

УДК 614.841.48:625.42

Е.Л. Алферова, И.В. Лугин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ФРОНТА ТЕМПЕРАТУР ОТ ГОРЯЩЕГО ПОЕЗДА В ТОННЕЛЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

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 ликвидации с минимальными потерями и затратами. Пороговая температура, при которой аварийно-спасательные работы выполняются спасателями ВГСЧ без специальных теплозащитных костюмов, составляет 40°C [1] и исследование динамики движения фронта пожарно-дымовых газов (ПДГ) с этой температурой по тоннелю позволит определить пространственно-временные рамки проведения спасательных операций на задымленном участке.

Проведенные исследования [2] 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 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 дымоудаления вентиляционной камеры (500 м), которое при минимальной скорости воздуха навстречу эвакуирующемуся пассажирам 2,23 м/с составляет 224 с (3,74 мин).

Объектом исследования данной работы является однопутный тоннель метрополитена. Боль-

шая часть эксплуатирующихся метрополитенов РФ и стран СНГ построена с использованием именно однопутных тоннелей, имеющих сборную обделку из железобетонных тюбингов 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 венткамерой.

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 эвакуирующемуся по тоннелю пассажирам и обслуживающему персоналу. Скорость движения воздуха нормируется СП «Метрополитены» [3] 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 эвакуация, и участок задымленный, через который проводится дымоудаление [4]. 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 тюбингов (рис. 2а) имеющий круглое сечение, ограниченное снизу основанием пути и рельсами, внутренний диаметр тоннеля 5,1 м, эквивалентный диаметр 4,81 м, площадь $18,62 \text{ м}^2$ [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

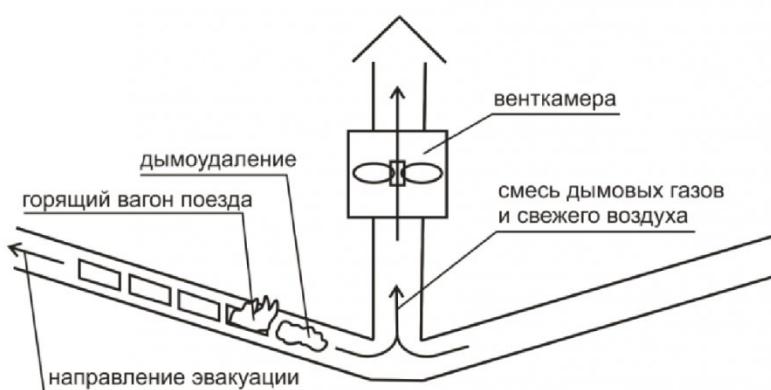


Рис. 1. Горящий поезд в тоннеле

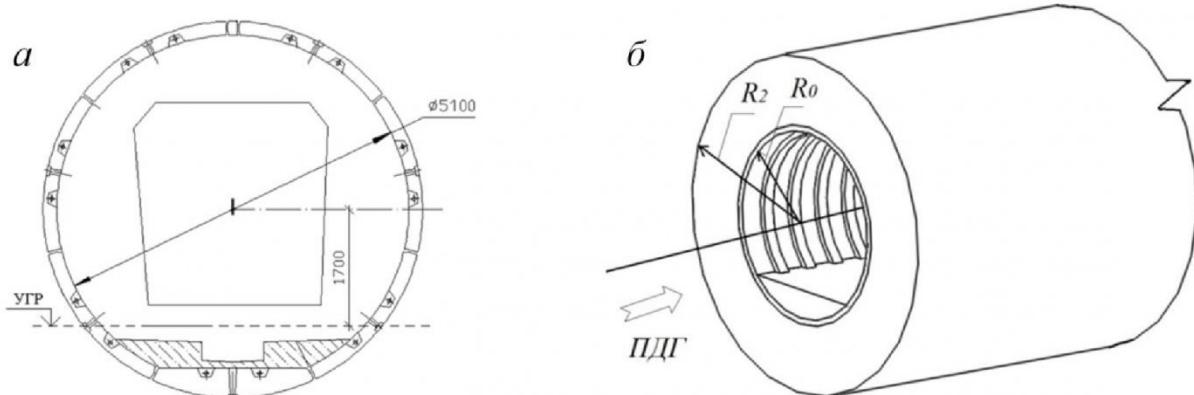


Рис. 2. Однопутный тоннель с железобетонными тюбингами: а – чертеж; б – схема к расчетной модели

уклона 0 ‰ [3].

При горении одного крайнего вагона температура ПДГ за его торцом принимается по имеющимся экспериментальным данным [5]. Для удобства использования в расчетах проведена кусочно-линейная аппроксимация графика изменения этой температуры T , °С, описываемая системой (1).

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

Из данных [4] следует, что максимальная скорость роста температуры приходится на первые 20 мин (1200 с) с начала возгорания. Согласно расчетной нормативной скорости движения фронта горения по вагону 1 м/мин [3] при его длине 20 м, за 20 мин уже весь вагон горит 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 оставляет 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, стены 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 10-15°C, что существенно ниже, чем диапазон изменения температуры ПДГ в тоннеле, поэтому неравновесностью в начальном распределении температуры в грунте пренебрегаем.

Границные условия: – на внешней стенке грунтового массива задается условие первого ро-

да, температура стены равна начальной температуре грунта; – на торцах тоннеля и грунтового массива теплообмен отсутствует; – на входе в тоннель задается постоянный массовый расход, обеспечивающий в незадымленной части скорость воздуха 2,23 м/с и температура ПДГ, меняющаяся в соответствии с зависимостью (1); – на выходе из тоннеля задается атмосферное давление.

Длина тоннеля 200 м, расчет ведется для первых 600 секунд развития пожара.

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

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

Предварительно проведенные исследования показали, что прогретый слой грунта на момент времени 3000 с от начала пожара несущественно распространяется за границу между обделкой и грунтом ($R=2,7$ м). Учитывая, что в объемной модели тюбинговая обделка имеет сложную форму, для геометрической модели (рис. 2б) принимаем толщину слоя окружающего грунта 1 м, т.е. по рис. 2б $R_2=3,55$ м.

Результаты решения сопряженной задачи теплообмена на объемной конечно-элементной модели тоннеля представлены на рис. 3-6.

На рис. 3 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, а через 210 с превышает эту температуру практически на всей длине рассматриваемого участка.

На рис. 4 показано изменение температуры ПДГ по длине тоннеля для моментов времени,

Таблица. Теплофизические свойства слоев грунта и обделки

Состав (материал) слоя	Теплофизические свойства		
	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость c , кДж/(кг·°C)	Теплопроводность λ , Вт/(м· °C)
Грунт – суглинок лесовой (относительная влажность $w=16\%$)	1680	2.35	1.51
Обделка – железобетон	2500	0.84	2.04

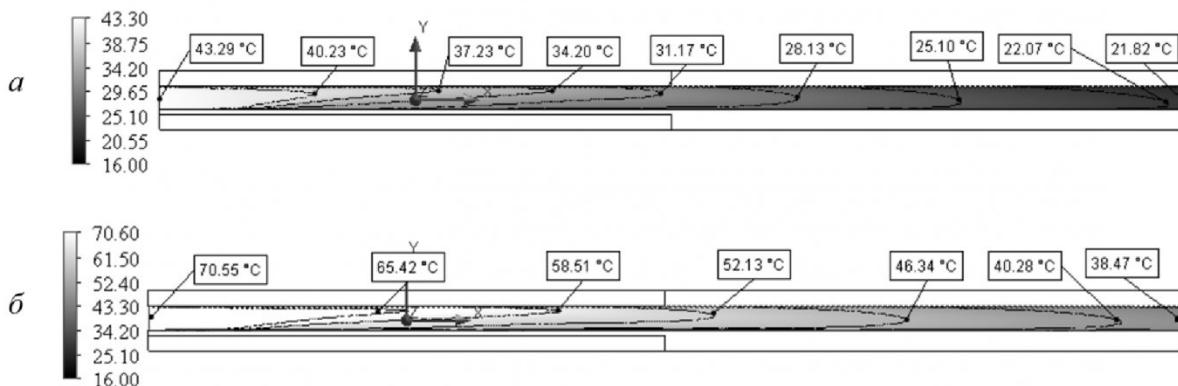


Рис. 3. Температурное поле в сечении по продольной оси тоннеля в различные моменты времени с начала пожара: а – 120 с; б – 210 с.

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.5 отображены изменения температуры ПДГ за время 600 с в замерных точках, расположенных в начале участка (точка 1), в середине – 100 м от начала (точка 2) и в конце участка модели – 200 м от начала (точка 3). Замерные точки находятся на высоте 2 м от путевого основания тоннеля – на верхней границе рабочей зоны для работы спасателей и эвакуации пассажиров и обслуживающего персонала. Видно, что после начального переходного участка, который состав-

ляет не более 100 с, графики температур по форме приближаются к прямым (т.к. граничное условие по температуре в этот промежуток времени задано прямой (1)), при этом угол их наклона, характеризующий скорость роста температур – отличается. Это объясняется сочетанием влияния повышения скорости потока больше начальной 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 [1] составляет 40°C (без специальных теплозащитных костюмов),

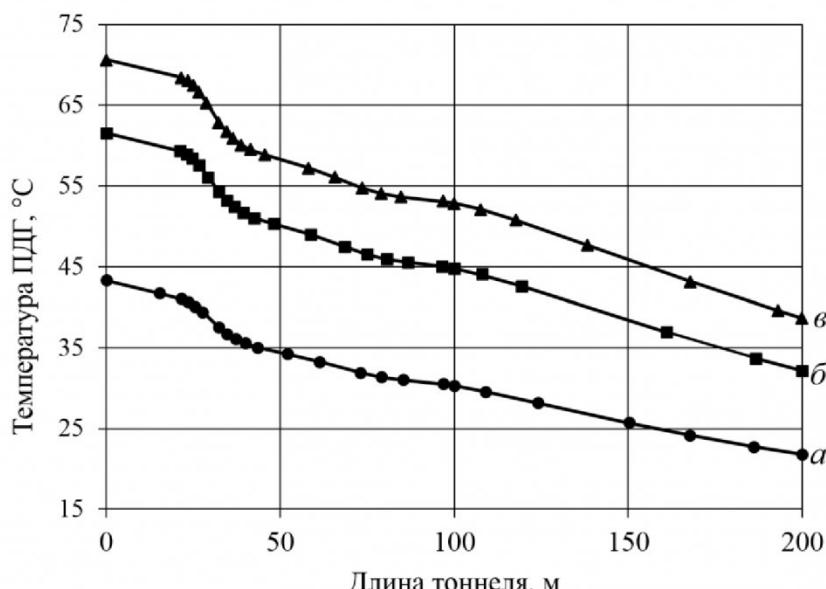


Рис. 4. Температура ПДГ по длине тоннеля через 120, 180 и 210 с от начала пожара

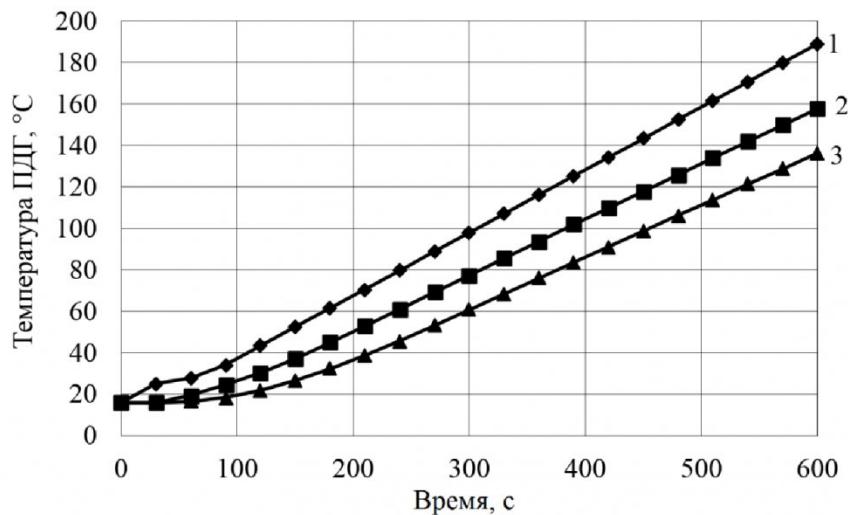


Рис. 5. Изменение температуры ПДГ по времени в точках на расстоянии от горящего поезда: 1 – 0 м; 2 – 100 м; 3 – 200 м.

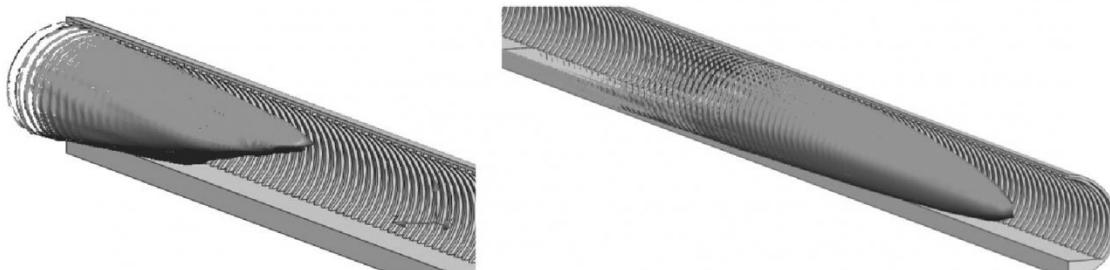


Рис. 6. Фронт температуры 40 °C: а – на участках от очага горения до 50 м; б – от 100 до 200 м

форма фронта ПДГ с такой температурой по тоннелю показан на рис.6 в виде изоповерхности. Такая форма обусловлена сочетанием гравитационного и динамического воздействия на поток газов.

Выходы

1. Скорость роста температуры по длине тоннеля при горении поезда определяется скоростью движения смеси воздуха и ПДГ в тоннеле и скоро-

стью роста температур газов от очага горения. Но скорость роста температуры по длине ниже за счет остывания ПДГ при теплообмене с обделкой тоннеля.

2. При горении поезда в тоннеле метрополитена температура ПДГ достигает порогового значения 40 °C уже через 120 с после начала горения крайнего вагона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Лугин И.В. Динамика температуры пожарно-дымовых газов в тоннеле метрополитена при горении поезда / И.В. Лугин, А.А. Адеев // Известия высших учебных заведений. Строительство.–2012.–№10.–С. 59-66.
3. СП 120.13330.2012. Свод правил. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 . – М.: Минрегион, 2012. – 259 с.
4. Красюк А.М. Исследование режимов работы тоннельной вентиляции при возгорании поезда в тоннеле метрополитена / А.М. Красюк, И.В. Лугин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. –2005. – №4. – С. 84–93.
5. Щодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов / В.Я. Щодиков – М.: Недра, 1975. – 237 с.
6. Голиков А.Д. Требуемый предел огнестойкости обделок тоннелей метрополитена / А.Д. Голиков, Г.Д. Негодаев, В.П. Чижиков // Борьба с пожарами в метрополитенах: Сб. науч. тр. – ВНИИПО МВД РФ, 1992.– С. 71–78.

Авторы статьи

Алферова Елена Леонидовна:

мл. научн. сотру. лаб. рудничной аэродинамики ИГД СО РАН, e-mail: alferova@mosk.ru

Лугин Иван Владимирович:

к.т.н., доцент, ст. научн. сотр. лаб. рудничной аэродинамики ИГД СО РАН, e-mail: ivlugin@misd.nsc.ru

Поступило в редакцию 14.02.2015