

УДК: 533.6.011.72

## Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты

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

<sup>1</sup> Томский государственный университет,  
физико-технический факультет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

<sup>2</sup> Институт угля СО РАН,  
Россия, 650610, г. Кемерово ГСП-610, ул. Рукавишникова, д. 21

<sup>3</sup> Сибирская угольная энергетическая компания  
Россия, 109028, г. Москва, Серебряническая наб., д. 28

E-mail: <sup>а</sup> akrainov@ftf.tsu.ru

Получено 2 июня 2011 г.

Представлена математическая модель для расчета нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты. Приведены результаты расчетов процесса вентиляции тупиковой выработки вентилятором местного проветривания и нестационарных аэродинамических процессов при реверсировании вентилятора главного проветривания в модельной сети выработок шахты.

Ключевые слова: нестационарная вентиляция, угольная шахта, математическое моделирование

### Mathematical simulation of non-stationary ventilation processes of coal mining.

I. M. Vasenin<sup>1</sup>, E. R. Shrager<sup>1</sup>, A. Yu. Krainov<sup>1, а</sup>, D. Yu. Paleev<sup>2</sup>, O. Yu. Lukashev<sup>2</sup>,  
V. N. Kosterenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Tomsk State University, Physical-Technical Faculty, TSU, Lenin St., 36, Tomsk, 634050, Russia

<sup>2</sup> Institute of Coal SB RAS, Rukavishnikova St., 21, Kemerovo, 650610, Russia

<sup>3</sup> Siberian Coal Energy Company, Serebryanicheskaya Emb., Moscow, 109028, Russia

**Abstract.** – Mathematical model of non-stationary ventilation processes of coal mining is presented. Numerical simulation of dead-end excavation ventilation processes using local ventilation fan and occurred non-stationary aerodynamic processes by reversing main ventilation fan in modeling of coal mining are presented in this study. Poisson on circle and other areas.

Keywords: non-stationary ventilation, coal mining, mathematical simulation

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 155–163 (Russian).

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.

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 загазования метаном с высокой его концентрацией. Нестационарные аэродинамические процессы в сети выработок возникают при возникновении локальных очагов пожара и их развитии. В этих условиях требуются оперативность и точность прогнозирования параметров загазования метаном выработок угольной шахты.

Расчет проветривания шахт и рудников в настоящее время на всех шахтах России проводится на основе стационарного подхода в предположении несжимаемости среды [Рудничная вентиляция, 1988; Ушаков, Бурчаков, Медведев, 1978]. 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 [Математическое моделирование ..., 2006; Шрагер, Крайнов, Васенин, 2009; Лукашов, Глазунов, Крайнов, 2009; Васенин, Костеренко, Крайнов, 2010] 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 учитывается 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 выработок, 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:

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

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

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

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

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

$$p = \rho RT, \tag{6}$$

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

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;  $\rho$  – плотность газа;  $\rho_i$  – парциальные плотности;  $u$  – скорость;  $p$  – давление;  $H$  – энтальпия массы, приходящей со стенок;  $T$  – температура;  $T_w$  – температура стенок;  $s(x)$  – сечение,  $\Pi$  – периметр выработки;  $\gamma$  – угол наклона выработки к горизонту;  $k$  – показатель адиабаты газовой смеси,  $R$  – газовая постоянная;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\tau_w$  – напряжение трения на стенках выработки;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $I$  – число газовых компонент.

Коэффициент теплоотдачи вычисляется с учетом свободной и вынужденной конвекции газа в выработках по эмпирическим формулам, учитывающим наклон выработок [Справочник по теплообменникам, 1987]. Для углов наклона выработок менее 45° к горизонту:

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

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

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

Для углов наклона выработок более 45° к горизонту:

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

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

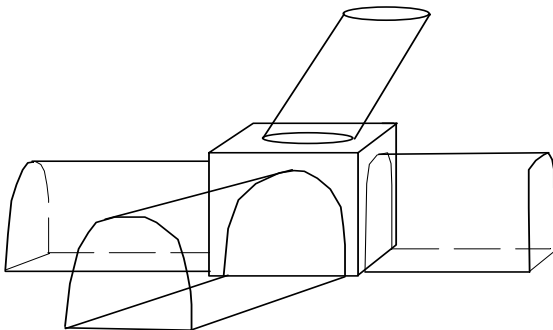


Рис. 1. Схематическое изображение узла с примыкающими выработками

Напряжение трения на стенках выработки определяется по формулам:

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

Обозначения:  $Re$  – число Рейнольдса,  $Pr$  – число Прандтля,  $Ra$  – число Релея,  $Nu$  – число Нуссельта,  $D_{eqv}$  – эквивалентный диаметр выработки,  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $\zeta$  – коэффициент теплового расширения газа,  $\lambda$ ,  $\mu$  – коэффициенты

теплопроводности и вязкости газа,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $c_f$  – коэффициент сопротивления.

Пересечения горных выработок будем представлять объемом заданной величины (рис. 1). 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:  $\rho$  – плотность газа в объеме  $V$ ;  $E = C_v \rho T$  – его внутренняя энергия;  $T$  – температура;  $\rho_i$  – 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  $k$ -го узла газодинамические параметры  $\rho_k$ ,  $\rho_{CH_4,k}$ ,  $\rho_{CO,k}$ ,  $T_k$ . 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 вглубь стенок;  $\chi$  – коэффициент температуропроводности горных пород,  $\chi = \lambda_n / (c_n \rho_n)$ ;  $\lambda_n$  – коэффициент теплопроводности;  $c_n$  – удельная теплоемкость;  $\rho_n$  – плот-

ность горных пород;  $T_g(x, t)$  – температура газа, определяется 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):

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

и параметры состояния газа в объемах сопряжений:

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

(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 С. К. Годунова распада произвольного разрыва [Годунов, Забродин, Иванов и др., 1976]. 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 вглубь стенки увеличивался по геометрической прогрессии.

На основе разработанной математической модели и методики расчета проведено моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок на примере модельных сетей шахты. Был проведен расчет проветривания тупиковой выработки вентилятором местного проветривания (ВМП).

Расчеты проветривания тупика с помощью ВМП проводились для модельного участка сети выработок, представленного на рисунке 2. Длина маршрута 1–3 – 1000 м, длина маршрута 2–3 – 700 м. Длины вертикальных выработок – 100 м, длина тупиковой выработки – 200 м. Площадь сечений выработок была принята  $10 \text{ м}^2$ .

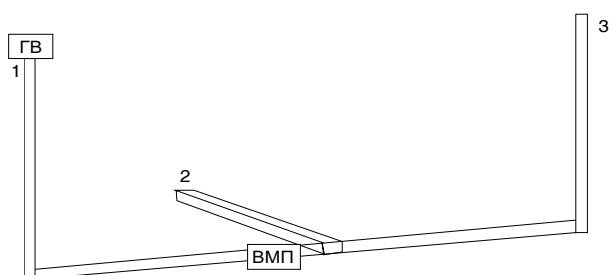


Рис. 2. Участок сети выработок. ГВ – главный вентилятор проветривания, ВМП – вентилятор местного проветривания. 1 – начало вертикальной выработки, где установлен ГВ, 2 – тупиковая выработка, 3 – выход в атмосферу

В тупиковой выработке задавалась повышенная концентрация метана ( $\rho_{CH_4}(x) = 0.03$ ). В заданный момент времени на фоне стационарного режима проветривания сети в работу включается ВМП, установленный в выработке со свежей струей воздуха на расстоянии 10 м от сопряжения с тупиковой выработкой и подающий по специальному трубопроводу поток воздуха к тупику выработки 2. Расчеты проведены для различных величин расхода воздуха, обеспечиваемого ВМП. Результаты представлены на рисунке 3.

После включения ВМП уменьшается скорость движения воздуха в локальной области между ВМП и устьем тупиковой выработки (рис. 3в, кривые 2), в месте установки ВМП локально понижается давление (рис. 3а). Из тупиковой выработки постепенно происходит вытеснение рудничной атмосферы с повышенным содержанием метана (рис. 3д, е). В зоне сопряжения происходит перемешивание струи газа из тупика, и к выходу в атмосферу идет вентиляционная струя с пониженной концентрацией метана.

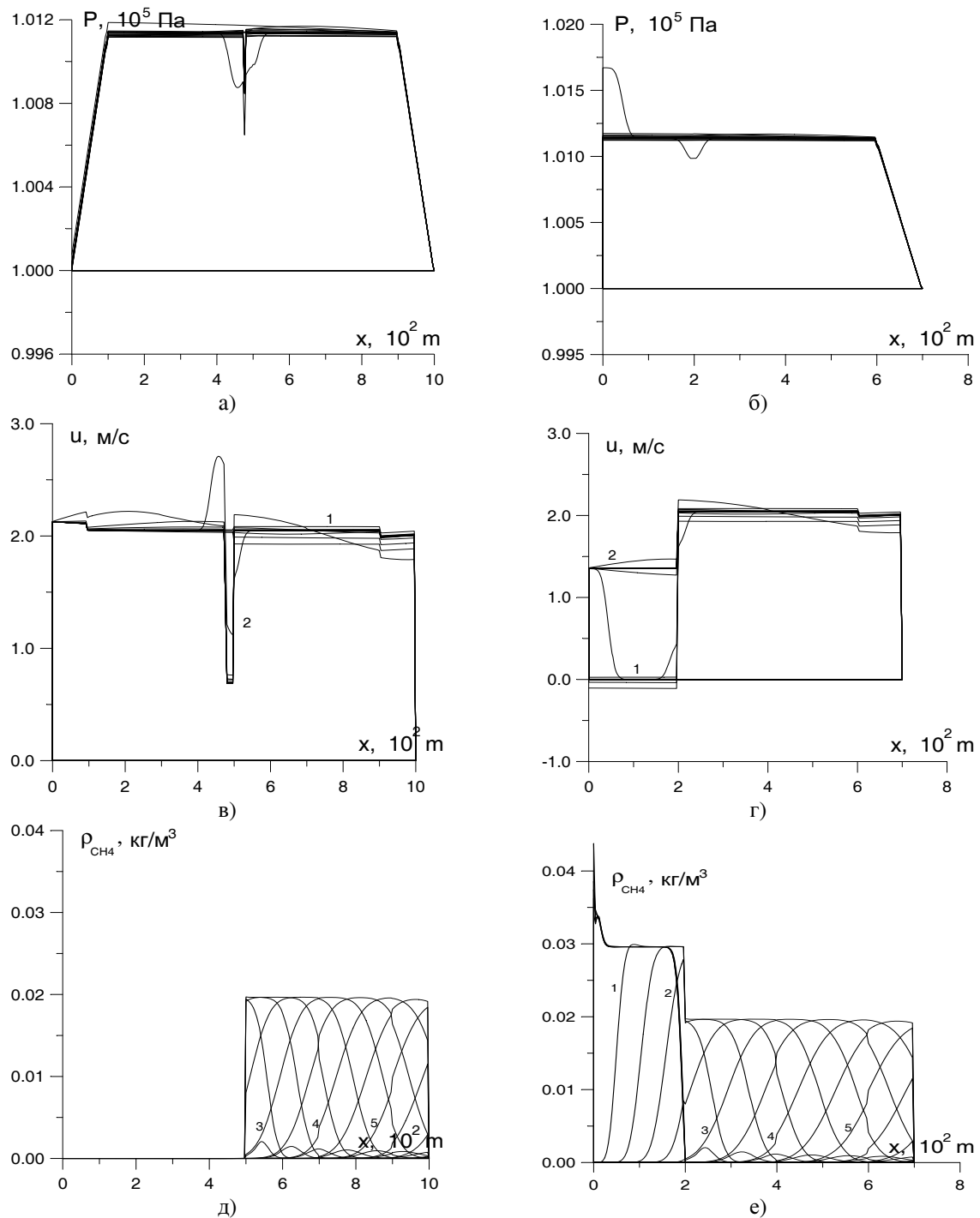


Рис. 3. Распределения давления, скорости, плотности метана по маршруту 1–3 (а, в, д) и маршруту 2–3 (б, г, е). Кривые построены в последовательные моменты времени через 80 с.  $G_{ВМП} = 12.5 \text{ м}^3 / \text{с}$

В случае, когда производительность ВМП больше, чем величина вентиляционного потока, подходящего к ВМП, то в локальной области между ВМП и устьем тупиковой выработки рудничная атмосфера будет двигаться от устья тупиковой выработкой к ВМП. Этот поток содержит некоторое количество метана, который снова возвращается в тупиковую выработку, что отрицательно сказывается на качестве проветривания.

Было проведено моделирование нестационарных процессов переноса метана в условиях реверсирования вентилятора главного проветривания. Расчеты показали, что установление стационарного течения рудничной атмосферы после реверсирования вентилятора главного проветривания происходит в несколько раз быстрее, чем установление стационарного распределения концентрации метана в выработках. При этом в период установления стационарного распределения концентрации метана в выработках возможно локальное и временное увеличение его концентрации в несколько раз.

Моделирование проведено на примере модельной сети выработок, представленной на рисунке 4. 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 –  $10 \text{ м}^2$ , периметр – 12 м. Коэффициент аэродинамического сопротивления в выработках был принят одинаковым для всех выработок. Предполагалось, что в выработках 4–5, 5–6 (на рис. 4) происходит приток метана в вентиляционный поток. В точке 10 выход в атмосферу отсутствует (точка 10 – тупик). После установления стационарного проветривания (в расчетах установление стационарного режима проветривания в выбранной модельной сети происходит за 3000 с) вентилятор главного проветривания переходит в реверсивный режим. Предполагается, что вентилятор главного проветривания обеспечивает скорость потока газа в реверсивном режиме такую же, что и в нормальном (в расчетах принято  $2.07 \text{ м/с}$ ). Результаты расчетов

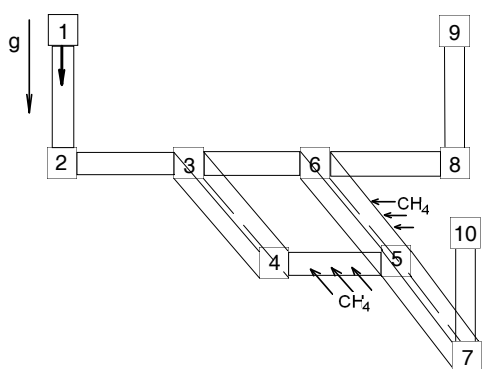


Рис. 4. Схема модельной сети выработок угольной шахты

представлены на рисунке 5. Здесь представлены установившиеся распределения скорости и парциальной плотности метана в выработках на маршрутах I – 1–2–3–4–5–6–8–9, II – 1–2–3–6–8–9.

Установление стационарного распределения газодинамических параметров после реверсирования вентилятора главного проветривания происходит относительно быстро – за время 1200–1500 с для выбранной сети выработок. Однако установление стационарного распределения метана в выработках происходит за время много большее, ~6000 с. В выработках 3–4, 4–5, 5–6 некоторое время наблюдается повышенная практически в два раза концентрация метана в период установления после реверсирования. Это объясняется тем, что вентиляционный поток дважды проходит выработки, в которых происходит приток метана в вентиляционный поток. В отличие от нормального режима проветривания при реверсировании после установления в выработке 3–4 наблюдается повышенная концентрация метана (рис. 5).

Разработанная математическая модель и методика расчета нестационарного проветривания сети выработок угольных шахт учитывает 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.

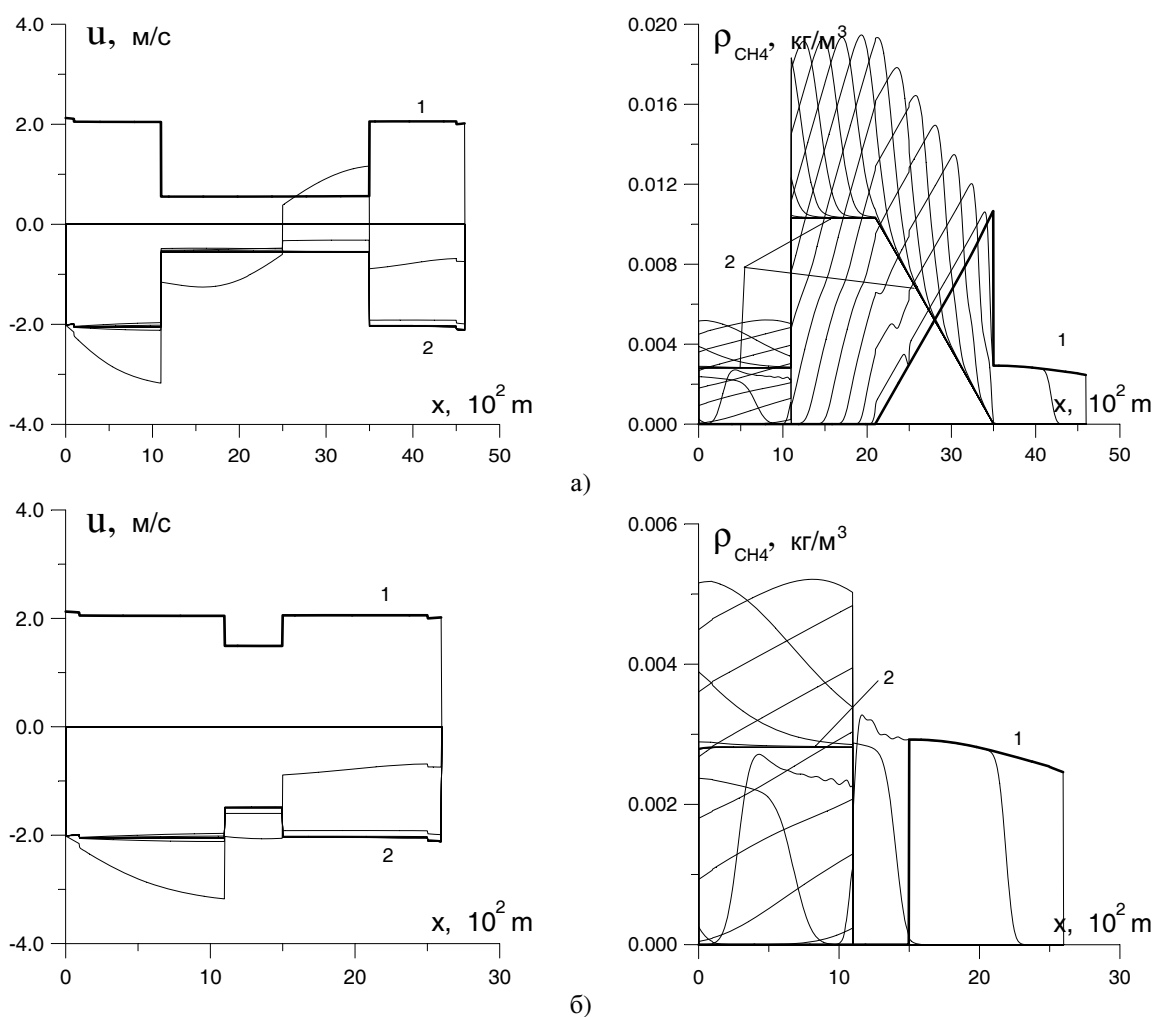


Рис. 5. Установившиеся распределения скорости и парциальной плотности метана до реверсирования вентилятора главного проветривания (кривые 1) и после реверсирования (кривые 2). Промежуточные кривые построены в моменты времени через 400 с, начиная с момента переключения главного вентилятора. Маршруты а) I – 1–2–3–4–5–6–8–9, б) II – 1–2–3–6–8–9

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

## Список литературы

- Васенин И. М., Костеренко В. Н., Крайнов А. Ю., Лукашов О. Ю., Палеев Д. Ю., Шрагер Э. Р. Моделирование процесса проветривания тупиковой выработки угольной шахты // Байкальские чтения: Наноструктурные системы и актуальные проблемы механики сплошной среды (теория и эксперимент): Тезисы докладов научной конференции. (Улан-Удэ, 19–22 июля 2010 г.). – Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2010. С. 124–128.
- Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
- Лукашов О. Ю., Глазунов А. А., Крайнов А. Ю., Костеренко В. Н. Исследование нестационарных аэродинамических процессов, возникающих при пожаре в наклонной выработке угольной шахты // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. Т. 52, № 7/2. С. 142–145.



- Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / под ред. И. М. Васенина. – Томск: изд-во Том. ун-та, 2006. – 322 с.
- Рудничная вентиляция: Справочник / под ред. К. З. Ушакова. – 2-е изд., перераб. и доп. // М.: Недра, 1988. – 440 с.
- Справочник по теплообменникам (в двух томах). Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 561 с.
- Ушаков К. З., Бурчаков А. С., Медведев И. И. Рудничная аэрология – М.: Недра, 1978. – 440 с.
- Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Васенин И. М., Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Тимченко А. Н., Костеренко В. Н. Газодинамический метод расчета нестационарного проветривания угольной шахты // Материалы «Всероссийской научной конференции», посвященной 100-летию со дня рождения профессора М. С. Горохова – основателя томской школы баллистики. Томск: Издательство Томского университета, 2009. С. 43–45.