

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА ПРИ ПОЖАРЕ

А.Б. Садыгов

*Институт кибернетики НАНА,  
ул. Ф. Агаева, 9, г. Баку, AZ-1141, Азербайджанская Республика, [aminaga@box.az](mailto:aminaga@box.az)*

Рассмотрено моделирование движения воздушных потоков в подземных сооружениях метрополитена при пожаре с помощью численных методов маркеров и ячеек, а также Simpler-метода Патанкара. Получено аналитическое выражение динамики расхода газа в тоннеле в зависимости от источников принудительной и свободной конвекции, с учётом теплового сопротивления и депрессии инерционных сил. Показано, что период стабилизации вентиляции в отдельных случаях соизмерим со временем эвакуации пассажиров из тоннеля, что создаёт дополнительную угрозу их безопасности. Установлено, что проведение вентиляционных манёвров в период эвакуации может ухудшить тепловую и газовую обстановку в тоннеле. Поэтому выбор аварийного режима должен производиться только после прогноза результатов его реализации с учётом длительности периода стабилизации.

Предлагаемая модель плоского течения газа в технических и служебных помещениях метрополитена позволяет исследовать поля скоростей при различном расположении и произвольных размерах тепловых источников как при наличии, так и при отсутствии принудительной вентиляции. Данный метод численного моделирования плоского течения может быть использован и для условий пожара подвижного состава в путевых тоннелях с целью прогноза возникновения дымовых шлейфов в период развития пожара.

УДК 614.49

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проблема обеспечения безопасности людей при пожарах в метрополитене приобретает все большую остроту. Это обусловлено не столько ростом количества пожаров, сколько масштабами их последствий. Большое количество людей, которые могут одновременно пребывать в ограниченном пространстве строений метрополитена, а также объективные и субъективные трудности проведения спасательных работ, локализации и ликвидации пожара могут привести к катастрофическим последствиям.

В этой связи представляются актуальными исследования, направленные на разработку методов прогнозирования движения в замкнутом пространстве газоздушных потоков как опасного проявления пожара, что и является целью этой работы.

Обеспечение безопасности людей при тушении пожаров в метрополитенах в первую очередь зависит от размеров зоны поражения пожаром (ЗПП). Она представляет собой область распространения опасных факторов пожара: высокой температуры и токсичных продуктов сгорания (оксиды углерода, твердые частицы и т.д.).

При разработке мероприятий по противопожарной защите объектов метрополитена необходимо иметь объективные данные о закономерностях распределения скоростей газовых потоков и теплоты в помещениях этих объектов. Поля температуры и токсичных примесей формируются под воздействием депрессии вентиляторов проветривания или тепловых источников тяги естественной (свободной) конвекции. В свою очередь температурный и газовый режимы объекта сказываются на режиме вентиляции аварийного объекта. Как правило, физические свойства газовой среды при пожаре отличаются пространственной неоднородностью.

В настоящей работе предполагается, что процессы тепломассопереноса и горения в объёме аварийного объекта практически не зависят от одной или двух пространственных координат и являются одномерными (двумерными плоскими). Такая постановка задачи возможна в случае сосредоточения пожарной нагрузки вдоль направления вентиляционной струи (подвижной состав метрополитена в путевом тоннеле) или при точечном (сферическом) очаге пожара (эскалаторный тоннель, технические и служебные помещения). При исследовании более сложных случаев распределения горючих материалов на объекте предполагается очаг пожара задавать эквивалентным источником по двум характерным размерам [1].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Перенос количества движения, массы и теплоты моделируется системой уравнений обобщённого вида [2–4]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = I, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время;  $x, y$  – пространственные координаты;  $\rho$  – плотность газа;  $J_x = \rho u\Phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x}$ ;

$J_y = \rho v\Phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y}$  – суммарные конвективно-диффузионные потоки массы, количества движения, теплоты или газовой примеси, размерность которых зависит от вида переносимой субстанции;  $\Phi$  – физическая переменная (скорость, плотность, температура, содержание примеси);  $I$  – источник, размерность которого зависит от вида переносимой субстанции.

В частности, в двумерной постановке, на основании (1), при  $\Gamma = \mu$  – динамической вязкости газа и составляющих скоростей по  $x(\Phi = u)$  и по  $y(\Phi = v)$ :

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 - \mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u - \mu \frac{\partial u}{\partial x}) = -\frac{\partial u}{\partial x} + I_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v - \mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 - \mu \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial v}{\partial y} + I_y, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность газовой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $P$  – давление, Па;  $I_x, I_y$  – источники тяги (движения), Н/м<sup>3</sup>.

При  $\Gamma=0$ ;  $\Phi=1$  и массовом источнике  $I = I_m$ , кг/(м<sup>3</sup>·с), из (1) получается уравнение неразрывности (сплошности) газового потока:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) = I_m. \quad (4)$$

Двумерная постановка задачи гидродинамики газовых потоков производится при исследовании тепломассопереноса для объектов с соизмеримыми размерами в направлениях  $x$  и  $y$  (технические и служебные помещения метрополитена). Продольные размеры тоннелей значительно превышают поперечные. Например, высота поперечного сечения путевого тоннеля не превышает  $H = 5$  м; характерная длина от станции до перегонной вентиляционной шахты  $L = 500$  м. Поэтому для случая пожара в тоннеле рассматривается уравнение движения (в том числе и дымовых шлейфов), полученное в результате осреднения физических переменных, входящих в (2)–(3), по сечению газового потока, в направлении  $y$ . Содержание входящих в (2)–(3) величин также характеризуется на основании этого уравнения, имеющего вид

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho u) + \frac{k}{2} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\lambda}{2D} \rho u^2 + I_d, \quad (5)$$

где средние величины физических переменных обозначены, как и фактические. Коэффициент  $k$  (Кориолиса) характеризует поправку на неравномерность распределения скорости в поперечном сечении  $S$  потока с периметром  $\Omega$  и гидравлическим диаметром  $D = 4S/\Omega$ . Для ламинарных потоков  $k = 2$ , для турбулентных  $k = 1,1$ .

Величина коэффициента  $\lambda$  пропорциональна динамической вязкости газа, шероховатости стенок канала движения и уменьшается с повышением скорости потока, то есть зависит от вязкостных свойств газа и режима его движения. Она определяет силы трения (напряжение внутреннего трения) между слоями потока, а также между потоком и стенками канала. В общем случае

$$\lambda = \left[ \frac{1}{D} (\varepsilon \lambda_0 + \frac{v}{u_0} \lambda_1) \right]^m, \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – шероховатость стенок канала движения потока;  $\lambda_0, \lambda_1, m$  – эмпирические константы;  $\nu = \mu / \rho_0$  – кинематическая вязкость;  $p_0$  – характерная плотность газа;  $u_0$  – характерная скорость потока.

В рудничной аэрологии [5] и при аэродинамических расчётах тоннелей метрополитенов [6] вместо  $\lambda$  используется комплекс  $\alpha_{TP} = 9,81 \text{ кг/м}^3$ , связанный с  $\lambda$  соотношением

$$\frac{\lambda p_0}{2D} = \frac{\lambda \gamma_0 \cdot \Omega}{8 \cdot g \cdot S} = \alpha_{TP} \frac{\Omega}{S}, \quad (7)$$

где  $\gamma_0$  – удельный вес воздуха.

Выражение

$$f_{II} = \frac{k}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2) \quad (8)$$

представляет инерционные силы в единице объёма газа. За счёт этих сил изменение режима движения потока происходит с определённым запаздыванием по сравнению с динамикой источников движения. При оценке устойчивости вентиляционных струй этим фактором обычно пренебрегают, что не допустимо при исследованиях ЗПП.

Потери давления потока по пути движения (первое слагаемое правой части уравнения (5)) обусловлены силами трения

$$f_T = \frac{\lambda}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2), \quad \text{Н/м}^3, \quad (9)$$

противодействующими изменению во времени массового расхода газа (первое слагаемое левой части уравнения) и силам инерции. Главной характеристикой потока является отношение сил инерции к силам трения. Принято, что источник движения  $I_D$  обусловлен гравитационными силами, возникающими ввиду неравномерности распределения плотности газовой среды в пределах объекта и существенного её отличия от плотности окружающей среды. В соответствии с [7] величина источников представляется двумя проекциями вектора гравитационных сил на направление потока:

$$I_D = \left( \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} H \cos \beta + \rho \sin \beta \right) \cdot g. \quad (10)$$

Первая из них,  $I_L = \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} H g \cos \beta$  – величина гравитационных сил на единицу объёма тоннеля, возникающих в результате изменения плотности воздуха, в направлении воздушного потока по мере его движения. Эти силы формируются за счёт локального статического давления  $\vec{p}_{CL}$  столба воздуха в поперечном сечении потока [7] в направлении  $x$  (рис. 1). Вторая,  $f_B = \rho g \sin \beta$  – обусловлена воздействием статического давления  $\vec{p}_{CB}$  столба воздуха в пределах всего тоннеля в том же направлении. Несмотря на одинаковую природу формирования, эти две составляющие гравитационных сил могут иметь разные знаки. Величина  $f_L$  становится отрицательной, если поток движется к очагу пожара (плотность снижается, температура повышается).

Приращение давления в тоннеле, вызванное наличием первой составляющей, не превышает давления столба воздуха высотой, равной половине высоты поперечного сечения тоннеля. При постоянной плотности воздуха в тоннеле оно отсутствует. Обычно локальное давление не учитывается ввиду малости по сравнению с барометрическим или нивелирным (глобальным статическим давлением). При нормальных условиях проветривания это вполне правомерно, так как плотность воздуха в пределах тоннеля практически не изменяется. Однако при пожаре, особенно в горизонтальных тоннелях, локальное давление имеет принципиальное значение, так как именно под его воздействием происходит расслоение воздушного потока на два противоположных: тёплый, под сводом тоннеля, и холодный, у его основания. При этом величина  $f_L$  характеризует Архимедовы силы всплытия нагретых масс воздуха в поперечном сечении тоннеля. Возникающая за счёт этого тепловая депрес-

сия в дальнейшем обозначается  $h_{л}$  и называется локальной тепловой депрессией, а известная в аварийной вентиляции тепловая депрессия пожара [8], обусловленная второй составляющей статического давления, обозначается общепринятым символом  $h_{г}$  и называется глобальной тепловой депрессией.

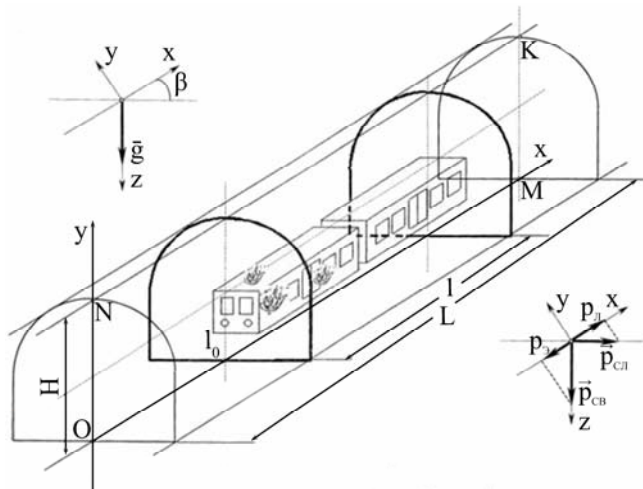


Рис. 1. Расчетная схема аварийного участка метрополитена

Так как скорость вентиляционных струй в подземных сооружениях метрополитена в редких случаях достигает 2 м/с и далека от скорости звука, газовую среду можно считать несжимаемой. Тогда уравнение неразрывности (4) для условий тоннеля представляется в стационарном виде (локальное изменение плотности во времени за счёт сжимаемости газа не учитывается):

$$\rho u = \rho_0 u_0. \quad (11)$$

Вместе с тем газовая среда считается термически деформируемой и моделируется уравнением состояния газа вида [9]:

$$\rho T = \rho_0 T_0, \quad (12)$$

где  $T_0$  – температура воздуха при нормальных условиях,  $K$ .

В качестве  $\rho_0 \cdot u_0$  и  $T_0$  могут быть приняты значения этих физических переменных в начальном сечении тоннеля со стороны свежей вентиляционной струи.

В результате интегрирования (5) по длине тоннеля на участке  $l_0$ , перед очагом пожара со стороны свежей вентиляционной струи, с учётом (10)–(12) получаем следующее уравнение:

$$\frac{\partial q}{\partial \bar{\tau}} = Eu - rq^2 - (F_r + Ri), \quad (13)$$

где  $q = \frac{uS}{u_0 S_0}$  – относительная величина расхода воздуха в тоннеле  $Q = uS$ ;  $S_0$  – площадь поперечного сечения на входе вентиляционной струи в тоннель;  $\rho_0 = 1,2$ ;  $\bar{\tau} = u_0 \tau / l_0$  – относительная величина времени;  $\tau = l_0 / u_0$  – характерное время;  $Eu = h_{kp} / P_0$  – число Эйлера;  $h_{kp}$  – первый параметр приведенной характеристики вентилятора в соответствии с выражением:  $h_{ВЕНТ} = h_{kp} - b \cdot Q^2$ , величина которого равна максимальной депрессии вентиляторов, приходящейся на аварийный тоннель;  $b$  – второй параметр приведенной характеристики вентилятора, величина которого равна эквивалентному аэродинамическому сопротивлению вентиляционной сети метрополитена;  $P_0 = \rho_0 u_0^2$  – харак-

терное давление в тоннеле;  $r = (k_T - K_H) \cdot r_T + r_c$  – относительная величина аэродинамического сопротивления тоннеля и вентиляционной сети;  $k_T = T_{cp} / T_0$  – коэффициент теплового сопротивления;

$T_{cp} = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} T dx$  – средняя температура газовой среды в тоннеле;  $T_K$  – температура в очаге пожара;

$r_T = \frac{\lambda \Omega}{8S} l_0$  – относительная величина аэродинамического сопротивления тоннеля;  $r_c = \frac{bS^2}{\rho_0}$  – относительная величина аэродинамического сопротивления примыкающей к тоннелю вентиляционной сети;

$k_H = \frac{1+k}{2 \cdot r_T} \cdot \left(\frac{T_K}{T_0} - 1\right)$  – коэффициент сопротивления (проводимости), обусловленный силами инерции;

$Fr = \left(1 - \frac{T_0}{T_{cr}}\right) \cdot \frac{g \Delta z}{\rho_0 u_0^2} = h_T / P_0$  – число Фруда, или относительная величина глобальной тепловой депрессии;  $\Delta z = l_0 \sin \beta$  – приращение глубины тоннеля на участке  $l_0$ ;  $\beta$  – угол наклона (уклон) тоннеля;

$T_{cr} = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} \frac{dx}{T}$  – среднегармоническое значение температуры;  $Ri = \left(\frac{T_K}{T_0} - 1\right) \cdot \frac{g \Delta \delta}{\rho_0 u_0^2} = h_L / P_0$  – число Ричардсона, или относительная величина локальной тепловой депрессии;  $\Delta \delta = \frac{1}{2} H \cos \beta$  – поперечный размер газового потока.

Аналогичным образом можно представить уравнение движения газа в тоннеле на участке за очагом пожара по направлению вентиляционной струи.

Таким образом, в соответствии с (13) динамика массового расхода газового потока в тоннеле обусловлена депрессией принудительной конвекции ( $Eu$ ) и свободной конвекции ( $Fr$ ,  $Ri$ ). Потери депрессии за счёт сил трения складываются из теплового сопротивления ( $k_T$ ); аэродинамического сопротивления вентиляционной сети ( $r_T, r_c$ ) и сопротивления инерционных сил ( $k_H$ ). При нормальных условиях проветривания  $T_{cp} = T_{cr} = T_0$ ;  $k_T = 1$ ;  $k_H = 0$ ;  $Fr = Ri = 0$  и расход воздуха в тоннеле составляет

$$Q_0 = u_0 S_0 = \sqrt{\frac{h_{kp}}{R_T + p}}, \quad (14)$$

где  $R_T = \frac{\lambda \Omega \rho_0}{8S^3} L$  – аэродинамическое сопротивление тоннеля. При этом всюду  $Q = 1$ .

Для условий пожара (13) имеет решение

$$q = \text{Sign}(Eu - Fr - Ri) \cdot \sqrt{\frac{Eu - Fr - Ri}{R}} \text{th}(\sqrt{(Eu - Fr - Ri) \cdot R} \cdot \bar{\tau}) + q^*, \quad (15)$$

где  $q^*$  – относительная величина начального расхода воздуха.

Из (15) следует, что опрокидывание газового потока возможно в случае  $Fr + Ri > Eu$ . В соответствии с [7] для стабилизации вентиляционной струи необходимо произвести мероприятия по повышению критической депрессии вентиляционного канала.

Если предположить, что массовый расход газового потока (дымового шлейфа) после опрокидывания составляет половину расхода при нормальных условиях проветривания  $q^* = -0,5$ , то для восстановления прежнего направления вентиляционной струи с расходом  $q = 0,5$ , как показывают расчёты по формуле (15), при  $Eu = 2,0$ ;  $Fr = 1,0$ ;  $Ri = 0,0$ ;  $k_T = 1,0$ ;  $r_T = 1,0$ ;  $r_c = 0,0$  потребуются время  $\bar{\tau} = 2,5$  (рис. 2, кривая 1).



Рис. 2. Динамика расхода газа при различных соотношениях свободно-принудительных источников тяги. 1 –  $Fz = 1,0$ ;  $Ri = 0,0$ ;  $k_T = 1,0$ ;  $r_T = 1,0$ ;  $r_C = k_H = 0,0$ ; 2 –  $k_T = 2,0$ ; 3 –  $Ri = 0,5$ ; 4 –  $k_H = 1,0$

Если в качестве характерной скорости выбрать  $u_0 = 2,0$ , то для участка тоннеля длиной  $l_0 = 600$  м и характерного времени  $\tau_0 = l_0 / u_0 = 5,0$  мин переход на стабильный вентиляционный режим займёт более 10 мин. Это время соизмеримо со временем эвакуации пассажиров из горящего в тоннеле поезда до станции. Следует учитывать, что в начале периода стабилизации на маршруте эвакуации возможен всплеск содержания токсичных примесей ввиду того, что в очаг пожара будут возвращаться продукты горения.

Если учесть наличие теплового сопротивления (рис. 2, кривая 2), то за время стабилизации расход воздуха составит  $q = 0,2$ , то есть менее половины ожидаемого значения. Наличие локальной тепловой депрессии и инерционных сил приводит к тому, что проветривание тоннеля прекращается, то есть  $q = 0,0$  (рис. 2, кривые 3 и 4).

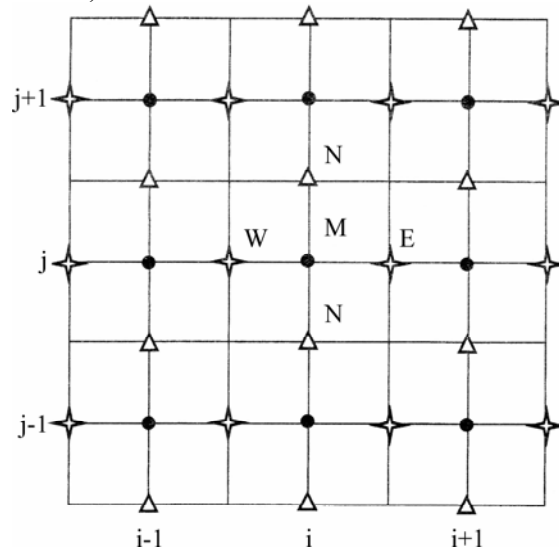


Рис. 3. Система ячеек и позиции для расчёта в методе маркеров и ячеек. • – узел давления (центр ячейки); \* – узел продольной скорости; Δ – узел поперечной скорости

Таким образом, проведение вентиляционных манёвров в период эвакуации может ухудшить тепловую и газовую обстановку в тоннеле. Поэтому выбор аварийного режима должен производиться только после прогноза результатов его реализации с учётом длительности периода стабилизации.

Моделирование плоских течений газовых потоков в технических и служебных помещениях производилось на основании системы уравнений (2)–(3) с помощью численных методов маркеров и ячеек (MAS) [2], а также Simplex-метода Патанкара [3]. В обоих методах используется шахматная (гибридная) сетка (рис. 3). В основных узлах  $M(i, j)$  вычисляется давление, а в фиктивных, отстоящих от основных на некотором расстоянии  $\delta x/2$  и  $\delta y/2$ , определяются продольная и поперечная составляющие скорости. В методе Патанкара профили скорости в пределах окрестности основных узлов представляются различными зависимостями от числа Рейнольдса (Пекле, Прандтля). В результа-

те конвективно-диффузионные потоки заменяются конечно-разностными аналогами, например, вдоль продольной координаты:

$$J_x = B\Phi_i - A\Phi_{i+1}, \quad (16)$$

где  $i$  – номер узла сетки;  $\Phi_i - \Phi_{i+1}$  – значения физической переменной в соответствующих узлах;

$A$  и  $B$  – функции сеточного числа Рейнольдса,  $Re = \frac{\rho_0 u_0 \delta x}{\mu}$ ;  $\mu_0$  – динамическая вязкость газа при нормальных условиях.

При линейной аппроксимации профиля скорости Simplex-методом конечно-разностный аналог уравнений движения совпадает с их конечно-разностным представлением по методу MAS. Однако вычисления поправок давления производились по Simplex-методу, так как решение уравнения Пуассона для давления в MAS сопровождалось возникновением рециркуляционных потоков на границах расчётной области и отличалось медленной сходимостью. На рис. 4, 5 представлены результаты моделирования поля скоростей газовых потоков при различных вариантах расположения очага пожара в помещении. В случае горения нижней границы (пола) и отсутствия принудительной вентиляции (рис. 4) наблюдается симметричное поле скоростей, обусловленное свободной конвекцией. Расчёты производились в безразмерных величинах скорости, отнесенных к характерной скорости 1 м/с. В области 1 наблюдаются концентрические линии равных скоростей, причём значения скоростей убывают по мере удаления от центра области. Вторая область – симметрична первой, в неё входят потоки с отрицательными скоростями. Симметрия существенно нарушается при наличии притоков воздуха в помещения за счёт депрессии вентиляторов проветривания.

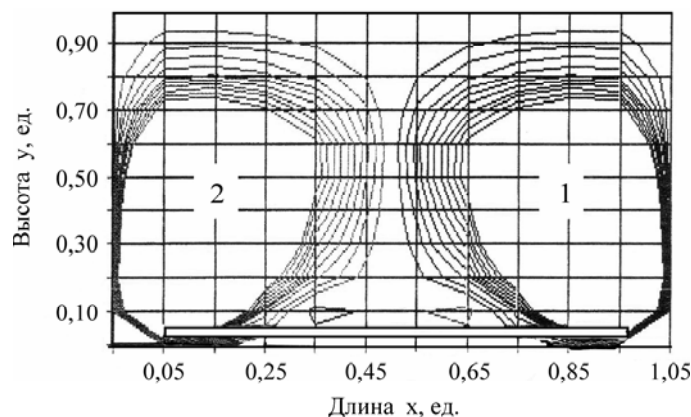


Рис. 4. Результаты моделирования поля скоростей в объеме помещения при отсутствии вентиляции и горении нижней границы. 1 – область положительных значений скорости в диапазоне 0,01–0,10 от характерного значения 1,00 м/с, с шагом 0,01; 2 – симметричная область отрицательных значений

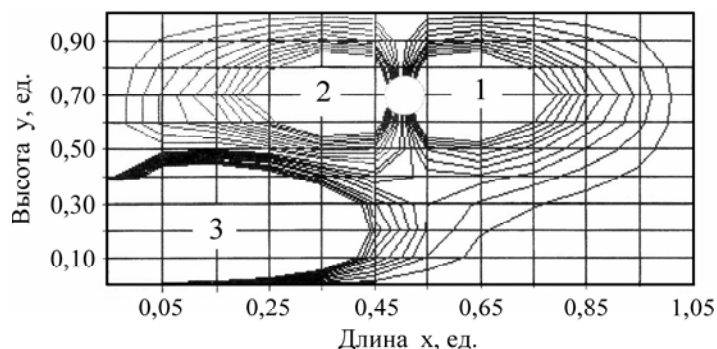


Рис. 5. Результаты моделирования поля скоростей в объеме помещения при поступлении вентиляционной струи в нижней части левой границы и точечном тепловом источнике у середины верхней границы. 1 – область положительных значений скорости в диапазоне 0,01–0,10 от характерного значения 1,00 м/с, с шагом 0,01; 2 – симметричная область отрицательных значений; 3 – область поступающей вентиляционной струи в диапазоне скоростей области 1

На рис. 5 показаны три области полей скорости газовых потоков. Третья область поступающих свежих воздушных масс со временем нарушает симметрию полей свободной конвекции.

Данный метод численного моделирования плоского течения может быть использован и для условий пожара подвижного состава в путевых тоннелях с целью прогноза возникновения дымовых шлейфов в период развития пожара.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате проведенных теоретических исследований получено аналитическое выражение (15) динамики расхода газа в тоннеле в зависимости от источников принудительной и свободной конвекции, с учётом теплового сопротивления и депрессии инерционных сил. Показано, что период стабилизации вентиляции в отдельных случаях соизмерим со временем эвакуации пассажиров из тоннеля, что создаёт дополнительную угрозу их безопасности. Однако реальное время переходных процессов в ходе проведения вентиляционных манёвров при пожаре подвижного состава в путевых тоннелях может быть определено после проведения экспериментальных исследований.

Представленная численная модель плоского течения газа в технических и служебных помещениях метрополитена позволяет исследовать поля скоростей при различном расположении и произвольных размерах тепловых источников как при наличии, так и при отсутствии принудительной вентиляции. Практическое применение этой модели возможно только после создания базы данных о типичных пожарах в подземных сооружениях метрополитена и проведения статистического анализа тепловой мощности и размеров очагов пожара, а также вентиляционной обстановки в объёме аварийных объектов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Недра, 1970. 904 с.
2. Роуч П. *Вычислительная гидродинамика*. М.: Мир, 1980. 616 с.
3. Патанкар С. *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкостей*. М.: Энергоатомиздат, 1993. 150 с.
4. Косарь А.М., Пашковский П.С. Моделирование движения воздушных потоков в подземных сооружениях. *Науковий вісник УКРНДППБ*. Киев, 2002, 2(6), 38–47.
5. Бодягин М.Н. *Рудничная вентиляция*. М.: Недра, 1967. 310 с.
6. Виноградов Ю.И., Бондарев В.Ф. Исследование аэродинамических параметров сооружений метрополитена для создания аварийных режимов вентиляции. *Сб. науч. трудов. Противопожарная защита подземных сооружений метрополитенов*. М., 1984. С. 64–68.
7. Ильин В.В. Основные принципы физического моделирования пожаров в метрополитенах. *Пожаровзрывобезопасность*. 1994, (3), 37–44.
8. *Руководство по выбору эффективных режимов проветривания шахт при авариях*. Донецк, ВНИИГД, 1986. 123 с.
9. Болбат И.Е., Смоланов С.Н., Ревякин А.В. Исследование температурных условий в пожарной выработке при “нулевом” режиме вентиляции. *Известия Донецкого горного института*. 1996, (2), 39–44.

Поступила 14.07.11

### Summary

The modeling of movement of airflows during the fire in underground constructions of metropoliten by the numerical methods of markers and cells and Simpler-method of Patankar is considered in the paper. By taking into accounts the thermal resistance and depression of the inertial forces an analytical expression of the dynamics of gas flow in the tunnel, depending on the source of forced and free convection, is obtained. It is shown that the stabilization period of ventilation in some cases is commensurable to the time of evacuation from the tunnel, creating an additional threat to their security. It has been found out that carrying out of air maneuvers during the evacuation may deteriorate the thermal and gas environment in the tunnel. Therefore the choice of emergency operation should be performed only after the forecast of the results of its implementation, taking into account the duration of the stabilization period. The proposed model of plane flow of gas in the technical and commercial buildings of metropoliten allows investigating the velocity field at different positions and sizes of arbitrary heat sources, both in presence and in absence of forced ventilation. This method of numerical simulation of plane flow can be used for fire conditions in the rolling track in tunnels for the purpose of prediction of smoke plumes during the fire development.