриваемого массового взрыва на Ситовском карьере. Массовые взрывы, проведенные в других условиях в известковом карьере Таффс-Уэлл (Уэльс) [13], также продемонстрировали развитие облака пыли, отделенного от подстилающей поверхности, с верхней границей, достигающей 100 м над дневной поверхностью.

Для обоснования возможности переноса к поверхности мелкодисперсной пыли, изначально локализованной на уровне, превышающем высоту борта карьера, проведена серия экспериментов с помощью численного моделирования осредненных методом крупных вихрей (LES) уравнений Навье – Стокса в дозвуковом приближении [12]. Распространение пыли рассматривалось в пределах АПС с учетом рельефа Ситовского карьера. Так как расчеты ориентированы на получение качественного результата, постановка задачи упрощена, позволяя моделировать ее в двухмерной геометрии.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения за развитием пылегазовых облаков, образующихся в результате массовых взрывов на Ситовском карьере, выполнены 10, 11 и 18 сентября 2020 г. Карьер расположен в нескольких километрах к северо-востоку от г. Липецк. В непосредственной близости находятся два населенных пункта: расстояние от борта карьера до границы с. Воскресеновка составляет 500–600 м, расстояние до границы с. Введенка — 800–1000 м.

В процессе наблюдений регистрировалась концентрация микрочастиц в воздухе вблизи поверхности Земли. Одновременно осуществлялась видеосъемка развития массового взрыва и сбор частиц, выпадавших из пылегазового облака взрыва на планшеты с фильтрами. Видеосъемка развития пылегазового облака массового взрыва 10 сентября 2020 г. велась с помощью камеры Canon 5D mIII с частотой 25 кадров/с. Расстояние от места установки камеры до взрываемого блока ~ 590 м. Для съемки использовался объектив Carl Zeiss с фокусным расстоянием 28 мм.

Для регистрации концентрации микрочастиц в полевых условиях разработана оригинальная система с автономным питанием на основе аппаратной платформы Arduino Uno и лазерного датчика твердых частиц Sensirion SPS30. В процессе наблюдений на Ситовском карьере концентрация частиц измерялась с частотой 1 Гц, что позволило получить детальную информацию о характере изменений во времени концентрации частиц при прохождении пылегазового облака взрыва.

Большинство лазерных датчиков, в том числе и Sensirion SPS30, измеряют счетные концентрации, на основе которых определяется массовая концентрация частиц. Размеры измеряемых частиц 3 – 10 мкм. Ниже приведены результаты наблюдений, полученные при проведении промышленного взрыва 10 сентября 2020 г. Общая масса взрывчатого вещества составила 6500 кг, время взрыва — 11 ч местного времени. Установлено, что значительная часть пылевого облака в первые минуты после взрыва расположена в пределах карьера на высоте 50 – 100 м над дневной поверхностью. Важно оценить вклад этой пыли в значения концентрации в пунктах фиксации. Измерение концентрации PM2.5 проводилось в нескольких пунктах наблюдения. Эти точки во время проведения массовых взрывов на карьере выбирались на основе изучения схемы взрыва, расположения боевых скважин вдоль уступа горных пород, а также возможности установки пунктов наблюдения с учетом размеров зоны безопасности при проведении массовых взрывов на данном карьере. Всего задействовано четыре мобильных и один стационарный пункт в с. Введенка на расстоянии 1950 м от борта карьера.

В стационарном пункте наблюдения проводились с 9 по 18 сентября 2020 г. Зарегистрированные фоновые значение массовой концентрации РМ2.5 составили 2-4 мкг/м³. Такие же фоновые концентрации наблюдались во временных пунктах. Среднесуточная предельно допустимая концентрация PM2.5 не должна превышать 25 мкг/м³, что существенно выше измеренных фоновых концентраций. Значительное увеличение концентрации частиц пыли зафиксировано 10 сентября 2020 г. одновременно в одном из мобильных пунктов, расположенном на расстоянии 350 м от борта карьера, и в стационарном пункте после массового взрыва, проведенного в 11 ч местного времени (рис. 1). На расстоянии 350 м от борта карьера пиковое значение концентрации (~6 мкг/м³) достигается через 2 мин после взрыва, на расстоянии 1950 м — примерно через 5 мин (~12 мкг/м³). Амплитуда пика в ближней к борту точке наблюдения примерно в 2 раза ниже, чем в дальней, хотя чем ближе пункт фиксации к источнику пыли, тем концентрация должна быть выше. Задержка между появлением пиков на записях соответствует времени перемещения пылегазового облака взрыва по ветру. Согласно метеорологическим данным, средняя по времени скорость ветра ~ 8 м/с. В обоих пунктах наблюдения пиковая массовая концентрация после взрыва более чем на порядок меньше разовой предельно допустимой концентрации PM2.5, составляющей 160 мкг/м³. Длительность превышения концентрации частиц над фоновыми значениями изменяется от 4 мин в ближней и до 5.5 мин в дальней точках наблюдения.



Рис. 1. Концентрации частиц РМ2.5 10 сентября 2020 г. в мобильном (1) и стационарном (2) пунктах

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ ВЕТРОВЫМ ПОТОКОМ

Постановка задачи, расчетная область и граничные условия. Пусть длина двух параллельных бортов прямоугольного в плане карьера много (в пределе — бесконечно много) больше двух других бортов. Обозначим эти борта как A^- — левый борт карьера, A^+ — правый борт карьера в расчетной области. Пусть вдоль поверхности грунта в направлении L, опреде-

ляемом от A^- к A^+ перпендикулярно A^+ и A^- , дует горизонтальный, одинаковый во всех вертикальных плоскостях, перпендикулярных бортам A^+ и A^- , ветер. В случае карьера нулевой глубины, т. е. при отсутствии возмущений, вносимых рельефом карьера, взаимодействие начального однородного по высоте ветра с шероховатой поверхностью грунта приведет к установлению газодинамического потока воздуха с вертикальным распределением горизонтальной скорости, характерным для АПС. Если глубина карьера отлична от нулевой, то взаимодействие ветра с рельефом карьера исказит характеристики АПС в окрестности карьера, но можно ожидать, что со временем установится режим обтекания карьера со слабо меняющимися во времени параметрами течения воздуха.

Пусть в определенном ранее квазиустановившемся потоке воздуха мгновенно формируется равномерно заполненная мелкодисперсной пылью область между бортами A^- и A^+ . И пусть эта область представляет собой бесконечный цилиндр произвольного профиля с образующей, параллельной борту A^+ . Подхваченная газодинамическими потоками пыль будет распространяться внутри и за пределами карьера, формируя облако пыли, характеристики которого в любом вертикальном сечении направления L вдоль борта A^+ одинаковы.

Предложенная постановка задачи допускает численное моделирование в двухмерной геометрии, так как во всех вертикальных плоскостях, перпендикулярных бортам карьера, течение одинаково. В то же время подобная постановка не накладывает никаких ограничений на вертикальную диффузию, влияние которой является предметом изучения.

Схема расчетной области показана на рис. 2. Нижняя граница, отмеченная на схеме как $\Gamma_1 - \Gamma_6$, описывает поверхность грунта. На нижней границе допускается наличие углубления, соответствующего профилю карьера. Участки границы Γ_2 и Γ_4 моделируют сечения бортов карьера A^- и A^+ соответственно, эти участки имеют ступенчатый вид. Пусть направление оси x совпадает с направлением втекающего в область параллельного поверхности потока воздуха. Направление компоненты скорости U_x — вдоль оси x, оси z — вверх, компоненты скорости U_z — вдоль оси z (рис. 2). Координата x=0 соответствует центру карьера, даже если в расчетах карьер отсутствует (нулевая глубина); координата z=0 — уровню дневной поверхности. Предполагалось, что АПС нейтрально стратифицирован, т. е. эффекты плавучести вследствие нагревания и охлаждения отсутствуют. В этом случае достаточно распространен способ формирования АПС при численном моделировании путем полного торможения потока воздуха у поверхности грунта [14, 15], называемого условием "прилипания". На границах $\Gamma_1 - \Gamma_6$ задавлись условия $U_x = U_z = 0$.



Рис. 2. Схема расчетной области (вертикального сечения карьера перпендикулярно его бортам). Углубление на нижней границе — профиль карьера

На границе Γ_7 задавался стратифицированный по вертикали поток воздуха со скоростями $U_z|_{\Gamma_7} = 0$, $U_x(z)|_{\Gamma_7} = U_{A\Pi C}$, где $U_{A\Pi C}$ определялся стандартным распределением скорости ветра в АПС [16]. Предполагалось, что набегающий из бесконечности однородный ветер к моменту прохождения границы расчетной области в результате взаимодействия с шероховатой поверхностью приобретает вертикальное распределение скорости, которое определяется данными [16]. Характеристики ветра в АПС представлены в широком диапазоне широт и долгот. Выбор конкретного профиля принципиально не влияет на качество оценочных расчетов. Для определенности выбран профиль летнего сезона в точке с координатами 55° СШ и 40° ВД, близкими к месту проведения описанных наблюдений. Температура, плотность и концентрация пыли в потоке воздуха задавались по данным [16].

На границе Г₈ принято условие "жесткой стенки":

$$U_z\Big|_{\Gamma_8} = 0, \quad \frac{\partial U_x}{\partial z}\Big|_{\Gamma_8} = 0,$$

на границе Г₉ задавалось условие вытекания воздуха при нулевом градиенте давления:

$$\frac{\partial U_x}{\partial x}\Big|_{\Gamma_9} = \frac{\partial U_z}{\partial x}\Big|_{\Gamma_9} = 0$$

На всех границах термодинамические параметры выбирались из условия

$$\frac{\partial T}{\partial l}\Big|_{\Gamma_i} = \frac{\partial \rho}{\partial l}\Big|_{\Gamma_i} = \frac{\partial c}{\partial l}\Big|_{\Gamma_i} = 0, \quad i = 1 - 9,$$

где l — направление, ортогональное границе Γ_i ; T — температура; ρ — плотность; c — концентрация мелкодисперсной пыли.

В начальный момент времени скорость воздуха во всей расчетной области при $z \ge 0$ выбиралась равной скорости ветра на левой границе в соответствие с ее распределением по высоте, а при z < 0 — равной нулю. Термодинамические характеристики втекающего воздуха и их начальные значения внутри области задавались в соответствии со стандартными параметрами атмосферы [17].

Дисбаланс между заданной на левой границе структурой ветра и течением, развивающемся внутри расчетной области в процессе LES-моделирования, приводит к образованию и распространению вихрей. Если поверхность грунта ровная (углубление отсутствует), то со временем при корректном моделировании должно сформироваться поле скорости, в котором горизонтальная ее составляющая в вертикальных сечениях этого распределения в среднем описывает заданную на левой границе структуру ветра. Обтекание ветром профиля карьера усложняет задачу, и время установления квазистационарного режима течения увеличивается. Изучение распространения пыли начиналось после установления квазистационарного режима.

С целью ослабления влияния возмущений, генерируемых вблизи левой и правой границ, нулевое значение оси *x* выбиралось на достаточно большом расстоянии от них. В расчетах положение левой границы выбрано равным $x \cong 2400$ м, правой — $x \cong 12000$ м, верхней границы — $z \cong 1500$ м. В области, ограниченной 400 < x < 900 м и z < 500 м, использовалась равномерная сетка с шагом 5 м, а на больших расстояниях шаг сетки увеличивался. Число расчетных ячеек 650×200 .

Метод моделирования. Для расчета рассматриваемых течений использована полная система уравнений Навье – Стокса для сжимаемой жидкости в дозвуковом приближении [12, 18], модифицированная для расчета течений воздуха в поле ветра. Основные этапы перехода к дозвуковому приближению следующие. Система уравнений Навье – Стокса приводится к безразмерному виду с помощью характерных для рассматриваемой задачи параметров. Этот процесс позволяет выделить в уравнениях 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, характерному для течений несжимаемой жидкости. Окончательная система уравнений в безразмерных переменных имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{U}\nabla\rho = -\rho\nabla\bar{U}, \qquad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + (\rho \bar{U} \nabla) \bar{U} = -\nabla \tilde{\rho} + \frac{1}{\text{Re}} \text{div} \tau_{eff} + (\rho - \rho^*) \frac{\bar{g}}{g}, \qquad (2)$$

$$\nabla \overline{U} = \frac{1}{C_p p^*} \left[\frac{1}{\operatorname{Re}\operatorname{Pr}} \left(\nabla (\lambda \nabla \widetilde{T}) + \left(\frac{\overline{g}}{g} \nabla \right) (\lambda \nabla T^*) \right) \frac{\overline{g}}{g} + \varepsilon_g \left(\overline{U} \frac{\overline{g}}{g} \right) \rho^* \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} - C_p \right) \right].$$
(3)

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

В (1)–(3) 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 скорости невозмущенного ветра u_0 на высоте 10 м, расстояния — к значению глубины карьера d_0 . В уравнения вошел параметр $\varepsilon_g = g \rho_0 d_0 / p_0$ и две новые переменные:

$$\tilde{p} = (p - p^*) / \left(\frac{\rho_0 u_0^2}{p_0}\right), \quad \tilde{T} = T - T^*.$$

Тензор напряжений определяется из обобщенного закона Ньютона:

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

где $S_{ij} = 1/2[(\partial u_i / \partial x_j) + (\partial u_j / \partial x_i)]$ — тензор скоростей деформации, *E* — единичный тензор, μ_{eff} — эффективный коэффициент вязкости, определяемый суммой его молекулярного и турбулентного значений.

Разностный аналог уравнений дозвуковой модели не связан ограничением по временному шагу, возникающим при численной реализации системы полных уравнений Навье – Стокса в силу ее гиперболичности. Изначально осредненные LES-методом уравнения Навье-Стокса в дозвуковом приближении использовались для расчетов всплытия нагретых объемов газа (термиков) [12]. Показана возможность вести расчеты в широком диапазоне перепадов плотностей в термике и окружающем воздухе вплоть до чисел Маха, близких к единице. В рассматриваемых задачах число Маха существенно меньше единицы, поэтому правомерно использование уравнений Навье-Стокса для сжимаемой жидкости в дозвуковом приближении для моделирования подобных течений.

В LES-модели Смагоринского [19, 20] большие вихри рассчитываются явно, а эффекты на малых масштабах моделируются с помощью турбулентной кинематической вязкости:

$$\nu_{t} = (C_{sm}\Delta)^{2} \left[\frac{\partial \overline{u}_{i}}{\partial x_{j}} \left(\frac{\partial \overline{u}_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \overline{u}_{j}}{\partial x_{i}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = (C_{sm}\Delta)^{2} \sqrt{2\overline{S}_{ij}\overline{S}_{ij}} = (C_{sm}\Delta)^{2} \left| \overline{S} \right|.$$
(4)

Здесь Δ — характерный размер сеточной ячейки; C_{sm} — константа Смагоринского. Черта сверху отмечает отфильтрованные LES-методом величины. Значение константы Смагоринского, определенное в 1967 г., равно 0.17. В более поздних работах с применением LES-модели значения константы в зависимости от рассматриваемой задачи, численной модели, шага разностной сетки несколько отличались. Чаще всего в расчетах константы Смагоринского составляют 0.1–0.2. Эти значения выбирались как из условия согласования результатов расчетов с экспериментами, так и произвольным образом. В расчетах данной работы использовалось значение 0.2.

Если молекулярная вязкость много меньше турбулентной вязкости v_t и ею можно пренебречь, то из (4) следует, что при выборе $v_0 = d_0 u_0$ число Рейнольдса $\text{Re} = d_0 u_0 / v_0 = 1$. Турбулентный аналог числа Прандтля $\text{Pr} = C_p^0 \rho_0 v_0 / \lambda_0$ выбран равным 0.9.

Определение характеристик облака мелкодисперсной пыли проводилось в предположении, что ее перемещение не влияет на характеристики воздушного потока, а ее скорость равна местной скорости потока. В расчет включено уравнение переноса концентрации пылевой примеси:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \overline{U}\nabla c = \operatorname{div}[\rho D_t \nabla (c / \rho)],$$

где ρ — плотность газопылевой смеси; *с* — концентрация примеси; *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 Sc = v_t / D_t [21]. Турбулентное число Шмидта меняется от 0.1 до 2.5 в зависимости от рассматриваемой задачи [22]. В исследовании выбиралось значение, равное 1. Здесь и далее черточка над отфильтрованными параметрами опущена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование течения, развивающегося при взаимодействии ветра с поверхностью. Приведем результат тестового расчета взаимодействия ветра с ровной (с нулевой глубиной карьера) поверхностью грунта в момент t = 30 мин после начала взаимодействия. Течение характеризуется достаточно большими флуктуациями скорости, но в среднем горизонтальная ее составляющая вдоль сечений x = const, так же как и при x = 0, хорошо описывает поведение заданного на левой границе расчетной области профиля скорости (рис. 3).



Рис. 3. Распределение горизонтальной составляющей скорости по вертикали: *1* — заданная скорость на левой границе расчетной области; *2* — скорость в сечении *x* = 0

Рассмотрим взаимодействие ветра с рельефом карьера, характеристики которого соответствуют Ситовскому карьеру. Глубина карьера 50 м, ширина на уровне дневной поверхности в расчетах варьировалась. При ширине карьера, превышающей 200 м, изменение характеристик вниз по течению за правым бортом слабо зависело от этого параметра. Приведены результаты для карьера шириной 400 м. Картина течения, реализующаяся в этих условиях через 40 мин после начала взаимодействия, представлена на рис. 4. Во внутренней области карьера наблюдается развитое вихревое течение (рис. 46). Выше дневной поверхности ветровой поток характеризуется флуктуациями, отражающими вихревую структуру течения в этой области. Обсуждение этого вопроса выходит за рамки рассматриваемой задачи.



Рис. 4. Поле скоростей воздуха в окрестности карьера (область, ограниченная плоской поверхностью и бортами карьера, закрашена) через 40 мин после начала взаимодействия ветра с поверхностью (*a*) и фрагмент верхней панели в увеличенном масштабе (б). Область, заполненная точками, — начальная локализация пыли в пылевом блоке

Динамика мелкодисперсной пыли в поле ветра. Рассмотрим перемещение облака пыли в соответствии с представленной постановкой задачи. Пусть мелкодисперсная пыль заполняет цилиндрический объем кругового сечения с образующей, параллельной бортам карьера. Поместим этот цилиндр в область ветрового потока, характеристики которого соответствуют полю скорости, отображенному на рис. 4*a*. Радиус кругового сечения выбран исходя из данных наблюдения за развитием массового взрыва на Ситовском карьере на начальной стадии формирования облака пыли и составлял 15 м. Верхняя кромка облака пыли в круговом сечении располагалась, как при Ситовском взрыве, на высоте 100 м (150 м от дна карьера). Динамику облака пыли кругового сечения в поле ветра рассмотрим в сопоставлении с развитием цилиндрического пылевого облака, сечение которого представляет собой столб пыли. Оба сечения представлены на рис. 4*a*, круговое сечение расположено в верхней части столба.

В обоих случаях предполагалось, что пыль заполняет пространство равномерно. Так как начальные значения концентрации пыли неизвестны, то рассматривались изменения во времени концентрации пыли в переменных, отнесенных к начальной концентрации, т. е. в начальный момент относительная концентрация предполагалась равной единице везде. В представленных результатах отсчет времени приведен с момента начала переноса пыли ветровым потоком.

Распространение облака пыли, изначально сосредоточенной внутри цилиндра кругового сечения, приводит к расширению круговой области, а стратификация ветра — к вытягиванию облака и его наклону к горизонтальной оси (рис. 5a, фрагменты 1, 2). Примерно к двум минутам нижняя граница облака достигает поверхности. В последующие моменты времени облако пыли существенно вытягивается в горизонтальном направлении. Одновременно увеличивается размер области соприкосновения облака с поверхностью. До 1-2 мин облако не касается поверхности. Если в рассматриваемом случае расположить точки фиксации частиц пыли на расстоянии в несколько сот метров от борта карьера, то они не зафиксируют частицы. Отметим, что речь идет о рассматриваемых частицах PM2.5, более крупные частицы могут выпадать из облака и вблизи борта карьера.

a



Рис. 5. Распределение относительной концентрации примеси во времени: a — источник пыли — круговое сечение цилиндрического облака, фрагменты 1-4 — распределение пыли в облаке в моменты времени 1, 2, 3.5 и 7 мин; δ — источник пыли — столб, фрагменты 1, 2 соответствуют 2 и 6 мин. Чем темнее закрашенная область, тем выше концентрация

Схожая, но все же несколько отличная картина распространения пылевого облака наблюдается в случае, если пыль изначально сосредоточена в столбе (рис. 56). Облако соприкасается с поверхностью с момента выхода за пределы карьера.

При равномерном начальном распределении мелкодисперсной пыли, одинаковом в обоих рассмотренных случаях, в расчетах наблюдается существенное отличие относительной концентрации в зависимости от начальной локализации пыли. Как и в реальном взрыве (рис. 2), зависимость концентрации от времени в фиксированных точках поверхности имеет импульсный характер с длительностью в несколько минут для точек фиксации на расстояниях до 2000 м от борта карьера (рис. 6). Длительность импульса практически не зависит от начальной локализации пыли, постепенно увеличиваясь до десятков минут при удалении от карьера. Однако если пыль вначале сосредоточена в столбе, то значения концентрации более чем на порядок выше. В случае равномерной начальной локализации пыли в столбе загрязнение поверхности более эффективно, чем при начальной локализации пыли в круговом сечении. В действительности начальная концентрация мелкодисперсной пыли в нижней части столба может оказаться существенно меньше, чем в верхней части, или в любом другом отделенном от поверхности облаке пыли. Так, при тротиловых взрывах на поверхности грунта мелкодисперсные частицы концентрируются в верхней части облака пыли [12].



Рис. 6. Распределение относительной концентрации пыли во времени на разных расстояниях: a — источник пыли — круговое сечение цилиндрического облака, кривые 1-6 соответствуют расстояниям от борта карьера в 0.3, 0.8, 1.8, 2.8, 3.8 и 4.8 км; δ — источник пыли — столб, кривые 1-6 соответствуют тем же расстояниям от центра карьера

В зависимости от начальной локализации пыли загрязнение приземного слоя атмосферы может фиксироваться сразу, начиная от борта карьера, или с некоторого расстояния. Если источник пыли — круговое сечение цилиндрического облака, то на расстояниях до 300 м от борта карьера пыль на поверхность не попадает (рис. 6*a*). По мере удаления от борта карьера концентрация пыли резко возрастает, достигая максимума на расстоянии 800 м, а затем — падает. В рассматриваемом случае концентрация пыли на расстоянии 300 м от борта карьера оказывается ниже, чем на расстоянии 1800 м. Если источник пыли — столб, то максимальное значение концентрации достигается непосредственно у борта, и по мере удаления точки фиксации от борта максимальная концентрация только падает.

При получении приведенных выше результатов на левой границе расчетной области задавалось условие втекания воздуха со скоростями, соответствующими распределению скорости [16] в атмосферном пограничном слое (рис. 3, кривая 1). Согласно этим данным, скорость на высоте 10 м составляет 3.5 м/с. В то же время приземная скорость ветра во время проведения массового взрыва на Ситовском карьере достигала 8 м/с. С целью изучения влияния скорости ветра на распространение облака пыли повторили все расчеты для случая увеличенных вдвое значений скорости на левой границе расчетной области, когда скорость ветра на высоте 10 м составляет 7 м/с. Несмотря на существенное увеличение скорости ветра в окрестности карьера при повышенных значениях скорости на левой границе расчетной области сами максимальные значения концентрации почти не изменились Однако длительность импульса концентрации в фиксированных точках поверхности грунта сократилась, причем обратно пропорционально увеличению скорости набегающего ветра. Она оказалась почти в 2 раза меньше, чем в случае скорости ветра 3.5 м/с на высоте 10 м. Длительность импульса концентрации на расстоянии 1800 м от борта карьера, т. е. на расстоянии, соответствующем расположению стационарного пункта регистрации при наблюдениях, равна ~ 5 мин. Это значение хорошо согласуется с полученным в измерениях.

Для удобства сопоставления результатов приведем рисунок, характеризующий интегральный параметр $C^s = \int c(x_i) dt$, представляющий собой суммарную концентрацию примеси в точке поверхности $x = x_i$ за время прохождения облака пыли. Так как $c(x_i)$ — относительная концентрация, то размерность C^s — секунды. Как следует из рис. 7 (кривые l и 2), до расстояния примерно равного 1000 м от борта карьера суммарная концентрация пыли на поверхности почти не зависит от скорости ветра на границе расчетной области, а затем различие быстро увеличивается, достигая примерно двойки для рассмотренных двух вариантов начальной скорости ветра.



Рис. 7. Суммарная относительная концентрация пыли на поверхности, источник пыли — круговое сечение цилиндрического облака: 1 — скорость ветра на границе по стандарту [16]; 2 — удвоенная скорость ветра на границе; 3 — стандартная скорость ветра на границе, но начальное положение кругового цилиндрического облака приподнято на 50 м. Стрелочкой отмечено положение борта карьера

Приведем результаты расчетов, демонстрирующие зависимость C^s от начальной высоты кругового цилиндрического облака мелкодисперсной пыли. Подобное изменение высоты пылевого облака в естественных условиях может быть связано, например, с увеличением энергии зарядов массовых взрывов. Приподнимем круговое цилиндрическое облако, сечение которого представлено на рис. 6, так, чтобы верхняя кромка достигла значения 150 м. Как следует из рис. 7, в этом случае суммарная концентрация уменьшается почти на порядок (кривая *3* по сравнению с кривой *1*). Дальнейшее увеличение высоты кругового цилиндрического облака в расчетах приводит к быстрому уменьшению C^s в фиксированных точках поверхности, достигая практически нулевых значений, когда верхняя кромка начального пылевого облака устанавливается на высоте 250 м. Таким образом, эффект переноса мелкодисперсной пыли к поверхности имеет место только в условиях, когда начальное облако пыли формируется в области нижней части АПС с его резкими градиентами горизонтальной составляющей скорости ветра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Регистрация с помощью современного оборудования процессов, сопровождающих формирование и последующее распространение в поле ветра пылевого облака массовых взрывов на Ситовском известковом карьере Липецкой области, позволила определить детальную картину развития облака в пределах карьера. Оценена в первом приближении концентрация вредных для здоровья микрочастиц на поверхности вне карьера после массового взрыва на расстояниях от сотен метров до нескольких километров.

Измерения показали, что в ближайших к населенным пунктам объектах фиксации частиц как фоновые значения концентрации PM2.5, так и максимальное отклонение концентрации после проведенного массового взрыва на порядок меньше предельно допустимой разовой дозы. Однако облако пыли по концентрации изначально неоднородно, что усиливается в процессе его распространения в поле ветра за счет дисперсии пыли по всем направлениям. Следовательно, нельзя считать, что всего лишь два пункта фиксации частиц позволили определить максимальные значения концентрации частиц после массового взрыва в карьере. Определение достоверных значений концентрации требует более густой сети пунктов фиксации и регулярности измерений.

Формирование облака пыли происходит под влиянием сложных процессов разрушения горной породы при массовом взрыве и увлечении взвеси порывистым ветром. Провести измерения на этой важной стадии развития облака пыли и получить хотя бы грубые оценки о концентрации частиц не представляется возможным. Крайне затруднительно и теоретическое исследование стадии формирования облака. Однако видеосъемка развития массового взрыва и формирования облака в пределах карьера позволила рассмотреть частную задачу о возможности переноса частиц мелкодисперсной пыли из верхней части облака с высот 50–100 м к пунктам фиксации. Численное моделирование газодинамического течения, развивающегося в области нижней части атмосферного пограничного слоя, возмущенного взаимодействием ветра с рельефом карьера, продемонстрировало вертикальное расширение облака пыли, в том числе и в направлении к поверхности Земли. Касание облаком поверхности происходит на некотором расстоянии от борта карьера, что приводит к возможности быстрого роста максималь-

ной концентрации по мере удаления от борта и последующего плавного ее уменьшения. Наличие пика максимальной концентрации на поверхности вне карьера допускает существование точек, расположенных ближе к борту, но в которых значение максимальной концентрации ниже по сравнению с некоторыми более отдаленными от борта точками. Подобная немонотонность максимальной концентрации вдоль поверхности обнаружена и в измерениях, в которых максимальная концентрация в ближнем пункте наблюдения оказалась примерно вдвое ниже, чем в дальнем. Этот факт также можно объяснить неоднородностью концентрации пыли в переносимом ветром облаке. Возможно, немонотонность связана с диффузионным переносом частиц к точкам фиксации на поверхности из верхней части облака пыли.

Согласно расчетам зависимости суммарной концентрации C^s от начальной высоты кругового цилиндрического облака мелкодисперсной пыли, увеличение начальной высоты облака в диапазоне 100 м и выше приводит к быстрому уменьшению C^s в фиксированных точках поверхности. Перенос пыли к поверхности из расположенного в начальный момент времени на некоторой высоте облака возможен в случае, если высота облака пыли не сильно превышает размеры нижней части атмосферного пограничного слоя с его крутыми градиентами горизонтальной составляющей скорости. В расчетах это высота ~ 100 м над дневной поверхностью.

Численное моделирование показало слабую зависимость длительности импульса концентрации в точках фиксации от вертикальных размеров области начальной локализации пыли внутри карьера. Увеличение скорости ветра приводит к уменьшению длительности импульса, что обратно пропорционально увеличению скорости ветра. Оба утверждения справедливы при одних и тех же остальных начальных условиях. В то же время сами максимальные концентрации почти не зависят от скорости ветра. Отмечалось, если скорость ветра в расчетах близка к зафиксированной при проведении измерений, то длительность импульса в точке, расположенной на расстоянии 1800 м от борта карьера, примерно 5 мин. Это значение хорошо коррелирует со значением, полученным в наблюдениях на расстоянии 1950 м (рис. 2). Нельзя утверждать, что близость этих значений подтверждает достоверность расчетов. Однако если длительность импульса концентрации действительно слабо зависит от начальной локализации пыли, и если горизонтальные размеры облака, покидающего карьер в условиях рассмотренного массового взрыва, не сильно отличаются от начальных данных расчета, то этот факт является свидетельством непротиворечивости расчетов и измерений.

выводы

Выполнена серия измерений концентрации РМ2.5 у поверхности Земли за пределами Ситовского известнякового карьера при массовых взрывах. Проведено численное моделирование распространения облака пыли в поле ветра в условиях, приближенных к характеристикам Ситовского карьера. Изучена зависимость полученных результатов от скорости ветра и других параметров модели. Выявлено, что отмеченная в наблюдениях немонотонность максимальной концентрации РМ2.5 вдоль поверхности может быть следствием локализации на завершающей стадии подъема пыли после массовых взрывов частиц микронного размера в области нижней части АПС в диапазоне высот 50 – 100 м над дневной поверхностью. Перенос пыли к поверхности из облака, расположенного на определенной высоте, в значимых концентрациях возможен, если нижняя граница облака не превышает высоты ~ 100 м над дневной поверхностью. Показана определенная корреляция данных численных расчетов и натурных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- **1.** Адушкин В. В., Соловьев С. П. Микрочастицы в атмосфере от литосферных источников техногенного происхождения // Физика Земли. — 2021. — № 5. — С. 120–132.
- 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.
- **3.** Fan L. and Liu S. Respirable nano-particulate generations and their pathogenesis in mining workplaces: a review, Int. J. Coal. Sci. Technol., 2021, Vol. 8. P. 179–198.
- 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.
- 5. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П. Методология оценки перспективной парадигмы развития минерально-сырьевого комплекса // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 175–187.
- 6. 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.
- 7. 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.
- 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.
- **9.** Бакланов А. А. Определение распространения примесей в атмосфере карьера на основе математического моделирования // ФТПРПИ. 1984. № 5. С. 73–79.
- **10. Бакланов А. А.** Метод расчета энергетических показателей атмосферы карьеров // ФТПРПИ. 1986. № 1. С. 73–78.
- Kumar P., Morawska L., Martani C., Biskos G., Neophytou M., Di Sabatino S., Bell M., Norford L., and Britter R. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities, Env. Int., 2015, Vol. 75. — P. 199–205.
- 12. Khazins V. M., Shuvalov V. V., and Soloviev S. P. Numerical modeling of formation and rise of gas and dust cloud from large scale commercial blasting, Atmosphere, 2020, Vol. 11. 1112.
- **13.** Jones T., Morgan A., and Richards R. Primary blasting in a limestone quarry: physicochemical characterization of the dust clouds, Mineral. Mag., 2003, Vol. 67. P. 153–162.
- 14. Wang Y., MacCall B. T., Hocut C. M., Zeng X., and Fernando H. J. S. Simulation of stratified flows over a ridge using a lattice Boltzmann model, Env. Fluid Mech., 2020, Vol. 20. P. 1333–1355.
- 15. Wang Y. and 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, Vol. 21. P. 287-304.
- **16.** 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.
- 17. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М.: Изд-во стандартов, 2004. 181 с.

- 18. Затевахин М. А., Кузнецов А. Е., Никулин Д. А., Стрелец М. Х. Численное моделирование процесса всплытия системы высокотемпературных турбулентных термиков в неоднородной сжимаемой атмосфере // ТВТ. — 1994. — Т. 32. — № 1. — С. 44–56.
- **19. Smagorinsky J.** General circulation experiments with the primitive equations, Mon. Weather Rev., 1963, Vol. 91. P. 99–164.
- 20. Lilly D. K. The representation of small-scale turbulence in numerical simulations. Proc. IBM scientific computing symposium on environmental sciences, Yorktown Heights, NY, IBM form No. 320-1951, 1967. — P. 195–210.
- **21.** Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
- **22.** 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.

Поступила в редакцию 28/IV 2022 После доработки 29/VI 2022 Принята к публикации 30/VI 2022