

Н. П. КОПЫЛОВ, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

В. И. ГОРШКОВ, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

С. Н. КОПЫЛОВ, д-р техн. наук, начальник центра автоматических установок обнаружения и тушения пожаров, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

Д. В. ФЕДОТКИН, канд. техн. наук, заместитель начальника отдела специальных исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: fdv982@mail.ru)

УДК 614.841.125:614.844.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА В РЕЗЕРВУАРАХ ПЕНОЙ

Рассматриваются процессы, происходящие у борта резервуара во время тушения горючей жидкости пеной после того, как большая часть зеркала жидкости покроется огнетушащим слоем пены. Приведен анализ двух случаев, необходимых для тушения оставшихся очагов горения у борта резервуара: охлаждения свободного борта резервуара до температуры, при которой нагретый пламенем борт перестает служить источником зажигания паров топлива, и понижения температуры горючей жидкости до температуры, при которой уже не происходит воспламенения горючей смеси. Для первого случая разработана математическая модель, описывающая изменение температуры при охлаждении борта резервуара в зависимости от времени, и получены с определенными допущениями аналитические решения. Предложено выражение, определяющее время тушения горючей жидкости, по которому с учетом имеющихся экспериментальных данных представлены расчетные значения коэффициента теплоотдачи. Для второго случая получено уравнение изменения температуры борта резервуара при охлаждении во время тушения горючей жидкости пеной.

Ключевые слова: пожаротушение; резервуар; время охлаждения; температура; математическое моделирование.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.70-76

Проблема тушения пожаров в резервуарах с нефтепродуктами по-прежнему остается достаточно острой, несмотря на более чем 50-летнюю историю попыток ее решить.

Для оценки эффективности той или иной технологии тушения пожаров необходимо учитывать различные эффекты, проявляющиеся при горении нефтепродуктов в резервуарах. Прежде всего, к таким эффектам относится взаимодействие пожара с атмосферой и прогрев стенки резервуара при пожаре. При тушении горючей жидкости в резервуаре пеной, после того как большая часть зеркала жидкости уже покрыта ее огнетушащим слоем, непосредственно у борта резервуара топливо продолжает гореть. Этот довольно сложный случай часто реализуется на практике, но в литературе описан недостаточно широко [1–3]. Тушение этих последних очагов горения достигается за счет:

- охлаждения свободного борта резервуара до температуры, при которой нагретый пламенем борт перестает служить источником зажигания паров топлива;
- понижения температуры горючей жидкости, расположенной у боковой поверхности резервуара, до температуры, при которой уже не происходит воспламенения горючей смеси, образующейся при смешении паров топлива с воздухом.

Рассмотрим первый случай — охлаждение свободного борта резервуара до температуры, при которой нагретый пламенем борт перестает служить источником зажигания паров топлива.

Будем считать, что после ликвидации пеной основного факела пожара начальная температура борта равна температуре пламени. Охлаждение борта происходит за счет передачи тепла в окружающее пространство по закону Ньютона. Вследствие малой

толщины стенок резервуара и высокой по сравнению с воздухом теплопроводностью не будем учитывать распределение температуры по толщине и высоте стенки. Тогда изменение температуры свободного борта может быть описано уравнением

$$c\rho V(dT/dt) = -\alpha S(T - T_0), \quad (1)$$

где c , ρ — теплоемкость и плотность материала резервуара;

V — объем свободного борта;

T, T_0 — текущая температура и температура окружающей среды;

t — время;

α — коэффициент теплоотдачи;

S — площадь охлаждения.

Начальным условием задачи будет

$$t = 0, \quad T = T_h, \quad (2)$$

где T_h — начальная температура свободного борта.

Перепишем уравнение (1) в виде

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\alpha S}{c\rho V}(T - T_0). \quad (3)$$

Вычислим в (3) отношение S/V через средний радиус резервуара R_{cp} :

$$R_{cp} = \frac{R_0 + r_0}{2}, \quad (4)$$

где R_0, r_0 — внешний и внутренний радиусы стенки резервуара.

Тогда с учетом того, что свободный борт охлаждается с двух сторон, площадь охлаждения

$$S = 4\pi R_{cp} H, \quad (5)$$

где H — высота свободного борта.

Объем свободного борта резервуара определяется выражением

$$V = 2\pi R_{cp} h H, \quad (6)$$

где h — толщина стенки резервуара.

Подставив (5) и (6) в (3) и разделив переменные, получим:

$$\int_{T_h}^T \frac{dT}{T - T_0} = -\int_0^t \frac{2\alpha}{c\rho h} dt. \quad (7)$$

Проинтегрируем (7):

$$t = \frac{c\rho h}{2\alpha} \ln \frac{T_h - T_0}{T - T_0}. \quad (8)$$

Если в качестве начальной температуры принять температуру пламени $T_{пл}$ и положить, что тушение пламени произойдет при температуре борта, равной температуре вспышки горючей жидкости $T_{всп}$, то необходимое время тушения t_t определится выражением

$$t_t = \frac{c\rho h}{2\alpha} \ln \frac{T_{пл} - T_0}{T_{всп} - T_0}. \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что чем интенсивнее теплообмен (чем больше α), тем быстрее будет завершен процесс подавления пламени пеной.

Величину коэффициента теплоотдачи можно вычислить с помощью известных критериальных уравнений для бесконечной пластины при естественном конвективном теплообмене. Однако следует иметь в виду, что для настоящей задачи на процесс отбора тепла от борта резервуара может оказывать влияние испарение слоя пены при контакте с нагретым бортом. Критериальных уравнений для подобного случая, вероятно, не существует, поэтому коэффициент теплоотдачи целесообразно определять по экспериментальным данным или на основе экспериментов попытаться получить необходимое критериальное уравнение.

В работе [4] приведены экспериментальные данные по прогреву борта резервуара и времени тушения пожара самовспенивающейся газоаэрозоленаполненной пеной, подаваемой от установок импульсного пожаротушения. Время свободного горения в резервуаре (до начала тушения) составляло не менее 3 мин. Используя справочные и экспериментальные данные и подставив в (9) значения времени $t = 400$ с, плотности стали $\rho = 7800$ кг/м³, теплоемкости стали $c = 0,461 \div 0,673$ кДж/(кг·К), толщины стенки резервуара $h = 4$ мм, текущей температуры $T = 1373$ К и температуры окружающей среды $T_0 = 283$ К, получим коэффициент теплоотдачи $\alpha = 0,34 \div 0,51$ Вт/(м²·К).

Рассмотрим второй случай — понижение температуры горючей жидкости, расположенной у боковой поверхности резервуара, до температуры, при которой уже не происходит воспламенения горючей смеси, образующейся при смешении паров топлива с воздухом.

При решении задачи об охлаждении резервуара, как и в предыдущем случае, будем считать, что теплообмен с окружающей средой происходит непосредственно с боковой поверхности жидкости. Глубина охлаждения представляет собой слой жидкости, расположенный непосредственно у борта резервуара. Его толщина значительно меньше радиуса резервуара, поэтому задача охлаждения резервуара в тепловом отношении может быть сведена к охлаждению тела неограниченных размеров (однородное тело, ограниченное бесконечной плоскостью $x = 0$ и простирающееся в бесконечность в положительном направлении оси x) [5]. Поскольку тепло в направлении осей y и z не распространяется, производные по этим координатам равны нулю. При отсутствии источников тепла в рассматриваемом пространстве уравнение теплопроводности и условия однозначности можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (10)$$

где a — температуропроводность горючей жидкости.
Начальным условием задачи будет

$$T = T_h \text{ при } t = 0. \quad (11)$$

На границе тела поток тепла, отбираемый в окружающее пространство путем конвекции, равен потоку тепла, передаваемого ему путем теплопроводности:

$$x = 0, \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T - T_0), \quad (12)$$

где λ — коэффициент теплопроводности.

В процессе охлаждения температура поверхности T_s изменяется с течением времени, поэтому вторым граничным условием можно записать

$$x = 0, T = T_s. \quad (13)$$

Введем величину $\delta(t)$, представляющую собой глубину охлаждаемого слоя, которая обладает важным свойством. Для всех значений $x > \delta(t)$ можно считать, что температура тела равна его начальной температуре ($T = T_h$) и тепло не распространяется за пределы прогретого слоя ($\partial T / \partial x = 0$). При этом глубина слоя непрерывно меняется с течением времени.

С учетом этого необходимыми для задачи граничными условиями будут:

$$x = \delta, T = T_h; \quad (14)$$

$$x = \delta, \partial T / \partial x = 0. \quad (15)$$

Трудности, с которыми приходится встречаться при непосредственном интегрировании уравнений математической физики, а также громоздкость и сложность получаемых при этом выражений побуждают искать приближенные, более простые пути решения этих задач. В связи с этим широкое распространение в литературе получили методы исследований физических процессов с помощью интегральных соотношений, вытекающих из анализа дифференциальных уравнений [6–10].

Умножив каждый член уравнения (10) на dx и проинтегрировав его в пределах от $x = 0$ до $x = \delta$, получим уравнение, называемое интегралом теплового баланса [11]:

$$\int_0^\delta \frac{\partial T}{\partial t} dx = a \int_0^\delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx. \quad (16)$$

Соответствующее выражение для левой части уравнения (10) найдем с помощью правила дифференцирования под знаком интеграла, когда пределы интеграла зависят от времени (правило Лейбница) [12]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{\alpha(t)}^{\beta(t)} f(x, t) dx &= \int_{\alpha(t)}^{\beta(t)} \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} dx + \\ &+ f[\beta(t), t] \frac{d\beta(t)}{dt} - f[\alpha(t), t] \frac{d\alpha(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (17)$$

В нашем случае верхний предел интегрирования $\beta(t) = \delta(t)$, а нижний — $\alpha(t) = 0$, поэтому на основании уравнения (17) будем иметь:

$$\int_0^\delta \frac{\partial T}{\partial t} dx = \frac{d}{dt} \int_0^\delta T(x, t) dx - T(\delta, t) \frac{d\delta}{dt}. \quad (18)$$

Проинтегрируем правую часть уравнения (10):

$$\int_0^\delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx = \int_0^\delta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) dx = \frac{\partial T(\delta, t)}{\partial x} - \frac{\partial T(0, t)}{\partial x}. \quad (19)$$

Равенство (19) является математической формулировкой интегрального теплового баланса для рассматриваемой задачи.

Подставив уравнения (18) и (19) в (16), с учетом граничного условия (15) получим:

$$\frac{d}{dt} \int_0^\delta T(x, t) dx - T_h \frac{d\delta}{dt} = -a \frac{\partial T(0, t)}{\partial x}. \quad (20)$$

Выражение (20) содержит две неизвестные функции T и δ . Первая представляет собой распределение температуры по толщине охлаждаемого слоя, вторая — изменение толщины указанного слоя с течением времени. В связи с этим первую из неизвестных функций T необходимо задавать заранее.

Определим распределение температур внутри слоя δ в виде полинома второй степени:

$$T = \beta_0 + \beta_1(\delta - x) + \beta_2(\delta - x)^2. \quad (21)$$

Коэффициенты полинома (21) β_0 , β_1 и β_2 найдем с помощью граничных условий (13)–(15). При этом важно отметить, что эти коэффициенты являются функцией только времени и не зависят от координаты.

Из условия (14) находим, что

$$\beta_0 = T_h. \quad (22)$$

Дифференцируя (21) по x , с учетом (15) получим:

$$\beta_1 = 0. \quad (23)$$

Тогда распределение температуры (21) можно записать в виде уравнения

$$T = T_h + \beta_2(\delta - x)^2. \quad (24)$$

Подставив в (24) условие (13), коэффициент полинома β_2 определим в виде

$$\beta_2 = -\frac{T_h - T_s}{\delta^2}. \quad (25)$$

Тогда распределение температур (24) запишем в виде формулы

$$T = T_h - \frac{T_h - T_s}{\delta^2} (\delta - x)^2. \quad (26)$$

Задача будет решена до конца, если в выражении (26) найдем зависимость глубины охлаждения δ от времени. Для этого воспользуемся уравнением интегрального баланса (20), для чего вычислим каждый его член с помощью формулы (26):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_0^\delta T(x, t) dx &= \frac{d}{dt} \int_0^\delta \left[T_h - \frac{T_h - T_s}{\delta^2} (\delta - x)^2 \right] dx = \\ &= T_h \frac{d\delta}{dt} + \frac{d}{dt} \frac{\delta(T_h - T_s)}{3}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$a \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = -\frac{2a}{\delta} (T_h - T_s). \quad (28)$$

Подставив выражения (27) и (28) в равенство (20), для толщины слоя δ получим дифференциальное уравнение

$$\frac{d[(T_h - T_s)\delta]}{dt} = \frac{6a(T_h - T_s)}{\delta}. \quad (29)$$

Исключим из уравнения (29) разность температур $T_h - T_s$ с помощью граничного условия (12), записав его в виде

$$T_h - T_s = \frac{\alpha\delta(T_h - T_0)}{\alpha\delta + 2\lambda}. \quad (30)$$

Подставив (30) в (29), получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\left(2\delta - \frac{\alpha\delta^2}{\alpha\delta + 2\lambda} \right) \frac{d\delta}{dt} = 6a. \quad (31)$$

Учитывая, что при $t = 0$ слой охлаждения еще не начал формироваться ($\delta = 0$), интеграл этого уравнения можно представить в виде

$$\int_0^\delta 2\delta \left(1 - \frac{\alpha\delta}{2(\alpha\delta + 2\lambda)} \right) d\delta = 6 \int_0^t dt. \quad (32)$$

Полученный интеграл выражается через элементарные функции, но получаемое при этом выражение столь сложно, что не представляется возможным вывести его в виде функции $\delta = f(t)$. Как показывает предварительная оценка, отношение параметров, входящих в уравнение (32) в виде дроби, значительно меньше единицы. Пренебрегая дробью по сравнению с единицей и интегрируя (32), будем иметь:

$$\delta = \sqrt{6at}. \quad (33)$$

Законность такого приема определим при сравнении полученного приближенного решения с точным.

Подставляя (33) в (30), прибавляя и отнимая от левой части уравнения (30) температуру окружа-

ющей среды T_0 , для интересующей нас температуры поверхности получим выражение

$$\frac{T_s - T_0}{T_h - T_0} = \frac{2\lambda}{\alpha\sqrt{6at} + 2\lambda}. \quad (34)$$

Обозначив

$$\frac{T_s - T_0}{T_h - T_0} = \theta, \quad (35)$$

получим:

$$\theta = \frac{2\lambda}{\alpha\sqrt{6at} + 2\lambda}. \quad (36)$$

Точное решение рассмотренной задачи приведено в работе [9]:

$$\theta = \exp\left(\frac{\alpha^2}{\lambda^2} at\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{at}\right) \right]. \quad (37)$$

Сравнение точного и приближенного решений по формулам (36) и (37) приведено на рисунке.

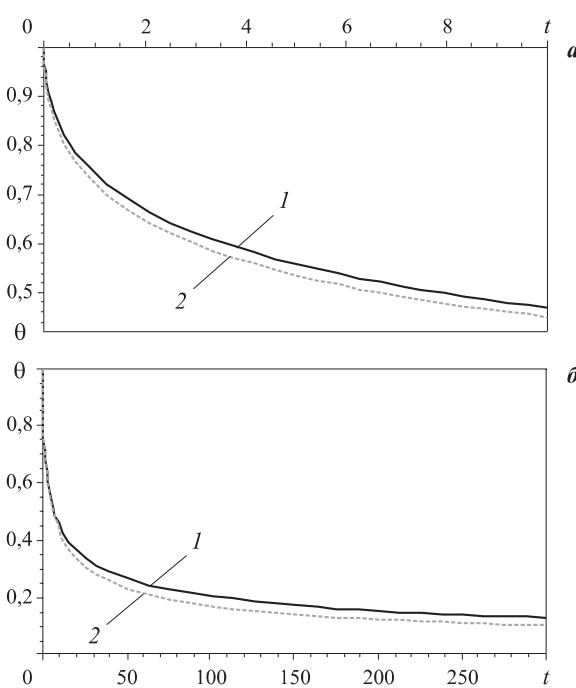
Время, необходимое для охлаждения борта резервуара, можно вычислить с помощью формулы (36):

$$t = \frac{1}{6a} \sqrt{\frac{2\lambda(1-\theta)}{\alpha\theta}}, \quad (38)$$

или с учетом (35)

$$t = \frac{1}{6a} \sqrt{\frac{2\lambda(T_h - T_s)}{\alpha(T_s - T_0)}}. \quad (39)$$

Формула (38) проще, так как не требует знания начальной температуры и температуры, при которой происходит тушение жидкости. Достаточно за-



Сравнение точного и приближенного решений в диапазоне 0–10 с (a) и 0–300 с (b): 1 — точное решение; 2 — приближенное решение ($a = 10^{-7}$; $\lambda = 0,1$; $\alpha = 0,5$)

дать необходимый уровень понижения температуры θ , чтобы рассчитать соответствующее ему время охлаждения.

Распределение температуры в слое охлаждения на основании формул (26), (30) и (33) может быть записано в виде

$$T = T_h - \frac{\alpha\sqrt{6at}(T_h - T_0)}{\alpha\sqrt{6at} + 2\lambda} \left(1 - \frac{x}{\sqrt{6at}}\right)^2. \quad (40)$$

Таким образом, получено уравнение изменения температуры борта резервуара при охлаждении во время тушения горючей жидкости пеной. Данную зависимость целесообразно использовать для сравнения с экспериментом. Полученное уравнение в дальнейшем может применяться при моделировании процессов тушения резервуаров и расчета интенсивности подачи пены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П., Воевода С. С., Шароварников С. А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. — М. : Изд. дом “Калан”, 2002. — 448 с.
2. Marco Fossa, Francesco Devia. A model for radiation evaluation and cooling system design in case of fire in tank farms // Fire Safety Journal. — 2008. — Vol. 43, Issue 1. — P. 42–49. DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.01.005.
3. Хабибулин Р. Ш. Устойчивость к воздействию тепловых потоков пожара горизонтальных резервуаров с нефтепродуктом : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Академия Государственной противопожарной службы МЧС России. — М., 2010. — 162 с.
4. Копылов Н. П., Кузнецов А. Е., Родионов Е. С. Федоткин Д. В., Орлов Л. А., Плаксина Д. С., Сенчишак Т. И., Кононов Б. В. Испытания импульсных установок пожаротушения для тушения нефтепродуктов самовспенивающейся газоэрозоленаполненной пеной // Пожарная безопасность. — 2016. — № 3. — С. 85–88.
5. Вейник А. И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. — М.–Л. : Госэнергоиздат, 1959. — 184 с.
6. Hadjisophocleous G. V., Sousa A. C. M., Venart J. E. S. A study of the effect of the tank diameter on the thermal stratification in LPG tanks subjected to fire engulfment // Journal of Hazardous Materials. — 1990. — Vol. 25, Issue 1-2. — P. 19–31. DOI: 10.1016/0304-3894(90)85067-D.
7. Горшков В. И., Шебеко А. Ю. Зажигание горючей смеси с помощью металлической пластины. Граничное условие первого рода // Пожарная безопасность. — 2016. — № 1. — С. 76–80.
8. Beynon G. V., Cowley L. T., Small L. M., Williams I. Fire engulfment of LPG tanks: heatup, a predictive model // Journal of Hazardous Materials. — 1988. — Vol. 20. — P. 227–238. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87014-6.
9. Гудмен Т. Р. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена // Проблемы теплообмена / Пер. с англ. — М. : Атомиздат, 1967. — С. 41–96.
10. Zhao B. Temperature-coupled field analysis of LPG tank under fire based on wavelet finite element method // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2014. — Vol. 117, Issue 1. — P. 413–422. DOI: 10.1007/s10973-014-3653-2.
11. Горшков В. И. Применение интегрального теплового баланса в задачах нестационарного теплообмена : метод. пособие. — М. : ВНИИПО, 2012. — 141 с.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М. : Наука, 1973. — 832 с.

Материал поступил в редакцию 13 декабря 2016 г.

Для цитирования: Копылов Н. П., Горшков В. И., Копылов С. Н., Федоткин Д. В. Исследование температурных режимов тушения пожара в резервуарах пеной // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 3. — С. 70–76. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.70-76.

English

INVESTIGATION OF TEMPERATURE REGIMES OF FOAM FIRE EXTINGUISHING IN THE TANKS

KOPYLOV N. P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIIPo, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

GORSHKOV V. I., Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher,
All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia
(VNIIPo, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

KOPYLOV S. N., Doctor of Technical Sciences, Head of Center
of Automatic Installations of Detection and Suppression of Fires,
All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of
Russia (VNIIPo, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

FEDOTKIN D. V., Candidate of Technical Sciences, Deputy Head
of Department of Special Investigations, All-Russian Research Institute
for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIIPo, 12, Balashikha, Moscow
Region, 143903, Russian Federation; e-mail: fdv982@mail.ru)

ABSTRACT

When fire extinguishing foam is applied for fire suppression of flammable liquid in the tank, after the most part of the liquid mirror is already covered by a fire extinguishing foam layer, the fuel continues to burn at the side of the tank. This rather complex case is often implemented in practice, but it wasn't fully described in the existing theoretical literature. Extinguishing of these last fire sources occur in the following two cases:

- cooling of a free side of the tank to a temperature at which the side heated by flame ceases to serve as a source of ignition of fuel vapors;
- lowering of the temperature of the combustible fluid located at the side surface of the reservoir to a temperature at which the ignition of the combustible mixture formed by mixing of the fuel vapor with air can not occur.

The article presents the analysis of the two cases needed to extinguish remaining pockets of burning at the side of the tank. For the first case (cooling of a free side of the tank to a temperature at which the side heated by flame ceases to serve as a source of ignition of fuel vapors), the mathematical model describing the temperature change during the cooling of the sides of the reservoir was developed. Analytical solutions with certain assumptions were obtained. The expression that defines the time of extinguishing of flammable liquid was also obtained. The values of heat transfer coefficient calculated with the usage of the resulting equation together with the available experimental data obtained in the burning tank, are presented in the paper. The values of the heat transfer coefficient are $0.34 \div 0.51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. For the second case (lowering of the temperature of the combustible fluid to a temperature at which the ignition of the combustible mixture can not occur), the resulting expression describes changes in temperature of the side of the tank during cooling by fire extinguishing foam. The expression was derived from the heat equation with a number of assumptions and the usage of integrating methods of research of physical processes involving integral relations derived from the analysis of differential equations. The obtained equation of temperature change of the side of the tank while cooling by fire suppression foam during extinguishing of flammable liquid, can be later used in the modeling of processes of extinguishing of tanks and in calculating of the flow rate of the foam.

Keywords: fire fighting; tank; cooling time; temperature; mathematical modeling.

REFERENCES

1. Sharovarnikov A. F., Molchanov V. P., Voevoda S. S., Sharovarnikov S. A. *Fire extinguishing of oil and oil products*. Moscow, Publishing house "Kalan", 2002. 448 p. (in Russian).
2. Marco Fossa, Francesco Devia. A model for radiation evaluation and cooling system design in case of fire in tank farms. *Fire Safety Journal*, 2008, vol. 43, issue 1, pp. 42–49. DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.01.005.
3. Khabibulin R. Sh. *Resistance to influence of thermal streams of the fire of horizontal reservoirs with oil product*. Abstr. cand. tech. sci. diss. Moscow, 2010. 162 p. (in Russian).
4. Kopylov N. P., Kuznetsov A. E., Rodionov E. S., Fedotkin D. V., Orlov L. A., Plaksina D. S., Senchishak T. I., Kononov B. V. Tests of pulse extinguishing installations for suppression of oil products with the self-foaming gas-aerosol filled foam. *Pozharnaya bezopasnost (Fire Safety)*, 2016, no. 3, pp. 85–88 (in Russian).
5. Veynik A. I. *Approximate calculation of processes of heat conductivity*. Moscow – Saint Petersburg, Gosenergoizdat, 1959. 184 p. (in Russian).

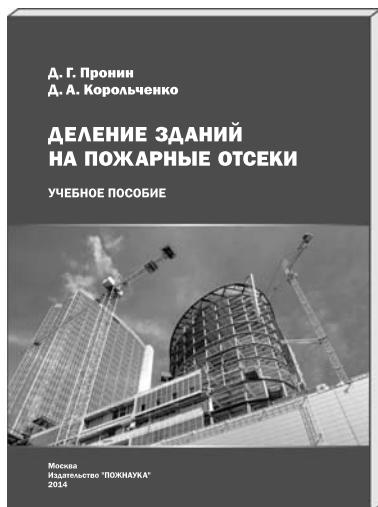
6. Hadjisophocleous G. V., Sousa A. C. M., Venart J. E. S. A study of the effect of the tank diameter on the thermal stratification in LPG tanks subjected to fire engulfment. *Journal of Hazardous Materials*, 1990, vol. 25, issue 1-2, pp. 19–31. DOI: 10.1016/0304-3894(90)85067-D.
7. Gorshkov V. I., Shebeko A. Yu. Ignition of gas mixture by the metal plate. Boundary condition of the first sort. *Pozharnaya bezopasnost (Fire Safety)*, 2016, no. 1, pp. 76–80 (in Russian).
8. Beynon G. V., Cowley L. T., Small L. M., Williams I. Fire engulfment of LPG tanks: heatup, a predictive model. *Journal of Hazardous Materials*, 1988, vol. 20, pp. 227–238. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87014-6.
9. Goodman T. R. Application of integral methods to transient nonlinear heat transfer. In: *Advances in Heat Transfer*. New York, London, Academic Press, 1964 (Russ. ed.: Gudmen T. R. *Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена*. In: *Проблемы теплообмена*. Moscow, Atomizdat, 1967, pp. 41–96).
10. Zhao B. Temperature-coupled field analysis of LPG tank under fire based on wavelet finite element method. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014, vol. 117, issue 1, pp. 413–422. DOI: 10.1007/s10973-014-3653-2.
11. Gorshkov V. I. *Use of integrated thermal balance in problems of non-stationary heat exchange. Methodical book*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2012. 141 p. (in Russian).
12. Korn G., Korn T. *The reference book on mathematics for scientists and engineers*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p. (in Russian).

For citation: Kopylov N. P., Gorshkov V. I., Kopylov S. N., Fedotkin D. V. Investigation of temperature regimes of foam fire extinguishing in the tanks. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 70–76. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.70-76.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу



Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко
**ДЕЛЕНИЕ ЗДАНИЙ НА ПОЖАРНЫЕ
ОТСЕКИ : учебное пособие.**

— М. : Издательство "ПОЖНАУКА", 2014. — 40 с. : ил.

В учебном пособии изложены базовые основы, действующие требования и современные представления о целях, задачах и способах ограничения распространения пожара по зданиям и сооружениям путем их разделения на пожарные отсеки.

Пособие предназначено для студентов Московского государственного строительного университета. Оно может быть использовано также другими образовательными учреждениями и практическими работниками, занимающимися вопросами обеспечения пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: info@fire-smi.ru