

Е.Л. Алферова, И.В. Лугин**ТЕПЛОМАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ ГОРЕНИИ ПОЕЗДА В ОДНОПУТНОМ
ТОННЕЛЕ МЕТРОПОЛИТЕНА**

Возгорание и остановка поезда в тоннеле является одним из наиболее опасных случаев аварийной ситуации в метрополитене. Исследованы тепломассообменные процессы, происходящие в тоннеле в такой ситуации, для поиска вариантов повышения безопасности эвакуации пассажиров и эффективности проведения аварийно-спасательных работ. Пороговая температура, при которой аварийно-спасательные работы выполняются спасателями без специальных теплозащитных костюмов, составляет 40 °С и скорость движения фронта пожарно-дымовых газов (ПДГ) с этой температурой по тоннелю позволит определить пространственно-временные рамки проведения спасательных операций на задымленном участке. Моделирование динамики температур ПДГ проведено с использованием метода конечных элементов (МКЭ), предварительно выполнена проверка его применимости: проведено сравнение результатов расчетов прогрева обделки тоннеля и окружающего грунта, выполненных МКЭ и аналитическим методом. Расхождение температур по результатам расчета не превысило 0,9 °С (1,01%), что подтверждает адекватность конечно-элементной модели для решения задач такого типа. Исследование показало, что скорость роста температуры зависит и от изменения температуры ПДГ вблизи очага горения, и от скорости движения газов по тоннелю, которая, в свою очередь, зависит от скорости подаваемого навстречу эвакуирующимся свежего воздуха и от увеличения объемного расхода газов за очагом горения вследствие их теплового расширения. Уже в момент времени 120 с от начала горения температура ПДГ в тоннеле около поезда превышает 40 °С.

Ключевые слова: метрополитен, вентиляция, тоннель, пожар, температура, дымоудаление, эвакуация, спасательные работы.

Метрополитен – это один из важнейших видов транспортной системы современных мегаполисов, позволяющий эффективно решить проблему пассажироперевозок. Сам метрополитен представляет собой мощный и сложный инженерный комплекс с использованием высокоэнергетических технологий, что приводит к увеличению возможности технологических аварий с негативными последствиями для жизни и здоровья людей и состоянию материальных ценностей. Поэтому прогнозирование течения аварийной ситуации необходимо для выработки технических и организационных решений для успешной ее лик-

видации с минимальными потерями и затратами.

Проведенные исследования [1] показали, что скорость роста температур в тоннеле определяется в основном скоростью движения смеси пожарно-дымовых газов и воздуха и скоростью роста температуры газов от очага горения. В настоящей работе исследования проведено уточнение и дополнение исследований: модель расширена до величины 200 м, время моделирования увеличено до 10 мин – оно принято большим, чем время прохода частицы воздуха на расстояние от горящего вагона до перегонной дымоудаляющей вентиляционной камеры

(500 м), которое при минимальной скорости воздуха навстречу эвакуирующимся пассажирам 2,23 м/с составляет 224 с (3,74 мин).

Объектом исследования данной работы является однопутный тоннель метрополитена. Большая часть эксплуатирующихся метрополитенов РФ и стран СНГ построена с использованием именно однопутных тоннелей имеющих сборную обделку из железобетонных тубингов на перегонах.

Рассмотренный случай возгорания крайнего вагона остановившегося в тоннеле поезда является одним из самых опасных вариантов чрезвычайной ситуации в метрополитене. Опасность обусловлена большим скоплением людей в области очага возгорания, блокированием тоннеля горящим поездом (рис. 1) и длинным путем эвакуации в условиях возможности его задымления, что ведет к большой вероятности появления человеческих жертв. Исследовался в данной работе участок дымоудаления от горящего вагона перегонной венткамеры (рис. 1).

Управление тоннельной вентиляцией метрополитена обеспечивает повышение безопасности эвакуации пассажиров, проведение эффективных аварийно-спасательных работ и позволяет избежать или свести к минимуму количество жертв. Безопасность пути эвакуации обеспечивается организацией такого воздухораспределения, при котором струя чистого воздуха направлена навстречу эвакуирующимся по тоннелю пассажирам и обслуживающему персоналу. Скорость движения воздуха нормируется СП «Метрополитены» [2] в зависимости от сечения тоннеля и его уклона. Таким образом, тоннель с горящим поездом (рис. 1) делится на два участка: участок чистого воздуха, в котором производится эва-

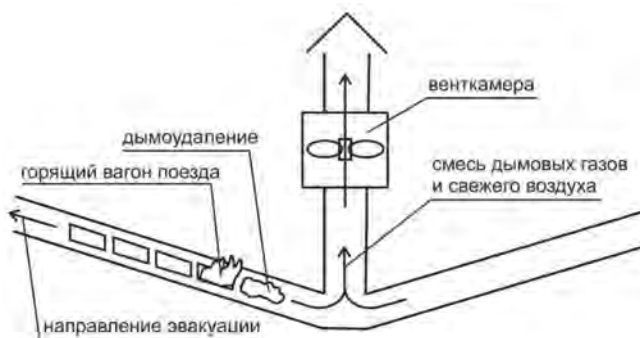


Рис. 1. Горящий поезд в тоннеле

куация и участок задымленный, через который проводится дымоудаление [3]. На задымленном участке тоже могут оказаться люди и, следовательно, там будут работать спасатели.

Путевой перегонный тоннель относится к основным сооружениям метрополитена. Как правило, это тоннель с обделкой из железобетонных тубингов (рис. 2, а) имеющий круглое сечение, ограниченное снизу основанием пути и рельсами, внутренний диаметр тоннеля 5,1 м, эквивалентный диаметр 4,81 м, площадь 18,62 м² [4].

Рассмотрим участок такого тоннеля с остановившимся в нем поездом с горящим крайним вагоном. Для поддержания безопасности путей эвакуации нормируемая скорость на них составляет 2,23 м/с для уклона 0‰ [2].

При горении одного крайнего вагона температура ПГД за его торцом (рис. 3) принимается по имеющимся экспериментальным данным [5]. Для удобства использования в расчетах проведена кусочно-линейная аппроксимация графика изменения этой температуры T , °С.

$$T(\tau) = \begin{cases} 0,303\tau + 16, & \tau \leq 1200 \\ 0,22\tau + 353,3, & 1200 < \tau \leq 3100 \\ -0,378\tau + 1193,33, & \tau > 3100 \end{cases} \quad (1)$$

По рис. 3 видно, что максимальная скорость роста температуры при-

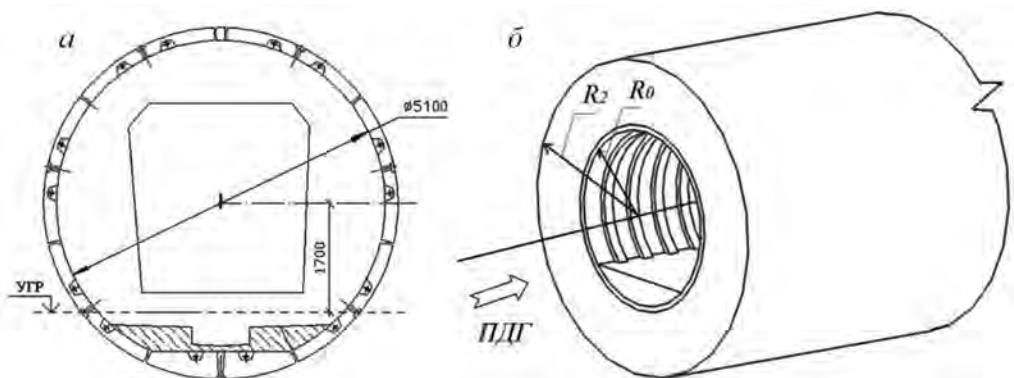


Рис. 2. Однопутный тоннель с железобетонными тубингами: а) чертеж; б) схема к расчетной модели

ходится на первые 20 мин (1200 с) с начала возгорания. Согласно расчетной нормативной скорости движения фронта горения по вагону 1 м/мин [1] при его длине 20 м, за 20 мин весь вагон разгорается по площади и скорость роста температур значительно снижается.

Для определения динамики температуры ПДГ на задымленном участке тоннеля за время развития пожара, разработана расчетная модель процесса сопряженного теплообмена на этом участке. Двигаясь по тоннелю, ПДГ остывают за счет теплообмена с обделкой и окружающим тоннель грунтовым массивом, при переменном значении коэффициента теплоотдачи от ПДГ к стенке тоннеля. Примем и приведем краевые условия для решения этой задачи.

Начальные условия:

- температура воздуха в тоннеле, стенки тоннеля, грунтового массива в заобделочном пространстве в нулевой момент времени одинакова и равна 16°C . В реальности такая температура грунта есть в окрестностях тоннеля, чем дальше от тоннеля, тем более она отличается от температуры воздуха в тоннеле. Но диапазон ее изменения составляет $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$, что существенно ниже, чем диапазон изменения температуры ПДГ в тоннеле, поэтому неравномерностью в начальном распределении температуры в грунте пренебрегаем.

Граничные условия:

- на внешней стенке грунтового массива задается условие первого рода, температура стенки равна начальной температуре грунта;

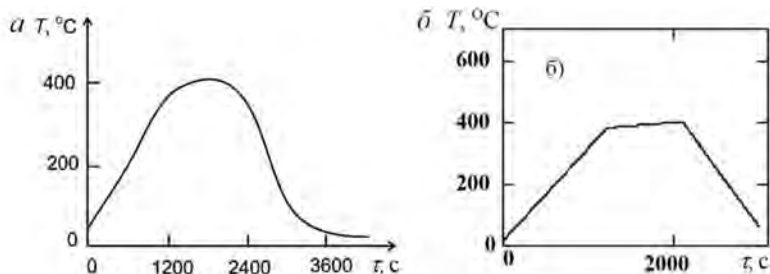


Рис. 3. Температура ПДГ за торцом горящего крайнего вагона: а) экспериментальные данные; б) аппроксимация

Таблица 1

Теплофизические свойства слоев грунта и обделки

Состав (материал) слоя	Теплофизические свойства		
	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость c , кДж/(кг·°С)	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)
Грунт – суглинок лессовый (относительная влажность $w = 16\%$)	1680	2,35	1,51
Обделка – железобетон	2500	0,84	2,04

• на торцах тоннеля и грунтового массива теплообмен отсутствует;

• на входе в тоннель задается скорость потока и температура ПДГ, скорость постоянна, температура меняется в соответствии с зависимостью (1), рис. 3, б;

• на выходе из тоннеля задается атмосферное давление.

Впоследствии часть граничных условий будет менять в зависимости от решаемой задачи и расчетной модели.

Геометрия тоннеля и обделки принята по [4] с незначительными упрощениями (рис. 2, б) (не рассматриваются рельсы, шпалы, кронштейны с кабелями). Теплофизические свойства железобетонного тубинга обделки и грунтового массива приведены в табл. 1.

За рабочее тело ПДГ принят воздух. Расчет проведен с учетом действия гравитации и сопутствующего температурного разделения потока по высоте тоннеля.

Для адекватного моделирования процесса теплообмена при заданных граничных условиях необходимо определиться с минимальной толщиной слоя грунтового массива вокруг тоннеля. Это весьма важно, т.к. при большой толщине слоя размерность задачи становится высокой, время счета (компьютерное время) занимает несколько суток, а точность решения повышается не существенно. Это обусловлено тем, что с некоторого расстояния от обделки тоннеля, температура грунта, практически, не изменяется, поэтому этот слой грунта можно не

учитывать в модели. С другой стороны, если слой грунта в модели будет слишком тонким, это может привести к большой погрешности результатов решения задачи. Проведем оценочный расчет толщины прогретого слоя за время существования пожара на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности (модель № 1), полученные результаты будут использованы для решения задачи сопряженного теплообмена методом конечных элементов (объемная модель). В модели № 1 рассматривается поперечное сечения тоннеля и грунта в непосредственной близости от торца горящего вагона, т.е. ПДГ имеют максимальную температуру.

Описание расчетной модели № 1 – аналитической.

Расчет температуры ведется на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопередачи в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \right),$$

где T – температура, К; τ – время, с; a – температуропроводность, м²/с, R – расстояние от оси тоннеля, м.

Геометрия модели: радиус внутренней поверхности тоннеля $R_0 = 2,55$ м (рис. 2), затем идет слой обделки до $R_1 = 2,7$ м, далее слой грунта до внешней границы $R_2 = 3,55$ м. Последняя величина принимается заведомо больше толщины прогретого слоя, граница которого определяется радиусом,

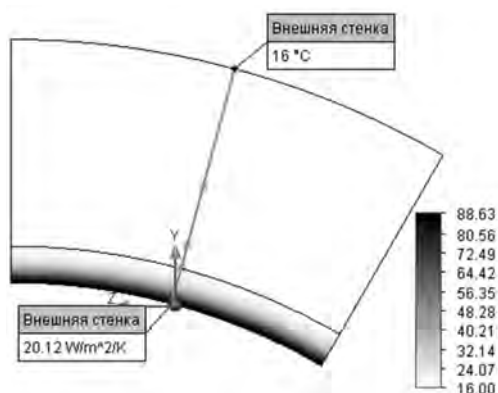


Рис. 4. Распределение температуры по толщине обделки и грунта вокруг тоннеля в момент времени 3000 с после начала пожара

на котором изменение температуры грунта составляет менее 1 градуса в течение максимально большого роста температуры ПДГ, т.е. с 0 по 3000 секунды развития пожара [1].

Теплофизические свойства обделки и грунта принимаются по табл. 1.

Отличие краевых условий от изложенных выше заключается в том, что граничные условия на внутренней границе обделки определяются условием третьего рода, изменение температуры ПДГ по графику на рис. 3, б и аппроксимации (1), коэффициент теплообмена $\alpha = 20,12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [4].

Решением дифференциального уравнения в принятых краевых условиях получены зависимости температуры от времени для толщи грунтового массива (рис. 5, б).

Проведен расчет изменения температурного поля грунта и обделки вокруг тоннеля (модель № 2) с использованием конечно-элементной модели с краевыми условиями аналогичными модели № 1. Для увеличения скорости расчета ограничим геометрию модели сектором с заданием условий симметричности на границах (рис. 4).

Проведем сравнение результатов моделирования (рис. 5) и сопоставим температуры на расстоянии 2,55; 2,6; 2,65; 2,7; 2,75; 2,8; 3 м от оси тоннеля для момента времени 3000 с от начала пожара. Результаты сравнения представлены в табл. 2.

Расхождение температур с одинаковыми пространственно-временными координатами в двух моделях не превышает $0,9 \text{ }^\circ\text{C}$, что составляет 1,01%, это подтверждает адекватность применения конечно-элементной модели для решения задач такого типа.

Из табл. 2 следует, что прогретый слой грунта на момент времени 3000 с от начала пожара несущественно распространяется за границу между обделкой и грунтом ($R = 2,7 \text{ м}$). Учитыв-

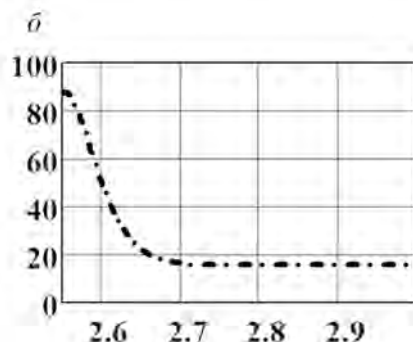
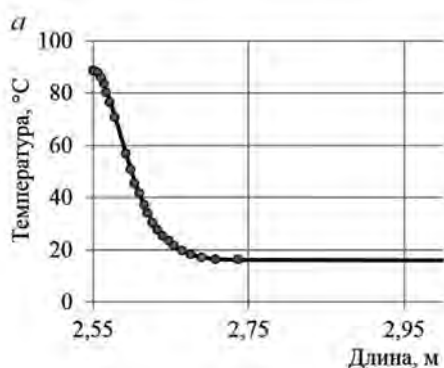


Рис. 5. Радиальное распределение температуры обделки тоннеля и окружающего грунта по толщине через 3000 с после начала пожара: а) в модели № 2; б) в модели № 1

Таблица 2

Сравнение результатов расчетов моделей № 1 и № 2

Модель	Температура в грунте, °C						
	Расстояние от оси тоннеля, м						
	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75	2,8	2,9
№1	87,44	50,203	22,41	16,573	16,012	16	16
№2	88,336	50,648	22,880	16,396	16,023	16	16
Невязка, °C	0,896	0,445	0,47	0,177	0,011	0	0
Невязка температур, %	1,01	0,88	2,06	1,06	0,07	0	0

вая, что в объемной модели тубинговая обделка имеет сложную форму, для окончательного расчета принимаем толщину слоя окружающего грунта 1 м, т.е. по рис. 2, $b R_2 = 3,55$ м.

Моделирование динамики температуры ПДГ в тоннеле

Предметом исследования являются пожарно-дымовые газы (ПДГ в задымленном участке тоннеля), изменение их температуры по длине участка при остановке в нем горящего поезда. Так как верхняя граница температур, при которых возможно проведение аварийно-спасательных работ подразделениями ВГСЧ [6] составляет 40 °C

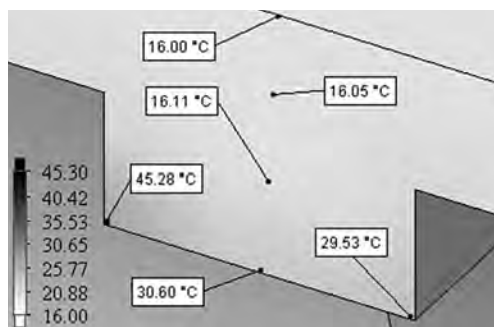


Рис. 6. Температура обделки и на границе «обделка-грунт» через 600 с от начала пожара

(без специальных теплозащитных костюмов), скорость движения фронта ПДГ с такой температурой по тоннелю

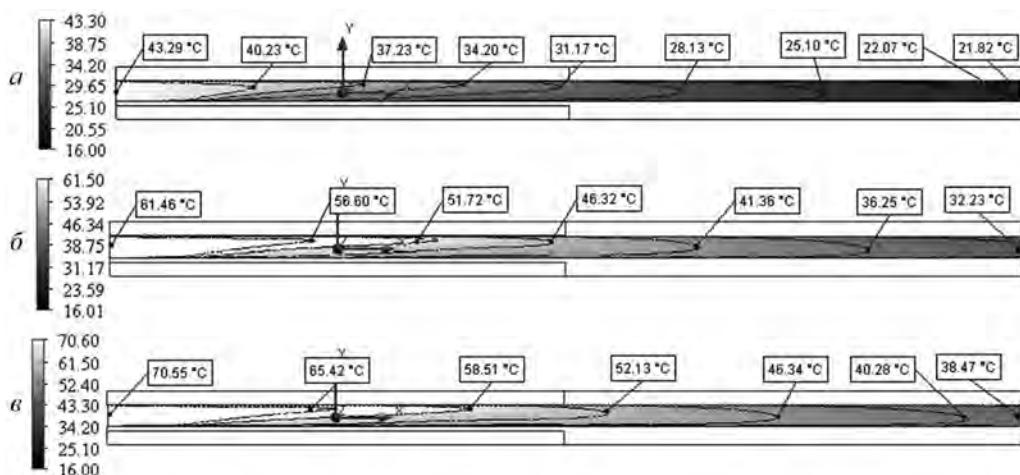


Рис. 7. Температурное поле в сечении по продольной оси тоннеля в различные моменты времени с начала пожара: а) 120 с; б) 180 с; в) 210 с

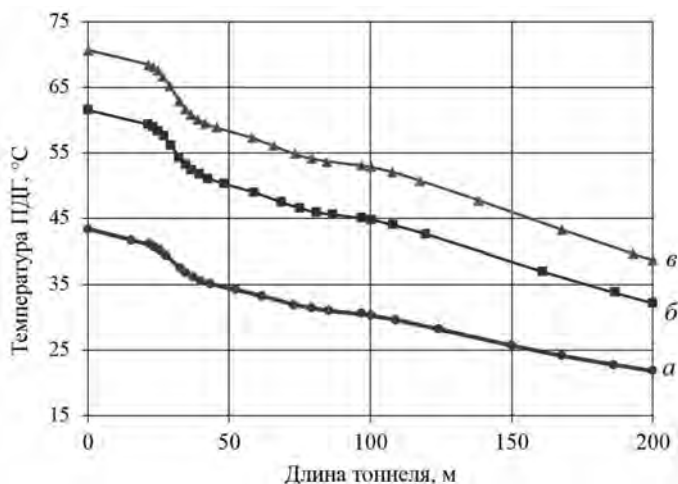


Рис. 8. Температура ПДГ по длине тоннеля через 120, 180 и 210 с

позволит определить пространственно-временные рамки проведения спасательных операций на задымленном участке для повышения их эффективности.

Геометрическая модель тоннеля и окружающего грунта представлена на рис. 2, б. Длина тоннеля 200 м, расчет ведется для первых 600 с развития пожара.

Согласно краевым условиям, указанным в начале статьи, с левой стороны в тоннель заходит поток ПДГ с постоянным массовым расходом, обеспечивающим в незадымленной части

скорость воздуха 2,23 м/с и с температурой, меняющейся временной зависимости (1) и рис. 2, б.

Результаты решения сопряженной задачи теплообмена на объемной конечно-элементной модели тоннеля представлены на рис. 6–10.

На рис. 7 изображено сечение по продольной оси тоннеля (торец горящего вагона на левой границе расчетной области, движение ПДГ слева направо) для различных моментов времени с начала пожара. Видно, что температура ПДГ в начале рассматриваемого участка достигает 40°C уже через 120 с после начала пожара.

На рис. 8 показано изменение температуры ПДГ по длине тоннеля для моментов времени, когда температура ПДГ на рассматриваемом участке достигает 40 °C: в начале участка – а (120 с), в середине – б (180 с) и в конце участка – в (210 с от начала пожара).

На рис. 9 отображены изменения температуры ПДГ за время 600 с в замерных точках, расположенных в

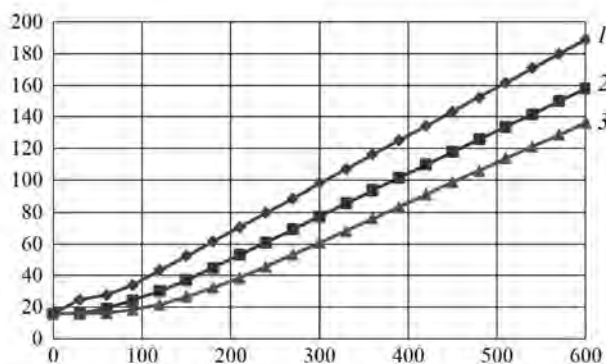


Рис. 9. Изменение температуры ПДГ по времени в точках на расстоянии от горящего поезда: 1 – 0 м; 2 – 100 м; 3 – 200 м

начале участка (точка 1), в середине – 100 м от начала (точка 2) и в конце модели участка – 200 м от начала (точка 3). Замерные точки находятся на высоте 2 м от путевого основания тоннеля, т.е. это верх рабочей зоны для работы спасателей и эвакуации пассажиров и обслуживающего персонала. Видно, что после начального переходного участка, который составляет не более 100 с, графики температур по форме приближаются к прямым (т.к. граничное условие по температуре задано прямой (1)), при этом угол их наклона, характеризующий скорость роста температур – отличается. Это объясняется сочетанием влияния повышения скорости потока более начальный 2,23 м/с за счет теплового расширения газов и снижения роста температур за счет теплопотерь на нагрев обделки. Причем влияние остывания потока больше.

Верхняя граница температур, при которых возможно проведение аварийно-спасательных работ подразделениями ВГСЧ [4] составляет 40 °С (без специальных теплозащитных костюмов), форма фронта ПДГ с такой температурой по тоннелю показан на рис. 10 в виде изоповерхности. Такая форма обусловлена сочетанием гра-



Рис. 10. Фронт температуры 40 °С: а) на участках от очага горения до 50 м; б) от 100 до 200 м

витационного и динамического воздействия на поток газов.

Выводы

1. Скорость роста температуры по длине тоннеля при горении поезда определяется скоростью движения смеси воздуха и ПДГ в тоннеле и скоростью роста температур газов от очага горения. Но скорость роста температуры по длине ниже за счет остывания ПДГ при теплообмене с обделкой тоннеля.

2. Температура ПДГ достигает граничного значения 40 °С уже через 120 с после начала горения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лугин И.В., Адеев А.А. Динамика температуры пожарнодымовых газов в тоннеле метрополитена при горении поезда // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 10. – С. 59–66.

2. СП 120.13330.2012. Свод правил. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003. – М.: Минрегион, 2012. – 259 с.

3. Красюк А.М., Лугин И.В. Исследование режимов работы тоннельной вентиляции при возгорании поезда в тоннеле метрополитена // Физикотехнические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 4. – С. 84–93.

4. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. – М.: Недра, 1975. – 237 с.

5. Голиков А.Д., Негодаев Г.Д., Чижигов В.П. Требуемый предел огнестойкости обделок тоннелей метрополитена / Борьба с пожарами в метрополитенах: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1992. – С. 71–78.

6. Устав профессиональной горноспасательной службы по организации и ведению горноспасательных работ на строительстве подземных сооружений/ Госстрой России, Управление горного надзора и военизированных горноспасательных частей. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 220 с. **ГИАБ**

Лугин Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru,
Алферова Елена Леонидовна – младший научный сотрудник, e-mail: alferova@mosk.ru
Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН.

UDC 614.841.48:625.42

HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN COMBUSTION TRAIN IN SINGLE-TRACK TUNNEL UNDERGROUND

Lugin I.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru,
Alferova E.L.¹, Junior Researcher, e-mail: alferova@mosk.ru,
Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.

The ignition and when the train being on one's way in tunnel is one of the most dangerous case of accident in underground. This paper is devoted to existent for this case heat and mass exchanges in the tunnel for safety improve and increase of live-saving work effectiveness.

The liminal temperature at which the rescue operation carried out by rescuers without special thermal protection suits maximum 40 °C. And the rate of the front of fire and flue gases (FFG) with this temperature allow to define spatio-temporal limits for rescue work conduction on a smoky area. Simulation of temperature dynamics in this case was conducted with the finite element method (FEM). The verification of FEM adaptability was conducted: comparison of the calculations results of warming tunnel lining and the surrounding soil were made the FEM and analytical method was conducted. The discrepancy between the results of the calculations of the temperature does not exceed 0,9 °C (1.01%), which confirms the adequacy of the finite element model for solving this type problems.

The study found that the rate of the temperature rise depends on the change of FFG temperature close to the source of combustion, and the rate of the gases through the tunnel, which, in turn, depends on the velocity of fresh air supplying forward the passengers are evacuated, and it also depends on the volume of the gas flow behind the hearth of combustion increase due to its thermal expansion. Is already at the moment 120 seconds from the beginning of combustion FFG temperature in the tunnel up-to-date train exceed 40 °C.

Key words: underground, ventilation, tunnel, fire, temperature, smoke removal, evacuation, rescue work.

REFERENCES

1. Lugin I.V., Adeev A.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2012, no 10, pp. 59–66.
2. SP 120.13330.2012. *Svod pravil. Metropoliteny. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 32-02-2003* (SP 120.13330.2012. Set of rules. Subways. The updated edition of SNIP 32-02-2003), Moscow, Minregion, 2012, 259 p.
3. Krasnyuk A.M., Lugin I.V. *Fizikotekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2005, no 4, pp. 84–93.
4. Tsodikov V.Ya. *Ventilyatsiya i teplosnabzhenie metropolitenov* (Ventilation and a heat supply of undergrounds), Moscow, Nedra, 1975, 237 p.
5. Golikov A.D., Negodaev G.D., Chizhikov V.P. *Bor'ba s pozharemi v metropolitenakh*. Sbornik nauchnykh trudov (Combating the fires in the subways. Proceedings), Moscow, VNIPO MVD RF, 1992, pp. 71–78.
6. *Ustav professional'noi gornospasatel'noi sluzhby po organizatsii i vedeniyu gornospasatel'nykh rabot na stroitel'stve podzemnykh sooruzhenii. Gosstroj Rossii, Upravlenie gornogo nadzora i voenizirovannykh gornospasatel'nykh chastei* (Charter of professional minerescue service on the organisation and conducting minerescue works on building underground constructions. Gosstroy of Russia, Department of mountain supervision and the militarised minerescue parts), Moscow, GUP TsPP, 2002, 220 p.

