

УДК 614.841.123.24

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ГОРЕНИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ТОННЕЛЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА

Арестович Д.Н.

Научно-исследовательский институт пожарной безопасности
и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь
e-mail: niipb@anitex.by

С применением методов технической теплофизики разработана аналитическая методика расчета температуры при горении подвижного состава в тоннелях метрополитена. Выполнен расчет для участка станция «Борисовский тракт» – станция «Уручье» Минского метрополитена и определено время безотказной работы вытяжных перегонных вентиляционных установок, величины пожарной тепловой депрессии в тоннеле и вентиляционной камере.

The applied method of engineering thermophysics allowed to develop the analytical method for temperature calculation in case of a fire in subway trains in underground tunnels. The calculation for the part on the line between «Borisovsky tract» and «Uruchcha» stations in Minsk underground was made and the time for reliable work of exhaust ventilation systems was determined, including the values of fire thermal depression in the tunnel and ventilation chamber.

(Поступила в редакцию 9 июля 2010 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее опасными в сооружениях метрополитена являются пожары подвижного состава. Надежность работы систем вентиляции является одним из определяющих факторов, обеспечивающих безопасную эвакуацию пассажиров и обслуживающего персонала из горящего поезда. Вентиляторы перегонной вентиляционной камеры несут основную нагрузку по созданию требуемого воздухораспределения при горении поезда на перегоне. Через перегонную вентиляционную камеру в случае пожара удаляются высокотемпературные продукты горения, которые определяют тепловой режим работы вентилятора. Работа при температуре, превышающей допустимую, может привести к отказу вентилятора. Время, за которое температура смеси удаляемых продуктов горения достигает критической отметки, является определяющим для расчета максимального времени ликвидации аварийной ситуации или вывода людей из зоны пожара и задымления. Для вентиляторов ВОМД-24, содержащих ременные передачи, в соответствии с условиями эксплуатации предельная температура составляет 60 °С. Кроме того, вентиляционный поток может изменить направление на противоположное вследствие развития тепловой депрессии пожара.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная математическая модель теплофизических и газодинамических процессов на аварийном участке метрополитена при пожаре подвижного состава [1, 2] решается с использованием численных методов. Ее применение для инженерных расчетов чрезвычайно сложно, но ее результаты могут быть использованы в качестве инструмента при создании приближенных методик расчета температуры в тоннеле.

Таким образом, для разработки эффективных аварийных режимов вентиляции, которые обеспечивают эвакуацию людей, необходимо решение следующих задач:

а) произвести расчет температуры продуктов горения по длине тоннеля до места их выброса;

- б) определить направление и величину тепловой депрессии пожара;
- в) произвести расчет воздухораспределения при пожаре;
- г) определить возможность выхода вентиляторов из строя в режиме дымоудаления.

Ниже мы рассмотрим изменение температуры продуктов горения по длине тоннеля с течением времени, причем длина актуального участка и будет определяться местом остановки горящего поезда.

При прохождении продуктов горения по тоннелю происходит их остывание за счет теплообмена с обделками тоннеля. Изменение температуры продуктов горения $T_{гр}$, формирующихся в зоне с координатой $z = z_0$ и движущихся со скоростью u по тоннелю, определяется одномерным уравнением баланса энергии [1]:

$$c_p \rho_{гр} u S \frac{dT_{гр}}{dz} = K_{\tau} \pi d (T_{гр} - T_w), \quad (1)$$

где $\rho_{гр}$ – средняя плотность потока, кг/м³;

S – площадь поперечного сечения тоннеля, м²;

d – диаметр тоннеля, м;

K_{τ} – коэффициент нестационарного теплообмена, Вт/(м²·°C);

c_p – теплоемкость продуктов горения, Дж/(кг·°C);

T_w – температура окружающих конструкций тоннеля, °C.

Решение уравнения (1) с начальным условием $T_{гр} = T_{он}$ при $z = z_0$ имеет вид:

$$T_{гр} = T_w + (T_{он} - T_w) \exp\left(-\frac{K_{\tau} \pi d}{\rho_{гр} u S c_p} (z - z_0)\right), \quad (2)$$

где $T_{он}$ – температура продуктов горения в очаге пожара, °C.

Температура струи продуктов горения в некотором сечении тоннеля определяется зависимостью коэффициента нестационарного теплообмена K_{τ} , который определяется из данных работы [3]:

$$K_{\tau} = \frac{\lambda \sqrt{1 + 1,6 \sqrt{\frac{k_t t}{R^2}}}}{\sqrt{\pi k_t t + \frac{\lambda}{\alpha \sqrt{1 + 1,6 \sqrt{\frac{k_t t}{R^2}}}}}}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обделки, Вт/(м·°C);

α – коэффициент теплоотдачи к стенкам тоннеля, Вт/(м²·°C);

R – радиус тоннеля, м;

t – время, с;

k_t – коэффициент температуропроводности обделок, м²/с.

Обобщенная зависимость для определения коэффициента теплоотдачи, по данным [3], имеет вид:

$$Nu = 0,023\epsilon Re^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (4)$$

где $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda_c}$, $Re = \frac{ud}{\nu}$, $Pr = \frac{\nu}{k_t}$ – соответственно критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля;

ϵ – коэффициент шероховатости;

ν – кинематическая вязкость воздушной среды, м²/с;

λ_c – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·°С).

Формула (4) применима для всех жидкостей и газов при $Re > 10^4$ и $Pr = 0,7 \div 2500$. По длине тоннеля теплоотдача различна, поэтому среднее значение коэффициента теплоотдачи для коротких тоннелей выше, чем для протяженных. Однако, если длина тоннеля L , м, гораздо больше его диаметра d , м, ($L/d > 40$), это различие становится совсем незначительным и им можно пренебречь. Так, для двухатомных газов и воздуха $Pr = 0,72$ независимо от давления и температуры.

Из формулы (4) после подстановки в нее значений Nu и Re получаем:

$$\alpha = 0,02\epsilon \frac{u^{0,8} \lambda_c}{\nu^{0,8} d^{0,2}}. \quad (5)$$

Совместным решением уравнений (2), (3) и (5) определена зависимость температуры воздуха и продуктов горения в тоннеле для вариантов различного удаления в начальный момент времени очага возгорания от перегонной вентиляционной камеры по ходу движения вентиляционного потока. Результаты расчетов представлены на рис. 1. Здесь начальная температура в очаге пожара при горении принята по результатам численного решения модели из [1, 2] на временном интервале от 0 до 3600 секунд представлением вида:

$$T_{\text{он}}(t) = A_0 + A_1 \exp(-t/b_1) + A_2 \exp(-t/b_2) + A_3 \exp(-t/b_3), \quad (6)$$

где $T_{\text{он}}$ – температура продуктов горения в очаге пожара, °С;

t – время развития пожара, с;

$A_0, A_1, A_2, A_3, b_1, b_2, b_3$ – коэффициенты аппроксимации:

$$A_0 = 679,80178 \text{ °С};$$

$$A_1 = -68,25009 \text{ °С};$$

$$A_2 = -153,13198 \text{ °С};$$

$$A_3 = -438,39524 \text{ °С};$$

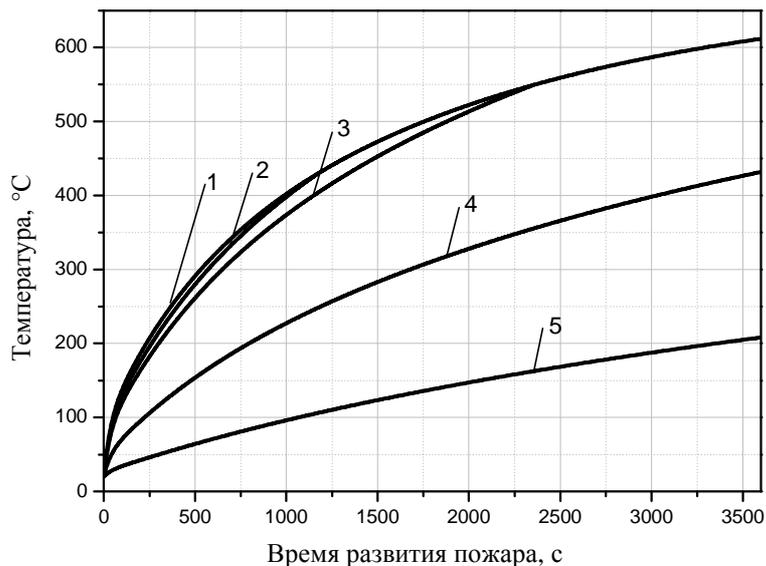
$$b_1 = 33,52362 \text{ с};$$

$$b_2 = 448,32007 \text{ с};$$

$$b_3 = 1931,3724 \text{ с}.$$

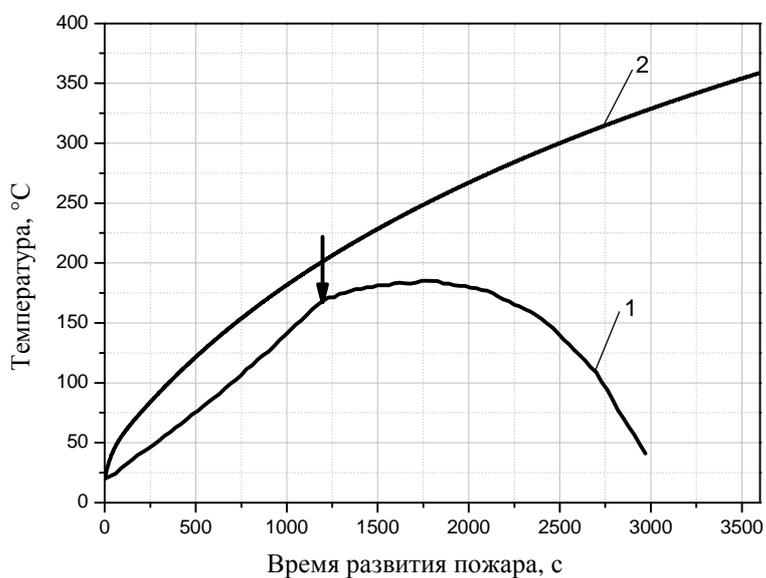
Для оценки сходимости результатов расчета по аналитической модели использовались данные, полученные в [4]. Следует отметить, что приведенные ниже результаты по материалам [4] получены исследователями с использованием численных методов, при этом в качестве температуры в очаге пожара была использована зависимость, средняя в сечении между 1-м и 2-м вагонами по данным. Так, например, при расстоянии 275 м от очага возгорания динамика температуры продуктов горения представлена на рис. 2.

Неопределенность оценивалась в контрольной точке (момент перехода переднего фронта горения во второй вагон) и, как следует из рис. 2, ее величина не превышает 14 %.



1 – начальная температура продуктов горения от очага возгорания; 2 – на расстоянии 20 м в начальный момент времени от очага возгорания; 3 – на расстоянии 50 м в начальный момент времени от очага возгорания; 4 – на расстоянии 200 м в начальный момент времени от очага возгорания; 5 – на расстоянии 500 м в начальный момент времени от очага возгорания

Рисунок 1 – Зависимость температуры продуктов горения в тоннеле метрополитена от расстояния между очагом пожара в начальный момент времени и перегонной вентиляционной камерой



1 – температура от очага возгорания по данным [4]; 2 – теоретическая температурная кривая, полученная на основании аналитической модели; стрелкой показан момент перехода переднего фронта горения во второй вагон

Рисунок 2 – Зависимость изменения температуры продуктов горения в тоннеле метрополитена на расстоянии 275 м от очага возгорания

Основными параметрами, влияющими на температуру смеси продуктов горения и свежего воздуха, подходящей к вентилятору, являются температура и расход продуктов горения идущих от горящего поезда, а также свежего воздуха, поступающего из незадымленных тоннелей. Уравнение теплосодержания [4] имеет вид:

$$G_{см} c_{p, см} T_{см} = G_x c_{p, x} T_x + G_{пг} c_{p, пг} T_{пг}, \quad (7)$$

где G – массовый расход, кг/с;

c_p – изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С);

T – температура, °С;

см, x, пг – индексы, обозначающие, соответственно, смесь газов и воздуха, холодный воздух и высокотемпературные продукты горения.

Обозначив относительный массовый расход продуктов горения как $m = G_{пг} / G_{см}$, получим:

$$c_{p, см} T_{см} = (1-m) c_{p, x} T_x + m c_{p, пг} T_{пг}. \quad (8)$$

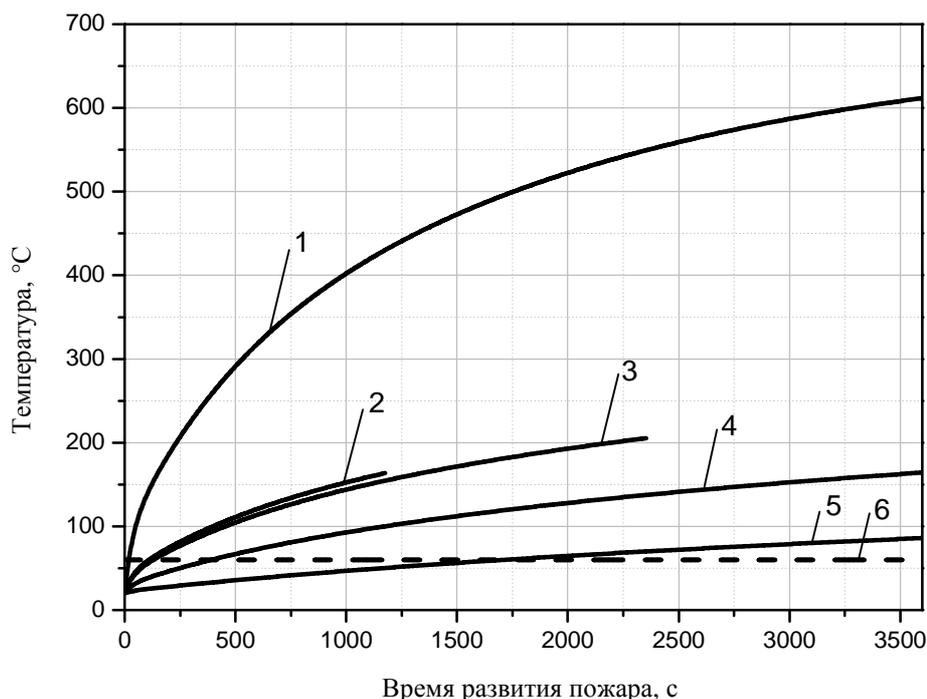
Проведенные численные эксперименты по моделированию воздухораспределения на основании разработанной математической модели [1] свидетельствуют, что величина m составляет $0,27 \div 0,35$.

За счет перемешивания продуктов горения со свежим воздухом из соседних тоннелей теплофизические свойства смеси продуктов горения и воздуха близки свойствам нагретого до такой же температуры воздуха. Результаты решения уравнения (8) относительно температуры смеси продуктов горения и свежего воздуха при горении подвижного состава на временном интервале от 0 до 3600 секунд приведены на рис. 3. Для участка станция «Борисовский тракт» – станция «Уручье» расчетные данные по времени безотказной работы перегонной вентиляционной установки приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Предельное время безотказной работы перегонной вентиляционной установки

Номер участка	Расстояние от очага пожара до перегонной вентиляционной камеры в начальный момент времени, м	Время достижения критической температуры 60 °С в течение 1 часа, с
1	745	не достигается
	398	1095
	50	140
2	50	140
	371	964
	692	не достигается

Время достижения критической температуры 60 °С для вентиляторов типа ВОМД-24 определяет время безопасной эвакуации пассажиров и должно быть использовано при составлении плана эвакуации при горении подвижного состава.



1 – температура продуктов горения от очага пожара; 2 – на расстоянии 20 м от очага пожара; 3 – на расстоянии 50 м от очага пожара; 4 – на расстоянии 200 м от очага пожара; 5 – на расстоянии 500 м от очага пожара; 6 – критическая температура для вентиляторов ВОМД-24

Рисунок 3 – Зависимость температуры смеси продуктов горения и свежего воздуха на входе в вентиляционную камеру при различном удалении горящего поезда от перегонной венткамеры

Величина тепловой депрессии h_m , Па, определяется по формуле А.Ф. Воропаева [3] на основе гидростатического метода:

$$h_m = 1,25hg \frac{T_v - T_{\text{пр}}^{\text{ср}}}{T_{\text{пр}}^{\text{ср}}}, \quad (9)$$

где h – разница отметок начала и конца задымленного тоннеля (определяется по профилю трассы), м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$T_{\text{пр}}^{\text{ср}}$ – средняя температура продуктов горения при пожаре в тоннеле, К;

T_v – температура воздуха в тоннеле до пожара, К.

В табл. 2 приведены максимальные расчетные значения пожарной тепловой депрессии для случая развитого пожара на перегоне станция «Борисовский тракт» – станция «Уручье» Минского метрополитена.

Пожарная тепловая депрессия возникает не только в тоннеле, но и в перегонной вентиляционной камере. Ее величина также рассчитывается по формуле (9), где h – это высота вентиляционной камеры от уровня головки рельса в месте слияния с тоннелем до уровня выхода воздуха из вентиляционного киоска. В отличие от тоннеля действие пожарной тепловой депрессии в вентиляционной камере совпадает по направлению с тягой вентилятора при его работе в вытяжном режиме. Поэтому учет влияния пожарной тепловой депрессии производится корректировкой аэродинамической характеристики вентилятора

путем прибавления величины пожарной тепловой депрессии к свободному члену квадратной параболы, аппроксимирующей аэродинамическую характеристику вентилятора. Расчетные значения пожарной тепловой депрессии в перегонной вентиляционной камере приведены в таблице 3 при случае развитого пожара для перегона станция «Борисовский тракт» – станция «Уручье» Минского метрополитена.

Таблица 2 – Пожарная тепловая депрессия в аварийном тоннеле в течение 1 часа

Параметр	Расстояние от места горения поезда до перегонной вентиляционной камеры, м							
	100	200	300	400	500	600	700	795
Максимальная температура продуктов горения от источника горения, °С	611	611	611	611	611	611	611	611
Максимальная температура продуктов горения у венткамеры, °С	554	431	337	264	208	165	131	107
Средняя температура продуктов горения в задымленном тоннеле, °С	582,5	521,0	474,0	437,5	409,5	388,0	371,0	359,0
Участок ст. «Борисовский тракт» – ПК 132 + 60								
Уклон путей	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Разность высотных отметок, м	1,3	2,6	3,9	5,2	6,5	7,8	9,4	10,3
Величина пожарной депрессии, Па	10,5	20,1	29,1	37,5	45,5	53,2	62,8	67,7
Участок ПК 132 + 60 – ст. «Уручье»								
Уклон путей	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	–
Разность высотных отметок, м	1,1	2,2	3,3	4,4	5,5	6,6	7,7	–
Величина пожарной депрессии, Па	8,9	17,0	24,6	31,7	38,5	45,0	51,5	–

Таблица 3 – Величина пожарной тепловой депрессии в перегонной вентиляционной камере при различном удалении от места горения подвижного состава

Показатель	Расстояние от места горения поезда до перегонной вентиляционной камеры, м						
	100	200	400	500	600	700	795
Температура смеси на входе в венткамеру, С	207	164	105	85	70	59	50
Температура смеси на выходе из венткамеры, °С	180	142	91	74	61	51	43
Средняя температура смеси в венткамере, С	193,5	153,0	98,0	79,5	65,5	55,0	46,5
Высота венткамеры, м	15	15	15	15	15	15	15
Величина пожарной депрессии, Па	68,4	57,5	38,9	31,4	25,0	19,8	15,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана аналитическая методика расчета температуры при горении подвижного состава в тоннелях метрополитена, позволяющая оценить время достижения критической для вентиляторов температуры в вентиляционной камере. Тем самым может быть определено время безопасной эвакуации пассажиров. Результаты апробации свидетельствуют о хорошей сходимости результатов расчета по методике с имеющимися в литературе численными данными. На примере участка станция «Борисовский тракт» – станция «Уручье» Минского метрополитена определены: время достижения критической температуры для вентиляционных установок типа ВОМД-24, величина пожарной тепловой депрессии в тоннеле и вентиляционной камере.

Разработанный в настоящей статье подход с использованием данных расчетов воздухораспределения [1, 2] позволяет разработать рекомендации по включению вентиляционных установок в метрополитене в аварийном режиме, а также обосновать технические параметры вентиляционных установок для обеспечения надежности их эксплуатации при удалении нагретых продуктов горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арестович, Д.Н. Математическое моделирование распространения продуктов горения при пожаре в подвижном составе метрополитена: формулировка математической модели / Д.Н. Арестович, Ф.М. Гриб, А.И. Шнип // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2007. – № 1 (21). – С. 5–18.
2. Арестович, Д.Н. Математическое моделирование распространения продуктов горения при пожаре в подвижном составе метрополитена: II численная реализация математической модели / Д.Н. Арестович, П.П. Матус, В.У. Бондарчук, А.И. Шнип // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2008. – № 1 (23). – С. 4–25.
3. Воропаев, А.Ф. Тепловая депрессия шахтной вентиляции / А.Ф. Воропаев. – Л. : Изд-во АН СССР, 1950. – 565 с.
4. Зедгенизов, Д.В. Исследование динамики нагрева тоннельного воздуха при горении поезда в тоннеле метрополитена / Д.В. Зедгенизов, И.В. Лугин // Безопасность жизнедеятельности № 8. – М. : Высш. шк., 2003. – С. 48–51.