

А. Д. ГОЛИКОВ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника по научной работе, Научно-исследовательский институт перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности (НИИПИИИТвОБЖ), Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 193079, г. Санкт-Петербург, Октябрьская наб., 35; e-mail: golikad@mail.ru)

Е. Ю. ЧЕРКАСОВ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НИИПИИИТвОБЖ, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 193079, г. Санкт-Петербург, Октябрьская наб., 35; e-mail: cherkasovspb@inbox.ru)

А. И. ДАНИЛОВ, руководитель группы гражданской обороны, чрезвычайных ситуаций и пожарной безопасности, НИПИИ "Ленметрогипротранс" (Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Московская, 2; e-mail: adanilav@gmail.com)

И. А. СИВАКОВ, аспирант, ассистент кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО Университет) (Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А; e-mail: i.a.sivakov@gmail.com)

УДК 614.849

СПОСОБ ОГНЕЗАЩИТЫ ОБДЕЛКИ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ ИЗ ЧУГУННЫХ ТЮБИНГОВ

Рассмотрена проблема обеспечения огнестойкости путевых тоннелей метрополитена с обделкой из чугунных тюбингов. Предложен способ огнезащиты конструкций тюбингов, который позволяет сохранить первоначальное сечение тоннеля. Показано, что огнезащитные плиты должны устанавливаться в нишах тюбингов между ребрами так, чтобы открытая площадь боковой поверхности ребер была минимальной. Проведены расчеты прогрева обделки с применением огнезащитных минераловатных плит. Посредством расчетов показана возможность обеспечения предела огнестойкости конструкций тоннелей по несущей способности не менее 90 мин.

Ключевые слова: пожарная безопасность; огнестойкость; тоннель; тюбинг; чугун.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29

Тоннели являются важной частью транспортных магистралей. При прокладке тоннелей в сложных гидрогеологических условиях применяют чугунную тюбинговую обделку. Внешний вид типового чугунного тюбинга, используемого при строительстве подземных сооружений метрополитена, приведен на рис. 1.

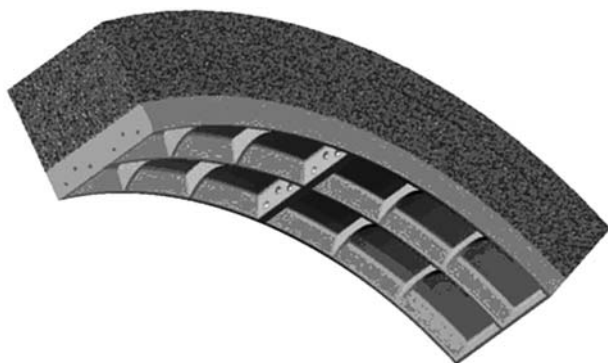


Рис. 1. Фрагмент тоннеля с обделкой из чугунных тюбингов

К обделкам тоннелей предъявляются требования по огнестойкости от 60–90 мин (эскалаторы и перегонные тоннели метрополитенов, железнодорожные тоннели) до 180 мин (автодорожные тоннели). Время прогрева чугунных конструкций до 500 °С (ориентировочная критическая температура для стальных конструкций [1]) и до 636 °С (температура, при которой температурный коэффициент условий работы чугуна [2, 3] снижается до значения коэффициента условий работы стали при 500 °С [4]) зависит от приведенной толщины металла (ПТМ), а также от вида и влажности грунтов, через которые проходит тоннель. В работе [5] было исследовано их влияние на прогрев чугунных тюбингов тоннелей метрополитена. Результаты расчетов показали, что пределы огнестойкости чугунных тюбингов соответствующей приведенной толщины могут достигать 60 мин без нанесения огнезащитных покрытий при достаточной приведенной толщине металла или наличии воды (переувлажненного грунта) на не-

обогреваемой поверхности. В случае наличия за обделкой тоннеля воды предел огнестойкости конструкции по несущей способности превышает R 90 (вопрос о сохранности гидроизоляции не рассматривался).

Для определения приведенной толщины металла, гарантирующей обеспечение предела огнестойкости R 90, были проведены расчеты прогрева чугуна обделки тоннеля при воздействии на внутренние поверхности тубинга стандартного температурного режима пожара по одномерной модели в зависимости от приведенной толщины металла. Критические значения температуры чугуна определялись на основании анализа отечественных и зарубежных исследований [2, 3, 6–8].

Приведенная толщина металла δ_{red} вычислялась по формуле

$$\delta_{red} = A/u, \quad (1)$$

где A — площадь поперечного сечения, m^2 ;

u — обогреваемая часть периметра сечения, m .

Стандартный температурный режим пожара определялся в виде следующей зависимости:

$$T = T_0 + 345 \lg \left(\frac{8}{60} \tau + 1 \right), \quad (2)$$

где T_0 — начальная температура, $^{\circ}C$;

τ — время с момента начала испытаний, s .

Расчет распределения температуры в поперечном сечении обделки тоннеля и окружающем грунте проводился путем численного решения уравнения теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик материалов от температуры:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T), \quad (3)$$

где c , ρ , λ — удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность материала соответственно.

Таблица 1. Зависимость удельной теплоемкости чугуна от температуры [10]

Температура, $^{\circ}C$	0	160	260	360	510
c , Дж/(кг $\cdot^{\circ}C$)	502	523	553	586	620

Таблица 2. Теплофизические характеристики серого чугуна, базальтоволокнистых минераловатных плит ROCKWOOL CONLIT SL 150 и грунта

Показатель	Чугун серый	ROCKWOOL CONLIT SL 150	Грунт	
			Глина	Известняк [11]
Плотность, кг/ m^3	7100 [3]	165 [12]	2000	2100
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м $\cdot^{\circ}C$)	52 [9]	0,0569 + 0,000117 [13]	1,71	1,25
Удельная теплоемкость, Дж/(кг $\cdot^{\circ}C$)	См. табл. 1	752 + 0,637 [14]	1420	920
Влажность, %	0	0	0	0

Примечание. T — температура, $^{\circ}C$.

Граничные условия задачи описывались уравнением лучистого и конвективного теплообмена между внутренней поверхностью конструкции и окружающей средой:

$$-\lambda \operatorname{grad} T = \alpha_k (T_r - T_n) + \varepsilon_{пр} \sigma [(T_r + 273)^4 - (T_n + 273)^4], \quad (4)$$

где α_k — коэффициент конвективного теплообмена для обогреваемой поверхности; $\alpha_k = 29$ Вт/ m^2 ; T_n , T_r — температура соответственно поверхности конструкции и газовой фазы, $^{\circ}C$;

$\varepsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты системы *обогреваемая среда – поверхность конструкции*; для системы *поверхность конструкции – чугун* $\varepsilon_{пр} = 0,72$;

σ — постоянная Стефана – Больцмана.

На поверхности контакта чугуна и грунта приняты условия равенства температур и тепловых потоков.

Коэффициенты теплообмена взяты из ГОСТ 30247.0–94 для условий испытаний в огневой печи.

Теплофизические характеристики серого чугуна СЧ20 [3, 9, 10] и грунта (глины и известняка [11]) приведены в табл. 1 и 2.

При проведении расчетов для случая необогреваемой поверхности конструкции принимались наихудшие условия теплообмена, которые реализуются при использовании в качестве грунта сухого известняка, как имеющего минимальный коэффициент температуропроводности. Площадь обогреваемой поверхности конструкции принималась равной площади контакта с грунтом, что приводило к несколько заниженным расчетным значениям температуры. В реальности из-за развитой внутренней поверхности тубингов площадь обогрева была больше площади теплоотдачи.

Температурные зависимости для несущих чугунных конструкций тоннеля без огнезащиты, проложенного в сухом известняке, приведены на рис. 2–4. Расчеты показали, что пределы огнестойкости обделок тоннелей в сухом грунте достигают 90 мин при ПТМ = 82 мм (критическая температура $636^{\circ}C$) или 123 мм (критическая температура $500^{\circ}C$), что

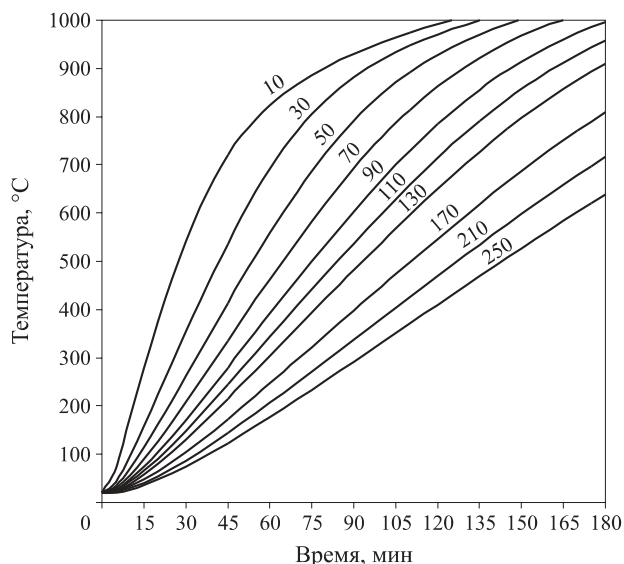


Рис. 2. Зависимость прогрева чугуных конструкций тоннеля без огнезащиты от времени при ПТМ 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 170, 210 и 250 мм

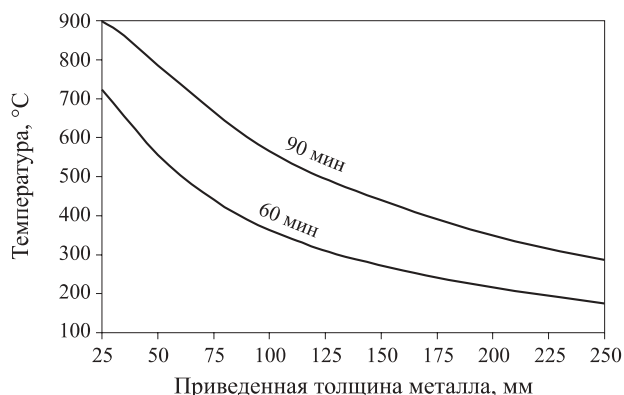


Рис. 3. Зависимость температуры конструкции от ПТМ при времени воздействия пожара 60 и 90 мин

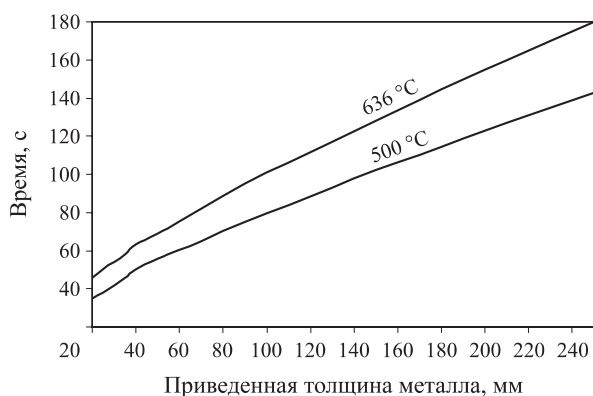


Рис. 4. Зависимость времени прогрева чугуных туннелей без огнезащиты при критической температуре 500 и 636 °C

значительно больше приведенных толщин применяемых туннелей (25–60 мм). Следовательно, для выполнения требований по пределам огнестойкости необходима огнезащита туннелей. При разработке и внедрении новых облегченных чугуных

обделок [15] приведенная толщина металла может стать еще меньше, а проблема обеспечения огнестойкости конструкций усугубится еще сильнее.

На рис. 5 представлены зависимости температуры чугуных конструкций при различных толщинах базальтоволокнистых минераловатных плит ROCKWOOL CONLIT SL 150, установленных по внутренней поверхности чугуных туннелей. Теплофизические характеристики базальтоволокнистых минераловатных плит ROCKWOOL CONLIT SL 150 [12–14] приведены в табл. 2 при $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,82$ (поверхность конструкции — минераловатная плита). На поверхности контакта минераловатных плит и чугуна приняты условия равенства температур и тепловых потоков.

Расчеты показали, что минераловатные плиты, применяемые в качестве огнезащиты чугуной тоннельной обделки, являются довольно эффективным средством. К недостаткам этого способа огнезащиты можно отнести сложность крепления огнезащитного покрытия к поверхности конструкции и уменьшение свободного сечения тоннеля.

Для обеспечения предела огнестойкости 90 мин эффективным решением является вариант “зонной” защиты, т. е. установка огнезащитных плит, которые защищают только внутренние поверхности туннеля, а торцы его ребер остаются открытыми.

Для определения средней температуры туннеля проводится два одномерных расчета — температуры ребер без огнезащиты (приведенная толщина металла равняется высоте ребра) и температуры полок с огнезащитой (приведенная толщина металла равняется толщине полки).

Средняя температура туннеля $T_{\text{туб}} (^\circ\text{C})$ определяется по формуле

$$T_{\text{туб}} = \frac{m_{\text{реб}} T_{\text{реб}} + (M_{\text{туб}} - m_{\text{реб}}) T_{\text{пол}}}{M_{\text{туб}}}, \quad (5)$$

где $m_{\text{реб}}$ — масса незащищенных ребер туннеля, кг;
 $T_{\text{реб}}$ — средняя температура металла ребер туннеля без огнезащитного покрытия, $^\circ\text{C}$ (табл. 3);
 $M_{\text{туб}}$ — масса туннеля, кг;
 $T_{\text{пол}}$ — средняя температура металла полок туннеля под огнезащитным покрытием, $^\circ\text{C}$ (табл. 4);
 $T_{\text{туб}}$ — средняя температура туннеля, $^\circ\text{C}$.

Зависимости температуры туннеля от приведенной толщины металла и толщины огнезащитного покрытия при времени воздействия пожара 60 и 90 мин (эскалаторные и перегонные тоннели) приведены в табл. 3 и 4 и на рис. 2–5.

Поскольку теплоемкость чугуна зависит от температуры, критерий достижения средней температурой критического значения точнее устанавливается через теплосодержание (энтальпию) материала. Для твердого тела при нагреве в случае отсутствия

Таблица 3. Температура тьюбинга без огнезащитного покрытия в зависимости от приведенной толщины металла при времени воздействия пожара 60 и 90 мин

Время воздействия пожара, мин	Температура тьюбинга, °С, при ПТМ, мм								
	30	40	50	60	80	100	150	200	250
60	689	618	555	501	423	365	272	214	175
90	882	839	786	738	645	565	441	349	287

Таблица 4. Температура тьюбинга в зависимости от приведенной толщины металла и толщины огнезащитного покрытия ROCKWOOL CONLIT SL 150 при времени воздействия пожара 60 и 90 мин

ПТМ, мм	Температура тьюбинга, °С, при толщине огнезащитного покрытия, мм												
	0	5	6	7	8	9	10	12	14	16	20	25	30
25	$\frac{721}{899}$	$\frac{271}{382}$	$\frac{241}{342}$	$\frac{217}{309}$	$\frac{198}{282}$	$\frac{182}{259}$	$\frac{168}{240}$	$\frac{147}{210}$	$\frac{131}{186}$	$\frac{118}{168}$	$\frac{99}{140}$	$\frac{83}{117}$	$\frac{72}{100}$
35	$\frac{656}{860}$	$\frac{232}{334}$	$\frac{206}{297}$	$\frac{185}{268}$	$\frac{168}{244}$	$\frac{155}{224}$	$\frac{143}{208}$	$\frac{125}{181}$	$\frac{111}{161}$	$\frac{101}{145}$	$\frac{85}{121}$	$\frac{72}{101}$	$\frac{62}{87}$
50	$\frac{557}{786}$	$\frac{190}{280}$	$\frac{169}{249}$	$\frac{152}{224}$	$\frac{138}{204}$	$\frac{127}{187}$	$\frac{118}{173}$	$\frac{103}{151}$	$\frac{92}{134}$	$\frac{84}{121}$	$\frac{71}{101}$	$\frac{61}{85}$	$\frac{53}{74}$
75	$\frac{443}{668}$	$\frac{148}{222}$	$\frac{131}{196}$	$\frac{118}{176}$	$\frac{108}{160}$	$\frac{100}{147}$	$\frac{93}{136}$	$\frac{82}{119}$	$\frac{74}{106}$	$\frac{67}{96}$	$\frac{58}{81}$	$\frac{50}{69}$	$\frac{44}{61}$
100	$\frac{365}{565}$	$\frac{122}{184}$	$\frac{109}{163}$	$\frac{98}{146}$	$\frac{90}{133}$	$\frac{83}{122}$	$\frac{78}{114}$	$\frac{69}{100}$	$\frac{62}{89}$	$\frac{57}{81}$	$\frac{53}{74}$	$\frac{50}{69}$	$\frac{39}{52}$

Пр и м е ч а н и е. Над чертой приведены показатели для времени воздействия 60 мин, под чертой — 90 мин.

фазовых переходов изменение энтальпии ΔH определяется количеством теплоты, полученной телом:

$$\Delta H(T_0 \rightarrow T_{\text{нагр}}) = \int_{T_0}^{T_{\text{нагр}}} C(T) dT, \quad (6)$$

где $T_{\text{нагр}}$ — средняя температура нагрева твердого тела, °С.

Зависимости теплоемкости и энтальпии серого чугуна от его температуры приведены в табл. 5 и на рис. 6.

Тогда условие достижения критической температуры можно выразить следующим образом:

$$\frac{m_{\text{реб}} \Delta H(T_0 \rightarrow T_{\text{реб}}) + m_{\text{пол}} \Delta H(T_0 \rightarrow T_{\text{пол}})}{M_{\text{тьюб}} \Delta H(T_0 \rightarrow T_{\text{кр}})} = 1, \quad (7)$$

где значения ΔH определяются по рис. 6.

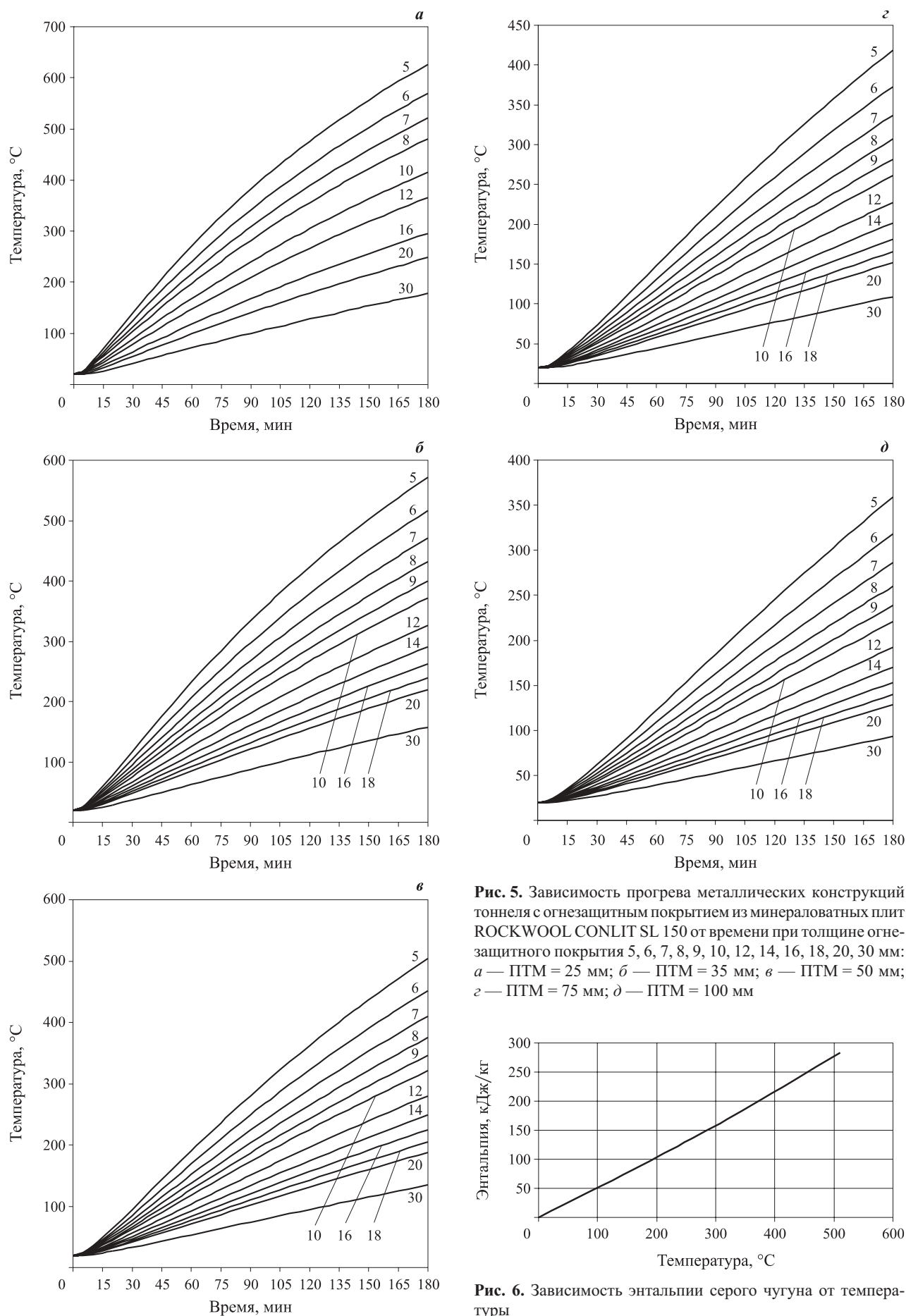
В качестве иллюстрации на рис. 7 приведена конструкция типового тьюбинга, высота ребер которого

Таблица 5. Зависимость теплоемкости и энтальпии серого чугуна от температуры [11]

Температура, °С	c , Дж/(кг·°С)	ΔH , кДж/кг
0	502	0
160	523	82,00
260	553	135,80
360	586	192,75
510	620	283,20

намного превышает 250 мм. При прогреве чугунной плиты толщиной 250 мм с теплоотдачей в грунт (сухой известняк) средняя температура на 90-й минуте не будет превышать 290 °С. Толщина полки при этом составляет 60 мм. Температура на 90-й минуте при толщине огнезащитной плиты 30 мм не будет превосходить 67 °С. Следовательно, предлагаемый вариант огнезащиты обеспечивает предел огнестойкости чугунного тьюбинга не менее 90 мин.

Вероятно, в случае крепления тьюбингов высокотемпературным силикатным клеем по периметру толщину минераловатных плит придется увеличить для расширения площади контакта и возможности вставки плит “враспор” между ребрами тьюбингов. При достаточной шероховатости боковых поверхностей ребер (или прорезании канавки) возможна дополнительная фиксация минераловатных плит, устанавливаемых “враспор” выпуклостью вверх, с помощью плоских металлических стержней, “пришитых” к плитам на необогреваемой поверхности вдоль короткой стороны. В случае достаточности клеевого соединения при установке минераловатных плит можно их зафиксировать с помощью плоских стержней, устанавливаемых со стороны открытой поверхности, на время схватывания клея. Для проектируемых тоннелей, по-видимому, лучшим вариантом является применение тьюбингов с местами для крепления огнезащитного покрытия, оборудованными в заводских условиях.



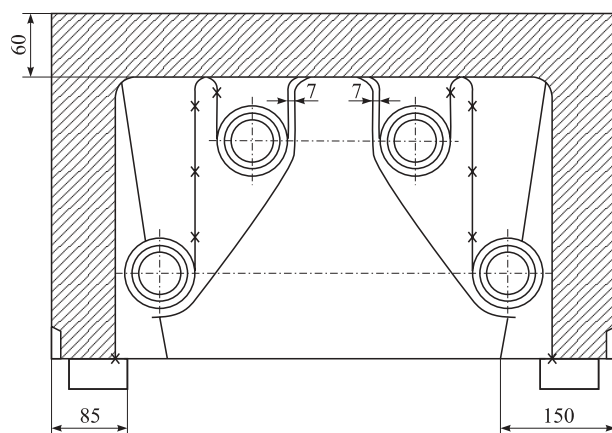


Рис. 7. Эскиз тьюбинга 105Н

Безусловно, подход к оценке предела огнестойкости металлических конструкций тьюбингов тоннелей, основанный на достижении критической температуры, требует экспериментального подтверждения в процессе испытаний представительных фрагментов тоннелей при нагрузках и условиях теплоотдачи в грунты, приближенных к реальным. На данный момент стенда, позволяющего реализовать такие условия, в России не существует. В случае перехода к гибкому нормированию при переходе на реальные температурные режимы пожара на рассматриваемом объекте также потребуются проведение дополнительных экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов (к СНиП II-2-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. — М. : Стройиздат, 1985. — 56 с.
2. Погодин-Алексеев Г. И. Справочник по машиностроительным материалам. — Т. 3. Чугун. — М. : Машгиз, 1959. — 359 с.
3. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н. Г. Гиршовича. — М. : Машиностроение, 1978. — 758 с.
4. Мосалков И. Л., Плюснина Г. Ф., Фролов А. Ю. Огнестойкость строительных конструкций. — М. : ЗАО «Спецтехника», 2001. — 496 с.
5. Голиков А. Д., Черкасов Е. Ю., Данилов А. И., Сиваков И. А. Предел огнестойкости конструкций чугунных тоннельных обделок метрополитена без огнезащитных покрытий // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 12. — С. 20–27.
6. Maraveas C., Wang Y. C., Swailes T. Elevated temperature behaviour and fire resistance of cast iron columns // Fire Safety Journal. — 2016. — Vol. 82. — P. 37–48. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.03.004.
7. Maraveas C., Wang Y. C., Swailes T., Sotiriadis G. An experimental investigation of mechanical properties of structural cast iron at elevated temperatures and after cooling down // Fire Safety Journal. — 2015. — Vol. 71. — P. 340–352. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.026.
8. Xiao Bin Huang, Yu Gang Ye, Xing Quan Shen, Xing Chang. The mechanical properties of gray cast iron and metallographic structure effect on the chip shape // Advanced Materials Research. — 2011. — Vol. 339. — P. 200–203. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.339.200.
9. Зернов С. И. Расчетные оценки при решении задач пожарно-технической экспертизы : учебное пособие. — М. : ЭКЦ МВД России, 1992.
10. Конструкционные материалы : справочник / Арзамасов Б. Н., Брострем В. А., Буше Н. А., Быков Ю. А., Васильева А. Г., Гардымов Г. П., Гершман И. С., Гини Э. Ч., Дриц М. Е., Зябрев А. А., Кириллов И. В., Кишкина С. И., Курочкин Е. А., Кучерявый В. И., Макарова В. И., Панайоти Т. А., Пастухова Ж. П., Перкас М. Д., Рахштадт А. Г., Семенов А. П., Силаева В. И., Симонов В. Н., Соколенко Л. М., Соловьёва Т. В., Солонин В. И., Строганов Г. Б., Третьяков В. И., Ульянин Е. А., Фридляндер И. Н., Ховова О. М., Яценко К. П. — М. : Машиностроение, 1990. — 688 с.
11. Эллисон В. А. Пожарная профилактика. — М. : Изд-во НКВД, 1931. — 262 с.
12. CONLIT SL 150. Описание продукта. URL: http://www.rockwool.ru/products+and+solutions/u/2011.product/1539/ognezashchita_sistema_rockfire/conlit_sl_150 (дата обращения: 21.07.2015).
13. Ройтман М. Я. Пожарная профилактика в строительном деле. — М. : Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1961. — 368 с.
14. Проектирование, испытание и оценка огнестойкости противопожарных дверей : рекомендации. — М. : ВНИИПО МВД СССР, 1990. — 91 с.
15. Мосолов Д. А. Эффективные конструктивные параметры облегченных чугунных обделок тоннелей метрополитенов : дис. ... канд. техн. наук. — М. : ОАО ЦНИИС, 2007. — 205 с.

Материал поступил в редакцию 17 июля 2016 г.

Для цитирования: Голиков А. Д., Черкасов Е. Ю., Данилов А. И., Сиваков И. А. Способ огнезащиты обделки транспортных тоннелей из чугунных тубингов // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 12. — С. 22–29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29.

METHOD FIRE PROTECTION OF CAST IRON TUNNEL LINING

GOLIKOV A. D., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Deputy Head on Scientific Work, Research Institute of Perspective Researches and Innovative Technologies in the Field of Health and Safety, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Oktyabrskaya Quay, 35, Saint Petersburg, 193079, Russian Federation; e-mail address: golikad@mail.ru)

CHERKASOV E. Yu., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Research Institute of Perspective Researches and Innovative Technologies in the Field of Health and Safety, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Oktyabrskaya Quay, 35, Saint Petersburg, 193079, Russian Federation; e-mail address: cherkasovspb@inbox.ru)

DANILOV A. I., Fire-Safety Principal Engineer, Scientific, Research, Design and Surveying Institute "Lenmetrogiprotrans" (Bolshaya Moskovskaya St., 2, Saint Petersburg, 191002, Russian Federation; e-mail address: adanilav@gmail.com)

SIVAKOV I. A., Postgraduate Student, Assistant of Department of Computer Thermal Physics and Energy Monitoring, Saint Petersburg State University of Information Technology, Mechanics and Optics (ITMO University) (Kronverkskiy Passage, 49, letter A, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; e-mail address: i.a.sivakov@gmail.com)

ABSTRACT

Subways are an important part of the transport system in large cities. Damage to load-bearing structures of underground tunnels under fire for a long time disrupts the functioning of the transport pipeline. In this regard, to the structural elements lining tunnels there are imposed high requirements for fire resistance of 60–90 minutes (for escalators, subway tunnels and rail tunnels) and to 180 minutes for road tunnels.

The purpose of research, the results of which are shown in the article, is the provision of fire resistance and lining of underground tunnels, made of iron tubing.

The analysis of domestic and foreign experience in the field of fire resistance of cast iron structures for different purposes and different operating conditions was conducted.

Initial and boundary conditions for the production and the estimated task of forming a mathematical model were formulated. Calculations of warm lining from cast iron tubing when exposed to the standard temperature of fire, depending on the thickness of construction, taking into account the heat transfer from the unheated side were conducted. Based on the results of the calculations it was determined the need for a fire-retardant action.

A method of fire protection constructions, which allows you to keep the original tunnel section, was suggested. The essence of the method lies in the structural protection of structural iron tubing using fire-retardant mineral woolplates.

The next stage of research was to conduct calculations of the regiment of heating the lining from cast iron tubing when exposed to the standard temperature of fire mode when using the proposed fire protection options. The calculation results have shown high efficiency of mineral wool plates use as fire protection of the iron tunnel lining.

Calculations have shown that even under the worst conditions of heat irradiation into the ground it's possible to provide the limit of fire resistance of cast iron tubing on the bearing capacity for at least 90 minutes. The results of the research show that the approach to defining the limit of fire resistance of structural metal tubing tunnels based on the achievement of critical temperature, requires experimental confirmation in tests of representative fragments of tunnels under the strain and conditions of heat irradiation into the ground close to the real.

In the case of the transition to a flexible standardization in the transition to the real temperature of fire regimes on the object in question will also require further experimental work.

Keywords: fire safety; fire; tunnel; tubing; cast iron.

REFERENCES

1. *Guidelines for identification of the limits of fire resistance of structures, within the fire from spreading structures and groups of flammability of materials (for SNiP II-2-80)*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 56 p. (in Russian).
2. Pogodin-Alekseev G. I. *Handbook of machine building materials. Vol. 3. Chugun*. Moscow, Mashgiz Publ., 1959. 359 p. (in Russian).
3. Girshovich N. G. (ed.). *Handbook of cast iron casting*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978. 758 p. (in Russian).
4. Mosalkov I. L., Plyusnina G. F., Frolov A. Yu. *Fire resistance of building structures*. Moscow, ZAO "Spetstekhnika" Publ., 2001. 496 p. (in Russian).
5. Golikov A. D., Cherkasov E. Yu., Danilov A. I., Sivakov I. A. Fire resistance of cast iron tunnel lining without fireproof covering. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 12, pp. 20–27 (in Russian).
6. Maraveas C., Wang Y. C., Swailes T. Elevated temperature behaviour and fire resistance of cast iron columns. *Fire Safety Journal*, 2016, vol. 82, pp. 37–48. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.03.004.
7. Maraveas C., Wang Y. C., Swailes T., Sotiriadis G. An experimental investigation of mechanical properties of structural cast iron at elevated temperatures and after cooling down. *Fire Safety Journal*, 2015, vol. 71, pp. 340–352. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.026.
8. Xiao Bin Huang, Yu Gang Ye, Xing Quan Shen, Xing Chang. The mechanical properties of gray cast iron and metallographic structure effect on the chip shape. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 339, pp. 200–203. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.339.200.
9. Zernov S. I. *Estimates at the decision of tasks of fire-technical examination. Tutorial*. Moscow, EKTs MVD Rossii Publ., 1992 (in Russian).
10. Arzamasov B. N., Brostrem V. A., Bushe N. A., Bykov Yu. A., Vasilyeva A. G., Gardymov G. P., Gershman I. S., Gini E. Ch., Drits M. Ye., Zyabrev A. A., Kirillov I. V., Kishkina S. I., Kurochkin Ye. A., Kucheryavy V. I., Makarova V. I., Panayoti T. A., Pastukhova Zh. P., Perkas M. D., Rakhshadt A. G., Semenov A. P., Silaeva V. I., Simonov V. N., Sokolenko L. M., Solovyeva T. V., Solonin V. I., Stroganov G. B., Tretyakov V. I., Ulyanin Ye. A., Fridlyaider I. N., Khovova O. M., Yatsenko K. P. *Construction materials. Handbook*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990. 688 p. (in Russian).
11. Ellison V. A. *Fire prevention*. Moscow, Izdatelstvo NKVD, 1931. 262 p. (in Russian).
12. *CONLIT SL 150. Product description*. Available at: http://www.rockwool.ru/products+and+solutions/u/2011.product/1539/ognezashchita_sistema_rockfire/conlit_sl_150 (Accessed 21 July 2015) (in Russian).
13. Roytman M. Ya. *Fire prevention in construction*. Moscow, Izdatelstvo Ministerstva kommunalnogo khozyaystva RSFSR Publ., 1961. 368 p. (in Russian).
14. *Designing, testing and evaluating the fire resistance of fire doors. Practical advice*. Moscow, VNIPO MVD SSSR Publ., 1990. 91 p. (in Russian).
15. Mosolov D. A. *Effective design parameters of lightweight cast-iron tunnel lining subways. Cand. techn. sci. diss.* Moscow, 2007. 205 p. (in Russian).

For citation: Golikov A. D., Cherkasov E. Yu., Danilov A. I., Sivakov I. A. Method fire protection of cast iron tunnel lining. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 12, pp. 22–29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29.