

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 532.529.5

И.М. Васенин, Д.Ю. Палеев, В.В. Ващилов

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ПОТОКА ПРИ ЕГО РЕВЕРСИРОВАНИИ

Реверсивный режим проветривания, при котором происходит изменение (опрокидывание) направления движения вентиляционной струи, является основным аварийным режимом проветривания угольной шахты, необходимость в котором возникает при наиболее сложных видах аварий (взрывы газа и пыли, пожары, внезапные выбросы угля и газа). При таких авариях в выработках, по которым поступает свежая струя воздуха, в недопустимых количествах появляются ядовитые или непригодные для дыхания газы. Поэтому для спасения людей и быстрого вывода их из шахты используют реверсирование вентиляционной струи.

Согласно Правилам безопасности, переход от нормального режима проветривания к реверсивному должен быть осуществлён в течение 10 мин; при этом количество воздуха, проходящее по выработкам после реверсирования вентилятора, должно быть не менее 60 % его количества при нормальном направлении вентиляционной струи. Главным фактором, определяющим величину необходимого расхода воздуха, является метановыделение на выемочных участках и по всей шахте при переходе с нормального режима проветривания на реверсивный. Определение зависимости между количеством воздуха, подаваемым на выемочный участок, и метановыделением из разрабатываемого пласта и выработанного пространства является довольно сложной задачей даже при нормальном проветривании. Ситуация становится ещё сложнее в переходных режимах и особенно в реверсивном, когда кроме изменения расхода воздуха изменяется направление его движения, а иногда и барометрическое давление. Следует учитывать и естественную тягу (её величину и направление) и изменение аэродинамического сопротивления шахтной вентиляционной сети.

Известно, что в начальный (переходный) период реверсирования происходит резкое увеличение содержания метана в шахтной атмосфере, которое представляет серьёзную опасность с точки зрения возможности взрыва при ликвидации пожара, и которое является исходным параметром при расчёте проветривания аварийного участка в длительном реверсивном режиме.

Рассмотрим этот процесс на примере простой схемы соединений горных выработок, представленной на рис. 1. Два шахтных ствола одинаковой

глубины 200 м сбиты между собой горизонтальной выработкой 4-5-6 длиной 600 м. Эта выработка разделена на одинаковой длины (200 м) составные части 4, 5 и 6. Площадь поперечного сечения выработок 16 м^2 , аэродинамическое сопротивление - 0,0098 кп. С боковых стенок выработки 5 выделяется метан в количестве $0,57 \text{ м}^3/\text{с}$ и равномерно перемешивается с вентиляционным пото-

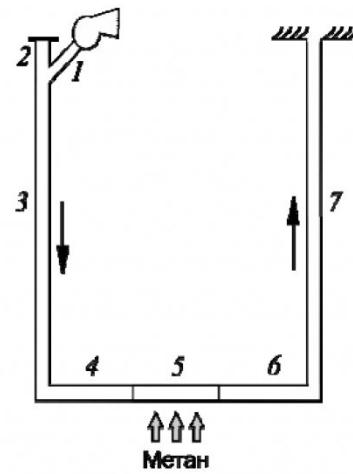


Рис. 1. Схема к расчёту проветривания шахты

ком. На выходе из выработки 5 концентрация метана составляет 1 %. Верхняя часть воздухоподающего ствола 2 изолирована от атмосферы. В канале 1 длиной 10 м установлен вентилятор, работающий в нормальном режиме на нагнетание с производительностью $3360 \text{ м}^3/\text{мин}$, в реверсивном режиме – с производительностью $3000 \text{ м}^3/\text{мин}$. Атмосферное давление на устье ствола 7 равно 0,101 МПа. Предполагается, что при неработающем вентиляторе температура воздуха и стенок выработок одинакова и естественная тяга шахты равна нулю.

Исследование проведём на основе нестационарного газодинамического подхода [1, 2], который при расчёте вентиляционной сети даёт более детальную информацию в отличие от традиционных стационарных методов расчёта. Использовались следующие газодинамические уравнения, в которых учитывается поступление метана в поток со стенок выработок, тепловое расширение пото-

ка, трение и конвективный теплообмен газа со стенками, влияние гидростатического давления:

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

$$\frac{\partial \rho s C_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho s C_1 u}{\partial x} = \Pi \dot{m}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho s u}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u^2}{\partial x} + s \frac{\partial p}{\partial x} = -\Pi C_r \frac{\rho u^2}{2} - s \rho g \sin \alpha, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho s \left(c_v T + \frac{u^2}{2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u \left(c_v T + \frac{c_p}{c_{p2}} \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right)}{\partial x} = \Pi \alpha_T (T - T_{CT}) - s \rho u g \sin \alpha; \quad (4)$$

$$p = \rho R T \sum_{j=1}^2 \frac{C_j}{M_j} \quad (5)$$

где ρ - плотность потока; u - скорость; p - давление; T - температура потока; T_{CT} - температура стенок выработок; \dot{m} - массовый приток метана с единицы поверхности стенки; c_v , c_p - соответственно удельные теплоёмкости смеси при постоянном объёме и давлении; α_T - коэффициент теплоотдачи; C_r - коэффициент трения потока о стенки выработки; s - сечение выработки; Π - периметр выработки; x - координата вдоль выработки; g - ускорение свободного падения; R - универсальная газовая постоянная; C_j - концентрация j -го газа ($j = 1$ - метан, $j = 2$ - воздух); M_j - молекулярная масса j -го газа; α - угол наклона выработки к горизонту; t - время.

Уравнение (4), в отличии от аналогичного уравнения в работе [2], более точно описывает изменение энталпии в потоке при вводе в него со стенок выработки 5 дополнительной массы метана путём учёта изменения удельных теплоёмкостей результирующего потока c_v и c_p , которые вычисляются из следующих соотношений:

$$c_v = c_{v1} C_1 + c_{v2} (1 - C_1), \quad c_p = c_{p1} C_1 + c_{p2} (1 - C_1),$$

где c_{v1} , c_{v2} , c_{p1} , c_{p2} - соответственно удельные теплоёмкости метана и воздуха при постоянном объёме и давлении.

Для численного решения нестационарной системы одномерных уравнений (1)-(5) используем алгоритм распада разрыва С.К. Годунова [3].

Начальные условия:

$$\begin{aligned} \rho(x, 0) &= \rho_{atm}, \quad P(x, 0) = P_{atm}, \quad u(x, 0) = 0, \\ C_1(x, 0) &= 0, \quad T(x, 0) = T_{atm}, \end{aligned} \quad (6)$$

т.е. в выработках 1-7 поток считается неподвижным и имеет параметры атмосферного воздуха на поверхности.

Границные условия задаются следующим образом. На вентиляторе (при $x = 0$), если он работает на всасывание, задаётся величина скорости

потока u_{vent} , которая берётся из расчёта аналогичной сети горных выработок по программе «Вентиляция» [4]. Если вентилятор работает на нагнетание, то дополнительно задаётся температура нагнетаемого воздуха.

$$u(0, t) = u_{vent}, \quad C_1(0, t) = 0, \quad T(0, t) = T_{vent} \quad (7)$$

На непроницаемой границе (при $x = x_2$) - верхней части воздухоподающего ствола 2, изолированном от атмосферы, ставится условие не протекания:

$$u(x_2, t) = 0, \quad \left. \frac{\partial C_1}{\partial x} \right|_{x=x_2} = 0, \quad \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x=x_2} = 0. \quad (8)$$

На устье ствола 7 (при $x = L$), если вентилятор работает на нагнетание и поток свободно выходит в атмосферу, задаются:

$$P(L, t) = P_{atm}, \quad \left. \frac{\partial C_1}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x=L} = 0. \quad (9)$$

Если вентилятор работает на всасывание и поток поступает в устье ствола 7 из атмосферы, дополнительно задаётся его энтропия.

Будем рассматривать только тепло- и массообменные процессы, возникающие при движении воздуха по вентиляционной сети, изображённой на рис. 1. Состав и влажность потока принимаются постоянными и их влияние на характеристики воздуха не рассматривается. Будем считать, что температура поступающего в шахту воздуха ($T_{atm}=288,3$ К) равна температуре стенок выработок, температура которых одинакова и не изменяется во времени, то есть $T(x, t)=T_{atm}$. Изменение будет претерпевать только температура потока, который может отдавать или, наоборот, принимать тепло от стенок выработок. Последнее допущение справедливо при значительной удельной теплоёмкости и очень большом коэффициенте теплопроводности стенок выработок.

Система уравнений (1)-(5) с начальными и граничными условиями (6)-(9) позволяет учитывать наряду с изменением концентрации метана изменение и температуры воздуха за счёт его сжатия при опускании по выработкам 1, 3 и разрежения - при подъёме по стволу 7 (см. рис. 1). Изменяется температура вентиляционного потока может также и за счёт теплообмена со стенками выработок 1-7. Повышение температуры потока за счёт трения о стенки выработок компенсируется его охлаждением при расширении, вызванном понижением давления при движении потока по горным выработкам.

На рис. 2-4 представлены результаты расчёта газодинамических параметров потока в переходном режиме реверсирования вентиляционной струи. Этот режим начинается в момент выключения вентилятора. Причём, течение первых 60 с происходит плавная остановка вентилятора, затем в течение 490 с выработки находятся при отсутствии источника тяги, далее вентилятор включается

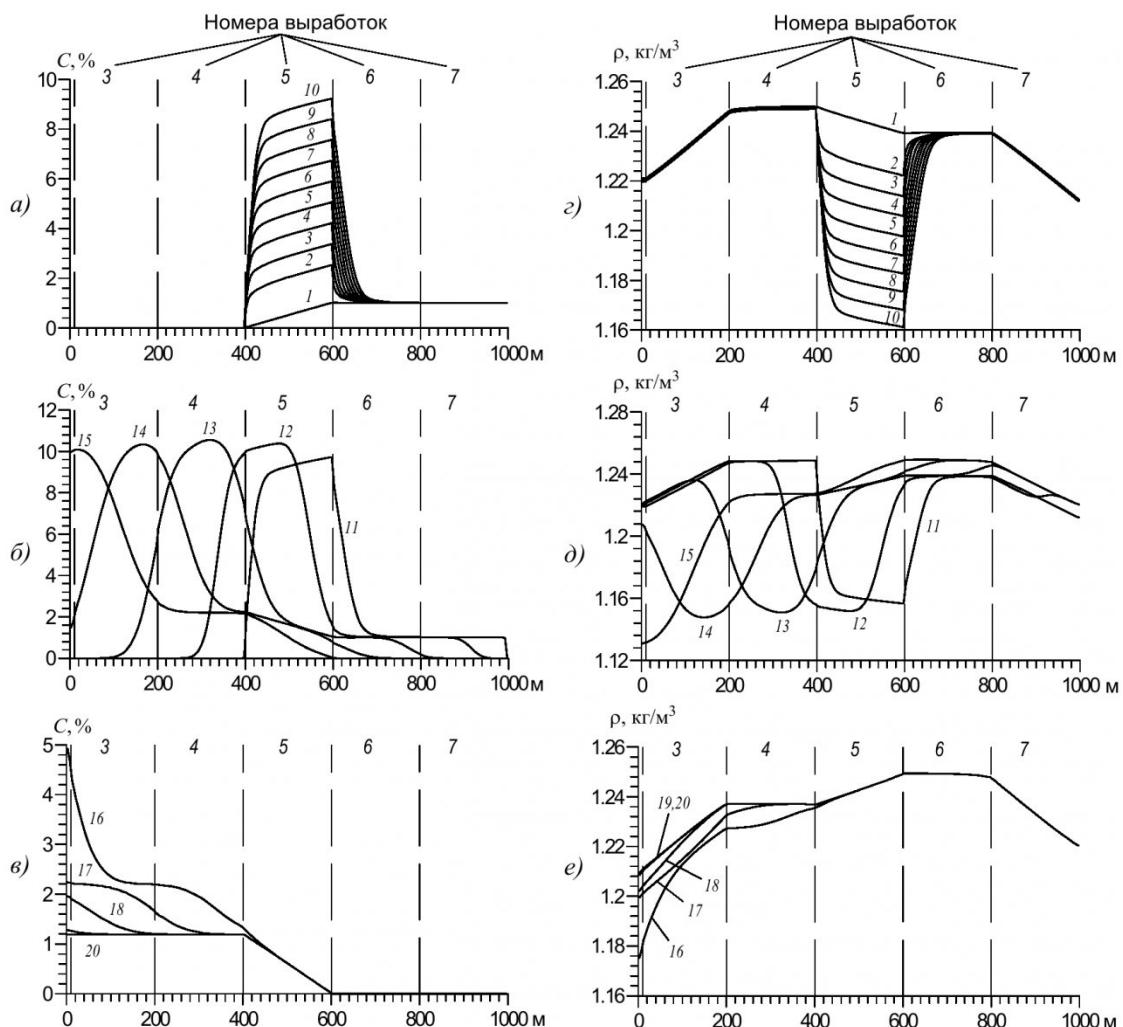


Рис. 2. Изменение концентрации метана и плотности потока в выработках при реверсировании вентиляционной струи: а, г – вентилятор остановлен; б, в, д, е – вентилятор реверсирован

и в течение 50 с выводится на максимальную производительность в реверсивном режиме (90 % от производительности в нормальном режиме). Номера кривых соответствуют следующим моментам времени после выключения вентилятора: 1 – 0 с; 2 – 120 с; 3 – 170 с; 4 – 220 с; 5 – 270 с; 6 – 320 с; 7 – 370 с; 8 – 420 с; 9 – 470 с; 10 – 520 с; 11 – 550 с; 12 – 600 с; 13 – 650 с; 14 – 700 с; 15 – 750 с; 16 – 800 с; 17 – 850 с; 18 – 900 с; 19 – 950 с; 20 – 1000 с.

На рис. 2.а и 2.г показаны изменения концентрации метана и плотности потока в течение 520 с после остановки вентилятора. Кривая 1 соответствует устанавлившемуся воздухораспределению и соответствует начальному моменту времени. Скорость потока 3,5 м/с, производительность вентилятора – 3360 м³/мин. Начиная с этого момента времени, производительность вентилятора в течение 60 с плавно уменьшается до 0 м³/с. Кривая 2 отражает параметры потока через 60 с после полной остановки вентилятора.

Кривые 3–10 отражают изменения параметров с шагом 50 с. Видно, что в выработке с метановыделением 5 идет постоянное увеличение концентрации, кроме того, присутствует небольшая

естественная тяга, обусловленная предыдущим состоянием системы. За счет этой тяги часть метана из выработки 5 попадает в выработку 6, а метан, оставшийся в выработках 6, 7, выходит на поверхность. В результате остановки вентилятора образуется две смежные области с метаном: область с высокой концентрацией метана (выработка 5) и прилегающая область с малой концентрацией (выработка 6).

Изменение концентрации метана в потоке в течение 200 с, начиная с момента включения вентилятора, представлено на рис. 2.б и 2.д. Видно как выносится основной объем метана из выработки 5, и, одновременно с этим, метан из выработок 6, 7 сносится в выработки 3, 4, 5. Даже при выделении 10 мин на реверсирование, необходимо гораздо больше времени для возвращения шахтной атмосферы к безопасным параметрам.

Заключительная фаза выноса метана приведена на рис. 2.в и 2.е. Видно, что после выноса основного объема метана из выработки 5 происходит вынос его остатков, скопившихся в выработках 6, 7. При этом на выходе из ствола временно устанавливается концентрация ~2 %, которая за-

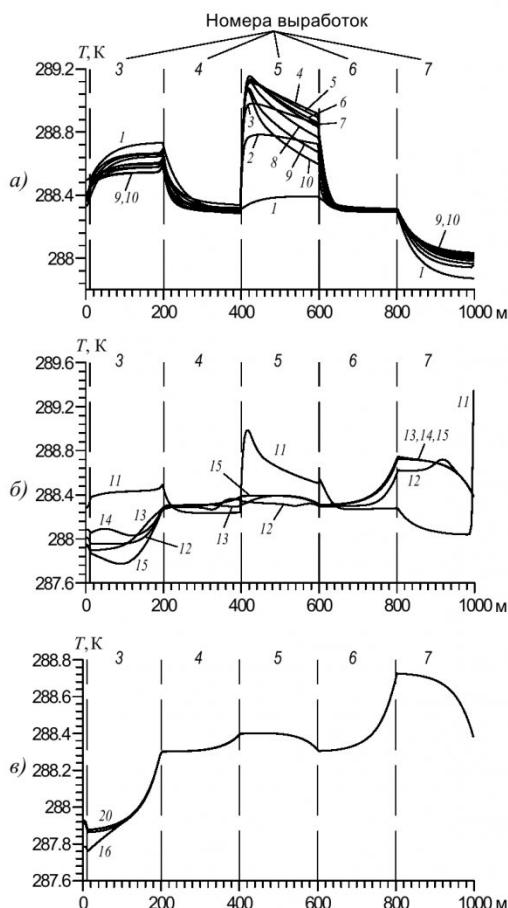


Рис. 3. Изменение температуры потока при реверсировании вентиляционной струи: а – вентилятор остановлен; б, в – вентилятор реверсирован

тем уменьшается до 1,2 %. Длительность процессов, представленных на рис. 2, сильно зависит от длины выработок и производительности вентилятора в реверсивном режиме.

Динамика изменения температуры потока при остановке вентилятора и последующем его



Рис. 4. Изменение скорости потока в выработках при нормальном (1) и реверсивном (2) режимах проветривания

реверсирования представлена на рис. 3. Кривая 1 соответствует начальному моменту времени (см. рис. 3.а). В результате остановки вентилятора температура в выработке с метановыделением 5 увеличилась на 0,6–0,8 К, а в выработках 3 и 7 приблизилась к температуре стенок, изменившись на 0,2 К. Изменение температуры потока с момента реверсирования вентилятора представлено на рис. 3.б. Кривая 11 описывает температуру потока после включения вентилятора, кривая 12 – после выхода вентилятора на стационарный режим. В дальнейшем происходят небольшие колебания температуры, связанные с выносом избыточного метана.

На рис 3.в показано распределение температуры вдоль потока после выноса основной массы метана. Видно, что малые концентрации метана (~1 %) слабо влияют на температуру установившегося потока. На рис. 4 представлен профиль скорости потока при нормальном 1 и реверсивном 2 режимах проветривания. В обоих случаях скорость потока перед выработкой с метановыделением самая низкая, а в выработке 5, за счёт притока газа, скорость потока увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вацилов В.В. Применение газодинамического подхода к расчету вентиляции угольной шахты // Физика и химия наноматериалов: Сборник материалов Международной школы-конференции молодых ученых (13–16 декабря 2005 г., г. Томск). – Томск: Томский гос. университет, 2005. С. 320–324.
2. Палеев Д.Ю., Вацилов В.В. Характер изменения газодинамических параметров вентиляционного потока в горных выработках // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Материалы Междунар. научно-практической конф. (6–8 июня 2006 г., г. Новокузнецк). С. 149–153.
3. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. - М.: Наука, 1976. - 400 с.
4. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Григорьева Н.В. Рудничная аэробиология, версия 1.0 (Вентиляция, версия 1.0) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612542. Реестр программ для ЭВМ. - М. 21.11.2003 г.

□ Авторы статьи:

Васенин
Игорь Михайлович
- докт. физ.-мат. наук, профессор, зав.
каф. прикладной аэромеханики Томского
государственного университета

Палеев
Дмитрий Юрьевич
-докт. техн. наук, вед. научн. сотр.
Института угля и углехимии СО
РАН

Вацилов
Валерий Валерьевич
- аспирант Института угля
и углехимии СО РАН