

## ОХРАНА ТРУДА

УДК 622.4+519.67

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-90-101

### Исследование влияния параметра фоновой стратификации на время естественного проветривания карьера на базе численного моделирования

Амосов П. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

*e-mail: p.amosov@ksc.ru*

#### Реферат

**Цель работы.** Оценка влияния параметра фоновой стратификации на время естественного проветривания карьера и уровень загрязнения атмосферы верхнего борта карьера вниз по ветровому потоку.

**Методика.** Описана азротермодинамическая модель атмосферы, в которой уравнения динамики в приближении несжимаемой жидкости дополнены уравнением переноса тепла, а также учетом механизмов плавучести и фоновой стратификации. Описаны необходимые модификации в неспециализированной программе COMSOL, обеспечивающие возможность выполнения исследований азротермодинамики атмосферы при ее различных состояниях. Построена и апробирована двухмерная CFD-модель атмосферы карьера, который при проведении массовых взрывов проветривается по рециркуляционной схеме. Выполнены численные эксперименты процессов естественного проветривания карьера для скоростей ветрового потока на верхнем борту карьера 1 и 2 м/с, при вариации параметра фоновой стратификации (от 0,0 до +0,05 °С/м) и фиксированном начальном местоположении пылегазового облака.

**Результаты и их анализ.** Отмечены существенные различия в азротермодинамических параметрах потоков и пространственном распределении отклонений потенциальной температуры при разных условиях состояния атмосферы. Показано существенное увеличение времени естественного проветривания карьера при усилении инверсионного состояния атмосферы по сравнению с ее нейтральным состоянием. Спрогнозировано отсутствие смещения месторасположения наиболее загрязненной области карьера при сильной инверсии. Отмечено смещение такой области в сторону подветренного борта карьера при малых значениях параметра фоновой стратификации.

**Выводы и область применения.** Для рециркуляционной схемы проветривания усиление инверсионного состояния атмосферы существенно увеличивает время естественного проветривания, но снижает уровень загрязнения, выносимого на верхний борт карьера вниз по потоку.

**Ключевые слова:** карьер; CFD-модель; атмосфера; параметры конвекции; фоновая стратификация; взрывные работы; естественное проветривание.

**Работа выполнена** в рамках темы НИР № гос. рег. 1021051803680-5 (FMEZ-2022-0010) «Процессы трансформации природных и техногенных систем в условиях изменения климата в Арктической зоне Российской Федерации (на примере Мурманской области)».

**Введение и актуальность.** В последние годы отмечается интерес к использованию компьютерного моделирования на базе хорошо верифицированных программ (Flowvision, ANSYS Fluent, ANSYS CFX, COMSOL и др.), которые не являются специализированными для решения задач рудничной аэрологии (карьеры, подземные выработки). Обусловлено это созданием высокопроизводительных компьютеров,

разработкой верифицированных программных комплексов вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование), а также подготовкой поколения специалистов в области информационных технологий. Подчеркнем, что проблема обеспечения безопасных условий труда горнорабочих в силу особенностей климатических и горно-геологических условий Заполярья, способствующих ослаблению естественного воздухообмена в карьерном пространстве и усложняющих создание нормальных санитарно-гигиенических условий труда, по-прежнему остается актуальной.

Известно достаточно много примеров использования перечисленных неспециализированных программ для оценки качества воздуха на объектах горнопромышленного комплекса (карьеры, хвостохранилища, отвалы).

Программный код Flowvision [1, 2] используют специалисты-практики Н. Р. Баширов [3], преподаватели и сотрудники Санкт-Петербургского горного университета (Е. Б. Гридина, И. А. Петров и др.) [4].

Широко используется в исследованиях программа ANSYS Fluent [5, 6]. Можно отметить работы специалистов Санкт-Петербургского горного университета (К. Н. Ястребова [7], С. Г. Гендлер и И. А. Борисовский [8]). Определенный объем исследований под руководством С. А. Козырева выполнен группой сотрудников Горного института КНЦ РАН [9, 10]. Следует упомянуть работы китайских исследовательских групп (Yuan Wang с коллегами [11], Huang Z. с коллегами [12]), а также изыскания индийского специалиста Kumar Vaibhav Raj [13]. К исследованиям по использованию CFD-моделирования для решения проблем аэрологии карьеров присоединились сотрудники Горного института УрО РАН (С. А. Бублик, М. А. Семин) [14].

Попытки моделирования аэротермодинамических процессов и исследования структуры полей скорости в карьере на базе программного кода COMSOL [15, 16] предприняты П. В. Амосовым с коллегами в Горном институте КНЦ РАН, позже в ИППЭС КНЦ РАН [17, 18] выполнены исследования процессов естественного проветривания.

Специалисты чилийского университета г. Сантьяго [19] используют ранее разработанный решатель OpenFOAM для изучения проблемы циркуляции воздуха при интенсивной инсоляции внутри крупных карьеров, где преобладают механические и плавучие эффекты, что имеет важное значение для рассеивания загрязняющих веществ.

В приведенных примерах при решении проблем обеспечения качества атмосферы в ходе деятельности предприятий горнопромышленного комплекса воздушная среда рассматривается в известных приближениях (приближение несжимаемой жидкости, для неизотермических потоков модели «несжимаемого идеального газа», приближение Буссинеска, слабой сжимаемости), весьма далеких от реальной атмосферы.

Представляется, что существует возможность пользовательской модификации неспециализированных программных комплексов (не только COMSOL) с тем, чтобы их можно было применять для исследований процессов атмосферного переноса газовых и пылевых загрязнений при различных состояниях (неустойчивых, нейтральных, инверсионных) приземного слоя атмосферы. Предлагается вернуться к модели атмосферного пограничного слоя, в которой используют систему уравнений гидротермодинамики с гидростатическим приближением в приближении Буссинеска и без включения полностью сжимаемой системы. Примером такой модели является модель микроклимата атмосферы, описанная как в работах прошлого века [20–22], так и в современных исследованиях [23, 24].

Для достижения цели исследования использована ранее построенная в программе COMSOL [15, 16] двумерная компьютерная модель аэрогазодинамики атмосферы карьера [17, 18], которая через источники члены управляющих уравнений дополнена учетом механизмов плавучести и фоновой стратификации. Такая модификация позволяет говорить об аэротермогазодинамической модели атмосферы карьера. Представленная далее система уравнений подобна системе уравнений, описанной в работе [22], с соответствующим набором краевых условий.

**Цель исследования** – продемонстрировать влияние параметра фоновой стратификации на время естественного проветривания карьера (рециркуляционная схема проветривания) при фиксированной глубине карьера, а также на уровень загрязнения атмосферы верхнего борта карьера вниз по ветровому потоку.

**Математическая модель.** Система управляющих уравнений аэротермодинамики и переноса загрязнений (газовая компонента) в двумерной постановке (координаты  $X-Z$ ) в программе COMSOL [15, 16] имеет следующий вид:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_T \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_T \frac{\partial u}{\partial z} \right); \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_T \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_T \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho \lambda \mathcal{G}'; \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}; \quad (3)$$

$$\rho C_p \frac{\partial \mathcal{G}'}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial \mathcal{G}'}{\partial x} + \rho C_p w \frac{\partial \mathcal{G}'}{\partial z} = -\rho C_p S w + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_T \frac{\partial \mathcal{G}'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_T \frac{\partial \mathcal{G}'}{\partial z} \right); \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho w \frac{\partial k}{\partial z} = \eta_T P(\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_T \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_T \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \rho \varepsilon; \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon \eta_T P(\bar{u})}{k} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_C \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_C \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (7)$$

где  $t$  – время;  $u$ ,  $w$  – компоненты вектора скорости  $\bar{u}$  потоков в направлении осей  $x$ ,  $z$ , соответственно;  $\rho$  – плотность воздуха;  $C_p$  – теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $\mathcal{G}'$  – отклонение потенциальной температуры от фоновой;  $\pi$  – приведенное давление;  $\lambda$  – параметр конвекции (плавучести),  $\lambda = g / T$  (числитель – ускорение свободного падения, знаменатель равен 273 K);  $S$  – параметр фоновой стратификации (положительные значения параметра соответствуют условиям устойчивого состояния атмосферы);  $C$  – концентрация газовой компоненты;

$\eta_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  – коэффициент динамической турбулентной вязкости;  $k_T = C_p \eta_T / Sc$  – коэффициент теплопроводности;  $k_C = \eta_T / (\rho Sc)$  – коэффициент диффузионного переноса загрязнений;  $k$  – удельная кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  – скорость вязкой диссипации энергии турбулентности;  $P(\bar{u})$  – тензор скоростей

деформаций,  $P(\bar{u}) = \nabla \bar{u} : (\nabla u + (\nabla \bar{u})^T)$ ,  $\nabla$  – оператор Гамильтона,  $T$  – транспонирование;  $Sc$  – число Прандтля–Шмидта;  $C_\mu = 0,09$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ,  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  – константы ( $k$ - $\varepsilon$ )-модели турбулентности.

Коэффициенты турбулентного переноса тепла и примеси в уравнениях (4) и (7) определяются посредством осреднения коэффициента турбулентной вязкости по области моделирования с поправкой на число Прандтля–Шмидта [25].

Используемые при описании граничных и начальных условий обозначения подробно описаны в документации программного продукта COMSOL [15, 16].

#### **Начальные и граничные условия для уравнений (1)–(6).**

Начальные условия при  $t = 0$ :

$$\bar{u} = \bar{u}(\bar{x}); \quad \mathcal{S}' = 0; \quad \pi = \pi_0; \quad k = k_0; \quad \varepsilon = \varepsilon_0.$$

Граничные условия ( $H$  – верхняя граница модели) приняты как в исходной модели [22], так и частично установлены по умолчанию [15, 16].

Входная граница:

$$u = u_\phi(z); \quad w = 0; \quad \mathcal{S}' = 0, \text{ где } u_\phi(z) \text{ – профиль горизонтальной скорости.}$$

Выходная граница:

$$\bar{n}(-k_T \nabla \mathcal{S}') = 0, \text{ где } \bar{n} \text{ – единичный вектор нормали к границе;}$$

$$\eta_T \left( \nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right) = 0, \quad \pi = \pi_0 \text{ – отсутствие вязких напряжений.}$$

Верхняя граница  $z = H$ :

$$u = u_\phi(H); \quad w = 0; \quad \mathcal{S}' = 0.$$

Подстилающая поверхность  $z = \delta(x)$ :

$$\mathcal{S}' = f(x, z, t);$$

$\bar{n}\bar{u} = 0; \quad \eta_T \left( \nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right) \bar{n} = \left[ \rho C_\mu^{0,25} k^{0,25} / \left( \frac{\ln(\delta_w^+)}{\kappa} + C^+ \right) \right] \bar{u}$  – логарифмическая функция стенки, где  $\kappa$  – постоянная Кармана.

**Для параметров турбулентности** использованы следующие граничные условия, которые установлены по умолчанию [15, 16].

Входная граница:

$$k = k_0; \quad \varepsilon = \varepsilon_0.$$

Выходная граница:

$$\bar{n}\nabla k = 0; \quad \bar{n}\nabla \varepsilon = 0.$$

Верхняя граница  $z = H$ :

$$k = k_0; \quad \varepsilon = \varepsilon_0.$$

Подстилающая поверхность  $z = \delta(x)$ :

$$\bar{n}\nabla k = 0; \quad \varepsilon = C_\mu^{0,75} k^{1,5} / (\kappa \delta_w); \quad \delta_w^+ = \delta_w \rho C_\mu^{0,25} k^{0,5} / \eta.$$

#### **Начальные и граничные условия для уравнения (7).**

Начальные условия при  $t = 0$ :

$C = C_0$  – в области пылегазового облака (ПГО);

$C = 0$  – в остальной области моделирования.

Граничные условия [15, 16].

Входная граница:

$$C = 0.$$

Выходная граница:

$$\bar{n}(-k_C \nabla C) = 0 \text{ – конвективный поток.}$$

Верхняя граница  $z = H$ :

$\vec{n}\vec{N} = 0$ ;  $\vec{N} = -k_c \nabla C + C\vec{u}$  – условие изоляции/симметрии.

Подстилающая поверхность  $z = \delta(x)$ :

$\vec{n}\vec{N} = 0$ ;  $\vec{N} = -k_c \nabla C + C\vec{u}$  – условие изоляции/симметрии.

**Геометрия модели и последовательность вычислений.** Для выполнения расчетов выбрана геометрия карьера (глубина 500 м), который проветривается по рециркуляционной схеме [26, с. 34]: относительная длина карьера в направлении движения ветра равна 3, угол откоса подветренного борта карьера более  $15^\circ$ . В численных экспериментах варьируются следующие параметры модели:

- параметр фоновой стратификации от 0,0 до  $+0,05$  °C/м с шагом  $0,005$  °C/м, т. е. рассмотрены ситуации от равновесной до глубокой инверсии;
- значения скорости набегающего ветрового потока на борту карьера на высоте 10 м приняты равными 1 и 2 м/с.

В расчетах зафиксированы два параметра модели:

- местоположение ПГО вблизи подошвы карьера в его центральной части;
- начальная концентрация газовой компоненты в облаке принята равной 100 ПДК.

Последовательность выполнения расчетов трехшаговая:

- на 1-м шаге получаем стационарное поле скорости и распределение коэффициентов турбулентной вязкости в приближении несжимаемой жидкости с использованием  $(k-\epsilon)$ -модели турбулентности;
- на 2-м шаге, отталкиваясь от результатов предыдущего шага, решаем нестационарную задачу аэротермодинамики с выходом практически на стационарный режим аэротермодинамических параметров;
- на 3-м шаге выполняем нестационарный расчет распространения газовой компоненты с учетом сложившегося к концу второго шага поля скорости и коэффициентов диффузионного переноса загрязнений.

**Результаты расчетов и анализ результатов.** Вертикальные распределения горизонтальной компоненты скорости и отклонения потенциальной температуры вдоль перпендикуляра, восстановленного к середине подошвы карьера, при скорости ветра 1 и 2 м/с и трех значениях параметра фоновой стратификации (0,00,  $+0,025$  и  $+0,05$  °C/м) приведены на рис. 1. Анализ вертикальных распределений горизонтальной компоненты скорости позволяет отметить следующие моменты.

При нейтральной стратификации имеем результат, который строго соответствует использованию стандартной модели несжимаемой жидкости:

- в верхней части карьера (с отметки 205 м) наблюдается прямой поток, а в нижней – обратный;
- отношение модулей горизонтальной компоненты скорости строго следует задаваемому граничному условию (скорость ветра 1 или 2 м/с).

Увеличение значения параметра стратификации существенно изменяет поведение профиля горизонтальной компоненты скорости:

- изменение знака происходит не единожды, а 3–4 раза, т. е. практически имеем «слоеный пирог» с разным направлением потоков;
- в нижней половине чаши карьера модуль горизонтальной компоненты скорости составляет несколько сантиметров в секунду;
- пространственное расположение максимума модуля обратного потока в зависимости от параметра стратификации изменяется, при этом величина скорости сохраняется (при скорости ветра 1 м/с –  $0,15$  м/с, а при скорости ветра 2 м/с –  $0,33$  м/с).

Анализ вертикальных распределений отклонений потенциальной температуры свидетельствует о следующем:

- в условиях инверсии в чаше карьера формируется «слоеный пирог» (2 слоя при скорости ветра 1 м/с и 3 слоя при ветре 2 м/с);

- уровень положительных отклонений потенциальной температуры при скорости ветра 1 м/с до высот 50–90 м (в зависимости от стратификации) незначительный;

- при скорости ветра 2 м/с в нижней половине карьера прогнозируются заметные отрицательные отклонения потенциальной температуры, а в верхней – положительные;

- переход от отрицательных отклонений к положительным наблюдается при скорости ветра 1 м/с в районе высотных отметок ~265–275 м, а при скорости ветра 2 м/с – ~273–289 м;

- на высоте верхнего борта карьера наблюдаются максимальные отклонения потенциальной температуры, при этом отсутствует линейность в зависимости от величины параметра фоновой стратификации.

В табл. 1 приведены прогнозные значения времени проветривания карьера при вариации параметра фоновой стратификации и скорости ветра.

Отметим наиболее существенные закономерности:

- при значениях параметра фоновой стратификации  $+0,010$  °C/м и выше (состояния инверсии) координаты точки максимального загрязнения сохраняются (район вблизи подошвы карьера по его центру);

- при равновесном и слабоустойчивом состояниях атмосферы координаты области с максимальным загрязнением «мигрируют» по пространству карьера вблизи его подветренного борта;

- скорость роста времени проветривания карьера с усилением инверсионного состояния уменьшается;

- при инверсионных состояниях атмосферы отсутствует линейная зависимость времени проветривания от скорости ветра, что имеет место при использовании в аналогичных расчетах модели несжимаемой жидкости [18].

Проанализированы пространственные распределения газовой компоненты по объему карьера при двух значениях скорости ветрового потока и трех величинах параметра фоновой стратификации на моменты времени, близкие к прогнозным значениям времени очищения атмосферы карьера до уровня ПДК. Можно отметить несколько моментов.

Во-первых, при сильной инверсии (0,05 и 0,025 °C/м):

- область максимального загрязнения находится вблизи подошвы карьера, практически в месте начального положения ПГО;

- конвективный перенос продолжает оставаться основным механизмом рассеивания загрязнения по отмеченным выше слоям «пирога», но скорость распространения загрязнения ослабевает с увеличением значения параметра фоновой стратификации.

Во-вторых, при равновесном и близком ему состояниях атмосферы прогнозируется смещение области максимального загрязнения в сторону подветренного борта.

Определенный интерес представляет информация по выносу загрязнения непосредственно из карьера. Проанализирована информация в точке мониторинга на верхнем борту карьера вниз по потоку с учетом вариации и скорости ветра, а также параметра фоновой стратификации. Оказалось, что при скорости ветра 2 м/с уровни концентрации выше, чем при скорости 1 м/с. Особенно заметные различия наблюдаются при значениях параметра фоновой стратификации от 0,005 до 0,02 °C/м.

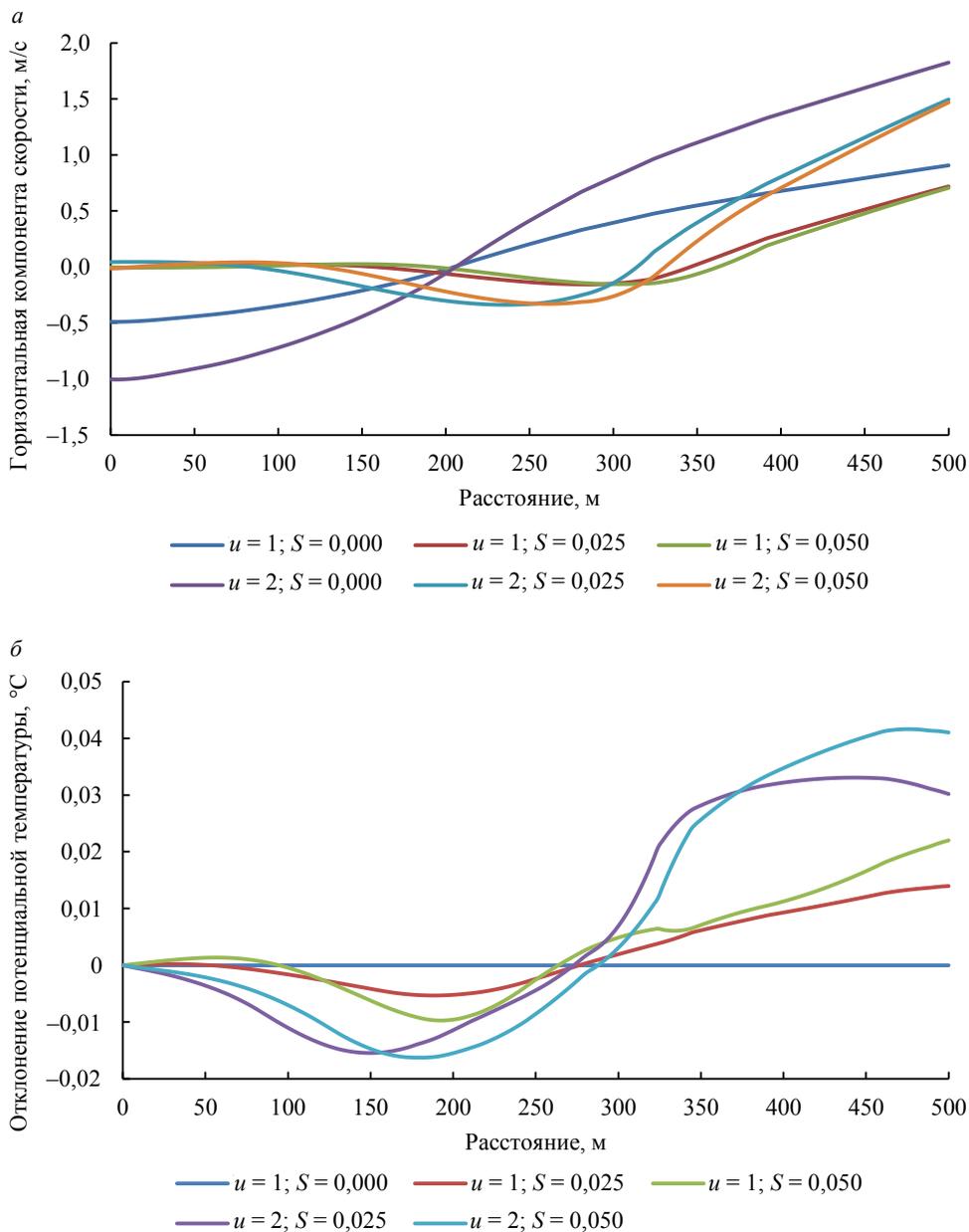


Рисунок 1. Вертикальное распределение горизонтальной компоненты скорости –  $a$  и отклонений потенциальной температуры –  $b$  вдоль перпендикуляра, восстановленного к середине подошвы карьера, при скорости ветра 1 и 2 м/с и вариации параметра фоновой стратификации: 0,00, +0,025 и +0,05 °С/м

Figure 1. Vertical distribution of the horizontal velocity component –  $a$  and potential temperature deviations –  $b$  along the perpendicular erected to the middle of the open-pit bottom under the wind speeds of 1 and 2 m/s and the background stratification parameter variations: 0.00, +0.025 and +0.05 °C/m

При нейтральной стратификации максимальные значения уровней загрязнения на борту карьера практически совпадают. Отметим, что при большей скорости ветра время достижения максимума загрязнения сокращается, что вполне естественно. Но линейности при этом не прослеживается.

**Таблица 1. Время проветривания карьера при вариации параметра стратификации и скорости ветра на борту карьера, с**  
**Table 1. Open-pit ventilation time under variations in the stratification parameter and wind speed on the pit wall, s**

Параметр фоновой стратификации $S$ , °C/м	Скорость ветра	
	1 м/с	2 м/с
0	~ 4685	~2315
0,005	~ 17 430	~ 4170
0,010	~ 21 840	~ 7000
0,015	~ 24 180	~8700
0,020	~ 25 590	~ 9880
0,025	~ 26 640	~ 10 770
0,030	~ 27 450	~ 11 550
0,035	~ 28 140	~ 12 150
0,040	~ 28 650	~ 12 660
0,045	~ 29 100	~ 13 140
0,050	~ 29 460	~ 13 500

Опыт использования двухмерной аэротермогазодинамической модели показал принципиальную возможность ее усложнения за счет учета как природных, так и технологических факторов (тепловой баланс поверхности, радиационные потоки, влажность атмосферы, угол откоса борта карьера, глубина карьера, начальное местоположение и загазованность пылегазового облака и др.), оказывающих серьезное влияние на процесс естественного проветривания. Предполагается, что включение обозначенных параметров может быть реализовано на следующих этапах работ.

Представляется весьма интересным применение подобной модели к задаче проветривания карьеров при эксплуатации оборудования с двигателями внутреннего сгорания в условиях инверсионного состояния атмосферы.

**Выводы.** В рамках неспециализированного программного продукта COMSOL предложены и выполнены дополнения в источниковых членах управляющих уравнений, в результате чего создана аэротермодинамическая модель микроклимата атмосферы карьера. Модификации включают учет механизмов плавучести и фоновой стратификации, которые обеспечивают расчет аэротермодинамики атмосферы при ее различных состояниях.

Созданная в двухмерном варианте аэротермодинамическая модель микроклимата атмосферы карьера апробирована на упрощенной модели карьера, проветриваемого при проведении массовых взрывов по рециркуляционной схеме.

При фиксированной глубине карьера 500 м, местоположении ПГО и начальной концентрации в нем при вариации скорости ветрового потока на верхнем борту карьера 1 и 2 м/с и вариации параметра фоновой стратификации в интервале от 0,000 до 0,050 °C/м выполнены численные эксперименты процессов естественного проветривания.

Проведен анализ аэротермодинамических параметров в карьере, времени естественного проветривания, пространственных распределений загрязнений в объеме карьера на момент завершения проветривания, загрязнения верхнего борта карьера вниз по потоку.

Показано существенное (относительно нейтрального состояния) увеличение времени естественного проветривания при усилении инверсионного состояния атмосферы. Скорость роста времени проветривания с усилением инверсионного состояния уменьшается.

Отмечено постоянство месторасположения наиболее загрязненной области карьера при сильной инверсии и смещение такой области в сторону подветренного борта карьера при малых значениях параметра фоновой стратификации.

Показано, что усиление инверсионного состояния снижает уровень загрязнения, выносимого на верхний борт карьера вниз по потоку. Максимальные значения уровней загрязнения атмосферы на борту карьера наблюдаются при условии нейтральной стратификации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство пользователя FlowVision. Версия 3.09.04. М.: ООО «ТЕСИС», 2015. 1295 с.
2. Щеляев А. FlowVision – современный российский инструмент математического моделирования. URL: <https://sapr.ru/article/21879> (дата обращения: 11.07.2023).
3. Баширов Н. Р. Метод динамического проектирования отвалов при предварительной симуляции воздушного потока // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 2. С. 40–47.
4. Gridina E. B., Andreev R. E. Mathematical modeling based on CFD method of wind currents in combined working out of the Olenegorsky pit in the Flowvision software package // International Review on Modelling and Simulations. 2017. Vol. 10. No. 1. P. 62–69.
5. Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. Основы работы в ANSYS 17. М.: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
6. ANSYS products 19.0 with documentation. URL: <https://avxhm.se/software/ANSYS-Products-19-0-with-Documentation.html> (дата обращения: 11.07.2023).
7. Ястребова К. Н. Имитационное моделирование процесса обтекания бортов открытой горной выработки естественным ветровым потоком // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 8. С. 60–62.
8. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. Вып. 4. С. 59–75. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75
9. Козырев С. А., Скороходов В. Ф., Никитин Р. М., Амосов П. В., Массан В. В. Оценка аэрологической обстановки на открытых горных работах на основе трехмерных моделей карьеров // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 178–182.
10. Назарчук О. В. Исследование процесса загрязнения атмосферы карьерного пространства от точечных стационарных источников в условиях температурной инверсии и шторма // Проблемы недропользования. 2021. № 4. С. 97–104. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.097
11. 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. No. 6. P. 448–455. DOI: 10.1021/acsomega.0c04881
12. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines // Applied Ecology and Environmental Research. 2021. No. 17(5). P. 10313–10333. DOI: 10.15666/aeer/1705\_1031310333
13. Raj K. V. Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures: PhD in Engineering diss. URL: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756> (дата обращения: 11.07.2023).
14. Бублик С. А., Семин М. А. Математическое моделирование тепло- и воздухораспределения в карьерах при естественном проветривании // Горное эхо. 2022. № 1(86). С. 126–133.
15. Интегрированная среда численного моделирования COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru> (дата обращения: 8.11.2020).
16. CFD module user's guide. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf> (дата обращения: 11.07.2023).
17. Амосов П. В. Доминирующий фактор в паре «взрывные работы–ветровой режим» // Известия СПбГИ(ТУ). 2020. № 54(80). С. 93–98. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-54-80-93-98

18. Амосов П. В. Численное моделирование процесса проветривания карьера при проведении массовых взрывов по пылевому фактору // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 6. С. 125–138. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-6-125-138

19. Flores F., Garreaud R., Munoz R. C. OpenFOAM applied to the CFD simulation of turbulent buoyant atmospheric flows and pollutant dispersion inside large open pit mines under intense insolation // Computers & Fluids. 2014. No. 90. P. 72–87. DOI: 10.1016/j.compfluid.2013.11.012

20. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.

21. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.

22. Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты: КФАН СССР, 1988. 200 с.

23. Шлычков В. А., Мальбахов В. М., Леженин А. А. Численное моделирование атмосферной циркуляции и переноса загрязняющих примесей в Норильской долине // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 5-6. С. 490–496.

24. Рапуга В. Ф., Шлычков В. А., Леженин А. А., Романов А. Н., Ярославцева Т. В. Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 08. С. 713–718.

25. Теодорович Э. В. Явления турбулентного переноса и метод ренормализационных групп // Журнал прикладной математики и механики. 1988. Т. 52. Вып. 2. С. 218–224.

26. Никитин В. С., Битколов Н. З. Проектирование вентиляции в карьерах. М.: Недра, 1980. 171 с.

Поступила в редакцию 14 марта 2023 года

#### Сведения об авторе:

**Амосов Павел Васильевич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: p.amosov@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-90-101

### Studying the effect of background stratification on the open-pit natural ventilation time based on the numerical modelling

**Pavel V. Amosov**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, the city of Apatity, Russia.

#### Abstract

**Research objective** is to evaluate the effect of background stratification parameter on the time of open-pit natural ventilation and level of open-pit upper wall atmospheric pollution down the wind flow.

**Methods of research.** An atmospheric aerothermodynamic model has been described. In the model, a heat transfer equation and buoyancy and background stratification mechanisms calculation are added to the dynamic equations in the approximation of an incompressible fluid. The necessary modifications in the non-dedicated COMSOL program are described. The modifications make it possible to study the various states of atmospheric aerothermodynamics. A two-dimensional CFD model of atmosphere was built and tested for an open-pit ventilated according to the recirculation scheme during large-scale blasts. Numerical experiments were carried out for open-pit natural ventilation for 1 and 2 m/s wind flow velocities on the open-pit upper wall under a changing background stratification parameter (from 0.0 to +0.05 °C/m) and a fixed initial location of the dust and gas cloud.

**Results and analysis.** Significant differences in the flow aerothermodynamic parameters are noted as well as in the spatial distribution of potential temperature deviations under different air conditions. A significant increase in the time of open-pit natural ventilation is shown with an increase in the inversion state of the atmosphere compared to its neutral state. No shift in the location of the most polluted pit area is predicted under a strong inversion. A shift of such an area towards the lee side of the open pit was noted at low values of the background stratification parameter.

**Conclusions and scope of results.** For a recirculation ventilation scheme, an increase in the inversion state of the atmosphere significantly increases the time of natural ventilation, but reduces the level of pollution carried down the open-pit upper wall.

**Keywords:** open pit; CFD model; atmosphere; convection parameters; background stratification; blasting; natural ventilation.

**The research was carried out** within the state research and development theme no. 1021051803680-5 (FMEZ-2022-0010) “Processes of natural and man-made systems transformation under changing climate in the Russian Arctic (as illustrated by the Murmansk region)”.

## REFERENCES

1. *FlowVision user manual. Version 3.09.04.* Moscow: OOO TESIS Publishing; 2015. (In Russ.)
2. Shcheliaev A. *FlowVision – modern Russian tool for mathematical modelling.* (In Russ.) Available from: <https://sapr.ru/article/21879> [Accessed 11 July 2023].
3. Bashirov N. R. Method for dynamic design of dumps in preliminary simulation of airflow. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2018; 2: 40–47. (In Russ.)
4. Gridina E. B., Andreev R. E. Mathematical modeling based on CFD method of wind currents in combined working out of the Olenegorsky pit in the Flowvision software package. *International Review on Modelling and Simulations.* 2017; 10(1): 62–69.
5. Fedorova N. N., Valger S. A., Danilov M. N., Zakharova Iu. V. *ANSYS 17 basics.* Moscow: DMK Press Publishing; 2017. (In Russ.)
6. *ANSYS products 19.0 with documentation.* Available from: <https://avxhm.se/software/ANSYS-Products-19-0-with-Documentation.html> [Accessed 11 July 2023].
7. Iastrebova K. N. Imitation modelling of the process of open pit slopes flow by natural wind current. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry.* 2014; 8: 60–62. (In Russ.)
8. Gendler S. G., Borisovskii I. A. Estimation of peculiarities of temperature inversion formation in open mining in the arctic conditions. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences.* 2021; 4: 59–75. (In Russ.) Available from: doi: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75
9. Kozyrev S. A., Skorokhodov V. F., Nikitin R. M., Amosov P. V., Massan V. V. Assessment of aerological setting in open pit based on 3D open-pit model. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific Journal of Murmansk State Technical University.* 2015; 18(2): 178–182. (In Russ.)
10. Nazarchuk O. V. Investigation of pollution process of the atmosphere of open pit space from point stationary sources under conditions of temperature inversions and still. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use.* 2021; 4: 97–104. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2021.04.097
11. 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; 6: 448–455. Available from: doi: 10.1021/acsomega.0c04881
12. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines. *Applied Ecology and Environmental Research.* 2021; 17(5): 10313–10333. Available from: doi: 10.15666/aer/1705\_1031310333
13. Raj K. V. *Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures: PhD in Engineering diss.* Available from: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756> [Accessed 11 July 2023].
14. Bublik S. A., Semin M. A. Mathematical modelling of heat and air distribution in open pits under natural ventilation. *Gornoe ekho = Mining Echo.* 2022; 1(86): 126–133. (In Russ.)
15. *Integrated environments of COMSOL numerical modelling.* Available from: <https://www.comsol.ru> (In Russ.) [Accessed 8 November 2020].
16. *CFD module user's guide.* Available from: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf> [Accessed 11 July 2023].
17. Amosov P. V. Dominant factor in the pair “blasting–wind mode”. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta = Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University).* 2020; 54(80): 93–98. (In Russ.) Available from: doi: 10.36807/1998-9849-2020-54-80-93-98
18. Amosov P. V. Numerical modeling of open pit aeration under major blasts according to the dust factor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2022; 6: 125–138. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2022-6-125-138
19. Flores F., Garreaud R., Munoz R. C. OpenFOAM applied to the CFD simulation of turbulent buoyant atmospheric flows and pollutant dispersion inside large open pit mines under intense insolation. *Computers & Fluids.* 2014; 90: 72–87. (In Russ.) Available from: doi: 10.1016/j.compfluid.2013.11.012

20. Marchuk G. I. *Mathematical modelling in the environmental problem*. Moscow: Nauka Publishing; 1982. (In Russ.)
21. Penenko V. V., Aloian A. E. *Models and methods for environmental protection problems*. Novosibirsk: Nauka Publishing; 1985. (In Russ.)
22. Baklanov A. A. *Numerical modelling in mining aerology*. Apatity: Kola branch of AS USSR Publishing; 1988. (In Russ.)
23. Shlychkov V. A., Malbakhov V. M., Lezhenin A. A. Numerical modeling of atmospheric circulation and pollution transport in the Norilsk suburb. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and Oceanic Optics*. 2005; 18(5-6): 490–496. (In Russ.)
24. Raputa V. F., Shlychkov V. A., Lezhenin A. A., Romanov A. N., Iaroslavytseva T. V. Numerical analysis of aerosol substance fallout from a high-altitude source. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and Oceanic Optics*. 2014; 27(08): 713–718. (In Russ.)
25. Teodorovich E. V. The phenomena of turbulent transport and the method of renormalization groups. *Zhurnal prikladnoi matematiki i mekhaniki = The Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1988; 52(2): 218–224. (In Russ.)
26. Nikitin V. S., Bitkolov N. Z. *Open-pit ventilation design*. Moscow: Nedra Publishing; 1980. (In Russ.)

Received 14 March 2023

#### Information about the author:

**Pavel V. Amosov** – PhD (Engineering), leading researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS. E-mail: p.amosov@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

**Для цитирования:** Амосов П. В. Исследование влияния параметра фоновой стратификации на время естественного проветривания карьера на базе численного моделирования // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 90–101. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-90-101

**For citation:** Amosov P. V. Studying the effect of background stratification on the open-pit natural ventilation time based on the numerical modelling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 90–101 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-90-101