

УДК 536.2(470.21)

С.А. Козырев, П.В. Амосов

Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров

S.A. Kozyrev, P.V. Amosov

Ways of atmosphere normalization of deep open-pits

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования процессов распределения воздушных потоков и нормализации атмосферы в карьерном пространстве нагнетательным способом проветривания с помощью вентиляционных восстающих и горизонтальных выработок. Отмечены существенные изменения в структуре скоростных потоков в пространстве карьера при использовании альтернативных способов подачи воздуха; приведены результаты расчетов эффективности выноса вредных примесей из карьерного пространства при различных скоростях подачи воздуха через выработки.

Abstract. The paper presents results on numerical modelling of processes of air currents distribution in the pit space and normalization of pit atmosphere by a pressure system of ventilation through ventilation raise workings and horizontal excavations. Significant changes have been recorded in the structure of high-velocity currents in the pit space when using alternative ways of air supply. The calculation results on removal of harmful impurities from the pit space at different velocities of air supply through excavations have been given.

Ключевые слова: нормализация атмосферы, карьер, численное моделирование

Key words: normalization of atmosphere, open-pit, numerical modelling

1. Введение

Состав атмосферы в рабочих зонах глубоких карьеров нуждается в нормализации, что обусловлено загрязнением их воздушного бассейна отработанными газами силовых установок карьерной техники (наряду с высоким уровнем запыленности). Учитывая общие тенденции развития горного дела (углубление карьеров, повышение производительности карьерного транспорта и, как следствие, увеличение мощности силовых установок), можно сделать вывод о том, что проблема проветривания глубоких карьеров становится все острее.

Неблагоприятные метеоусловия (сочетание штилей с инверсиями) негативно влияют на экологию воздушного бассейна карьера. Вынужденные простои многих действующих карьеров вследствие превышения ПДК загрязняющих веществ в составе их атмосферы достигают 25 % времени года.

В соответствии с требованиями Единых правил безопасности (ЕПБ) при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом (*Единые правила...*, 2001) во всех случаях, когда содержание вредных газов или запыленность воздуха на объекте открытых горных работ превышают установленные нормы, должны быть приняты меры по обеспечению безопасных и здоровых условий труда.

Для интенсификации естественного воздухообмена в плохо проветриваемых и застойных зонах объекта открытых горных работ применяется искусственная вентиляция с помощью вентиляционных установок или других средств в соответствии с мероприятиями, утвержденными техническим руководителем организации.

Искусственное проветривание (вентиляция) применяется с целью создания необходимых для нормального ведения работ атмосферных условий в карьере в случаях, когда естественное проветривание этого не обеспечивает. Способами искусственного проветривания карьеров являются интенсификация естественного проветривания, местная и общеобменная вентиляция карьера.

Поскольку в условиях штилей и инверсий способы интенсификации естественного воздухообмена неэффективны, применяют искусственное проветривание карьеров.

Местная вентиляция применяется при загрязнении небольших объемов внутрикарьерного пространства (экскаваторные забои, перегрузочные пункты, места взрывных работ и др.) и производится с помощью вентиляторов с трубопроводами, специальных карьерных вентиляторных установок (*Морин*, 2011; *Конорев и др.*, 2010). Общеобменная вентиляция применяется в больших зонах загрязнения в карьере или при загрязнении карьера в целом; для ее осуществления разработаны и испытаны мощные вентиляционные установки на базе авиационной техники (АИ-20-КВ, НК-12-КВ, УВУ-1), а также тепловые установки (УТ-ЛФИ-2, УКПК-1) (*Конорев и др.*, 2010). Общеобменная вентиляция карьера требует больших затрат энергии и практически не применяется при отработке глубоких карьеров. Так, по оценке А.Д. Вассермана (*Вассерман*, 1989; *Вассерман, Козырев*, 2005), искусственные свободные струи

создают циркуляционные зоны, в объеме которых происходит быстрое осреднение концентрации вредных примесей и их накопление без существенного выноса за пределы зоны, а для нормализации атмосферы в карьерах средней глубины при штилях и температурных инверсиях требуется мощность $10^5 \div 10^6$ кВт, что на 3 ÷ 4 порядка выше не только мощности карьерных вентиляторов, но и потребности карьера в электрической энергии. Поэтому проблема создания нормализованных санитарно-гигиенических условий методом искусственной вентиляции в общем случае решена быть не может.

Способ проветривания с помощью горных выработок до настоящего времени не нашел широкого использования на отечественных карьерах в связи со значительными затратами на сооружение системы. Очевидно, что этот способ не будет применяться для общекарьерной вентиляции, в особенности для карьеров больших объемов. Однако при открыто-подземной отработке месторождений полезных ископаемых он может осуществляться посредством создания вентиляционных восстающих под дном карьера или воздухоподающих штолен на бортах карьера.

В данной статье проанализированы возможности проветривания карьера рудника "Железный" Ковдорского ГОКа нагнетательным способом с использованием горных выработок. Методической основой проведенной работы служило численное моделирование аэрогазодинамических процессов в карьере.

В ходе исследования осуществлены проектные решения по отработке карьера рудника "Железный" комбинированным способом. В соответствии с проектом его дно на заключительном этапе отработки будет находиться на абсолютной отметке "-660 м" и иметь глубину по максимальной высотной отметке бортов: западного – 1042 м; северного – 922 м; восточного – 900 м; южного – 970 м. Исходя из этих проектных решений, необходимо обеспечить нормальные санитарно-гигиенические условия труда в карьере, гарантирующие безопасность и высокую производительность.

Авторами промоделированы два вида инженерных мероприятий, которые могут оказать существенное влияние на структуру скоростного поля в объеме карьера:

- 1) создание в нижней части карьера (отметка "-660 м") трех вентиляционных восстающих, по которым можно будет подавать чистый воздух для интенсификации проветривания (рис. 1);
- 2) обустройство на отметках "-620 м" и "-470 м" по две горизонтальные выработки (штольни) с указанной выше целью (рис. 2).

Поперечный размер вентиляционных восстающих и штолен составляет 5 м.

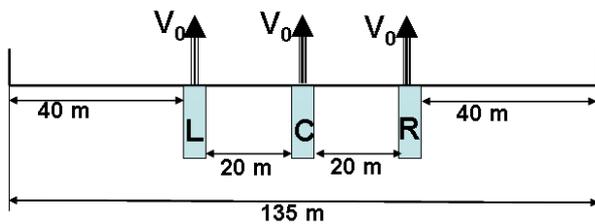


Рис. 1. Схема размещения на отметке "-660 м" вентиляционных восстающих:
L – левого; C – центрального; R – правого

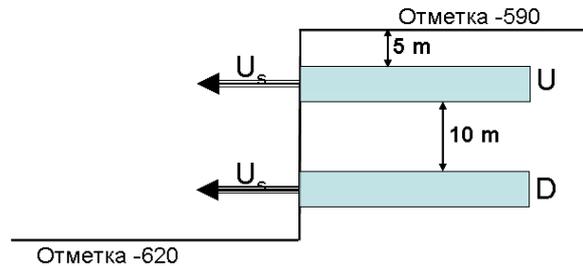


Рис. 2. Схема размещения на отметке "-620 м" штолен: U – верхней; D – нижней

2. Методология численного моделирования

Некоторые результаты численных экспериментов по разработанным в среде *COMSOL* цифровым моделям представлены ниже. Сами модели аналогичны тем, которые авторы достаточно успешно использовали в ходе оценки проветривания тупиковых выработок при взрывных работах (Козырев, Амосов, 2012а; 2013), а также анализа структуры скоростных полей карьера Центральный-Глубокий (Козырев, Амосов, 2012б). В указанных публикациях подробно изложены управляющие уравнения и последовательность выполнения расчетов.

На первом этапе в рамках модели несжимаемой жидкости (уравнения Навье – Стокса и неразрывности) для изотермического процесса рассчитывается скоростное поле во внутрикарьерном пространстве. На этом же этапе уточняется распределение коэффициентов турбулентной динамической вязкости, для которой выполняются процедуры осреднения (для нашего случая в области задания начальной конфигурации газового облака) и перехода в терминологию осредненного коэффициента турбулентной диффузии (Калабин и др., 1990; Бакланов, 1987).

На втором этапе реализуется численное решение стандартного уравнения конвективно-диффузионного переноса пассивной примеси. Отдельного пояснения требует описание коэффициента

диффузии. Поскольку физически коэффициент диффузии является функцией пространственных переменных, а в уравнении конвективно-диффузионного переноса коэффициент диффузии принят постоянным, то выполняется процедура для его определения:

$$D = [\eta_t]/(\rho\sigma_t) = (C_\mu/\sigma_\varepsilon)[k^2/(\varepsilon\sigma_t)],$$

где $[\eta_t]$ – среднее значение коэффициента турбулентной динамической вязкости в области задания начальной конфигурации газового облака (см. ниже); σ_t – турбулентное число Прандтля – Шмидта, которое в случае пространственных течений принимает значение 0,72 (Калабин и др., 1990; Бакланов, 1987); k – энергия турбулентности; ε – скорость диссипации турбулентности; $C_\mu = 0,09$ и $\sigma_\varepsilon = 1,3$ – коэффициенты стандартной (k - ε)-модели. Решателем для второй нестационарной задачи массопереноса авторы использовали метод *UMFPACK* (высокоэффективный прямой решатель).

Приблизительная величина коэффициента турбулентной динамической вязкости $[\eta_t]$ в области задания начальной конфигурации газового облака получена посредством обработки графической и числовой информации. Предварительно для этого была построена аэродинамическая модель карьера в упрощенной геометрии с соблюдением основных глобальных параметров объекта и его характеристик вблизи подошвы. На этом шаге для расчета стационарного поля скорости использована стандартная (k - ε)-модель турбулентности (Козырев, Амосов, 2012; Калабин и др., 1990; Бакланов, 1987).

Анализ числовых значений коэффициентов турбулентной динамической вязкости (в горизонтальных и вертикальном сечениях) показал, что для решения переносной задачи в качестве консервативной оценки времени проветривания (достижения уровня ПДК) можно рекомендовать значение коэффициента турбулентной диффузии на уровне 1,3 м²/с. Именно это значение и было принято в качестве основного.

В целом выполнено большое количество численных экспериментов с учетом вариации густоты расчетной сетки. Просчитаны все возможные варианты подачи свежего воздуха:

- для вентиляционных восстающих – семь вариантов (*L, C, R, LC, LR, CR, LCR*);
- штолен (на каждой отметке) – по три варианта (*U, D, UD*).

В статье приведено существенно сокращенное количество информации и рисунков.

3. Оценка структуры воздушных потоков в карьерном пространстве при различных скоростях подачи воздуха через вентиляционные восстающие на заключительном этапе отработки

Первоначально было промоделировано распределение воздушного потока в карьерном пространстве при естественном проветривании (рис. 3). По результатам моделирования выявлено, что в карьерном пространстве при естественном проветривании образуются два вихря: крупный, занимающий центральную часть карьера; мелкий, противоположного направления у дна карьера, что приводит к образованию застойных зон и невозможности выноса вредных примесей из рабочих зон карьера.

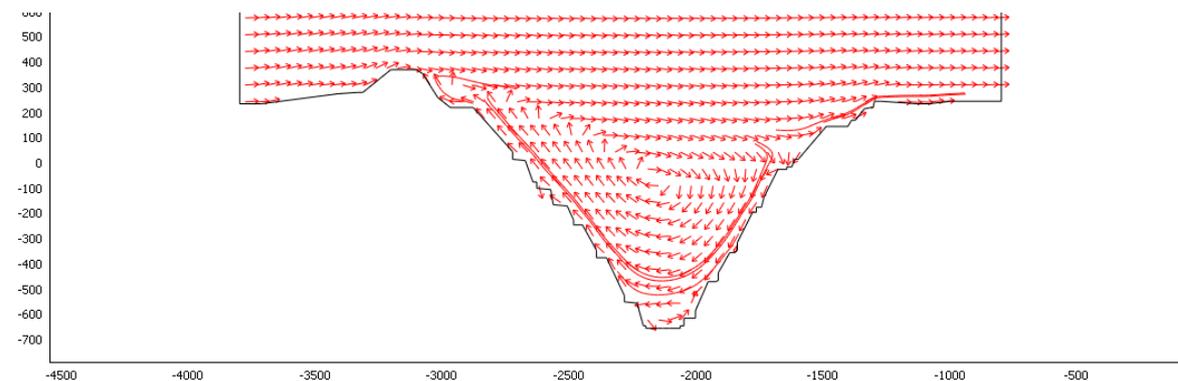


Рис. 3. Распределение воздушного потока в карьерном пространстве при естественном проветривании (базовый вариант: скорость на входе в карьер $U_0 = 3$ м/с по румбу запад-восток)

Результаты расчета структуры воздушных потоков при различных скоростях подачи воздуха через вентиляционные восстающие приведены на рис. 4, *а* (скорость 10 м/с) и *б* (скорость 25 м/с). Анализ скоростных полей (рис. 3; 4, *а* и *б*) показал, что по сравнению с базовым вариантом имеет место существенная перестройка структуры скоростных полей. Во всех случаях происходит разбивка мелкого вихря у дна карьера и увеличение объема восходящих потоков в карьерном пространстве с изменением структуры крупного вихря, что значительно улучшает вынос вредных примесей из карьера. Но при этом

в прибортовых зонах карьера остаются трудно проветриваемые участки с низкими скоростями движения воздуха (правая часть рисунка).

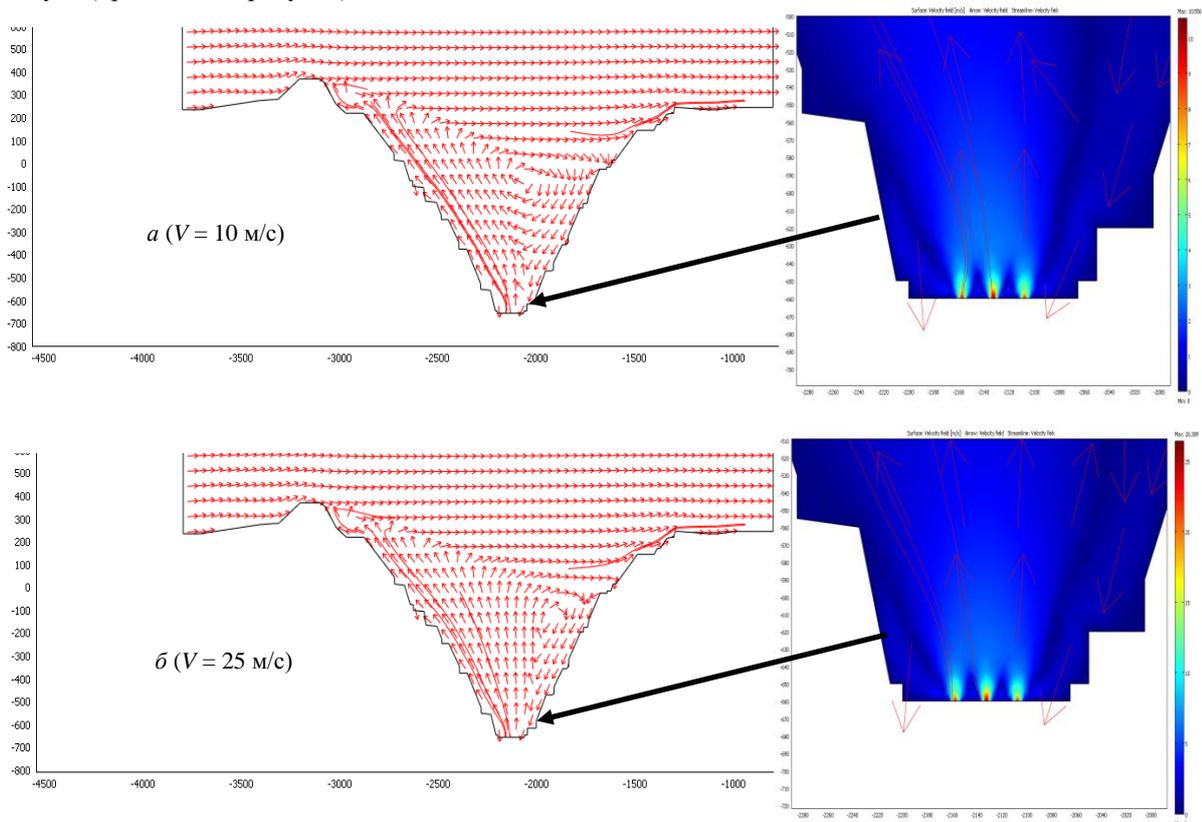


Рис. 4. Структуры скоростных полей и увеличенный фрагмент изоповерхности скорости в карьерном пространстве при вариации модуля скорости в вентиляционных восстающих: $a - 10$ м/с; $б - 25$ м/с

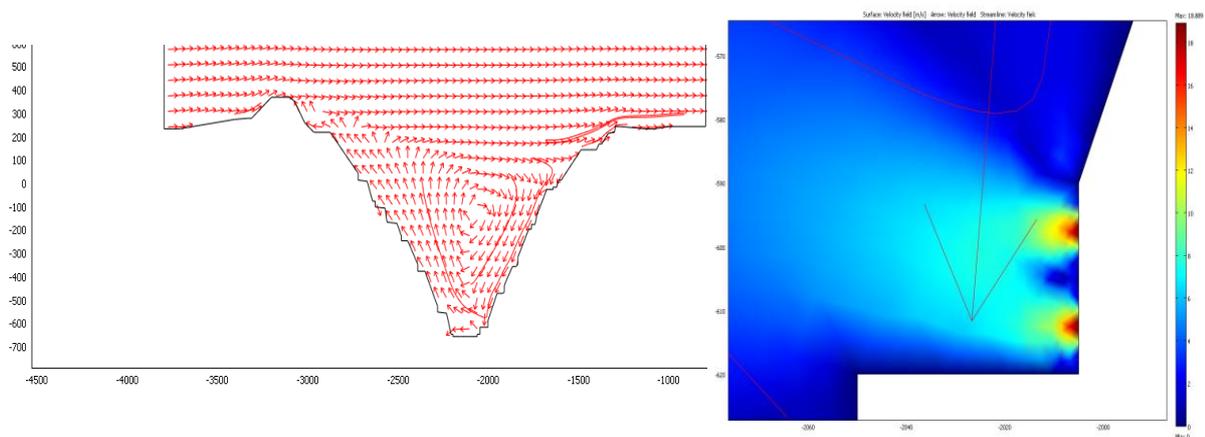


Рис. 5. Структуры скоростных полей в модели штолен на горизонте "-620 м" (вариант DU) при скорости движения воздуха 20 м/с

4. Проветривание карьера с помощью штолен, пройденных в борту карьера

На данном этапе исследования рассмотрено два варианта расположения штолен в восточном борту карьера: 1) на отметке "-470 м", где проходит нижняя граница крупного вихря; 2) на отметке "-620 м" (рис. 2), т.е. в зоне действия мелкого вихря у дна карьера. В качестве примера на рис. 5 представлены результаты расчетов скоростного поля для нижней отметки "-620 м" (вариант DU).

Анализ структуры скоростных полей в модели для штолен на горизонтах "-470 м" и "-620 м" при скорости движения воздуха 20 м/с показал ряд их различий. При расположении штолен на горизонте "-470 м" разбивка мелкого вихря у дна карьера не происходит, в то время как при их расположении у дна

карьера происходит перестройка структуры скоростных полей с разбивкой мелкого вихря, что способствует выносу вредных примесей. В результате анализа изоповерхностей скоростного поля можно сделать вывод о том, что дальнобойность струи воздуха, выходящей из штолен, где сохраняется скорость воздуха на уровне 0,5 м/с, составляет 150-180 м.

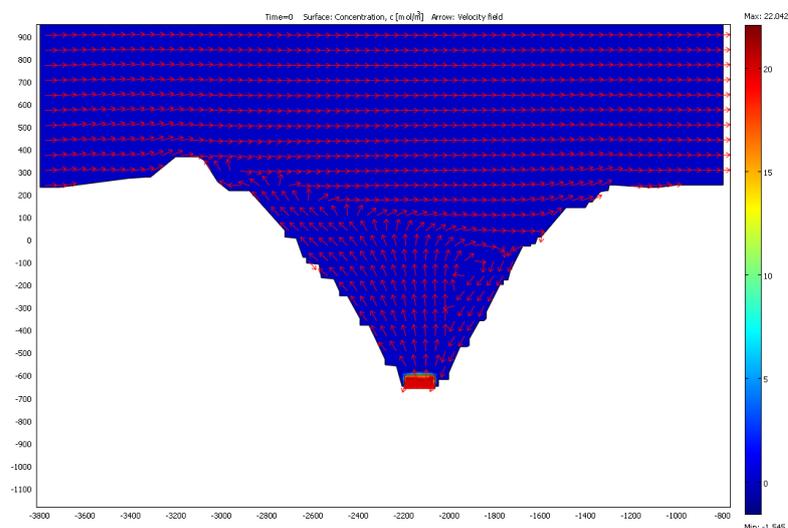


Рис. 6. Моделируемая область загрязнения карьера (выделена красным цветом), базовый вариант (время проветривания около 150 мин)

Таким образом, проветривание карьера с помощью вентиляционных восстающих и штолен позволяет изменить структуру скоростных полей и обеспечить вынос вредных примесей из карьерного пространства за более короткое время по сравнению с базовым вариантом. При этом, как показал анализ результатов расчетов, применение вентиляционных восстающих является более предпочтительным вариантом.

5. Оценка времени проветривания карьера при загрязнении его придонной части с учетом различных скоростей подачи воздуха через вентиляционные восстающие на заключительном этапе отработки

На следующем этапе исследований была проведена оценка времени проветривания карьера при загрязнении придонной части до уровня 20 ПДК по окислам азота (рис. 6) ко времени достижения ПДК (рис. 7).

Как следует из рис. 7, картина пространственного распределения загрязнения весьма неоднородна. В отдельных ситуациях на заключительном этапе моделирования максимальные концентрации прогнозируются в левой части карьера, в других – в его центре или правой половине. Время проветривания с помощью вентиляционных восстающих, несмотря на присутствие трудно проветриваемых участков в прибортовой части карьера, уменьшается в 5-7 раз по сравнению с базовым вариантом. Например, при скорости потоков в рудопусках 15, 20 и 25 м/с расчетное время достижения ПДК составило 20, 18 и 16 мин соответственно. Тенденция достаточно очевидна.

Приведенные значения времени проветривания не следует рассматривать как абсолютно строгие величины. Скорее, они отражают именно тенденцию снижения времени проветривания до допустимой концентрации при использовании описанных инженерных мероприятий.

6. Выводы

В результате численного моделирования продемонстрирована возможность проветривания карьера с помощью вентиляционных восстающих и штолен. Применение этих способов позволяет существенно изменить структуру скоростных полей и обеспечить вынос вредных примесей из карьерного пространства за более короткое время по сравнению с базовым вариантом. При этом использование вентиляционных восстающих более предпочтительно, чем штолен.

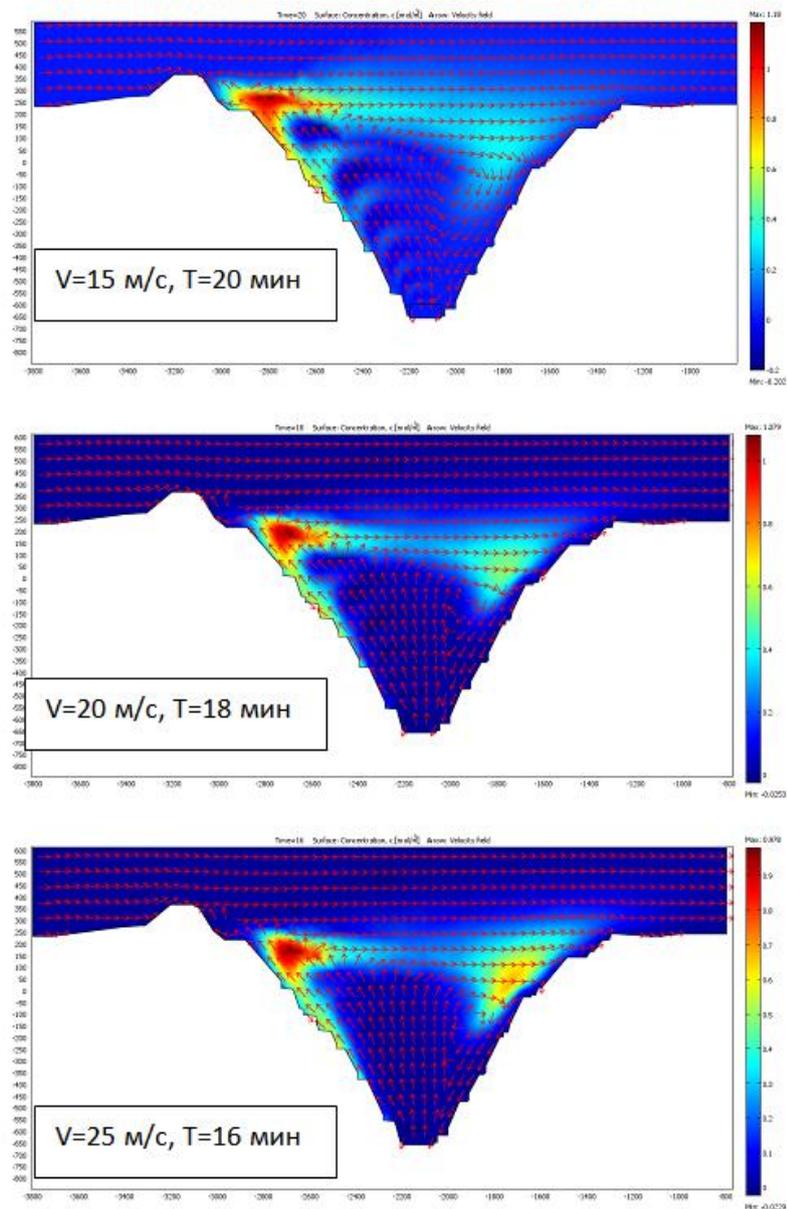


Рис. 7. Распределение примеси в объеме карьера ко времени достижения ПДК при различных скоростях воздушного потока

Литература

- Бакланов А.А.** Численное моделирование в рудничной аэрологии. *Апатиты, КФ АН СССР*, 200 с., 1987.
- Вассерман А.Д.** Эффективно ли решается проблема оздоровления атмосферы глубоких карьеров? *Горный журнал*, № 11, с. 49-51, 1989.
- Вассерман А.Д., Козырев С.А.** Научные основы создания и поддержания безопасного состояния воздушной среды при отработке месторождений полезных ископаемых. *В кн.: Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Арктическом регионе. Апатиты, КНЦ РАН*, с. 144-149, 2005.
- Единые правила безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. ПБ 03-498-02. *СПб.*, 111 с., 2001.
- Калабин Г.В., Бакланов А.А., Амосов П.В.** Метод расчета аэрогазодинамики плоских камерообразных выработок на основе математического моделирования. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 1, с. 74-88, 1990.

- Козырев С.А., Амосов П.В.** Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб. *Безопасность труда в промышленности*, № 10, с. 79-83, 2012.
- Козырев С.А., Амосов П.В.** Моделирование аэродинамических процессов в глубоких карьерах. Глубокие карьеры. *Сб. докл. Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 18-22 июня 2012 г. Апатиты; СПб.*, с. 470-474, 2012.
- Козырев С.А., Амосов П.В.** Математическое моделирование проветривания тупиковых выработок при взрывных работах с использованием CFD-моделей. *Аэрология и безопасность горных предприятий. Сб. науч. тр. М., "Горное дело" ООО "Киммерийский центр"*, вып. 1, с. 23-29, 2013.
- Коноров М.М., Нестеренко Г.Ф., Павлов А.И.** Вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров. *Екатеринбург, УрО РАН*, 440 с., 2010.
- Морин А.С.** Обоснование технологии трубопроводного проветривания глубоких карьеров. *Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск*, 46 с., 2011.

References

- Baklanov A.A.** Chislennoe modelirovanie v rudnichnoy aerologii [Numerical modelling in mine aerology]. Apatityi, KF AN SSSR, 200 p., 1987.
- Vasserman A.D.** Effektivno li reshaetsya problema ozdorovleniya atmosferyi glubokih karerov [How effectively is a question of atmosphere rehabilitation in deep open-pits solved]? *Gornyy zhurnal*, N 11, p. 49-51, 1989.
- Vasserman A.D., Kozyrev S.A.** Nauchnyie osnovy sozdaniya i podderzhaniya bezopasnogo sostoyaniya vozduшной среды pri otrabotke mestorozhdeniy poleznyih iskopaemyih [Scientific basis for formation and maintenance of safety of air environment during mineral deposits development]. V kn.: *Formirovanie osnov sovremennoy strategii prirodopolzovaniya v Evro-Arkticheskom regione*. Apatityi, KNTs RAN, p. 144-149, 2005.
- Edinyie pravila bezopasnosti pri razrabotke mestorozhdeniy poleznyih iskopaemyih otkrytym sposobom [Unified safety regulations for development of mineral deposits by open mining]. PB 03-498-02. SPb., 111 p., 2001.
- Kalabin G.V., Baklanov A.A., Amosov P.V.** Metod rascheta aerogazodinamiki ploskih kameroobraznyih vyirabotok na osnove matematicheskogo modelirovaniya [Method of calculation of aerogas dynamics of flat room excavations on the basis of mathematical modelling]. *Fiziko-tehnicheskie problemyi razrabotki poleznyih iskopaemyih*, N 1, p. 74-88, 1990.
- Kozyrev S.A., Amosov P.V.** Obosnovanie minimalnogo rasstoyaniya ot zaboya provodimoy vyirabotki do kontsa ventilyatsionnyih trub [Substantiation of minimum distance from an excavation face to the end of ventilation pipes]. *Безопасность труда в промышленности*, N 10, p. 79-83, 2012.
- Kozyrev S.A., Amosov P.V.** Modelirovanie aerodinamicheskikh protsessov v glubokih karerakh [Modelling of aerodynamic processes in deep open-pits]. *Glubokie kareryi. Sb. dokl. Vseross. nauch.-tehn. konf. s mezhdunar. uchastiem, 18-22 iyunya 2012 g. Apatityi; СПб.*, p. 470-474, 2012.
- Kozyrev S.A., Amosov P.V.** Matematicheskoe modelirovanie provetrivaniya tupikovyih vyirabotok pri vzyivnyih rabotah s ispolzovaniem CFD-modeley [Mathematical modelling of ventilation in blind excavations during blasting with CFD-models]. *Aerologiya i bezopasnost gornyih predpriyatiy. Sb. nauch. tr. M., "Gornoe delo" ООО "Киммерийский центр"*, вып. 1, p. 23-29, 2013.
- Konorev M.M., Nesterenko G.F., Pavlov A.I.** Ventilyatsiya i pylegazopodavlenie v atmosfere karerov [Ventilation and suppression of dust and gas in open-pit atmosphere]. *Екатеринбург, УрО РАН*, 440 p., 2010.
- Morin A.S.** Obosnovanie tehnologii truboprovodnogo provetrivaniya glubokih karerov [Substantiation of technology of pipeline ventilation of deep open-pits]. *Аvtoreferat dis. ... d-r tehn. nauk. Krasnoyarsk*, 46 p., 2011.

Информация об авторах

Амосов Павел Васильевич – Горный институт (ГоИ) КНЦ РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, доцент, e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru

Amosov P.V. – Mining Institute KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher, Associate Professor, e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru

Козырев Сергей Александрович – Горный институт (ГоИ) КНЦ РАН, д-р техн. наук, зав. лабораторией технологических процессов при добыче полезных ископаемых, e-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru

Kozyrev S.A. – Mining Institute KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Head of Laboratory of Technological Processes of Mining Operations, e-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru