

# РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ТОННЕЛЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

**П.М. Агеев; С.В. Шарапов, доктор технических наук, профессор.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.**

**А.Д. Голиков, кандидат технических наук.**

**Санкт-Петербургский филиал ФГУ ВНИИПО МЧС России**

Рассмотрена методика расчета параметров пожара вагонов метрополитена, по которым предъявляются требования к системам обеспечения безопасности и конструктивно-планировочным решениям в тоннелях метрополитена. Приведены расчеты, в которых в качестве определяющего опасного фактора пожара для тоннеля принимается расстояние от уровня пешеходных дорожек до нижней границы зоны задымления. Показано, что при определении необходимого расстояния между эвакуационными проходами, ведущими на пути эвакуации, время блокирования путей эвакуации следует принимать равным 21,5 мин. Удаление дыма в определенном направлении со скоростью  $1,9 - 2,25 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  не позволяет распространяться дыму против вентиляционного потока.

*Ключевые слова:* опасные факторы пожара, тоннели метрополитена, системы дымоудаления, пути эвакуации при пожаре

## CALCULATION OF KEY PARAMETERS OF THE FIRE OF THE ROLLING STOCK IN THE UNDERGROUND TUNNEL

P.M. Ageev; S.V. Sharapov.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia.

A.D. Golikov.

Saint-Petersburg branch of FGU VNIIPPO of EMERCOM of Russia

In work the design procedure of parameters of a fire of cars to metropoliten thy on which demands are made to systems of safety and a structurally and planned decisions in underground tunnels is considered. Calculations in which as the defining dangerous factor of a fire for a tunnel the distance from level of foot paths to the bottom border of a zone of smoke blanketing is accepted are resulted. It is shown that at definition of necessary distance between evacuation the passes conducting on a way of evacuation. Time of blocking of ways of evacuation it is necessary to accept equal 21,5 minutes smoke removal in a certain direction with a speed  $1,9 - 2,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  doesn't allow to extend to a smoke against a ventilating stream.

*Key words:* dangerous factors of a fire, tunnels of underground, system of removal of a smoke, evacuation way at a fire

Характер задымления при пожаре сооружений тоннельного типа зависит от ряда факторов, основными из которых являются: стадия пожара (начальная или развитый пожар), свойства горючих материалов и характер распространения пожара (круговое, линейное в одном направлении, линейное в двух направлениях), геометрические характеристики галереи (высота, ширина, уклон), состояние дверных проемов вагона (открытое или закрытое), наличие и тип общеобменной вентиляции, режим ее работы.

Характерной особенностью пожара в тоннеле является распространение слоя продуктов горения под сводом тоннеля в обе стороны от очага пожара. На начальной стадии, при высоких значениях градиента температур на границе раздела воздух – продукты

горения, наблюдается отчетливо выраженная стратификация при движении слоя дыма. По мере остывания слоя газов при удалении от очага пожара происходит перемешивание дыма с воздухом, снижение скорости его распространения, а постоянное поступление дыма из очага приводит к увеличению слоя дыма под сводом тоннеля и опусканию его нижней границы. В качестве критического значения высоты незадымленной зоны обычно принимается уровень 2,5 м от нижнего уровня задымляемого помещения [1] (для тоннеля от уровня пешеходных дорожек, предназначенных для эвакуации людей).

Приведенный характер задымления соответствует скорости воздушного потока менее  $0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  [2]. При более высоких скоростях вентиляционного потока происходит перемешивание продуктов горения с воздухом нижней части галереи и задымление всего объема [3].

Для расчетов параметров пожара, по которым предъявляются требования к системам обеспечения безопасности и конструктивно-планировочным решениям, принимается наиболее жесткий вариант его развития. При таком варианте нет необходимости отдельно рассматривать распространение пожара в салоне вагона и выделение дыма в объем тоннеля через проемы салона. Поезд метрополитена рассматривается в виде протяженного объекта с равномерно распределенной пожарной нагрузкой, размещенной по ширине, соответствующей ширине вагона. Предполагается, что горючие материалы размещаются от уровня верхнего строения на высоте, соответствующей высоте уровня пола вагона метрополитена. Характеристики горения пожарной нагрузки принимаются по данным, полученным в ходе огневых экспериментов, и соответствуют усредненным показателям используемых при постройке вагонов горючих материалов.

Принимается расположение очага пожара в центральной части поезда. Схема распространения пожара в поезде представлена на рис. 1.

Распространение горения происходит с линейной скоростью, равной в течение первых 10 мин пожара  $0,5 V_{\text{л}}$ , в последующий период –  $V_{\text{л}}$ . После достижения фронтом горения боковых стенок вагона площадь горения будет представлять часть круга с увеличивающимся радиусом, ограниченного боковыми стенками вагонов (рис. 1).

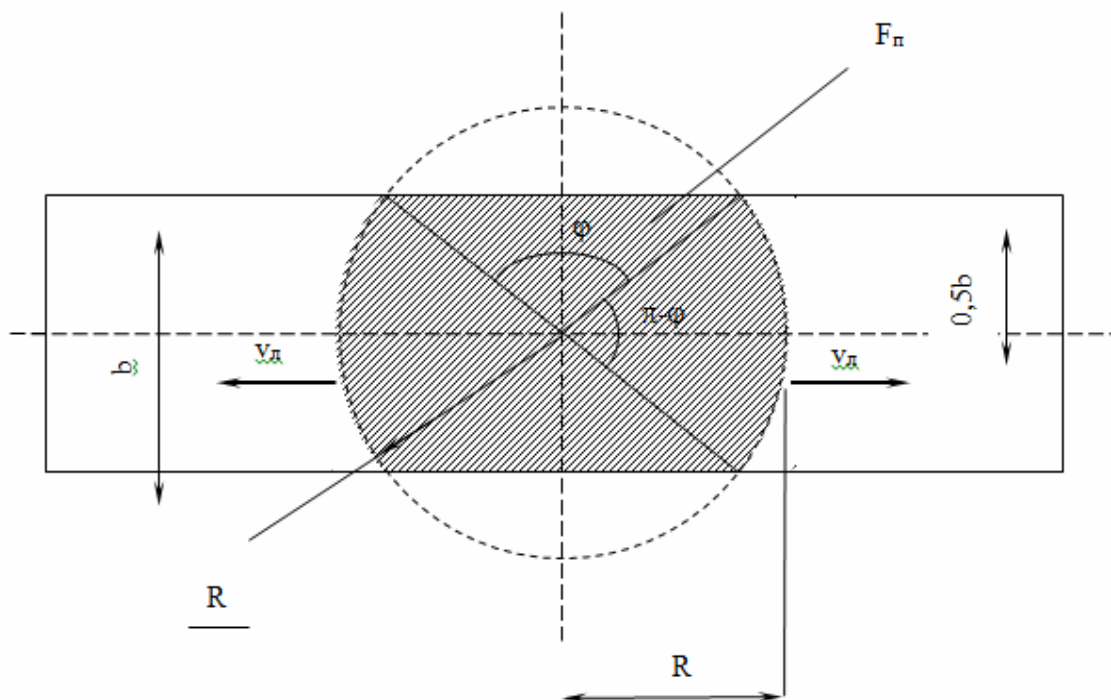


Рис. 1. Схема распространения пожара в поезде  
( $F_n$  – площадь пожара;  $R$  – радиус пожара;  $b$  – ширина вагона;  $\varphi$  – центральный угол)

В соответствии с таким сценарием развития пожара изменение его площади определяется следующими выражениями:

$$F_{II} = \pi \cdot R^2 \text{ при } R \leq 0,5 \cdot b; \quad (1)$$

$$F_{II} = \pi \cdot R^2 - 2R^2[0,5(\varphi - \sin \varphi)] = R^2[\pi - (\varphi - \sin \varphi)] \text{ при } R > 0,5 \cdot b, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус распространения пожара, м;  $b$  – ширина размещения пожарной нагрузки (ширина вагона), м;  $\varphi$  – центральный угол (рис. 1), соответствующий хорде, имеющей длину охваченной горением боковой стены вагона, рад.

Величины  $R$  и  $\varphi$  определяются формулами:

$$R = 0,5v_{II} \cdot \tau \text{ при } 0 < \tau \leq 600, \quad (3)$$

$$R = 0,5v_{II} \cdot 600 + v_{II} \cdot (\tau - 600) \text{ при } \tau > 600, \quad (4)$$

$$\varphi = \arcsin \frac{[R^2 - (0,5b)^2]^{1/2}}{R}. \quad (5)$$

Периметр пожара (рис. 1) определяется выражениями:

$$P_{II} = 2\pi R \text{ при } R \leq 0,5b; \quad (6)$$

$$P_{II} = 2R[\pi - \varphi + 2\sin(0,54)] \text{ при } R > 0,5. \quad (7)$$

При определении рассмотренных выше геометрических характеристик пожара предполагалось, что  $v_{II} = 1 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1} = 0,0167 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $b = 2,6 \text{ м}$ .

Мощность пожара определялась из выражения:

$$Q_{II} = F_{II} \cdot \eta \cdot Q_{II}^p \cdot m_0, \quad (8)$$

где  $Q_{II}$  – мощность пожара, Вт;  $m_0$  – средневзвешенная удельная скорость выгорания горючих материалов вагона метрополитена,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $\eta$  – коэффициент недожога;  $Q_{II}^p$  – средневзвешенная низшая теплота сгорания материалов вагона,  $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

Результаты крупномасштабных огневых экспериментов, проведенных филиалом ВНИИПО [4, 5] показали, что  $m_0 = 0,024 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ , а произведение величин  $\eta \cdot Q_{II}^p = 17400000 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

Массовый расход дыма, выделяемый очагом пожара, зависит от ряда факторов, основными из которых являются геометрические параметры пожара и тоннеля (рис. 2). В качестве примера рассмотрен одно- и двухпутный тоннель мелкого заложения прямоугольного сечения.

Для определения количества выделяемого дыма используется формула, полученная на основе зависимости, приведенной в работе [6]:

$$G_{II} = 0,096 \cdot P_{II} \cdot (H - z - d)^{3/2} \cdot \rho_0 (gT_0/T_{II})^{1/2}, \quad (9)$$

где  $G_{\Pi}$  – массовый расход дыма,  $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $H$  – высота тоннеля, м;  $d$  – толщина слоя дыма под сводом сооружения, м;  $z$  – условная высота размещения пожарной нагрузки поезда,  $z = 1,1$  м;  $\rho_0$  – исходная (до пожара) плотность пожарной нагрузки воздуха в тоннеле,  $\rho_0 = \frac{352,17}{T_0}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ ;  $T_0, T_{\Pi}$  – исходная температура воздуха и температура пламени в очаге (дымовой колонке), К,  $T_0 = 293$  К;  $T_{\Pi} = 1100$  К.

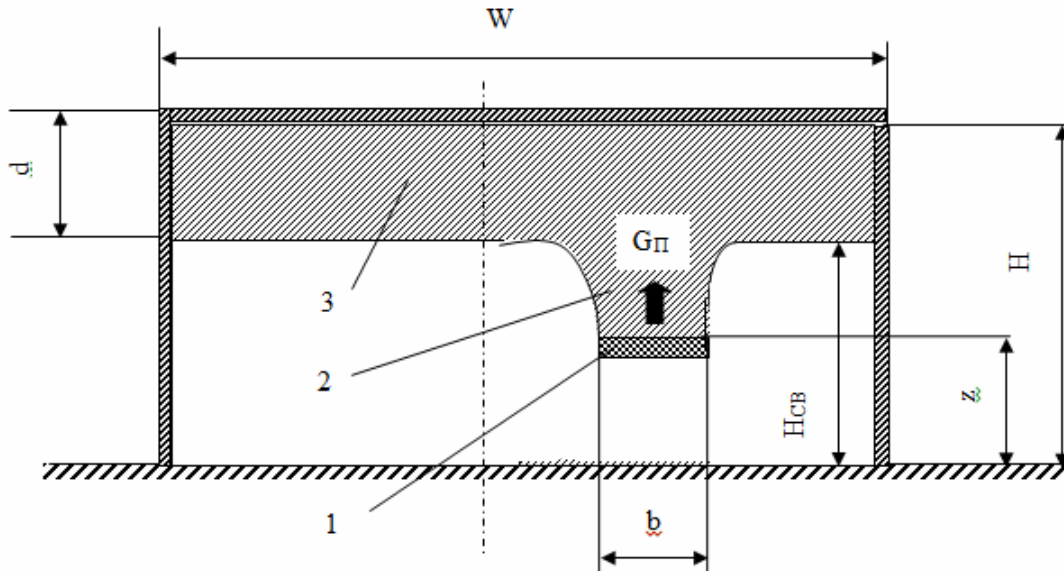


Рис. 2. Схема поперечного сечения тоннеля и геометрические размеры пожара, характеризующие задымление (1 – условное размещение пожарной нагрузки; 2 – дымовая колонка над очагом пожара; 3 – слой дыма под сводом тоннеля)

Средняя температура продуктов горения над очагом пожара зависит от большого числа факторов, влияние которых учесть достаточно сложно. Исследованиями, проведенными в работах [7, 8], установлено, что для тоннельных пожаров теплоотдача излучением составляет около 25 % общего тепловыделения. Эта величина подтверждена обработкой данных по экспериментальным пожарам в тоннелях. С учетом этого приближенную величину температуры продуктов горения над очагом пожара для стадии его развития можно вычислять по формуле:

$$T_1 = T_0 + 0,75 \frac{Q_{\Pi}}{G_{\Pi} \cdot C_{p1}}, \quad (10)$$

где  $C_{p1}$  – удельная теплоемкость продуктов горения,  $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ .

Удельная теплоемкость продуктов горения в очаге пожара определяется из выражения:

$$C_{p1} = 1027(1 + 0,0000616 \cdot T_1). \quad (11)$$

Средняя толщина слоя дыма под сводом тоннеля определяется по формуле:

$$d = \frac{V_{\text{д}}}{x \cdot W}, \quad (12)$$

где  $V_d$  – текущее значение объема дыма, выделившегося при горении,  $m^3$ ;  $x$  – длина зоны распространения дыма, м;  $W$  – ширина тоннеля для движения поездов метрополитена, м.

Для двухпутного тоннеля (без разделительной перегородки в средней части сечения)  $W=10,4$  м, для однопутного тоннеля  $W=5,2$  м.

Объем дыма, выделившегося за интервал времени  $\Delta t$  и общий объем дыма в произвольный момент времени определялись из выражений:

$$\Delta V_i = \Delta \tau_i \frac{0,5G_{II}}{\rho_{cp}}; \quad (13)$$

$$V_g = V_{g_{i-1}} + \Delta V_i, \quad (14)$$

где  $\rho_{cp}$  – средняя плотность продуктов горения в слое дыма,  $kg \cdot m^{-3}$ .

Величина  $\rho_{cp}$  определялась по формуле:

$$\rho_{cp} = \frac{\rho_0 \cdot T_0}{T_{cp}}, \quad (15)$$

где  $T_{cp}$  – среднеинтегральная температура газов в слое дыма, К.

Величина  $T_{cp}$  определялась по формуле:

$$T_{cp} = T_0 + \frac{(T_1 - T_0) \cdot 0,5G_{II} \cdot C_{pcp}}{\alpha \cdot x \cdot (2d + 2W)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\beta \cdot x \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot W)}{0,5 \cdot G_n \cdot C_{pcp}}\right) \right], \quad (16)$$

где  $C_{pcp}$  – удельная теплоемкость продуктов горения в слое дыма,  $Dж \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ;

$$C_{p, cp} = 1027(1 + 0,0000616 T_{cp}). \quad (17)$$

При рассмотрении процесса распространения дыма в тоннеле предполагалось, что выделяющийся при пожаре поток продуктов горения распространяется в обе стороны тоннеля с расходом  $0,5 G_{II}$  в каждую сторону. Это допущение учтено в выражениях (13) и (16).

Усредненный коэффициент теплоотдачи от потока продуктов горения к ограждениям определялся из выражения:

$$\alpha = 0,116 \cdot (0,5G_{II})^{0,8} \cdot (T_{cp} - 273)^{0,363}. \quad (18)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $Вт \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ .

Эмпирическая формула (18) получена по результатам обработки данных по экспериментальным пожарам в транспортных тоннелях, приведенных в работе [9].

На характер задымления тоннеля существенное влияние оказывает величина скорости продуктов горения во фронте слоя дыма, соответствующая скоростному напору, создаваемому разностью плотностей газов:

$$v_x = \left( \frac{2 \cdot \Delta P_x}{c_x} \right)^{1/2}, \quad (19)$$

где  $\Delta P_x$  – разность давлений на переднем фронте слоя газов и в воздухе перед слоем, Па;

$\rho_x$  – плотность газов на фронте потока продуктов горения,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Величины  $\Delta P_x$  и  $\rho_x$  определяются выражениями:

$$\Delta P = \frac{d}{2} \cdot g \cdot (c_0 - c_x), \quad (20)$$

$$\rho_x = \rho_0 \cdot T_0 / T_x. \quad (21)$$

Температура газов на фронте потока продуктов горения определялась по формуле (12):

$$T_x = T_0 + (T_1 - T_0) \exp\left(-\frac{\bar{b} \cdot x \cdot (2 \cdot d_{cp} + 2 \cdot W)}{0,5 \cdot G_n \cdot C_{пер}}\right); \quad (22)$$

Расстояние, пройденное от очага пожара передним фронтом потока продуктов горения, определялось суммированием участков пути на каждом временном шаге расчета:

$$x = \sum v_x \cdot \Delta t. \quad (23)$$

Средняя толщина слоя дыма, определяемая из выражения (12), позволяет оценить расстояние от уровня верхнего строения железнодорожного пути (пола) тоннеля до нижней границы слоя дыма:

$$H_{CЗ} = H - d, \quad (24)$$

где  $H_{CЗ}$  – высота свободной зоны, м.

Промежуток времени, в течение которого этот параметр больше 2,5 м, является временем безопасного пребывания в тоннеле для людей без средств защиты органов дыхания, а момент достижения  $H_{CЗ}$  критической величины 2,5 м – временем блокирования путей эвакуации  $\tau_{бл}$ . В выражении (24) высота тоннеля  $H$  принималась равной 4,43 м при наличии в тоннеле огнезащитного потолка и 5,49 м – при его отсутствии.

Для обеспечения безопасной эвакуации людей в тоннеле необходимо поддерживать условия, обеспечивающие стратификацию (расслоение) потока продуктов горения и воздуха в тоннеле. Процесс перемешивания двух слоев газов с различными значениями плотностей характеризуется безразмерным числом Ричардсона [10]:

$$Ri = \frac{g \cdot d_{cp} \cdot (T_x - T_0)}{T_x \cdot (v_x - v_v)^2} \quad (25)$$

где  $v_v$  – скорость воздушного потока в тоннеле,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Если скорости потока продуктов горения и воздуха в нижней части тоннеля направлены навстречу, друг другу (что соответствует режиму отключения общеобменной вентиляции на участке трассы метрополитена), то в знаменателе выражения (25) должен находиться квадрат суммы скоростей.

Скорость воздушного потока в нижней (незадымленной) части тоннеля определялась из баланса газовых потоков для поперечного сечения в сечении, соответствующем координате  $x$ :

$$v_v = \frac{v_x \cdot d_{cp}}{(H - d_{cp})} \pm v_n, \quad (26)$$

где  $v_{\text{п}}$  – продольная скорость, создаваемая принудительной или естественной вентиляцией,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Результаты исследований, приведенных в работах [10, 11] показали, что резкое увеличение турбулентности, приводящее к перемешиванию стратифицированных слоев, происходит в том случае, когда  $R_i < 0,8$ . Рассмотрение выражений (25) и (26) показывает без проведения вычислений, что для поддержания более продолжительного состояния стратификации величина  $v_{\text{п}}$  должна быть равна нулю, то есть общеобменная вентиляция метрополитена должна быть отключена.

В ходе спасательных работ и работ по тушению пожара может оказаться необходимым удаление дыма из тоннеля в продольном направлении. Условием, необходимым для предотвращения распространения дыма навстречу вентиляционному потоку в сооружениях тоннельного типа, является обеспечение определенной скорости воздуха, называемой критической. Фирма «ICFKaiserEngineers» (США) предлагает для определения критической скорости использовать выражение (12):

$$v_{\text{кр}} = k_g \cdot K \cdot \left( \frac{g \cdot H \cdot Q_{\text{п}}}{c_0 \cdot C_p \cdot S \cdot T_1} \right)^{1/3}, \quad (27)$$

где  $k_g$  – величина, учитывающая уклон;  $K$  – эмпирический коэффициент, равный 0,61;  $S$  – площадь поперечного сечения тоннеля, равная  $W \cdot H, \text{м}^2$ .

Величина  $k_g$  определяется из выражения (12):

$$k_g = 1 + 0,03 \cdot i, \quad (28)$$

где  $i$  – уклон сооружения тоннельного типа, (%). Для тоннеля принимался уклон, равный 2 % (0,020).

Для проведения расчетов параметров пожара и динамики задымления тоннеля в филиале ВНИИПО была разработана вычислительная программа, реализующая выражения (1) – (28).

### Результаты расчетов

Под временем блокирования путей эвакуации ( $\tau_{\text{бл}}$ ) понимается время от начала пожара до момента достижения опасных факторов пожара критических значений (13). В соответствии со СНиП 2.04.05 (раздел 5 и Приложение 22) [1] в качестве определяющего опасного фактора пожара для тоннеля принимается расстояние от уровня пешеходных дорожек до нижней границы зоны задымления, критическое значение которого составляет 2,5 м.

При расчете параметров пожара представляет интерес как значение величины  $\tau_{\text{бл}}$  так и влияние на нее таких характеристик тоннеля, как ширина (двухпутный или однопутный с разделительной стеной) и высота (которая связана с наличием или отсутствием огнезащитного потолка).

В связи с этим были проведены расчеты параметров пожара для стадии его развития по двум вариантам: для максимального и минимального объема тоннеля. Вариант 1 рассчитывался для тоннеля, имеющего ширину 10,4 м и высоту 5,49 м, вариант 2 – для тоннеля, имеющего ширину 5,2 м и высоту 4,37 м. Наиболее важные результаты расчетов параметров пожара приведены в графическом виде на рис. 3, 4.

В целом, на основании, анализа результатов расчетов параметров пожара подвижного состава в тоннеле можно сделать следующие выводы:

– тоннель следует проектировать двухпутным (без деления продольной перегородкой на 2 объема);

– при определении необходимого расстояния между эвакуационными проходами, ведущими на пути эвакуации, время блокирования путей эвакуации следует принимать равным 21,5 мин;

– на время проведения эвакуации продольная (общеобменная) вентиляция метрополитена должна быть отключена – для поддержания эффекта стратификации;

– после завершения эвакуации людей из тоннеля, удаление дыма в определенном направлении следует производить со скоростью  $1,9 - 2,25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , что не позволит распространяться дыму против вентиляционного потока.

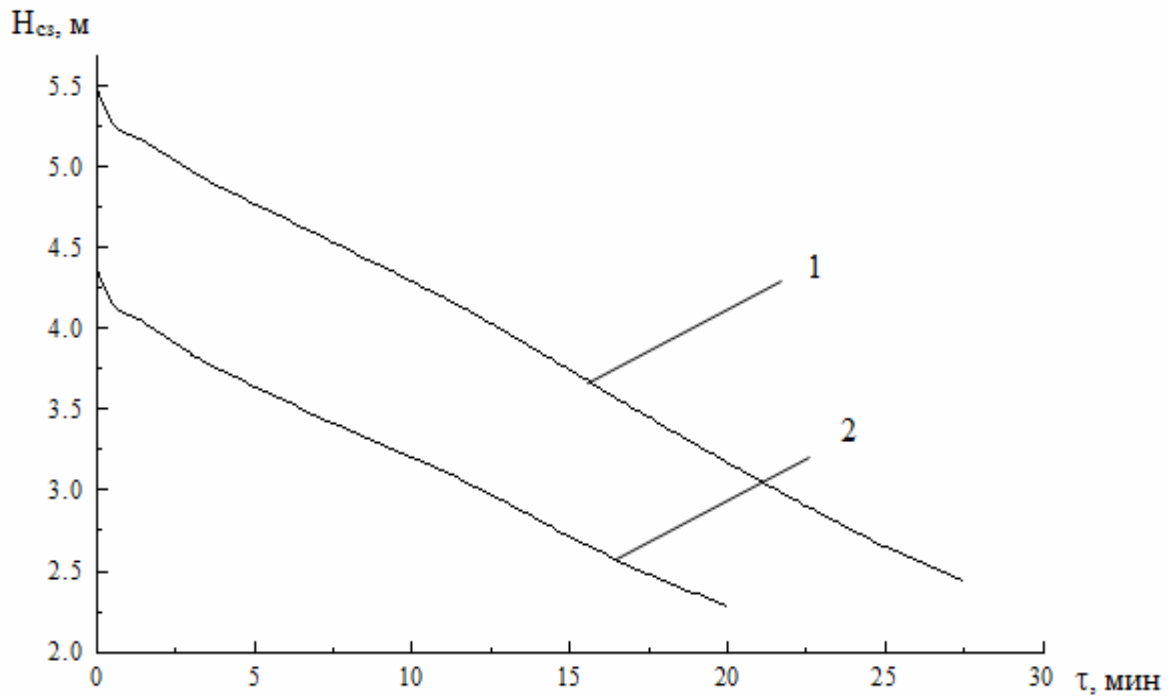


Рис. 3. Динамика опускания нижней границы слоя дыма для вариантов 1 и 2

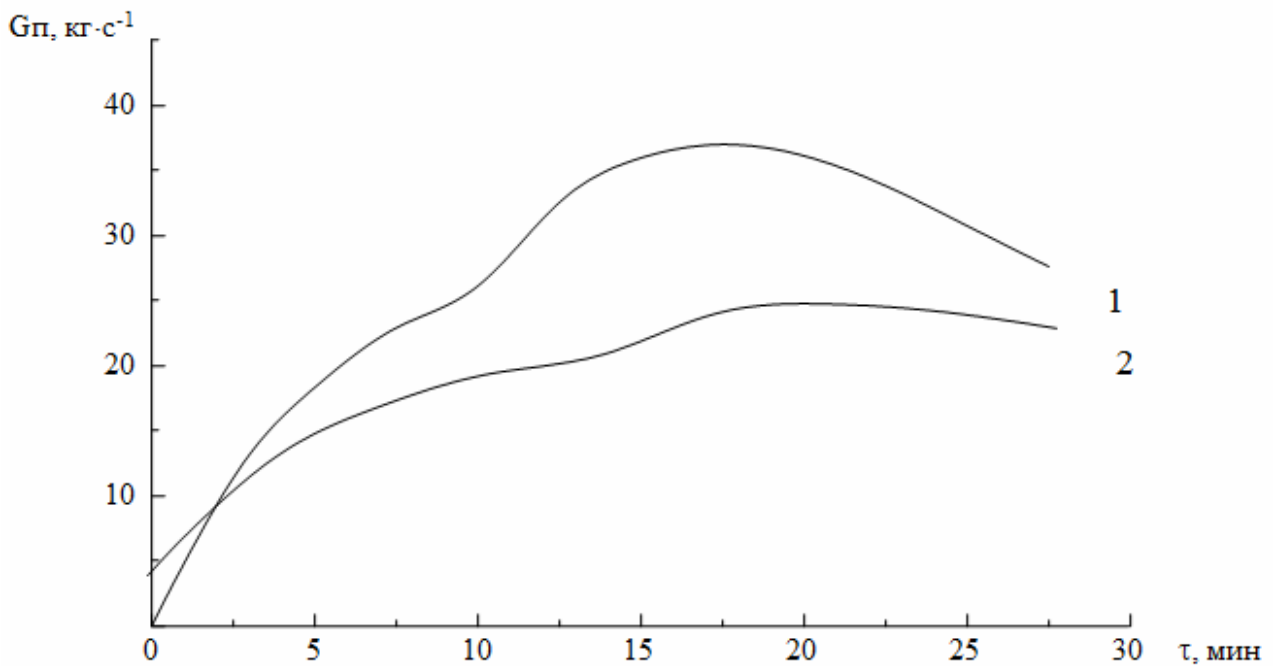


Рис. 4. Изменение расхода дыма, выделившегося при пожаре для вариантов 1 и 2



## Литература

1. СНиП 32-02-2003. Метрополитены. М.: Госстрой России, 2004.
2. Документы по противодымной и противопожарной защите в автодорожных тоннелях, опубликованные до 1992 года Комитетом по автодорожным тоннелям Ассоциации PIARC. / перевод № 2536. СПб.: ФВНИИПО, 1994. 89 с.
3. Wu Y., Bakar M. Z. A. Control of smoke flow in tunnels fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity. // Fire Safety Journal. 2000. P. 363–390.
4. Бондарев В.Ф., Лесков А.А. Определение интенсивности тепловыделения при пожаре подвижного состава метрополитена в тоннеле // Борьба с пожарами в метрополитенах: сб. науч. тр. М.: ВНИИПО МВД РФ, 1992. С. 62–70.
5. Проведение исследования тактических приемов и способов тушения пожаров в основных подземных сооружениях метрополитенов: отчет о НИР. Инв. № 531/2лф. Л., 1989. 317 с.
6. Батчер Е., Парнэлл А. Опасность дыма и дымозащита: пер. с англ. / под ред. В.М. Есина. М.: Стройиздат, 1983. 152 с.
7. Heselden A.J.M. Studies of fire and smoke behavior relevant to tunnels. Build Res. Establ. Curr. Pap. 1978. № 66. P. 1–15.
8. Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires: SP Report / Swedish National Testing and Research Institute Fire Technology. ISBN 91-7848-XXX-X. Boras, 1993. 75 p.
9. Осипов С.Н., Жадан В.М. Вентиляция шахт при подземных пожарах. М.: Недра, 1973. 152 с.
10. Elleson T.H., Turner J.S. Turbulent entrainment in stratified flows. J. Fluid Mech. 1959. № 6. P. 423–448.
11. Hinkley P.L., Wraught H.G.H., Theobald C.R. The contribution of flames under ceilings to fire spread in compartment. Part 5. Incombustible ceilings. Fire Research Note. 1968. № 712.