

д-р техн. наук **П.С. ПАШКОВСКИЙ/ P.S. PASHKOVSKIY**, Ph.D.¹

канд. техн. наук **И.Н. ЗИНЧЕНКО/ I.N. ZINCHENKO**, Ph.D.¹

В.З. БРЮМ/ V.Z. BRYUM²

Przyjęty/Accepted/Принята: 04.03.2014;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 03.11.2014;

Opublikowany/Published/Опубликована: 31.12.2014;

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ ПРИ ПОЖАРЕ В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ^{3,4}

Interaction of Convective Flows during Fire Incidents in Mine Workings

Wzajemne oddziaływanie przepływów konwekcyjnych przy pożarze w wyrobisku górniczym

Аннотация

Цель: Статья посвящена вопросам взаимодействия конвективных потоков при проявлении подъёмных сил в зоне высоких температур при развитых пожарах. Представлен анализ результатов работ в этом направлении. Показано, что при исследовании скоростной структуры вентиляционного потока при встречных движениях пожарных газов обычно делят поток на две части (входящий и выходящий из помещения) или накладывают потоки друг на друга без учёта пограничного слоя у кровли выработки и обращения скорости воздуха в нуль на стенках, что имеет место в действительности.

Методы: Для уточнения механизма взаимодействия конвективных потоков пожарных газов предложено одновременно учитывать как турбулентный, так и ламинарный режимы движения газов путём введения в дифференциальные уравнения дополнительных слагаемых. Получены аналитические решения для профилей скорости и температуры в окрестности очага горения.

Результаты: Установлено, что наличие пограничного слоя под кровлей выработки резко деформирует указанные профили, отображая реальную картину процесса конвективного переноса примесей в поле гравитации. Как показали результаты расчёта, при отсутствии пожара, профиль скорости воздушного потока при учёте ламинарного и турбулентного режимов движения наиболее точно описывает скоростную структуру потока воздуха в отличие от обычно используемой кривой параболы для ламинарного потока, либо прямой линии при турбулентном движении, когда на стенках выработки скорость не равна нулю. Результаты разработанного метода исследований взаимодействия конвективных потоков существенно отличаются от известных методов тем, что профили скорости воздушного потока отражают реальную картину турбулентного течения газов в ядре потока с переходом к ламинарному режиму у стенок выработки, где образуется пограничный слой. Анализ полученных результатов показывает, что при отсутствии пожара профиль скорости воздуха симметричен относительно оси выработки. При возникновении пожара наблюдается деформация профиля скорости, которая выражается в том, что ядро потока смещается к почве выработки, и воздух как бы отесняется от кровли. Наконец, наступает такой момент, что в верхней части выработки происходит опрокидывание потока. Полученные профили температуры отображают наблюдаемую картину шлейфа пожарных газов под кровлей выработки с постепенным его рассеиванием.

Выводы: Данный метод позволяет определить длину встречного потока газов и длину высокотемпературного шлейфа при развитом пожаре, когда длина шлейфа будет максимальной. Полученная информация по данным мониторинга и прогноза на ЭВМ встречных потоков пожарных газов необходима для обнаружения пожара и его ликвидации.

Ключевые слова: пожар, потоки газов, скорость, температура, ламинарный режим, турбулентный режим, поле гравитации, наклон выработки, опрокидывание потока, дальность распространения

Вид статьи: оригинальная научная статья

¹ Научно-исследовательский институт горноспасательного дела и пожарной безопасности „Респиратор”; Украина, 83048, Донецк, ул. Артема, 157; niigd@ukrpost.ua / The “Respirator” Scientific Research Institute of Mine-Rescue Work and Fire Safety; Ukraine, 83048, Donetsk, Artem, 157;

² ГП „Петровский завод угольного машиностроения”; Украина, 83038, Донецк, ул. Чусовская, 1 / The state enterprise “Petrovsky coal machine building plant”; Ukraine, 83038, Donetsk, 1, Chusovskaya st.;

³ Процентное соотношение участия в создании статьи / Percentage contribution: P.S. Pashkovskiy - 40%, I.N. Zinchenko - 30%, V.Z. Bryum - 30%;

⁴ Статью наградила Редакционный Совет / The article was recognised by the Editorial Committee;

Abstract

Aim: The article is concerned with the problem of convective flows interaction in the presence of lifting powers caused by high temperature conditions created by developed fires. Additionally, the article reveals an analysis of investigation results in this direction. The authors have shown, in an examination of the velocity structure of a ventilation flow during reverse movements of fire gases, that the flow is either separated into two parts (input and output to and from the chamber) or the flows are superimposed without taking account of a boundary layer near the roof of a mine working or zero air velocity movement at the walls, what happens in practice.

Methods: In tandem with the intention to specify the interaction mechanism of the convective flows of the fire gases the authors simultaneously took into account both the turbulent and laminar movements of the gases by incorporating additional components to differential equations. Analytical solutions were obtained for velocity and temperature profiles in the proximity of the fire source.

Results: It was established that the presence of the boundary layer under the roof of the mine working sharply deforms the identified profiles, revealing the realistic picture of the process of the convective transfer of admixtures to the gravitation field. The calculations show that, in the absence of a fire, the velocity profile of the air flow taking account of turbulent and laminar movements, most accurately describes the velocity structure of the air flow. This is in contrast with the favored parabola curve for the laminar stream or with the straight line for turbulence when the velocity at the walls of the mine working does not equate to zero. The fundamental difference between the results derived from the technique developed by research and results derived by the popular methods is that the velocity profiles of the air flow realistically reproduce the turbulent movement of the fire gases in the stream core by taking account of the change to the laminar movement at the walls of the mine working, where the boundary layer is formed. The analysis of the results obtained reveals that in the absence of the fire the air velocity profile is symmetrical in relation to the axis of the mine working. By origin of the fire one can observe a deformation of the velocity profile, and this is attributable to the stream core movement towards the soil of the mine working, and air, in a sense, moves away from the roof. Ultimately, a moment occurs during which the stream is pushed down in the upper part of the mine working. Derived temperature profiles reveal the observed picture of the fire gases trail under the roof of the mine working with its gradual disperse.

Conclusions: The presented technique allows for linear evaluation of the fire gases flowing in reverse and that one of the high-temperature trial during the developed fire when the trail length will be at its maximum. The information acquired during observation and computer-aided prediction of reverse fire gases flows is necessary for the detection of the fire and its elimination.

Keywords: fire, flows of gases, velocity, temperature, laminar mode, turbulent mode, gravitation field, inclination of the working, overthrow of the flow, propagation distance

Type of article: original scientific article

Abstrakt

Cel: Artykuł poświęcony jest problemowi wzajemnego oddziaływania przepływów konwekcyjnych podczas wystąpienia sił nośnych w warunkach wysokich temperatur przy rozwiniętym pożarze.

W artykule przedstawiono analizę wyników badań omawianego zjawiska. Autorzy wykazali, że przy badaniu struktury prędkości przepływu wentylacyjnego przy ruchach wstecznych gazów pożarowych przepływ rozdziela się na dwie składowe (wchodzącą i wychodzącą z obszaru wyrobiska) lub przepływy nakładają się na siebie bez uwzględnienia warstwy granicznej przy stropie wyrobiska oraz zmiany prędkości przepływu powietrza do zera przy ścianach, co zachodzi w rzeczywistości.

Metody: W celu określenia mechanizmu wzajemnego oddziaływania przepływów konwekcyjnych gazów pożarowych autorzy zaproponowali jednoczesne uwzględnianie przepływów turbulentnych i laminarnych dla gazów pożarowych poprzez wprowadzenie do równań różniczkowych dodatkowych składowych. Otrzymano rozwiązania analityczne dla profili prędkości i temperatury w pobliżu źródła pożaru.

Wyniki: Ustalono, że obecność warstwy granicznej pod stropem wyrobiska diametralnie zmienia przedstawione profile, pokazując rzeczywisty obraz procesu przepływu konwekcyjnego domieszek w polu grawitacji. Jak wykazały wyniki obliczeń, w sytuacji bez pożaru, profil prędkości przepływu powietrza uwzględniający tryb turbulentny i laminarny najdokładniej opisuje strukturę prędkości przepływu powietrza – w odróżnieniu od zwykle wykorzystywanej krzywej paraboli dla przepływu laminarnego lub linii prostej przy ruchu turbulentnym, kiedy prędkość na ścianach wyrobiska nie jest równa zero. Różnica pomiędzy wynikami otrzymanymi dzięki opracowanej metodyce badań wzajemnego oddziaływania strumieni konwekcyjnych a wynikami znanych metod polega na tym, że w przypadku tych pierwszych profile prędkości strumienia powietrza odwzorowują realny obraz przepływu turbulentnego w strumieniu głównym ze zmianą ruchu na laminarny przy ścianach wyrobiska, gdzie tworzy się warstwa graniczna. Analiza otrzymanych wyników wskazuje na to, że przy braku pożaru profil prędkości powietrza jest symetryczny względem osi wyrobiska. Podczas powstania pożaru obserwowana jest zmiana profilu prędkości, która polega na tym, że strumień główny przesuwają się do podłoża wyrobiska, a powietrze jakby odrywa się od stropu. Ostatecznie następuje moment, w którym w górnej części wyrobiska zachodzi zjawisko zmiany kierunku przepływu. Otrzymane profile temperatury odwzorowują obserwowane zjawisko przepływu gazów pożarowych pod stropem wyrobiska ze stopniową ich dyspersją.

Wnioski: Przedstawiona metoda pozwala ocenić drogę przepływu wstecznego gazów i drogę wysokotemperaturowego strumienia podczas pożaru rozwiniętego, kiedy długość przepływu osiąga wartość maksymalną. Informacje otrzymane w drodze obserwacji i symulacji komputerowej przepływu wstecznego gazów pożarowych są niezbędne do detekcji i zwalczania pożaru.

Słowa kluczowe: pożar, strumienie gazów, prędkość, temperatura, tryb laminarny, tryb turbulentny, pole grawitacji, nachylenie wyrobiska, zmiana kierunku przepływu, zasięg rozprzestrzeniania

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

1. Введение

При пожарах даже в горизонтальных выработках угольных шахт возникают встречные потоки продуктов горения под кровлей, которые могут попадать на свежие струи и создавать угрозу отравления.

В результате формируется группа выработок, в атмосфере которых содержатся опасные для человека вредные вещества – зона распространения продуктов горения. Определение выработок, входящих в эту зону, – важная и достаточно сложная проблема, которую необходимо решать заранее для всех потенциально опасных участков (выработок) шахты. Информация о вероятной зоне распространения пожарных газов по шахтной сети необходима для раннего обнаружения пожара, выбора методов и средств его тушения, а также безопасных маршрутов выхода людей.

При частичном опрокидывании вентиляционной струи в нижней части выработки воздух движется в нормальном направлении, а под кровлей выработки возникают конвективные потоки в противоположном направлении. Так, например, Эйснер и Смит [2] упоминают о взрыве и последующем пожаре на шахте Whitehaven, когда продукты горения распространились навстречу вентиляционной струе на 335 м, в результате чего погибло 86 человек. Эти же авторы наблюдали случай, когда при небольшом пожаре на конвейере образовался встречный шлейф пожарных газов длиной 90 м при скорости вентиляционной струи около 0,25 м/с. Вынос продуктов горения нагретыми газами навстречу свежей струе воздуха неоднократно фиксировался в ходе ликвидации пожаров на угольных шахтах Украины [2].

При исследовании скоростной структуры вентиляционного потока при встречных движениях пожарных газов исходят путём деления потока на две части (входящий и выходящий из помещения [3]), либо путём наложения потоков друг на друга [4, 5, 9] без учёта пограничного слоя у кровли выработки и обращения скорости воздуха в нуль на стенках, что имеет место в действительности.

2. Методы

Поэтому предлагается такая модель встречного течения пожарных газов, которая учитывала бы как ламинарный, так и турбулентный режимы движения газов. В этом случае скорости на стенках выработки будут обращаться в нуль, а вдали от стенок режим движения будет турбулентным.

Уравнение движения для продольной составляющей скорости можно записать в виде [6]:

$$\frac{du}{d\tau} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \rho u}{\partial y^2} + \frac{\partial \rho u' v'}{\partial y} + f_x \quad (1)$$

где P – давление, Па; u – продольная составляющая скорости воздуха, м/с; u' – пульсационная составляющая продольной скорости, м/с; v' – пульсационная составляющая поперечной скорости, м/с; ρ – плотность воздуха, м/с; ν – кинематическая вязкость, м²/с;

x – продольная координата по потоку воздуха, м; y – поперечная координата, м; f_x – проекция вектора силы плавучести газов на ось x , кг/(м·с)²; τ – время, с.

Предложены различные теории турбулентности [6]. Примем, что пульсации скорости пропорциональны самой скорости и можно принять [7]

$$\frac{\partial \rho u' v'}{\partial y} \approx -\frac{\lambda |u|}{2d} \rho u \quad (2)$$

где λ – коэффициент аэродинамического сопротивления выработки; $|u|$ – модуль скорости, м/с; d – приведенный диаметр потока воздуха, м.

Тем самым предполагается, что пульсации скорости тем больше, чем больше скорость и чем меньше диаметр выработки, на стенках которой как раз и проявляются пульсации.

Подставляя формулу (2) в уравнение (1), получим в случае стационарного течения газов при развитом пожаре

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \rho u}{\partial y^2} - \frac{\lambda |u|}{2d} \rho u + f_x \quad (3)$$

Второе слагаемое учитывает ламинарность, а третье слагаемое в уравнении (3) учитывает турбулентность потока газов. В проекциях на ось y примем, что поперечные размеры выработки неизмеримо малы по сравнению с продольными и поэтому можно не учитывать потери на трение и записать

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial y} + f_y \quad (4)$$

где f_y – проекция вектора силы плавучести газов на ось y , кг/(м·с)².

На рис. 1 приведена схема наклонной выработки с указанием вектора ускорения свободного падения.

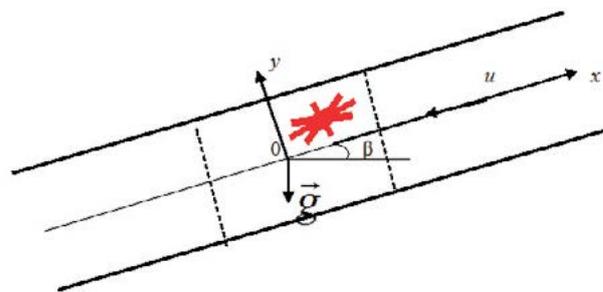


Рис. 1. Схема наклонной выработки с указанием зоны горения и вектора ускорения свободного падения
Fig. 1. Diagram of the inclined mine working with indication of the combustion zone and free fall acceleration vector

Источник: Собственное исследование.

Source: Own elaboration.

Проекции вектора плавучести газов примем равными

$$f_x = \frac{\rho_0}{k} \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) g \sin \beta; \quad (5)$$

$$f_y = \frac{\rho_0}{k} \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) g \cos \beta,$$

где $k = \left(\frac{T}{T_0} + 1 \right) / 2$ – коэффициент сжимаемости воздуха, как среднеарифметическое максимальной T_1 и минимальной T_0 температур; ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; β – угол наклона выработки к горизонту, рад.

Подставляя равенства (5) в уравнения (3) и (4), получим

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \rho u}{\partial y^2} - \frac{\lambda |u|}{2d} \rho u + \frac{\rho_0}{k} \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) g \sin \beta;$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\rho_0}{k} \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) g \cos \beta \quad (6)$$

Чтобы избавиться в уравнениях (6) от давления, продифференцируем сначала второе уравнение по x , а затем проинтегрируем его по y и, подставляя полученное выражение в первое уравнение, будем иметь

$$\rho_0 \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} - \frac{\lambda \rho_0 |\tilde{u}|}{2d} \tilde{u} + \frac{\rho_0}{k} (\bar{T} - 1) g \sin \beta = \frac{\rho_0 g}{k} \cos \beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} y + A \quad (7)$$

где $\bar{T} = \frac{T}{T_0}$ – относительная температура.

Примем в первом приближении, что входящая в уравнение (7) температура является функцией только от x . Выделим частное решение уравнения (7), что позволяет найти константу интегрирования A в виде

$$A = -\frac{\lambda \rho_0 |\tilde{u}_1|}{2d} \tilde{u}_1 + \frac{\rho_0}{k} (\bar{T} - 1) g \sin \beta \quad (8)$$

Подставляя константу интегрирования (8) в уравнение (7), будем иметь

$$\rho_0 \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} - \frac{\lambda \rho_0 |\tilde{u}|}{2d} \tilde{u} = \frac{\rho_0 g}{k} \cos \beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} y - \frac{\lambda \rho_0 |\tilde{u}_1|}{2d} \tilde{u}_1 \quad (9)$$

Выделяя частное решение уравнения (9) с учётом только турбулентного режима ($\nu = 0$), получим

$$\tilde{u}_c = \sqrt{|\tilde{u}_1| \tilde{u}_1} - \frac{2dg}{\lambda k} \cos \beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} y \quad (10)$$

Если под корнем будет отрицательная величина, то принимается это число без знака, а знак ставится перед корнем.

Из полученной формулы следует, что, так как температура вне пожара уменьшается с удалением от него, то производная от температуры будет всегда отрицательной. Следовательно, под корнем второе слагаемое в формуле (10) над осью симметрии выработки всегда положительное. Поэтому при восходящем проветривании над осью скорость воздуха будет увеличиваться, а при нисходящем проветривании будет уменьшаться. Под осью выработки всё будет наоборот. При отрицательной скорости воздуха над осью выработки произойдёт опрокидывание потока при определённых условиях, а под осью – увеличение скорости.

При только турбулентном движении, как видно, скорость воздуха на стенках выработки не обращается в нуль. Об этом говорят и данные [5]. Однако у стенок выработки существует пограничный ламинарный слой, и здесь скорость должна обращаться в нуль.

Будем решать уравнение (9) без правой части, принимая при этом $|\tilde{u}| = |\tilde{u}_1|$. Корни характеристического уравнения, соответствующего этому уравнению равны

$$n_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{\lambda |\tilde{u}_1|}{2\nu d}} \quad (11)$$

Это позволяет представить искомое решение уравнения (9) в виде

$$\tilde{u} = B_1 \exp(n_1 y) + B_2 \exp(n_2 y) + \tilde{u}_c \quad (12)$$

где B_1 и B_2 – константы интегрирования, м/с.

Константы интегрирования определим из условия, что на кровле и почве выработки скорость обращается в нуль, а на оси симметрии она равна скорости основного потока:

$$1) \tilde{u}(0) = \tilde{u}_c; \quad 2) \tilde{u}(H/2) = 0; \quad 3) \tilde{u}(-H/2) = 0 \quad (13)$$

где H – высота выработки, м.

Исходя из этих условий, получим

$$B_1 = -B_2 = \frac{\text{sign}(y) \tilde{u}_c [\text{sign}(y)H/2]}{\exp(n_2 H/2) - \exp(n_1 H/2)} \quad (14)$$

3. Результаты

На основании полученных результатов на рис. 2 изображены профили скорости воздушного потока согласно полученным зависимостям.

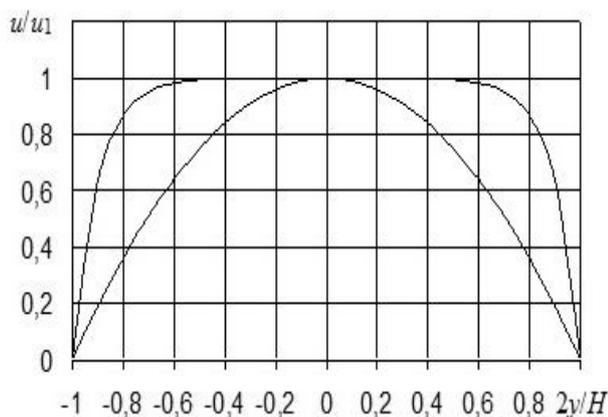


Рис. 2. Профиль скорости воздушного потока до пожара при ламинарном (тонкая линия) и смешанном (жирная линия) режимах движения

Fig. 2. Velocity profile of the laminar (thin line) and combined (solid line) air flow before the fire

Источник: Собственное исследование.

Source: Own elaboration.

Как показывают результаты расчёта, при отсутствии пожара, профиль скорости воздушного потока при учёте ламинарного и турбулентного режимов движения наиболее точно описывает скоростную структуру потока воздуха в отличие от обычно используемой кривой параболы для ламинарного потока, либо прямой линии при турбулентном движении, когда на стенках выработки скорость не равна нулю. При ламинарном режиме движения профиль скорости изображается в виде параболы [8]. При расчётах принимались наиболее соответствующие реальному объекту исходные данные: скорость воздуха $u_1 = 1,0$ м/с; высота выработки и приведенный диаметр $d = H = 2$ м; коэффициент аэродинамического сопротивления выработки $\lambda = 0,1$; коэффициент кинематической вязкости воздуха $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с [8].

На рис. 3 представлены результаты расчёта профиля скорости воздуха перед очагом пожара. При расчётах использовались те же исходные данные, что и в предыдущем примере и плюс дополнительные данные: ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с²; угол наклона выработки к горизонту $\beta = 0$; коэффициент термического расширения воздуха $k = 2,5$; $x = 10$ м.

Анализ полученных результатов показывает, что при отсутствии пожара профиль скорости воздуха симметричен относительно оси выработки. При возникновении пожара наблюдается деформация профиля скорости, которая выражается в том, что ядро потока смещается к почве выработки, и воздух как бы оттесняется от кровли. Наконец, наступает такой момент, что в верхней части выработки происходит опрокидывание потока.

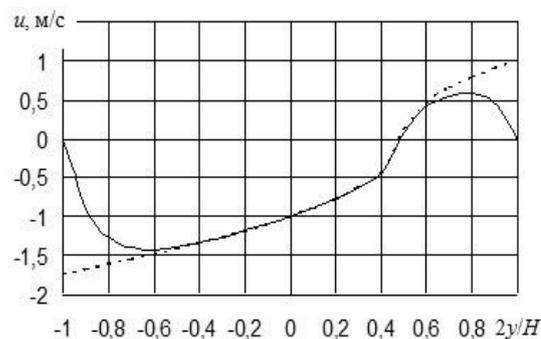


Рис. 3. Профиль скорости воздушного потока на расстоянии 10 м до пожара при смешанном режиме течения (жирная линия) и при только турбулентном режиме (штриховая линия)

Fig. 3. Velocity profile of the combined air flow (solid line) and only turbulent flow (dashed line) at a distance of 10 m from the fire

Источник: Собственное исследование.

Source: Own elaboration.

Как видно из рис. 3, на расстоянии 10 м от очага пожара наблюдается опрокидывание потока воздуха. В верхней части выработки, несмотря на отсутствие движения воздуха у самой кровли, скорость против основного движения даже превышает 0,5 м/с при средней 1 м/с. Профиль скорости при только турбулентном режиме получен в работе [3].

Дальнейшие результаты моделирования показывают (рис. 4), что даже на расстоянии 20 м от очага пожара профиль скорости деформирован и по-прежнему в верхней части выработки воздуха, поступающего к очагу пожара меньше, чем в нижней части.

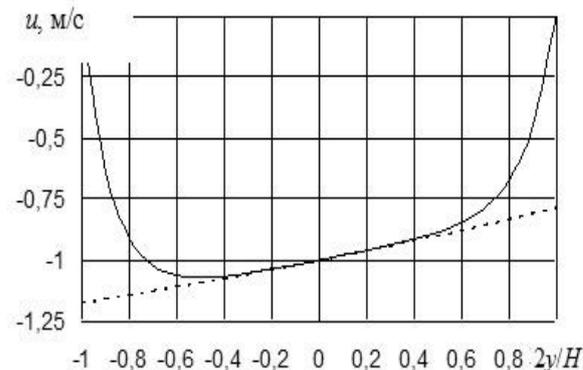


Рис. 4. Профиль скорости воздушного потока на расстоянии 20 м до пожара при смешанном режиме течения (жирная линия) и при только турбулентном режиме (штриховая линия)

Fig. 4. Velocity profile of the combined air flow (solid line) and only turbulent air flow (dashed line) at a distance of 20 m from the fire

Источник: Собственное исследование.

Source: Own elaboration.

Полученные результаты показывают (см. рис. 3 и 4), что учёт смешанного режима течения газов (одновременно турбулентного и ламинарного) наиболее правильно отражает скоростную структуру вентиляционного потока в отличие от обычно используемого в расчётах линейного распределения скорости или па-

рабочего, отмеченного на рисунках штриховыми линиями.

При описании профиля температуры необходимо используется линейное распределение температуры по высоте выработки [7]. Очевидно, при образовании встречного потока воздуха температуры в верхней и нижней частях выработки будут резко отличаться друг от друга.

Для описания профиля температуры перед и за очагом пожара используем уравнение сохранения энергии в виде

$$\tilde{u} \frac{dT}{dx} = a \frac{d^2T}{dx^2} + \bar{\alpha}(T_0 - T) \quad (15)$$

где a – коэффициент турбулентной теплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; $\bar{\alpha} = \frac{a\Pi}{c\rho_0 S}$ – удельный коэффициент теплообмена со стенками выработки, $1/\text{с}$; a – коэффициент теплообмена смеси газов со стенками выработки, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; Π – периметр поперечного сечения выработки, м ; S – площадь поперечного сечения выработки, м^2 ; c – удельная теплоемкость газов при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Решение уравнения (15) можно представить в виде

$$T(x,y) = T_0 + (T_1 - T_0) \exp \left[\left(\frac{\tilde{u}}{2a} - \sqrt{\frac{\tilde{u}^2}{4a^2} + \frac{\bar{\alpha}}{a}} \right) x \right] \quad (16)$$

Полученная зависимость (16) позволяет производить прогноз температур, как по потоку воздуха, так и против него, используя ещё, кроме того, зависимость (12).

На рис. 5 приведены профили температуры на различных расстояниях перед очагом пожара при средней скорости движения воздуха $1,0 \text{ м/с}$. Остальные исходные данные принимались такими же, как и в предыдущих примерах.

Анализ полученных результатов показывает, что вблизи очага пожара наблюдаются высокие температуры в верхней части выработки, где произошло опрокидывание вентиляционного потока. С увеличением расстояния до очага температура в верхней части выработки резко уменьшается и шлейф пожарных газов становится всё тоньше. В нижней же части выработки температура перед очагом пожара увеличивается незначительно.

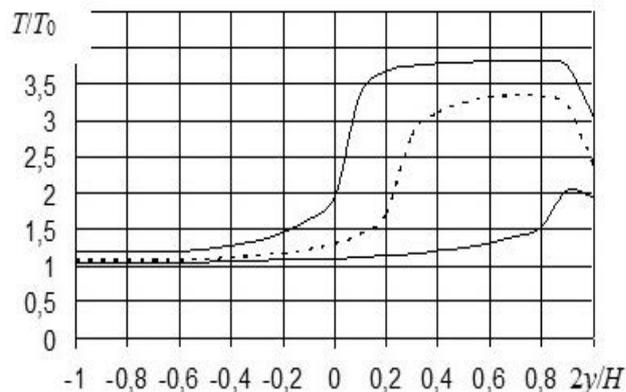


Рис. 5. Профили температуры на расстоянии 5 м (жирная линия), 10 м (штриховая линия) и 15 м (тонкая линия) до пожара

Fig. 5. Temperature profiles at a distance of 5 m (solid line), 10 m (dashed line) and 15 m (thin line) from the fire

Источник: Собственное исследование.

Source: Own elaboration.

4. Дискуссия по поводу методов и результатов

Результаты разработанного метода исследований взаимодействия конвективных потоков существенно отличаются от известных методов тем, что профили скорости воздушного потока отражают реальную картину турбулентного течения газов в ядре потока с переходом к ламинарному режиму у стенок выработки, где образуется пограничный слой. Полученные профили температуры отображают наблюдаемую картину шлейфа пожарных газов под кровлей выработки с постепенным его рассеиванием. Данный метод позволяет определить длину, как встречного потока газов, так и длину высокотемпературного шлейфа при развитии пожара, когда длина шлейфа будет максимальной.

5. Подведение итогов. Выводы

Разработана математическая модель движения конвективных потоков в окрестности очага развитого пожара при одновременно ламинарном и турбулентном режимах в поле гравитации. Установлено, что подъёмные силы, возникающие в очаге пожара, деформируют профили скорости и температуры особенно под кровлей выработки, опрокидывая в этом месте основной поток воздуха и перемещая его в нижнюю часть выработки. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения при прогнозе возможности проникновения пожарных газов на свежие струи в наиболее опасной ситуации при развитии пожара.

Литература

1. Eisner H.S., Smith P.B., *Convection effects from underground fires*, "Colliery Guardian", Vol. 189, Issue 4879, 1954, pp. 311-315.
2. Gladkov Yu. A., Belik I.P., Privalov N.I., *Opyt likvidatsii slozhnykh aviariy na ugol'nykh shakhtakh Ukrainy*, Tekhnika, Kiev 1992, p. 192.

3. Drayzdel D., *Vvedeniye v dinamiku pozharov*, Stroyizdat, Moscow 1990, p. 424.
4. Pashkovskiy P.S., Kravchenko N.M., *Ugroza proniknoveniya pozharnykh gazov navstrechu svezhey struye vozdukhа v vyrabotkakh*, „Ugol’ Ukrainy”, Issue 1, 2003, pp. 54-56.
5. Kravchenko N.M., *Vliyaniye poperechnoy sostavlyayushchey temperaturnogo gradiyenta na obrazovaniye vstrechnogo potoka pozharnykh gazov*, “Gornospasatel’noye delo”, Issue 45, 2008, pp. 116-123.
6. Lykov A.V., *Teplomassoobmen: spravochnik*, Energiya, Moscow 1980, p. 580.
7. Grashchenkov N.F., Petrosyan A.E., Frolov M.A., *Rudnichnaya ventilyatsiya: spravochnik*, Nedra, Moscow 1988, p. 440.
8. Loytsyanskiy L.G., *Mekhanika zhidkostey i gazov*, Drofa, Moscow 2003, p. 840.
9. Kravchenko N.M., Kravchenko M.V., *Raschet kontsentratsii metana v seti gornykh vyrabotok s uchetom vliyaniya vstrechnykh gazovykh potokov*, “Gornospasatel’noye delo”, Issue 50, 2013, pp. 44-49.

Петр Семенович Пашковский – окончил Донецкий политехнический институт, Харьковский инженерно-экономический институт, доктор технических наук, профессор, академик Академии горных наук Украины, первый заместитель директора Научно-исследовательского института горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респиратор» по научной работе, заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины.

Игорь Николаевич Зинченко – окончил Воронежский государственный университет, кандидат технических наук, ведущий инженер отраслевого научно-исследовательского отдела борьбы с эндогенными пожарами в шахтах и на породных отвалах Научно-исследовательского института горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респиратор».

Виктор Зиновьевич Брюм – окончил Донецкий политехнический институт, директор Петровского завода угольного машиностроения, создатель унифицированной телекоммуникационной системы диспетчерского контроля, которая предотвращает аварии.