

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.45

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В СИСТЕМАХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

М. А. Семин, А. Г. Исаевич, Н. А. Трушкова, С. А. Бублик, Б. П. Казаков

Горный институт УрО РАН,

E-mail: seminma@inbox.ru, aero_alex@mail.ru, ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия

Выполнен анализ литературы по расчету переноса вредных примесей газа или пыли в системах горных выработок. Показано, что наряду с конвективным переносом примесей при расчете важно учитывать продольную дисперсию, а молекулярной и турбулентной диффузией примесей можно пренебречь при рассмотрении прямых участков горных выработок. Однако при вихревом перемешивании воздуха в застойных зонах около сопряжений горных выработок турбулентная диффузия может оказаться сопоставима с продольной дисперсией. Предложена формула для расчета эффективного коэффициента продольной дисперсии с учетом влияния скоростей воздушного потока в соседних горных выработках. Разработан численный алгоритм расчета нестационарного распределения примесей в сети горных выработок, основанный на методе расщепления по физическим процессам.

Рудничная вентиляция, моделирование, вредные примеси, диффузия газов, коэффициент продольной дисперсии

DOI: 10.15372/FTPRPI20220208

Проектирование современных шахт и рудников, имеющих сложные вентиляционные сети, состоящие из множества горных выработок и источников тяги [1], требует применения современных вычислительных методов и средств для расчета распределения расходов воздуха, а также других важных характеристик воздушного потока — температуры, влажности, концентрации различных примесей [2].

Предмет исследования настоящей работы — расчет переноса вредных примесей (газов, пыли) в системах горных выработок. Важность определения распределений примесей обусловлена действующими на территории РФ “Правилами безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых”, в которых предполагается расчет времени эвакуации

работников при аварии на рабочих местах. В случае сложных разветвленных вентиляционных сетей корректный расчет эвакуации работников с учетом наличия пожара или других источников выделения газа требует моделирования нестационарного распределения вредных примесей (наряду с расчетом переноса теплоты). На шахтах и рудниках с “газовым режимом” необходимо разрабатывать мероприятия по разгазированию горных выработок, что также требует выполнения расчетов выноса вредных примесей из рабочих зон по системе горных выработок.

Общая методология расчета переноса вредных примесей в горных выработках сформулирована в середине XX в. преимущественно для угольных шахт [3], где проблема выделения и переноса газов более актуальна по сравнению с рудниками. Методология расчета динамики вредных примесей на калийных рудниках разработана позднее — в 90-е годы XX в. [4]. В [5] сделан подробный обзор моделей и методов расчета переноса вредных примесей в шахтах и рудниках произвольного типа, приведено классическое одномерное уравнение переноса объемной концентрации вредной примеси C в горных выработках:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_{\text{cp}} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + q, \quad (1)$$

где V_{cp} — средняя по сечению горной выработки скорость воздуха, м/с; D — эффективный коэффициент продольной дисперсии (диффузии), м²/с; q — источник вредной примеси, 1/с; t — время, с; x — координата вдоль оси горной выработки, м.

В [5] указывается, что коэффициент продольной дисперсии D включает в себя как “размывание” примеси за счет неоднородного по сечению профиля скорости потока (дисперсия), так и продольную турбулентную диффузию из-за турбулентных пульсаций скорости потока в каждой его точке. Молекулярная диффузия пылегазовоздушной смеси, как правило, считается пренебрежимо малой при рассмотрении турбулентных течений воздуха в горных выработках. Она соотносится с турбулентной диффузией так же, как молекулярная вязкость с турбулентной, т. е. ниже последней на один-три порядка [5, 6].

Согласно [5], явление “размывания” примеси за счет неоднородного по сечению скоростного поля — ключевой фактор диффузионного типа при одномерном моделировании течения жидких и газообразных сред. В [5] не приводится явного метода определения коэффициента продольной дисперсии D , но упоминается, что он является функцией коэффициента аэродинамического сопротивления и числа Рейнольдса; при этом делается ссылка на [7] с эмпирической зависимостью для него применительно к горным выработкам. В [7] авторы ссылаются на более раннюю основополагающую работу Тейлора [8], в которой получено выражение для коэффициента продольной дисперсии в круглой трубе:

$$K_{\text{disp}} = 10.06RV^*, \quad (2)$$

а также для коэффициента турбулентной диффузии:

$$K_{\text{diff}} = 0.05RV^*. \quad (3)$$

Здесь R — радиус трубы или горной выработки, м; V^* — динамическая скорость или скорость трения [9], м/с. Из (2) и (3) ясно, что дисперсия вредных примесей в турбулентном течении воздуха на три порядка выше, чем турбулентная диффузия в воздушном потоке. Это согласуется с [5] и указывает на то, что при моделировании переноса примесей на прямых участках горных выработок важно учитывать именно дисперсию из-за неравномерности поля скоростей, а турбулентной и молекулярной диффузией можно пренебречь.

В [10, 11] коэффициент продольной дисперсии использовался в основном для анализа применимости метода трассировки газов при вентиляции шахт. Исследователями рассматривались отдельные горные выработки. При этом вопрос выбора коэффициента продольной дисперсии нигде подробно не обсуждался применительно к сетевым расчетам распределения вредных примесей в вентиляционных сетях шахт и рудников. Не затрагивался и вопрос о влиянии скоростей воздушного потока в смежных горных выработках на эффективный коэффициент дисперсии (диффузии) в рассматриваемой выработке. Как правило, исследователи ограничивались общими фразами о газодинамическом расчете [12] или же без пояснения приводили формулы, схожие с формулой (2), в виде [13–15]:

$$d = 65.47R\sqrt{\alpha}V_{cp} \quad (4)$$

или в виде [11, 16]:

$$D = 10.1\sqrt{\frac{f}{8}}V_{cp}R, \quad (5)$$

где α , f — коэффициент аэродинамического сопротивления и коэффициент трения, фигурирующие в законе Дарси–Вейсбаха [17].

С учетом известной связи между α и f :

$$f = \frac{8\alpha}{\rho}, \quad (6)$$

формулы (4) и (5) не соответствуют друг другу. Такое разночтение формулы (2), по-видимому, связано с тем, что числовой коэффициент в (4) получен эмпирически, в (5) — из теоретических соображений. Формула (5) более понятна в том смысле, что в ней соблюдаются размерности левой и правой частей.

Если расчеты конвективно-диффузионного переноса вредных примесей описаны в литературе применительно к одной или нескольким горным выработкам заданной топологии, то расчет чисто конвективного переноса описан в достаточно полной сетевой постановке в [18] и реализован в аналитическом комплексе “АэроСеть” [19]. Подобный подход правомерен при соблюдении двух условий:

- 1) скорость движения воздуха значительно больше, чем “скорость” турбулентной дисперсии примеси;
- 2) длина горных выработок значительно больше их поперечного размера.

Преимущество данного подхода — его простота и возможность оперативного расчета даже для вентиляционных сетей, состоящих из нескольких тысяч ветвей. Тем не менее подход имеет слабую сторону, связанную с нефизичным поведением вредных примесей в горных выработках с низкой скоростью воздуха, которые присутствуют в детализированных моделях вентиляционных сетей рудников. Например, в сбойках с перемычками из-за низкой скорости воздуха вредные примеси могут задерживаться на достаточно длительное время более нескольких часов, в то время как в смежных с ними выработках все вредные примеси удаляются сравнительно быстро.

Некоторые аспекты сетевого расчета распределения вредных примесей затрагивались также в [5], где представлена формула расчета концентрации примеси при смешивании потоков в сопряжениях горных выработок произвольного типа. Однако из предложенной формулы не ясно, о массовых или объемных расходах воздуха идет речь.

В целом на основании проведенного анализа литературы можно сделать вывод о том, что несмотря на проработанную общую методологию моделирования распространения вредных примесей (как пассивных, так и активных), остаются нерешенными некоторые частные вопросы, связанные с программной реализацией моделей конвективно-диффузионного переноса вредных примесей в вентиляционных сетях произвольной топологии. Например, выбор расчетной формулы для эффективного коэффициента продольной дисперсии (диффузии) с учетом влияния скоростей потока в соседних горных выработках, анализ особенностей перемешивания вредных примесей на сопряжениях горных выработок, возможность оперативного расчета переноса вредных примесей с учетом как конвективных, так и диффузионных процессов. Именно этим вопросам посвящена настоящая работа, которая была мотивирована во многом потребностью модифицировать существующий алгоритм расчета конвективного переноса вредных примесей в аналитическом комплексе “АэроСеть”.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматривается перенос вредных примесей произвольного типа (газ или пыль). Расчет распределения вредных примесей неразрывно связан с расчетом распределения воздушных потоков в вентиляционных сетях шахт и рудников. Для решения уравнения типа (1) необходимо знать среднюю скорость воздушного потока в каждой выработке. Для этого в рудничной вентиляции решается система уравнений, образованная 1-м и 2-м правилами Кирхгоффа [20]:

$$\sum_{i \in A_j} Q_i U_{ij} = 0, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in C_k} (R_i Q_i |Q_i| - H_i) Y_{ik} = 0, \quad (8)$$

где Q_i — расход воздуха в ветви i , м³/с; R_i — аэродинамическое сопротивление ветви i , Н·с²/м⁸; H_i — источник тяги (вентилятор) в ветви i , Па; U_{ij} — индикатор, равный 1, если ветвь i начинается в узле j , и -1 , если ветвь i оканчивается в узле j ; Y_{ik} — индикатор, равный 1, если ветвь i сонаправлена с направлением обхода контура k , и -1 , если ветвь i направлена в противоположную сторону; A_j — множество ветвей, инцидентных узлу j ; C_k — множество ветвей, входящих в контур k .

После решения системы уравнений (7), (8) одним из известных численных методов (в случае аналитического комплекса “АэроСеть” решение ищется методом контурных расходов [21]) поле средних скоростей воздушных потоков в сети горных выработках становится задано и возможен переход ко второму этапу — решению задачи о распределении вредных примесей. Предполагается, что распределение примесей не влияет на распределение воздушных потоков. Это применимо в большинстве практических случаев, за исключением некоторых частных ситуаций, когда концентрация газа достаточно велика и начинает действовать эффект “газовой” депрессии [22].

В рамках настоящего исследования для численного решения задачи о распределении вредных примесей уравнение (1) дискретизируется с помощью явной по времени конечно-разностной схемы (первый порядок точности по времени и второй порядок точности по пространству). Здесь и ниже индекс j будет нумеровать не узлы вентиляционного графа, а узлы конечно-разностной сетки каждой ветви; индекс k — не независимые контуры графа, а временные слои. Задается фиксированный шаг по времени Δt . Для каждой горной выработки

определяется конечно-разностная сетка, характеризующаяся однородным шагом по пространству ΔL_i . Он рассчитывается исходя из заданного шага по времени Δt и средней скорости воздушного потока V_i :

$$\Delta L_i = V_i \Delta t. \tag{9}$$

Индекс “ср” здесь и далее для удобства опущен. Выбор пространственного шага в форме (9) позволяет существенно упростить конечно-разностную запись уравнения конвективного переноса. По этой причине именно в таком виде шаг по времени выбирался в [18].

Общее количество узлов n_i в ветви определяется как отношение длины ветви L_i к пространственному шагу (9) с округлением вверх до ближайшего целого. Если скорость достаточно велика, а длина ветви мала, то возможна ситуация $n_i = 1$. В другом случае при очень малой скорости V_i количество узлов может стать чрезмерно большим. Это приведет к неэффективному использованию вычислительных мощностей компьютера. Целесообразно ограничить максимальное количество узлов сетки n_i некоторой величиной n_{\max} , выбираемой исходя из требуемых скорости и точности расчета, и не проводить расчет конвективного переноса примесей в ветвях, где $n_i > n_{\max}$.

В рассматриваемом случае необходимо учитывать не только конвективный перенос массы, но и диффузионный. Для увязывания конвективного и диффузионного процессов используется метод расщепления по физическим процессам [23]. В этом случае на каждой временной итерации k алгоритм распределения вредных примесей выполняет на внутренних узлах каждой ветви i два последовательных шага.

Шаг 1. Расчет конвективного переноса газовых примесей с учетом источников выделения газа в соответствии со схемой [18] на узлах $j = 2, \dots, n_i$:

$$C_{i,j}^* = C_{i,j-1}^k + \frac{W_{i,j}^k}{Q_i}, \tag{10}$$

где $C_{i,j}^*$ — промежуточное (по временному слою) узловое значение концентрации вредных примесей в узле j , $\text{м}^3/\text{м}^3$; $C_{i,j-1}^k$ — концентрация вредных примесей в узле $(j - 1)$ на предыдущем временном шаге k , $\text{м}^3/\text{м}^3$; $W_{i,j}^k$ — объемный расход выделения/поглощения вредной примеси, $\text{м}^3/\text{с}$. Также на этом шаге рассчитываются промежуточные значения на входных узлах ветвей:

для внутреннего узла

$$C_{i,1}^* = \sum_{e=1, e \neq i}^n C_{em}(t) Q_e / \sum_{e=1, e \neq i}^n Q_e, \tag{11}$$

для атмосферного

$$C_{i,1}^* = 0. \tag{12}$$

Здесь e — номер инцидентной узлу ветви, из которой воздушный поток поступает в первый узел ветви i ; n — общее количество ветвей, из которых воздушный поток поступает в первый узел; t — номер последнего узла в конечно-разностной сетке ветви e . Если узел — единственный узел конечно-разностной сетки ветви i , то к (11) и (12) добавляется слагаемое $W_{i,j}^k / Q$.

На практике при моделировании слагаемое $W_{i,j}^k / Q_i$ может быть принято равным некоторому приращению концентрации вредной примеси $\Delta C_{i,j-1}^k$ после прохождения источника выделения вредности, если таковое известно. Или же, если рассматривается задача об оседании/сорбции вредной примеси (например, оседание соляного аэрозоля на стенках выработки [20]), слагаемое $W_{i,j}^k / Q_i$ будет равно $-\lambda \Delta t \Delta C_{i,j-1}^k$ (λ — скорость оседания/сорбции вредной примеси, 1/с).

Шаг 2. Расчет диффузионного переноса газовых примесей на внутренних узлах $j = 2, \dots, n_i - 1$:

$$C_{i,j}^{k+1} = C_{i,j}^* + s_i (C_{i,j+1}^* - 2C_{i,j}^* + C_{i,j-1}^*), \quad (13)$$

$$s_i = \max\left(\frac{1}{2}; D_i \frac{\Delta t}{\Delta L_i^2}\right), \quad (14)$$

где D_i — эффективный коэффициент продольной дисперсии (диффузии), $\text{м}^2/\text{с}$. Для его расчета используется выражение (5) с учетом соотношения (6), а также с учетом понятия эквивалентного диаметра горной выработки

$$D = 20.2 \sqrt{\frac{\alpha}{\rho}} V_{\text{cp}} \frac{S}{P}, \quad (15)$$

P — периметр поперечного сечения горной выработки, м; S — площадь поперечного сечения, м^2 .

На рис. 1 показаны изолинии эффективного коэффициента продольной дисперсии в фазовой плоскости скоростей воздушного потока и эффективных диаметров горной выработки $d_{\text{eff}} = 4S / P$. Принято, что плотность ρ равна $1.2 \text{ кг}/\text{м}^3$, коэффициент α — $0.004 \text{ кг}/\text{м}^3$ (комбайновая проходка).

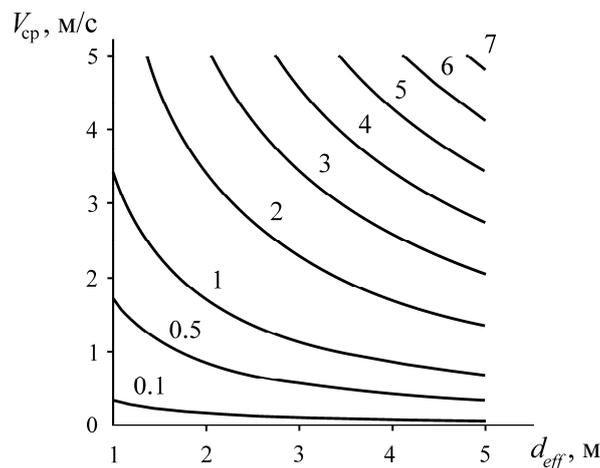


Рис. 1. Изолинии эффективного коэффициента продольной дисперсии ($\text{м}^2/\text{с}$) в фазовой плоскости скорости V_{cp} и эффективного диаметра d_{eff}

Дополнительные граничные условия для шага 2 имеют вид:

$$C_{i,1}^{k+1} = C_{i,1}^*, \quad C_{i,n_i}^{k+1} = C_{i,n_i}^* (1 - s_i) + s_i C_{i,n_i-1}^*. \quad (16)$$

В результате итерационного расчета шагов 1 и 2 находится распределение вредных примесей во всей вентиляционной сети рудника на всем исследуемом интервале времени.

Сделаем несколько важных замечаний касательно шага 2. Из (14) следует, что коэффициент продольной дисперсии для каждой ветви i должен быть не более величины D_i^{\max} , исходя из условия сходимости явной по времени конечно-разностной схемы диффузионного типа [24, 25]:

$$D_i \leq D_i^{\max} = \frac{1}{2} \frac{\Delta L_i^2}{\Delta t}. \quad (17)$$

В противном случае диффузионный перенос массы в численной схеме будет искусственно ограничиваться в соответствии с условием $s_i \leq 1/2$. Для преодоления этого ограничения шаг 2 может иметь несколько подытераций, количество которых будет определяться целочисленной величиной:

$$r_i = \left[2D_i \frac{\Delta t}{\Delta L_i^2} \right] = \left[\frac{2D_i \Delta t}{v_i^2} \right]. \quad (18)$$

Операция $[x]$ представляет собой округление величины x вверх до ближайшего целого. На каждой такой подытерации в (13) и (16) вместо s_i будет фигурировать s_i / r_i . Если количество подытераций r_i слишком велико (≥ 10), то в рассматриваемой ветви процесс диффузии выражен намного сильнее процесса конвекции. Это встречается в горных выработках с низкой скоростью воздушного потока V_i . В этой ситуации конвекцией можно пренебречь, а величину ΔL_i рассчитывать из условия Куранта по диффузии (17):

$$\Delta L_i = \sqrt{2D_i \Delta t}. \quad (19)$$

С учетом (5) и (6) коэффициент продольной дисперсии будет выше своего максимально допустимого значения, если выполнено условие

$$V_{\text{ср}} < 36.8 \frac{s\sqrt{\alpha}}{P\Delta t}. \quad (20)$$

В (20) принято, что плотность воздуха 1.2 кг/м^3 , т. е. шаг по времени всегда можно выбрать достаточно малым для того, чтобы условие (17) выполнялось.

Еще одним важным моментом является то, что коэффициент продольной дисперсии должен определяться не только скоростью воздушного потока в рассматриваемой ветви i , но и скоростью потока в соседних с ней ветвях. Физически это связано, например, с наличием застойных вихревых зон в местах сопряжения горных выработок [26]. Если к сквозной выработке с относительно высокой скоростью воздушного потока примыкает другая выработка с относительно малой скоростью потока, то на некоторой области последней будет происходить вихревое движение воздушных потоков, приводящее к дополнительному турбулентному перемешиванию вредных примесей. Только с учетом этого фактора в рамках описываемого метода возможно смоделировать изменение распределения газовой примеси в тупиковых горных выработках, имеющих в рамках одномерного подхода к описанию процессов вентиляции рудника нулевой расход воздуха.

Для реализации такого подхода можно принять и использовать в (14) пересчитанный коэффициент продольной дисперсии:

$$D_{i,j}^* = D_i + \Delta D_i^{in} \exp(-ad_{in}) + \Delta D_i^{out} \exp(-ad_{out}), \quad (21)$$

$$\Delta D_i^{in} = (D_{adj}^{in} - D_i)^+, \quad \Delta D_i^{out} = (D_{adj}^{out} - D_i)^+, \quad (22)$$

$$d_{in} = x_j, \quad d_{out} = L_i - x_j. \quad (23)$$

Здесь ΔD_i^{in} — разница между продольной дисперсией D_i в рассматриваемой ветви и дисперсией D_{adj}^{in} в смежной с ней (по начальному узлу), $\text{м}^2/\text{с}$; ΔD_i^{out} — разница между продольной дисперсией D_i в рассматриваемой ветви и дисперсией D_{adj}^{out} в смежной с ней (по конечному узлу), $\text{м}^2/\text{с}$; a — модельный параметр, м^{-1} ; d_{in} — расстояние от рассматриваемого узла до начала ветви, м ; d_{out} — расстояние от рассматриваемого узла до конца ветви, м ; $x^+ = \max(0; x)$ — обобщенная функция.

В случае использования коррекции дисперсии (21)–(23) надо учитывать, что условие (17) теперь должно применяться для максимального значения переменного по длине коэффициента продольной дисперсии. Поскольку дисперсия (15) пропорциональна скорости воздушного потока, подход (21)–(23) физически можно трактовать как корректировку коэффициента продольной дисперсии по фактору влияния более высоких скоростей воздушного потока в соседних ветвях на массообменные процессы в рассматриваемой ветви. В данном случае процесс вихревого перемешивания воздуха в застойной зоне ветви с более низкой скоростью физически больше представляет собой турбулентную диффузию, а не дисперсию. Тем не менее в рамках данного подхода будем называть величину $D_{i,j}^*$ эффективным коэффициентом продольной дисперсии.

Эмпирический параметр a определяется экспериментально или в ходе численного трехмерного моделирования для конкретных видов сопряжений горных выработок. Качественную оценку для данного параметра можно сделать, например, на основании [21], где предложена формула для уменьшения интенсивности воздухообмена в призабойной части тупиковой горной выработки по мере удаления от конца вентиляционного трубопровода: $a = 0.47 / h$ (h — ширина выработки).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Конечно-разностная схема была предварительно реализована и исследована в пакете компьютерной алгебры Wolfram Mathematica 10. В настоящей статье рассмотрена задача о проветривании участка вентиляционной сети, состоящего из воздухоподающего и вентиляционного штреков, а также вентиляционной сбойкой с перемычкой и относительно низким расходом воздуха. Длины ветвей и расходы в них указаны на рис. 2. Эффективные диаметры всех ветвей приняты равными 3.9 м, плотности воздуха $1.2 \text{ кг}/\text{м}^3$, а коэффициенты аэродинамического сопротивления $0.0044 \text{ кг}/\text{м}^3$. Сопротивление перемычки подобрано таким образом, чтобы обеспечить требуемое соотношение расходов в параллельных ветвях 2 и 3.

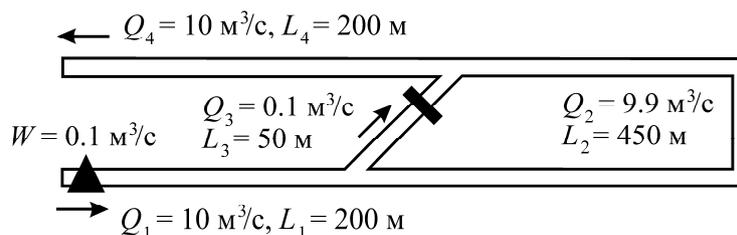


Рис. 2. Геометрия участка вентиляционной сети и параметры задачи

В начальный момент времени в начале ветви 1 начинает действовать источник выделения вредной примеси (обозначен треугольником), после чего спустя промежуток времени $t = 10$ мин выделение прекращается. Далее проводится наблюдение за временной динамикой выноса вредной примеси из исследуемой системы горных выработок.

Рассмотрено три варианта:

- модель “идеального вытеснения” без учета диффузии [18];
- постоянный по длине ветви эффективный коэффициент продольной дисперсии (15);
- переменный по длине ветви эффективный коэффициент продольной дисперсии в соответствии с подходом (21)–(23).

С учетом принятых физических параметров задачи эффективные коэффициенты продольной дисперсии для ветвей 1–4 равны 1, 0.99, 0.01 и $1 \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно. Эти значения использовались при расчетах по второму варианту. На рис. 3 приведена зависимость переменного коэффициента продольной дисперсии в ветви 2, рассчитанного по формулам (21)–(23) с учетом принятых параметров задачи ($h = 3.45 \text{ м}$). Данная зависимость использовалась для расчетов по третьему варианту. Шаг по времени равен 80 с, а количество шагов по пространству для ветви 2 равно 75.

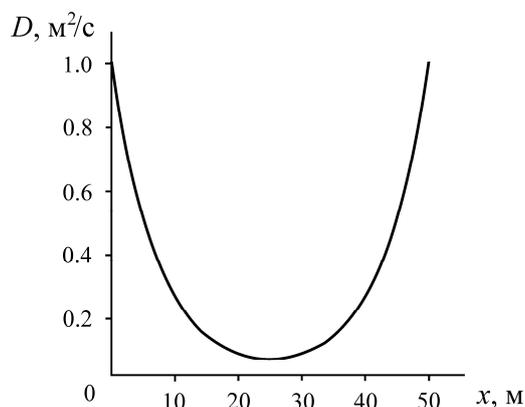


Рис. 3. Переменный коэффициент продольной дисперсии в ветви 2 как функция продольной координаты x

На рис. 4 показаны результаты численного моделирования — распределение концентрации вредных примесей в ветви 2 в различные моменты времени после начала выделения вредной примеси. По оси y отмечена безразмерная концентрация $C' = CQ / W$. Общее время расчета 2 ч. Представлены три момента времени — 30 мин, 1 ч и 1 ч 52 мин после начала действия источника вредности. Последний момент времени выбран чуть меньшим, чем время проветривания сбойки в рамках модели “идеального вытеснения”.

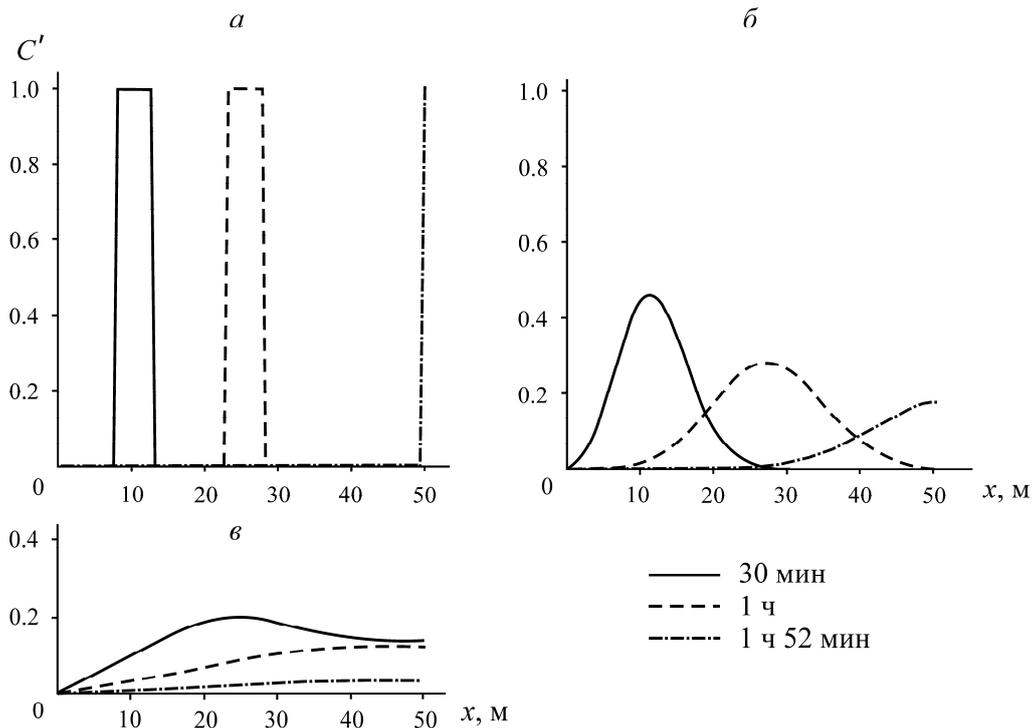


Рис. 4. Распределения безразмерной концентрации вредных примесей в ветви 2 в различные моменты времени: *a* — модель “идеального вытеснения”; *б* — постоянный коэффициент продольной дисперсии; *в* — переменный коэффициент продольной дисперсии

Согласно рис. 4, введение диффузионного слагаемого с постоянным коэффициентом продольной дисперсии (своим для каждой ветви) дает существенное изменение продольных профилей безразмерной концентрации, а также уменьшение максимальной концентрации вредной примеси в ветви 2 к конечному моменту времени (1 ч 52 мин) в 5 раз. Введение неравномерного коэффициента продольной дисперсии в соответствии с моделью (21)–(23) способствует еще большему уменьшению максимальной концентрации вредной примеси в ветви 2 к конечному моменту времени — в 6 раз по сравнению с вариантом постоянной продольной дисперсии. В целом полученные результаты свидетельствуют о чувствительности решения к способу задания коэффициента продольной диффузии. По данной причине важным является физически обоснованное задание распределения коэффициента продольной дисперсии на сопряжениях горных выработок. Это указывает на необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на определение параметров, входящих в формулу (15) и модель (21)–(23), по данным экспериментальных измерений в условиях реальных горных выработках рудников или лабораторных стендов.

Важно отметить, что с точки зрения численной процедуры введение неравномерного коэффициента продольной дисперсии оказывается неблагоприятным, так как может приводить к существенному увеличению общего расчетного времени. Рост времени связан со значительным увеличением количества подытераций r . Если для случая постоянной продольной дисперсии в рассматриваемом случае для ветви 2 $r = 4$, то для переменной продольной дисперсии r в отдельных узлах достигает 352. Приемлемое решение данной проблемы для рудничных вентиляционных сетей с большим количеством ветвей с относительно низким расхо-

дом воздуха заключается в расчете шага по пространству исходя из условия Куранта по диффузии (19). С учетом этого решения для рассмотренного случая количество пространственных шагов ветви 2 снижается с 75 до 12, а величина r становится равной 1.

ВЫВОДЫ

Установлено, что на прямых участках горных выработок продольная дисперсия из-за неоднородности поля скоростей является доминирующим фактором продольной диффузии, а молекулярной и турбулентной диффузией можно пренебречь. При вихревом перемешивании воздуха в застойных зонах около сопряжений горных выработок турбулентная диффузия может быть сопоставима с продольной дисперсией.

Предложен простой метод расчета переменного по длине эффективного коэффициента продольной дисперсии исходя из соотношения скоростей воздушных потоков в рассматриваемой горной выработке и в соседних с ней.

Разработан численный алгоритм расчета нестационарной задачи распределения вредных примесей в сети горных выработок, основанный на методе расщепления по физическим процессам. Алгоритм реализован в модуле теплогазодинамического расчета аналитического комплекса “АэроСеть”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев С. В., Казаков Б. П., Семин М. А. Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции // Изв. ТГУ. Науки о земле. — 2019. — № 4. — С. 283–291.
2. Кобылкин С. С., Кобылкин А. С. Трехмерное моделирование при проведении инженерных расчетов по тактике горноспасательных работ // Горн. журн. — 2018. — № 5. — С. 82–85.
3. Кобылкин С. С. Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт: дис. ... д-ра техн. наук. — М.: НИТУ “МИСиС”, 2018. — 322 с.
4. Красноштейн А. Е., Файнбург Г. З. Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников. — Свердловск: УрО РАН, 1992 — 242 с.
5. Венгеров И. Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. 1. Анализ парадигмы. — Донецк: Норд-пресс, 2008. — 632 с.
6. Vardy A. E. and Brown J. M. B. Transient turbulent friction in smooth pipe flows, *J. Sound Vibration*, 2003, Vol. 259, No. 5. — P. 1011–1036.
7. Laigna K. Y. and Potter É. A. Methods for determining the coefficients of turbulent diffusion in mine ventilation streams, *Sov. Min.*, 1983, Vol. 19, No. 3. — P. 230–235.
8. Taylor G. I. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe, *Proc. of the Royal Society of London, Series A, Mathem. Phys. Sci.*, 1954, Vol. 223, No. 1155. — P. 446–468.
9. Гарбарук А. В., Лапин Ю. В., Стрелец М. Х. Простая алгебраическая модель турбулентности для расчета турбулентного пограничного слоя с положительным градиентом давления // Теплофизика высоких температур. — 1999. — Т. 37. — № 1. — С. 87–91.
10. Arpa G., Sasaki K., and Sugai Y. Narrow vein shrinkage stope ventilation measurement using tracer gas and numerical simulation, 12th US/North American Mine Ventilation Symp., Reno, 2008. — P. 261–266.
11. Widiatmojo A., Sasaki K., Widodo N. P., Sugai Y., Sinaga J., and Yusuf H. Numerical simulation to evaluate gas diffusion of turbulent flow in mine ventilation system, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2013, Vol. 23, No. 3. — P. 349–355.

12. **Wallace K., Prosser B., and Stinnette J. D.** The practice of mine ventilation engineering, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2015, Vol. 25, No. 2. — P. 165–169.
13. **Kai W., Aitao Z., and Shan L.** Computer simulation of dynamic influence of outburst gas flow on mine ventilation network, *Disaster Advances*, 2013, Vol. 19. — P. 31–38.
14. **Dziurzyński W. and Krawczyk J.** Unsteady flow of gases in a mine ventilation network—a numerical simulation, *Archives Min. Sci.*, 2001, Vol. 46, No. 2. — P. 119–137.
15. **Zhou A. and Wang K.** A transient model for airflow stabilization induced by gas accumulations in a mine ventilation network, *J. Loss Prevention Process Industries*, 2017, Vol. 47. — P. 104–109.
16. **Hart J., Guymier I., Jones A., and Stovin V.** Longitudinal dispersion coefficients within turbulent and transitional pipe flow, *Experimental and Computational Solutions of Hydraulic Problems*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. — P. 133–145.
17. **Zhou A. and Wang K.** Role of gas ventilation pressure on the stability of airway airflow in underground ventilation, *J. Min. Sci.*, 2018, Vol. 54, No. 1. — P. 111–119.
18. **Красноштейн А. Е., Казаков Б. П., Шалимов А. В.** Моделирование нестационарных процессов распространения газовых примесей по выработкам в условиях рециркуляционного проветривания // ФТПРПИ. — 2006. — № 1. — С. 95–101.
19. **Св-во о гос. регистрации № 2015610589.** Аналитический комплекс “АэроСеть”: программа для ЭВМ / А. В. Зайцев, Б. П. Казаков, А. В. Кашников, Д. С. Кормщииков, Ю. В. Крутлов, Л. Ю. Левин, П. С. Мальков, А. В. Шалимов. Заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН № 2014613790; заявл. 24.04.2014 г.; зарегистрировано 14.01.2015 г. // Оpubл. в БИ. — 2015.
20. **Семин М. А., Исаевич А. Г., Жихарев С. Я.** Исследование оседания пыли калийной соли в горной выработке // ФТПРПИ. — 2021. — № 2. — С. 178–191.
21. **Шалимов А. В.** Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дис. ... д-ра техн. наук. — Пермь, 2012. — 329 с.
22. **Zhou A., Wang K., Wu L., and Xiao Y.** Influence of gas ventilation pressure on the stability of airways airflow, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2018, Vol. 28, No. 2. — P. 297–301.
23. **Воеводин А. Ф., Гончарова О. Н.** Метод расщепления по физическим процессам для расчета задач конвекции // *Мат. моделирование*. — 2001. — Т. 13. — № 5. — С. 90–96.
24. **Witek M. L., Teixeira J., and Flatau P. J.** On stable and explicit numerical methods for the advection-diffusion equation, *Mathem. Comp. Simulation*, 2008, Vol. 79, No. 3. — P. 561–570.
25. **Самарский А. А., Гулин А. В.** Устойчивость разностных схем. — М.: УРСС, 2005. — 383 с.
26. **Левин Л. Ю., Семин М. А.** Оценка влияния местных сопротивлений на воздухораспределение в шахтах и рудниках // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 120–130.

*Поступила в редакцию 11/XI 2021
После доработки 25/XII 2021
Принята к публикации 14/III 2022*