

Математическое моделирование комбинированной схемы проветривания сети выработок угольной шахты

Mathematical modeling of combined schemes of airing network workings of a coal mine

Васенин И.М.¹, Шрагер Э.Р.¹, Крайнов А.Ю.¹, Палеев Д.Ю.²,
Лукашов О.Ю.², Костеренко В.Н.³

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия (E-mail: sher@ftf.tsu.ru);

²Институт угля СО РАН, Кемерово, Россия (E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru);

³Сибирская угольная энергетическая компания, Москва, Россия

Шахта куыстарын желдетудің математикалық моделі жасалған. Модельдеу газ динамикасына негізделген. Тендеу сандық әдіспен шешілген. Шахта куыстарында метанның тасымалдану заңдылығы, сондай-ақ желдетудің әр түрлі күйлері қарастырылған.

The mathematical model of non-stationary ventilation of mine is developed. The model is based on the equations of gas dynamics. The results of numerical solution of the problem of ventilation of mines are presents. The dynamics methane transfer in the workings of the mine is received. The modeling of different modes of ventilation was performed.

Угольные шахты относятся к предприятиям с повышенной опасностью труда. Это обусловлено в первую очередь выделением метана, адсорбированного в угле, при его добыче. Удаление взрывоопасного газа из зоны забоя и прилегающих выработок проводится путем организации достаточной вентиляции выработок. Вентиляция также необходима для обеспечения нормальных санитарно-гигиенических условий труда горняков. При организации проветривания используются различные схемы: прямоточная схема проветривания с подсвежением, возвратоточная схема проветривания, комбинированное проветривание выемочного участка. Наиболее эффективная — комбинированная схема проветривания [1]. Для ее осуществления организуется отсос метановоздушной смеси из выработанного пространства газоотсасывающими вентиляторами, установленными на поверхности. Отвод метановоздушной смеси производится либо по неподдерживаемым выработкам, через сбойки, соединяющие выработанное пространство со штреками, либо по скважинам, либо по трубопроводам.

Существенную роль в накоплении метана в выработках угольных шахт играют нестационарные процессы их вентиляции. Они возникают при изменении режима проветривания сети выработок, при установке вентиляционных шлюзов и других изоляционных сооружений, изменяющих потокораспределение воздуха в сети выработок. Во время нестационарных процессов вентиляции возможно возникновение слабо проветриваемых зон, в которых могут образовываться зоны слоевого и местного загазовывания метаном с высокой концентрацией.

Расчет проветривания шахт и рудников в настоящее время на всех шахтах России проводится на основе стационарного подхода в предположении несжимаемости среды [2, 3]. На базе такого подхода расчет нестационарных процессов вентиляции принципиально невозможен. Поэтому разработка газодинамических методик расчета нестационарных процессов вентиляции является актуальной.

Математическая модель вентиляции сети выработок шахты [4–7] основывается на предположениях об одномерном движении газа в прямолинейных выработках, полном и мгновенном перемешивании потоков в узлах сопряжения прямолинейных выработок. Эффекты турбулентной вязкости и теплопроводности учитываются в уравнениях в правых частях с использованием интегральных коэффициентов аэродинамического сопротивления горных выработок и мест их пересечения, которые подробно изучены экспериментально. В математической модели учитываются эффекты естественной конвекции неизотермического газа при его движении в наклонных выработках. Для прогнозирования влияния естественной конвекции на аэродинамику рудничной атмосферы в сети выработок берутся во внимание теплообмен рудничной атмосферы со стенками выработок, а также изменение температуры стенок при теплообмене. Неоднородное распределение легких примесей в рудничной атмосфере также приводит к естественно-конвективному движению в наклонных выработках и учитывается в математической модели. Процессы вентиляции определяются пространственной топологией вырабо-

ток, расстановкой и режимами работы вентиляционного оборудования (вентилятора главного проветривания, вентиляторов местного проветривания, газоотсасывающих установок, вентиляционных сооружений, располагающихся в выработках шахты). С учетом всех перечисленных физических процессов и эффектов система уравнений нестационарной аэродинамики сети выработок угольных шахт запишется в виде

$$\frac{\partial \rho s}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u}{\partial x} = \Pi \dot{m}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho s u}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u^2}{\partial x} + s \frac{\partial p}{\partial x} = \Pi \tau_w - s \rho g \sin \gamma, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho s \left(e + \frac{u^2}{2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u \left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right)}{\partial x} = \Pi \dot{m} H - \Pi \alpha (T - T_w) - s \rho u g \sin \gamma, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_i s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i s u}{\partial x} = \Pi \dot{m}_i, \quad i = 1, \dots, I - 1, \quad (4)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^I \rho_i, \quad (5)$$

$$p = \rho R T, \quad (6)$$

$$e = \frac{p}{\rho(k-1)},$$

где уравнения неразрывности (1), движения (2), энергии (3) и уравнения для парциальных плотностей компонент (4) записаны в предположении, что приход массы \dot{m} , \dot{m}_i и энтальпии $H\dot{m}$ в поток осуществляется со стенок выработок. Уравнения (1)–(6) записываются для всех прямолинейных участков сети выработок. В этих уравнениях x — координата; t — время; ρ — плотность газа; ρ_i — парциальные плотности; u — скорость; p — давление; H — энтальпия массы, приходящей со стенок; T — температура; T_w — температура стенок; $s(x)$ — сечение; Π — периметр выработки; γ — угол наклона выработки к горизонту; k — показатель адиабаты газовой смеси; R — газовая постоянная; g — ускорение силы тяжести; τ_w — напряжение трения на стенках выработки; α — коэффициент теплоотдачи; I — число газовых компонент.

Коэффициент теплоотдачи вычисляется с учетом свободной и вынужденной конвекции газа в выработках по эмпирическим формулам, учитывающим наклон выработок [8]. Для углов наклона выработок менее 45° к горизонту:

$$Nu_F = 0.0214 Re^{0.8} Pr^{0.4}, \quad Nu_N = 0.817 Ra^{0.215} \left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-0.382},$$

$$Nu = (Nu_F^3 + Nu_N^3)^{1/3}, \quad \alpha = \frac{Nu \lambda}{D_{eqv}},$$

где $Re = \frac{\rho u D_{eqv}}{\mu}$, $Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$, $Ra = \frac{g \rho^2 C_p \zeta (T_w - T_g) D_{eqv}^3}{\mu \lambda}$, $D_{eqv} = \frac{4s}{\Pi}$.

Для углов наклона выработок более 45° к горизонту:

$$Nu_F = \frac{0.0357 Re Pr^{1/3} (1 + Pr^{-5/6})}{\ln(17 Re)}, \quad Nu_N = 0.15 Ra^{1/3} \left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/27}.$$

Если потоки вынужденной и естественной конвекции сонаправлены, то $Nu = |Nu_F^3 + Nu_N^3|^{1/3}$, если противонаправлены, то $Nu = |Nu_F^3 - Nu_N^3|^{1/3}$, $\alpha = \frac{Nu \lambda}{D_{eqv}}$.

Напряжение трения на стенках выработки определяется по формулам

$$\tau_{mp} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}}.$$

Здесь Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля; Ra — число Релея; Nu — число Нуссельта; D_{eqv} — эквивалентный диаметр выработки; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; ζ — коэффициент теплового расширения газа; λ, μ — коэффициенты теплопроводности и вязкости газа; α — коэффициент теплоотдачи; c_f — коэффициент сопротивления.

Пересечения горных выработок будем представлять объемом заданной величины (рис. 1).

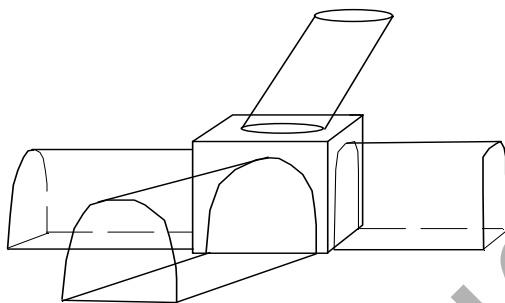


Рис. 1. Схематическое изображение узла с примыкающими выработками

Предполагая давление одинаковым по объему, смешение потоков из примыкающих выработок с разными концентрациями примесей происходит мгновенно. Запишем законы сохранения массы, энергии и концентрации примесей для объема сопряжения в виде

$$V \frac{d\rho}{dt} = \sum_k G_k, \quad (7)$$

$$V \frac{dE}{dt} = \sum_k G_k H_k, \quad (8)$$

$$V \frac{d\rho_i}{dt} = \sum_k G_{i,k}, \quad i = 1, \dots, I-1, \quad (9)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^I \rho_i, \quad (10)$$

$$p = \rho RT. \quad (11)$$

Уравнения (7)–(11) записываются для всех объемов сопряжений выработок. В этих уравнениях: ρ — плотность газа в объеме V ; $E = C_v \rho T$ — его внутренняя энергия; T — температура; ρ_i — парциальные плотности примесей; G_k — потоки массы между объемом V и примыкающей k -той выработкой; $H_k = C_p T_k$ — энтальпия газа в потоке G_k ; $G_{i,k}$ — потоки массы примесей; суммы по k берутся по всем выработкам, примыкающим к объему V .

Уравнения (7)–(10) позволяют вычислить в объеме k -того узла газодинамические параметры $\rho_k, \rho_{CH_4 k}, \rho_{CO_2 k}, T_k$. После этого давление p_k можно вычислить из уравнения состояния идеального газа (11).

Представленная модель расчета аэродинамических параметров в узле основана на законах сохранения массы и энергии. Изменение импульса в узлах не рассчитывается. Перенос импульса через сопряжения определяется заданием граничных условий на границах ветвей, примыкающих к узлу в соответствии с направлением характеристик.

В нестационарных условиях вентиляции температура стенок выработок меняется во времени и влияет на аэродинамику рудничной атмосферы. Так как наибольший градиент температуры формируется в направлении, перпендикулярном стенкам выработки, будем моделировать распространение тепла в горной породе от стенок выработки на основе одномерного уравнения теплопроводности в направлении, перпендикулярном стенке во всех точках вдоль выработки, полагая в этих точках интенсивность теплообмена газа со стенками по периметру выработки одинаковой:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (12)$$

с начальными и граничными условиями:

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = \alpha(T_g(x, t) - T(x, 0, t)), \quad \frac{\partial T(x, \infty, t)}{\partial y} = 0, \quad (13)$$

где y — координата в глубь стенок; χ — коэффициент температуропроводности горных пород, $\chi = \lambda_n / (c_n \rho_n)$; λ_n — коэффициент теплопроводности; c_n — удельная теплоемкость; ρ_n — плотность горных пород; $T_g(x, t)$ — температура газа, определяемая из решения системы уравнений (1)–(11); $T(x, 0, t)$ — температура поверхности стенок выработок, определяется из решения уравнения (12) с краевыми условиями (13). Полученные значения $T(x, 0, t) = T_w$ используются в модели (1)–(11). Поэтому уравнения (1)–(11) и (12), (13) решаются совместно.

В качестве начальных условий для системы уравнений (1)–(11) задаются начальные распределения давления, температуры, скорости и концентрации метана в прямолинейных выработках (в расчетах предполагается, что метан является единственной примесью в воздухе):

$$p(x, 0) = p_n, \quad T(x, 0) = T_n, \quad u(x, 0) = 0, \quad \rho_{CH_4}(x, 0) = \rho_{CH_4 n}(x) \quad (14)$$

и параметры состояния газа в объемах сопряжений:

$$p_k(0) = p_n, \quad T_k(0) = T, \quad \rho_{CH_4 k}(0) = \rho_{CH_4 n k} \quad (15)$$

(индекс n соответствует начальным значениям параметров состояния рудничной атмосферы).

Граничные условия ставятся в зависимости от условий на границах прямолинейных выработок. Если границей выработки является стенка, то ставится условие непротекания. Если границей выработки является выход выработки на поверхность в атмосферу, то граничные условия ставятся в зависимости от направления потока газа. Если на границе выработки установлен работающий вентилятор проветривания, то задаются скорость и энтропия воздуха, втекающего в выработку. Если граница ветви примыкает к узлу, то граничные условия ставятся в соответствии с направлением характеристик и задаются давление и энтропия либо только давление.

Таким образом, система уравнений (1)–(15) описывает нестационарное течение смеси газов в выработках с учетом тепло- и массообмена потока воздуха со стенками выработок.

Для численного решения системы уравнений (1)–(6) использовался метод распада произвольного разрыва С.К. Годунова [9]. Обыкновенные дифференциальные уравнения (7)–(9) решались методом Эйлера. Уравнения теплопроводности (12) с краевыми условиями (13) решались по неявной разностной схеме методом прогонки на неравномерной сетке, в которой шаг по пространству в глубь стенки увеличивался по геометрической прогрессии.

Газоотсасывающие установки, используемые в комбинированных схемах проветривания, устанавливаются на поверхности для отбора метановоздушной смеси через неподдерживаемые выработки. Проведем моделирование влияния газоотсасывающих установок на вентиляцию на примере модельной сети выработок угольной шахты, изображенной на рисунке 2.

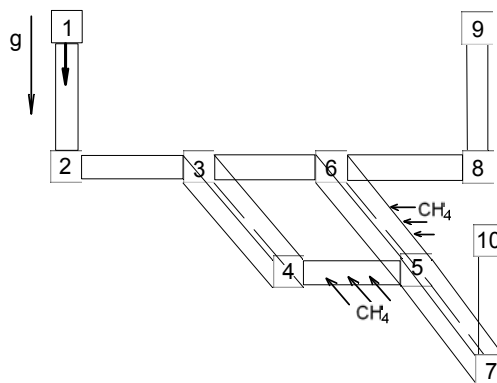


Рис. 2. Схема модельной сети выработок угольной шахты

В точке 1 установлен вентилятор главного проветривания. В точке 10 — газоотсасывающая установка (на поверхности земли). Для сравнительного анализа проводились расчеты вентиляции сети в случае, когда точка 10 является тупиком и выходом в атмосферу. Предполагалось, что в выработках 4–5, 5–6 происходит приток метана со стенок в вентиляционный поток (для различных вариантов исследования). Длины выработок были приняты: 1–2 — 100 м, 2–3 — 1000 м, 3–4 — 1000 м, 4–5 — 400 м, 5–6 — 1000 м, 3–6 — 400 м, 6–8 — 1000 м, 8–9 — 100 м, 5–7 — 1000 м, 7–10 — 100 м, площади проходного сечения выработок — 10 м^2 , периметр — 12 м. Коэффициент аэродинамического сопротивления в выработках был принят одинаковым для всех выработок.

Расчеты проводились по модели (1)–(15) до установления стационарных значений параметров состояния среды в выработках. Результаты расчетов получившегося стационарного состояния проветривания представлены на рисунках в виде распределения скорости газа и концентрации метана в выработках на маршрутах I — 1-2-3-4-5-6-8-9, II — 1-2-3-6-8-9, III — 1-2-3-4-5-7-10, IV — 1-2-3-6-5-7-10 (установившиеся распределения параметров).

На рисунке 3 представлены результаты расчетов, когда в точке 10 отсутствует связь выработки с атмосферой (тупик); на рисунке 4 — в точке 10 имеется выход в атмосферу; на рисунке 5 — в точке 10 установлена газоотсасывающая установка. При проведении этих расчетов было принято, что в выработках 4–5, 5–6 (рис. 2) происходит приток метана в вентиляционный поток.

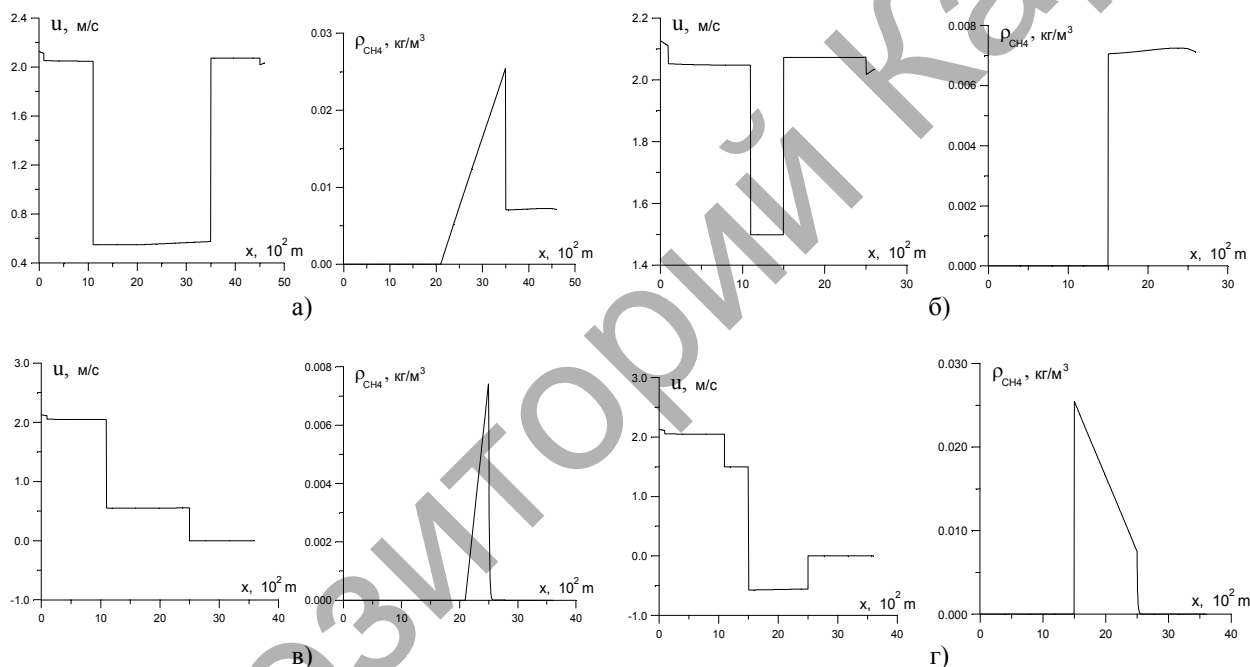


Рис. 3. Стационарные распределения скорости и парциальной плотности метана по маршрутам а) I, б) II, в) III, г) IV. В конце ветви 10 — тупик

В случае, когда в точке 10 тупик, скорость течения в участке 3-4-5-6 маленькая, поэтому там происходит накопление метана до больших значений (рис. 3 а, г). Поток газа в узле 6 перемешиваются, и в атмосферу идет поток рудничной атмосферы с малой концентрацией метана (рис. 3 а, б).

Для уменьшения концентрации метана в областях, где происходит его накопление, можно задействовать дополнительные выработки с выходами в атмосферу. На рисунке 4 представлены расчеты, когда в точке 10 выработки связаны с атмосферой. Видно, что на участке 3-4-5 скорость протекания газа увеличилась и в отличие от предыдущего варианта на участке 5–6 изменилось направление течения. В связи с большей скоростью движения вентиляционного потока накопление метана в потоке на этом участке уменьшается, на выходе в атмосферу в точке 10 концентрация метана также уменьшается за счет смешения потоков в узле 5. Из-за изменения направления течения газа на участке 5–6 на выходе в атмосферу в точке 9 метан отсутствует.

Для уменьшения концентрации метана в областях его интенсивного выделения и накопления в сети выработок на поверхности иногда устанавливают газоотсасывающие вентиляционные установки (ГОВУ). Были проведены расчеты, когда в точке 10 установлена ГОВУ, которая обеспечивает отвод

рудничной атмосферы со скоростью 2.07 м/с. Результаты расчетов приведены на рисунке 5. Как видно из рисунка, качественно картина течения остается аналогичной случаю, когда в точке 10 имеется выход в атмосферу. Однако количественные значения другие: скорость на участке 5–6 стала выше, концентрация метана на входе в точку 10 и на участках 4–5 и 5–6 уменьшилась, скорость газа в вертикальной выработке 8–9 стала маленькой.

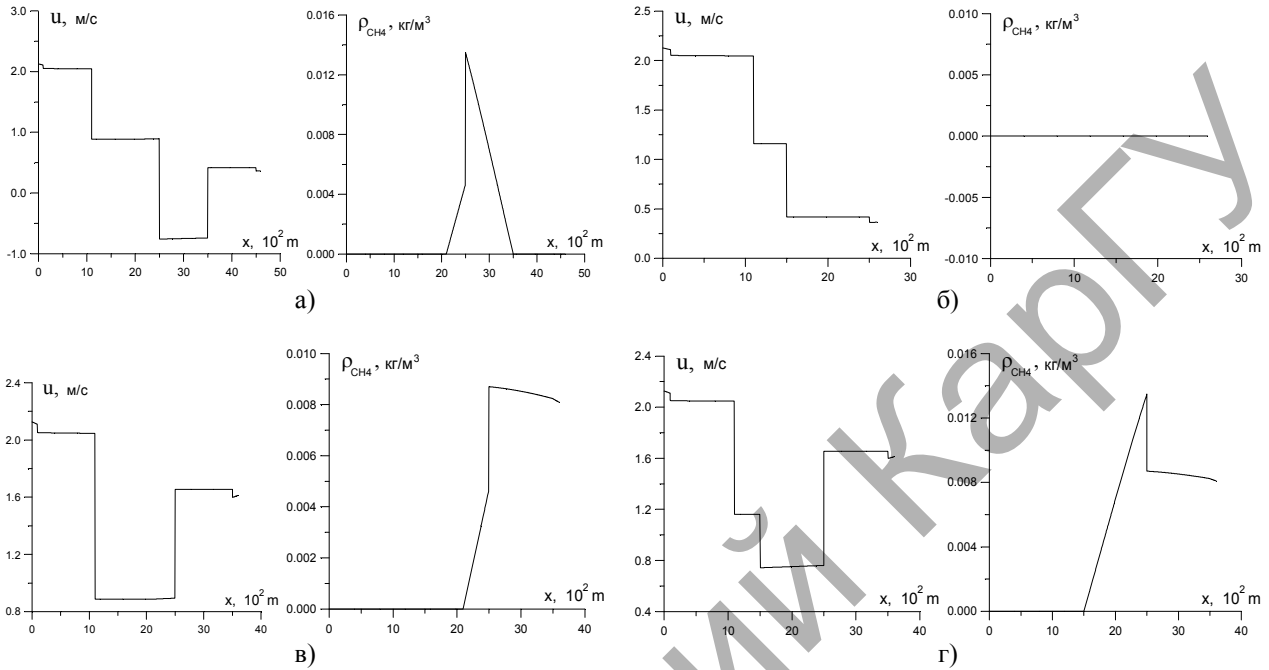


Рис. 4. Стационарные распределения скорости и парциальной плотности метана по маршрутам а) I, б) II, в) III, г) IV. В конце ветви 10 — выход в атмосферу

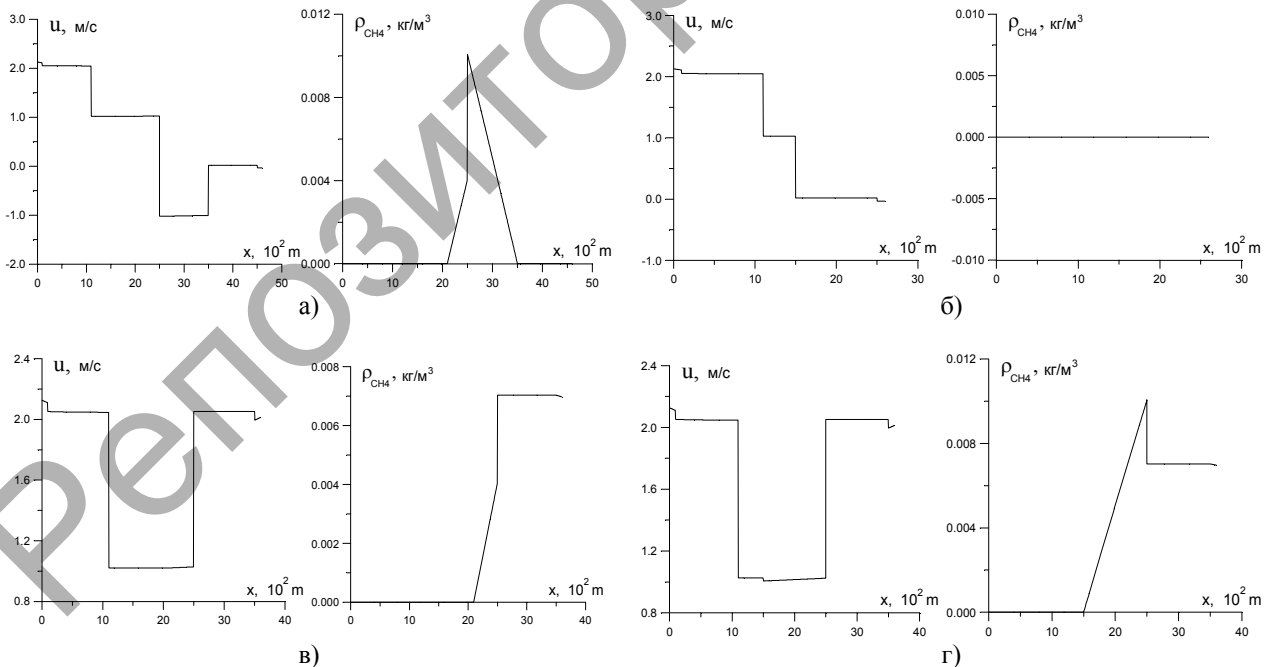


Рис. 5. Стационарные распределения скорости и парциальной плотности метана по маршрутам а) I, б) II, в) III, г) IV. В конце ветви 10 — газоотсасывающая установка, скорость газа 2.07 м/с

Был проведен расчет при скорости газоотсоса ГОВУ 1.5 м/с. Это значение скорости меньше, чем скорость рудничной атмосферы на выходе в атмосферу в точке 10 без установки ГОВУ (рис. 4). В

этом варианте ГОВУ блокирует поток газа в атмосферу и приводит к появлению большей концентрации метана на участках 4–5 и 5–6.

Отметим, что во всех вариантах по длине выработок, где происходит приток метана в вентиляционный поток, имеется неоднородное распределение концентрации метана по длине выработок. При прохождении вентиляционного потока через сопряжения выработок происходит изменение концентрации метана из-за смешения его с потоками смежных выработок (как, например, на рис. 3 а, 4 в, г и др.). При этом только в локальных областях таких выработок может возникнуть превышающая безопасный уровень концентрация метана.

Таким образом, газоотсасывающая установка способна эффективно перераспределять потоки рудничной атмосферы и уменьшать концентрацию метана в рудничной атмосфере. В случаях, когда производительность ГОВУ будет меньше расхода воздуха, который поступает в выработанное пространство за счёт работы вентилятора главного проветривания, использование ГОВУ становится неэффективным.

Разработанная математическая модель и методика расчета нестационарного проветривания сети выработок угольных шахт учитывают реальную топологию сети выработок (длины и площади поперечных сечений выработок, переменность площади сечения выработок, углы их наклона, сопряжения выработок, выходы на поверхность), характеристики вентилятора главного проветривания, газоотсасывающих установок, вентиляторов местного проветривания, расположение вентиляционных сооружений, взрывоустойчивых перемычек, водоналивных взрывозащитных перемычек, взрывозащитных парашютных перемычек, если они развернуты, искусственно создаваемые при угрозе взрыва завалы выработок, загромождение выработок оборудованием, нестационарный теплообмен потока газа со стенками выработок, метановыделение со стенок выработок, перенос локальных скоплений метана, если они заданы в начальных условиях. Разработанный подход позволяет решать задачи управления вентиляцией сети выработок угольной шахты с помощью расстановки в сети вентиляционных сооружений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11–08–00370-а.

References

1. Zolotih S.S., Stekolshikov G.G. Technology of combined ventilation of the excavation sites and fields with the use of gas involvement ventilation units for coal mines // STC Kuzbassugletechnologia. — Kemerovo, 2001. — 123 p.
2. Mine ventilation: a Handbook / K.Z. Ushakov. - 2-nd edition. — M.: Subsoil, 1988. — 440 p.
3. Ushakov K.Z., Burchakov A.S., Medvedev I.I. Mine aerology — M.: Subsoil, 1978. — 440 p.
4. Mathematical modeling of combustion and explosion of high-energy systems / Editor I.M. Vasenin. — Tomsk: Publ. TSU, 2006. — 322 p.
5. Vasenin I.M., Kosterenko V.N. et al. Simulation of the process of ventilation of the coal mines // Baikal reading: Abstracts of reports of scientific conference. Ighevsk: IAM YuB RAS, 2010. — P. 124–128.
6. Lukashov O.Yu., Glazunov A.A. et al. Research of non-stationary aerodynamic processes in a fire in a coal mine // News of higher education institutions. — Physics. — 2009. — Vol. 52. — № 7/2. — P. 142–145.
7. Shragher E.R., Krajnov A.Yu. et al. Gas-dynamic method of calculation of non-stationary ventilation of coal mines // Materials of all-Russian scientific conference. — Tomsk: Publ. TSU, 2009. — P. 43–45.
8. Reference book on heat exchangers. — Vol. 1. — M.: Energoatomizdat, 1987. — 561 p.
9. Godunov S.K., Zabpodin A.V., Ivanov M.I., et al. Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics. — M.: Science, 1976. — 400 p.