

Научная статья

УДК 536.37+536.24+ 614.841.42

doi: 10.17223/19988621/76/10

Теоретическое и экспериментальное исследование пожаров в крупных топливных резервуарах и создание инновационной технологии их тушения

Николай Петрович Копылов¹, Сергей Николаевич Копылов²,
Алексей Васильевич Карпов³, Дмитрий Вячеславович Федоткин⁴,
Елена Юрьевна Сушкина⁵

1, 2, 3, 4, 5 ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, Россия

4 НИТУ МИСИС, Москва, Россия

¹ np.nanpb@mail.ru

² firetest@mail.ru

³ k708@yandex.ru

⁴ fdv982@mail.ru

⁵ sushkina@bk.ru

Аннотация. Разработана инновационная технология пенного тушения пожара в резервуарах, основанная на использовании твердотопливных газогенераторов. Предложена математическая модель, основанная на численном решении системы уравнений Навье–Стокса. По результатам расчетов по данной модели показано, что при классической технологии тушения пожаров происходят унос пены конвективными потоками и ее разрушение от контакта с высокотемпературной зоной воздействия теплового излучения.

Ключевые слова: взрыв газозавоздушной смеси, тепло-массоперенос, численное моделирование, твердотопливные газогенераторы, пена, пожаротушение, крупные резервуары с нефтепродуктами

Для цитирования: Копылов Н.П., Копылов С.Н., Карпов А.В., Федоткин Д.В., Сушкина Е.Ю. Теоретическое и экспериментальное исследование пожаров в крупных топливных резервуарах и создание инновационной технологии их тушения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 76. С. 131–149. doi: 10.17223/19988621/76/10

Theoretical and experimental investigation of fires in large fuel tanks and creation of an innovative technology of their extinguishment

Nikolay P. Kopylov¹, Sergey N. Kopylov², Aleksey V. Karpov³,
Dmitry V. Fedotkin⁴, Elena Yu. Sushkina⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russia

⁴ MISiS, Moscow, Russia

¹ np.nanpb@mail.ru

² firetest@mail.ru

³ k708@yandex.ru

⁴ fdv982@mail.ru

⁵ sushkina@bk.ru

Abstract. Fundamental inefficiency of existing foam fire systems extinguishing tanks with oil and petroleum products having a volume of 5000 m³ or more is shown by methods of mathematical modeling. The required foam supply intensity and foam supply rate allowing effective fire suppression in large tanks with a volume of up to 20000 m³ are theoretically predicted. On this basis of theoretical conclusions, a new method of foam fire extinguishing in large fuel tanks has been developed. To obtain the required intensities and supply rates, fire extinguishing foam is formed in a special container with the use of solid-fuel gas generators. The theoretical predictions were confirmed in 21 full-scale successful experiments, in which fire suppression system based on the new method was able to extinguish a fully developed gasoline fire in tanks with a volume of 5000 m³ and 20 000 m³ just for 30–90 seconds. The required amount of the foaming agent to extinguish a fire in a 20 000 m³ tank is only 450 liters, which is at least 100 times less than for traditional foam fire fighting

Keywords: foam, fire extinguishing, large fuel tanks

For citation: Kopylov, N.P., Kopylov, S.N., Karpov, A.V., Fedotkin, D.V., Sushkina, E.Yu. (2022) Theoretical and experimental investigation of fires in large fuel tanks and creation of an innovative technology of their extinguishment. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. 76. pp. 131–149. doi: 10.17223/19988621/76/10

Введение

Склады нефти и нефтепродуктов являются объектами повышенной опасности. Пожары на таких объектах обычно носят затяжной характер, приводят к огромному экономическому ущербу и ущербу для окружающей среды, часто сопровождаются гибелью людей и вызывают большой негативный общественный резонанс не только на национальном, но и на мировом уровне. Примерами таких пожаров являются крупнейшие пожары на складах нефти и нефтепродуктов в Бансфилде, Великобритания, 11 декабря 2005 г., когда 23 больших резервуара были уничтожены, а 43 человека получили ранения [1], в Конде, Ханты-Мансийский автономный округ, Россия, 22 августа 2009 г. (3 больших резервуара объемом 20 тыс. м³ уничтожено, 3 повреждено; погибли 3 человека, 5 ранены [2]), на нефтебазе в Крячках, Киевская область, Украина, 8 июня 2015 г. (все 17 больших топливных

резервуаров были уничтожены, 1 человек погиб, 5 ранены [3]), на нефтеперерабатывающем заводе НОРСИ в Кстово, Нижегородская область, Россия, 5 октября 2017 г. (повреждено 6 резервуаров объемом 10 тыс. м³, 4 человека погибли [4]); и этот список можно продолжать. Как показывает опыт, топливные резервуары емкостью более 10 тыс. м³ практически не тушатся, а резервуары объемом 5 тыс. м³ тушатся с вероятностью менее 50%, особенно резервуары с современными топливами, содержащими спирты. Поскольку практически каждый топливный резервуар в мире защищается автоматической системой пенного пожаротушения, можно утверждать, что традиционное пенное пожаротушение неэффективно при таком применении. Для ответа на вопрос: «Почему так происходит?» – выполнена настоящая работа.

Расчет объема взрывоопасной зоны и давления взрыва в больших топливных резервуарах

Одной из главных причин неэффективности способов тушения пожаров, используемых на складах нефти и нефтепродуктов, является неустойчивость систем пенного пожаротушения, установленных на резервуарах, к давлению взрыва газозооных смесей под крышей резервуара. Известно, что более 90% пожаров на резервуарах начинаются со взрыва [5].

Давление взрыва рассчитывается по следующей формуле [6]:

$$\Delta p = \frac{m_v \cdot H_T \cdot p_0 \cdot Z}{V \cdot \rho_a \cdot C_p \cdot T_0} \cdot \frac{1}{K_H}, \quad (1)$$

где m_v – масса паров горючего во взрывоопасной зоне, кг; H_T – теплота сгорания топлива, Дж/кг; p_0 – начальное давление, кПа (допускается использовать значение 101 кПа); Z – коэффициент участия горючих газов и паров в процессе горения (допускается использовать значения Z из [6, табл. А.1]; V – свободный объем топливного резервуара (под крышей), м³; T_0 – начальная температура воздуха, К; ρ_a – плотность воздуха при температуре T_0 , кг/м³; C_p – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К) (допускается принимать равным $1,01 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)); K_H – коэффициент, учитывающий утечки и неадиабатичность процесса горения (допускается использовать $K_H = 3$).

$$m_v = \rho_{\Pi} \cdot V_{\text{взр}}, \quad (2)$$

где ρ_{Π} – плотность взрывоопасной смеси, кг/м³; $V_{\text{взр}}$ – объем взрывоопасной смеси, м³.

Объем горючей (взрывоопасной) смеси в газовом пространстве резервуаров $V_{\text{взр}}$ можно оценить по следующей формуле [7]:

$$V_{\text{взр}} = F \left(\sqrt{\frac{\varphi_{\text{в}}}{\varphi_{\text{с}}}} - \sqrt{\frac{\varphi_{\text{н}}}{\varphi_{\text{с}}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{12 D_t \tau}{1 - \varphi_{\text{с}}}}, \quad (3)$$

где F – площадь поверхности испарения горючей жидкости, м²; D_t – коэффициент диффузии, м²/с; $\varphi_{\text{с}}$ – насыщенная концентрация паров углеводородов, г·м⁻³; $\varphi_{\text{н}}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени, г·м⁻³; $\varphi_{\text{в}}$ – верхний концентрационный предел распространения пламени г·м⁻³; τ – время, с.

Согласно предложенному методу были выполнены расчеты для резервуаров объемом 5 тыс. и 20 тыс. м³, заполненных бензином Аи-93. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

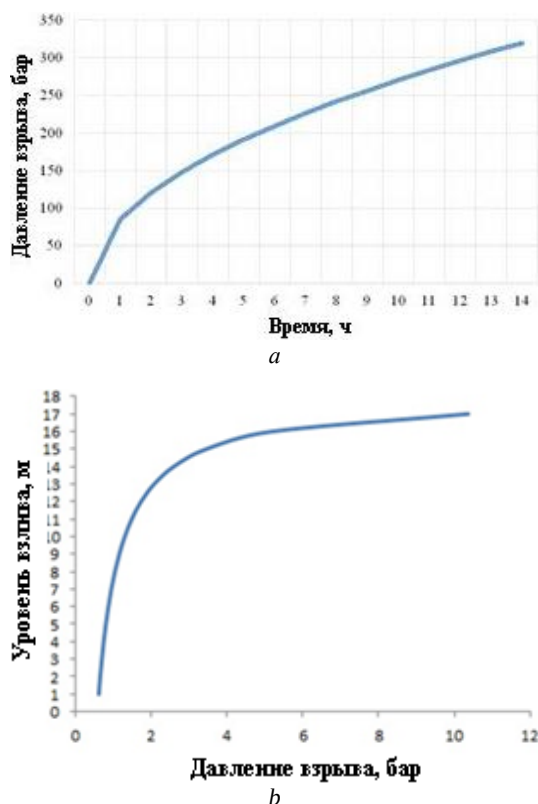


Рис. 1. Зависимости давления взрыва: *a* – от времени испарения для резервуара 5 000 м³; *b* – от уровня взлива топливного резервуара объемом 20 000 м³ с крышей
Fig. 1. Dependence of explosion pressure: *a* – on evaporation time for a 5 000 m³ tank; *a* – on the filling level of a roofed fuel tank with a volume of 20 000 m³

Как следует из полученных значений давления взрыва, пеногенераторы системы пожаротушения, установленные в верхней части топливного резервуара, с высокой вероятностью будут повреждены или уничтожены взрывом под крышей топливного резервуара. Это означает, что огнетушащая пена не будет сформирована при выпуске огнетушащего вещества, и, соответственно, пожаротушение будет однозначно безуспешным.

Полевая математическая модель пожара в больших топливных резервуарах

Для оценки значений параметров пожара проведено математическое моделирование горения нефтепродуктов, хранящихся в резервуарах.

Математическая модель, реализованная с помощью программного комплекса SOFIE [8] включала следующие основные уравнения:

– уравнения неразрывности и сохранения импульса

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \rho u_x}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_x u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_x u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_x u_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \\
 & + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_t \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + \rho g_x, \\
 & \frac{\partial \rho u_y}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_x u_y}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_y u_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \\
 & + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) + \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_t \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) + \rho g_y, \\
 & \frac{\partial \rho u_z}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_x u_z}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y u_z}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z u_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + \\
 & + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_t \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \rho g_z;
 \end{aligned} \tag{5}$$

– уравнения k - ε модели турбулентности [9] с поправкой на влияние естественной конвекции [10]

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_x k}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y k}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \\
 & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_K + G_B - \rho \varepsilon, \\
 & \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y \varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z \varepsilon}{\partial z} = \\
 & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \\
 & + \frac{\varepsilon}{k} [c_1 (G_K + G_B)] - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k};
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$,

$$G_K = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 \right\},$$

$$G_B = -\beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \left(g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right);$$

– уравнение сохранения энергии

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho h}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_x h}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y h}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z h}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu}{\sigma_h} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu}{\sigma_h} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{\mu}{\sigma_h} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + S_{h,rad}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT + \sum_k Y_k H_k$ – удельная массовая энтальпия смеси, h_0 – удельная

массовая энтальпия воздуха при начальной температуре, Y_k – массовая доля k -го компонента смеси, H_k – теплота образования k -го компонента смеси;

– уравнение сохранения массы горючего

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho Y_f}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_x Y_f}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y Y_f}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z Y_f}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_f}{\partial z} \right) + S_f; \end{aligned} \quad (9)$$

– уравнение для функции смешения

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho f}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_x f}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y f}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z f}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial f}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Значения констант были приняты согласно [11]:

$$C_\mu = 0.09; C_1 = 1.44; C_2 = 1.92; \sigma_k = 1.0; \delta_\varepsilon = 1.3; \sigma_t = \sigma_h = Sc_h = Sc_t = 0.7.$$

Для моделирования горения был применен вариант диффузионно-вихревой модели горения Магнуссена [12]:

$$S_f = -\rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ C \cdot Y_f, C \frac{Y_{ox}}{s}, B \frac{Y_{pr}}{s+1} \right\}, \quad (11)$$

где $C = 4$, $B = 2$.

Функция смешения $f = \frac{\beta - \beta_o}{\beta_f - \beta_o}$, где $\beta = Y_f - (Y_o / s)$ – консервативная пере-

менная Шваба–Зельдовича, а индексы f и o относятся к топливу и окислителю соответственно.

$$Y_{pr} = \begin{cases} \left[Y_{ox,0} + (Y_{f,f} - Y_{ox,0}) f \right] - Y_{ox,0} \left[\frac{f_{st} - f}{f_{st}} \right], & 0 < f < f_{st}, \\ \left[Y_{ox,0} + (Y_{f,f} - Y_{ox,0}) f \right] - Y_{f,f} \left[\frac{f - f_{st}}{1 - f_{st}} \right], & f_{st} < f < 1, \end{cases} \quad (12)$$

где стехиометрическое значение $f_{st} = \frac{Y_{ox,0}}{sY_{f,f} + Y_{ox,0}}$, $Y_{ox,0}$ – массовая доля кислорода

да в потоке окислителя, Y_{ff} – массовая доля топлива в потоке топлива.

Теплоперенос излучением учитывался средствами метода дискретного радиационного переноса (DTRM) [13]. Для него характерны некоторые черты методов Монте-Карло, а именно прохождение «лучей» электромагнитного излучения через вычислительную область между границами. Однако в отличие от методов Монте-Карло, где направления лучей генерируются случайным образом, в этой модели они выбираются предварительно, таким же образом, как выбирается расположение гидродинамической сетки. Метод включает в себя решение уравнения радиационного переноса вдоль путей этих лучей, выбираемых обычно таким образом, чтобы они приходили в центры граничных поверхностей гидродинамических контрольных объемов.

Число и направление лучей для каждой точки выбирается предварительно, чтобы обеспечить желаемый уровень точности, аналогично тому, как выбирается конечно-разностная сетка для проведения гидродинамических расчетов. Полусфера вокруг каждой точки разбивается на сегменты с равными площадями поверхностей на полусфере, в пределах которых интенсивность считается однородной.

Для каждого луча при его прохождении от одной границы до другой решается уравнение радиационного переноса

$$\frac{dI}{ds} = -(k_a + k_s)I + k_a \frac{E_g}{\pi} + \frac{k_s}{4\pi} \int_{4\pi} P(\Omega, \Omega') I(\Omega') d\Omega', \quad (13)$$

где I – интенсивность радиационного излучения в направлении Ω , S – расстояние в направлении Ω , $E_g = \sigma T_g^4$ – энергия, излучаемая абсолютно черным газом при температуре газа T_g , k_a и k_s – коэффициенты поглощения и рассеяния, $P(\Omega, \Omega')$ – вероятность того, что излучение в направлении Ω' после рассеяния попадет в телесный угол $d\Omega$ в окрестности направления Ω .

Если для краткости ввести коэффициент ослабления $k_e = k_a + k_s$, оптическую глубину элемента $dS^* = k_e dS$ и модифицированную энергию излучения

$$E^* = \frac{1}{k_e} \left(k_a E_g + \frac{k_s}{4\pi} \int_{4\pi} P(\Omega, \Omega') I(\Omega') d\Omega' \right),$$

то уравнение переноса можно переписать в виде:

$$\frac{dI}{ds^*} = -I + \frac{E^*}{\pi}. \quad (14)$$

Для элементарного контрольного объема, в котором температуру можно считать постоянной, уравнение (13) можно проинтегрировать и привести к виду:

$$Ie^{\delta s^*} = \frac{E^*}{\pi} e^{\delta s^*} + const. \quad (15)$$

Если считать величину E^* постоянной внутри контрольного объема, что вполне согласуется с обычной практикой применения конечно-разностного подхода к уравнениям динамики жидкости, получается простое рекуррентное соотношение:

$$I_{n+1} = I_n + \frac{E^*}{\pi} (1 - e^{-\delta S^*}), \quad (16)$$

где I_n и I_{n+1} – соответственно значения интенсивности излучения, входящего и выходящего из n -го контрольного объема, δS^* – оптическая длина контрольного объема.

Затем в каждом контрольном объеме, с учетом всех пересекающих его лучей, вычисляется величина чистого поглощения или выделения энергии излучения, которая, как упоминалось выше, может использоваться в уравнении сохранения энергии. Для n -го контрольного объема

$$S_{h,rad} = \sum_{n=1}^N (I_{n+1} - I_n) \Omega \delta \Omega \delta A, \quad (17)$$

где N – общее количество лучей, δA – площадь поверхности ячейки.

Радиационные свойства продуктов горения были определены согласно модели взвешенной суммы серых газов [14] с коэффициентами аппроксимации Трюлава [15].

Плотность смеси газов вычислялась из уравнения состояния идеального газа. Температурные зависимости теплофизических свойств веществ учитывались с помощью кусочно-полиномиальной аппроксимации. Давление определялось с использованием уравнения для поправок давления согласно итерационной схеме SIMPLEC [16], являющейся модификацией процедуры SIMPLE [17].

Для приведения исходной системы к алгебраической форме в большинстве исследовательских работ по пожарам и в большинстве случаев практического применения полевого моделирования, когда конвекция преобладает над диффузией, используются разностные схемы «против потока» и «комбинированная» для описания конвективного члена и центральная разностная схема для описания диффузионного. Схема «против потока» более строгая и стабильная, но дает значительную ошибку усечения и численную диффузию, когда линии течения проходят под углом к линиям сетки. Хотя ошибка усечения для центральной разностной схемы меньше, чем для схемы «против потока» первого порядка, она менее приемлема для потоков, где конвекция преобладает над диффузией. Комбинированная схема [18] сочетает в себе достоинства центральной схемы и схемы «против потока» первого порядка. Она состоит в переключении с центральной разностной схемы на схему «против потока» при сеточном числе Пекле

$$P_m = \frac{(\rho u_i)_m (\delta x_i)_m}{\Gamma_m} \text{ больше } 2, \text{ т.е. когда конвективный поток более чем в 2 раза}$$

превышает диффузионный поток. Поэтому в данной работе была использована комбинированная разностная схема.

Для дискретизации производной по времени использовалась полностью неявная разностная схема первого порядка. При решении системы уравнений были применены сильно неявная процедура Стоуна SIP [19] для уравнения поправки давления и метод прогонки для остальных уравнений.

На свободной границе расчетной области в вариантах без ветра использовалось граничное условие $p = 0$. При этом для касательных составляющих скорости использовались условия $\partial v / \partial n = 0$, а нормальная составляющая определялась из уравнения Бернулли [8]. Для уменьшения влияния граничного условия на зону

горения в соответствии с рекомендациями [20] расчетная область была выбрана таким образом, чтобы свободная граница располагалась на удалении от резервуара.

В вариантах с наличием ветра на границах, нормальных к направлению ветра, нормальные составляющие скорости принимались равными скорости ветра. При этом рассматривался равномерный профиль скорости ветра по высоте. Значение кинетической энергии турбулентности на свободной границе принималось равным $0.01u^2$. Значение $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$.

Особое внимание необходимо уделить заданию граничных условий для турбулентных параметров k и ε на поверхности горючей жидкости. Как показывают экспериментальные исследования [21], в тонком слое вблизи границы горючего происходит резкое снижение величины турбулентной кинетической энергии от значений, характерных для процессов, протекающих в области пламени, до значений, характерных для потока паров горючего. Стандартная k – ε модель турбулентности не позволяет смоделировать этот эффект, поэтому использование в качестве граничных условий значений k и ε , соответствующих параметрам потока горючего, приводит к занижению значений турбулентной вязкости в области пламени и, как следствие, к завышению значений скоростей и температур в области пламени и восходящей свободно-конвективной струи [22]. Строгого решения задачи о постановке этих граничных условий на данный момент не существует. Для практических расчетов в качестве граничных условий используют искусственные значения k и ε [23–25], обеспечивающие разумные значения турбулентной вязкости в области пламени без рассмотрения процессов, протекающих в тонком слое вблизи поверхности горючего. Так, проведенные исследования [22] показали, что хорошие результаты при использовании k – ε модели в сочетании с диффузионно-вихревой моделью горения [12] дает использование значений $k = 0,3 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$ и $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$.

Начальное значение температуры соответствовало 293 К. Начальные значения скоростей соответствовали скорости ветра.

Результаты моделирования пожара в больших топливных резервуарах

С использованием этого модельного подхода для двух типов топливных резервуаров (5 тыс. м^3 и 20 тыс. м^3) в зависимости от времени были рассчитаны температурное поле над горящим резервуаром, плотность теплового потока на поверхность горючего, скорости потоков в конвективной колонке. Расчеты учитывают скорость ветра $0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а также уровень залива топливного резервуара. Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 2–6.

Полученные результаты показывают, что если при анализе учитывать только фактор скорости, то для топливного резервуара объемом 5 тыс. м^3 существуют некоторые возможности тушения пожара с помощью классической технологии пенного тушения (интенсивность подачи пены $27,4 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$, скорость подачи $2\text{--}3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$). В этом случае для полностью заполненного топливного резервуара скорость потока пены превышает скорости потоков в конвективной колонке (около $0,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; см. рис. 3), но уже при более низком уровне заполнения сильные вертикальные потоки ($10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и более), действующие на половине расстояния от верхней кромки резервуара, не позволяют пене достичь поверхности горящей жидкости (см. рис. 3, б).

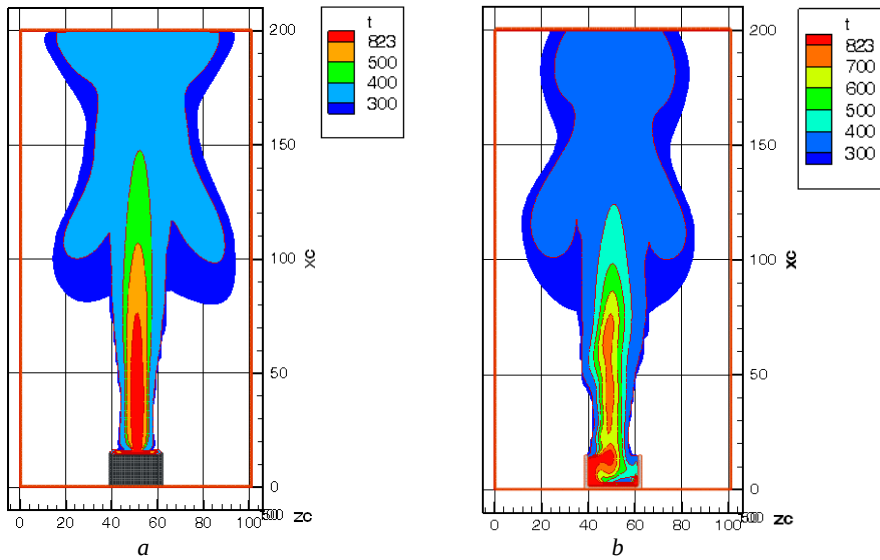


Рис. 2. Температурное поле (K) при пожаре в топливном резервуаре объемом 5 000 м³ (время горения 60 с) при отсутствии ветра: *a* – полностью заполненный резервуар; *b* – уровень заполнения 2 м

Fig. 2. Temperature field (K) in case of fire in a fuel tank with a volume of 5000 m³ in the absence of wind (combustion time is 60 s): (*a*) fully filled tank and (*b*) the filling level is 2 m

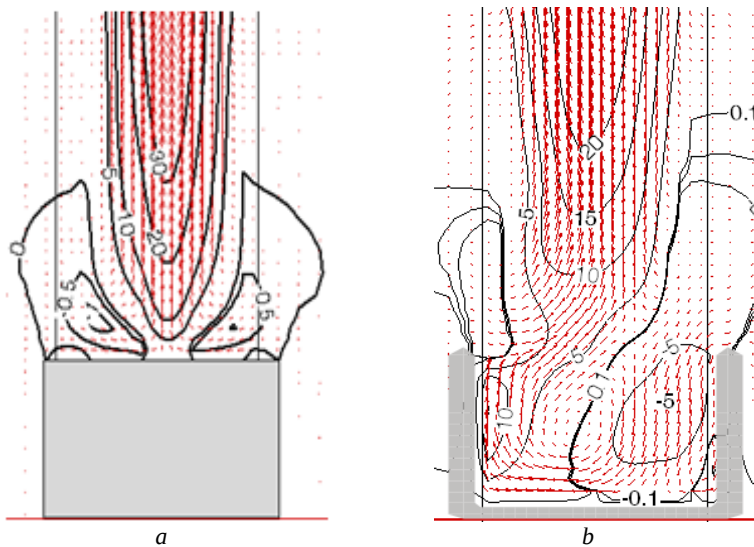


Рис. 3. Скорости потоков (м·с⁻¹) над горящим резервуаром объемом 5 000 м³ (время горения 60 с) при отсутствии ветра: *a* – полностью заполненный резервуар; *b* – уровень заполнения 2 м

Fig. 3. Flow velocities (m·s⁻¹) over a burning tank with a volume of 5000 m³ in the absence of wind (combustion time is 60 s): *a* – fully filled tank, *b* – filling level is 2 m

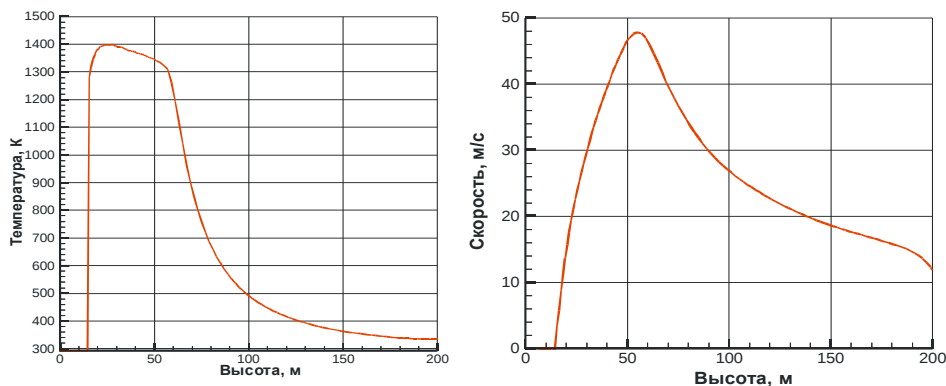


Рис. 4. Графики температуры и вертикальной скорости потоков ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$) на оси симметрии горящего резервуара объемом $5\,000\text{ м}^3$ (время горения 300 с) при отсутствии ветра

Fig. 4. Dependencies of temperature and vertical flow velocity ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$) along the symmetry axis of a burning tank with a volume of 5000 м^3 in the absence of wind (combustion time is 300 s)

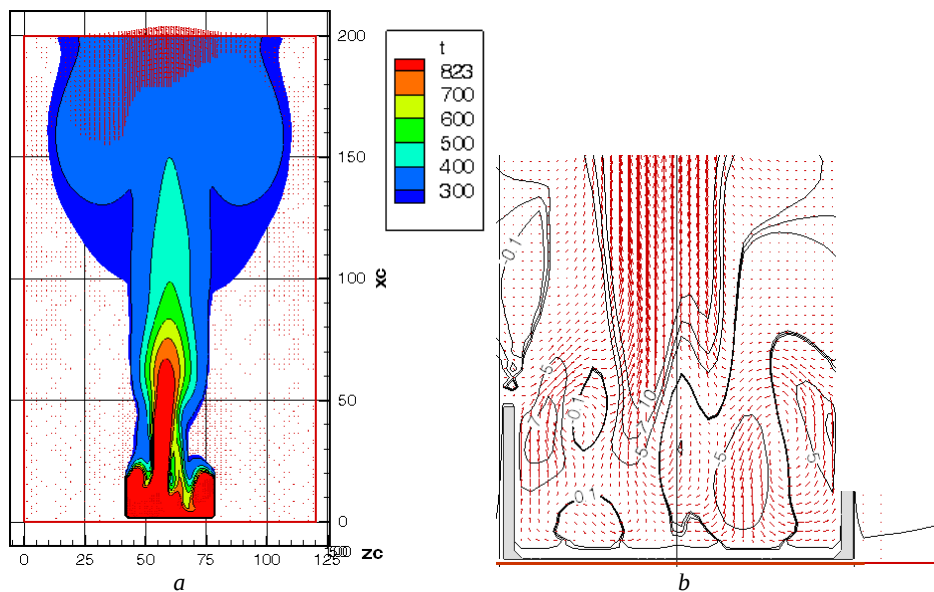


Рис. 5. Горение в резервуаре объемом $20\,000\text{ м}^3$ (время горения 60 с) при отсутствии ветра, уровень заполнения 2 м: *a* – температурное поле (K); *b* – скорости потоков ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$)

Fig.5. Combustion in a tank with a volume of 20000 м^3 (combustion time is 60 s), no wind, filling level is 2 m: *a* – temperature field (K), *b* – flow velocities ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$)

При горении в резервуаре объемом 20 тыс. м^3 возникают постоянно действующие сильные вертикальные потоки (имеющие скорость $5\text{--}10\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ при отсутствии ветра; см. рис. 4, *b*) или горизонтальные потоки (имеющие скорость $7\text{--}10\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ при скорости ветра $10\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, см. рис 5, *b*) на кромке резервуара, которые будут предотвращать попадание пены к поверхности горячей жидкости (нормативная интенсивность подачи пены $114\text{ л}\cdot\text{с}^{-1}$, скорость подачи $2\text{--}3\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$).

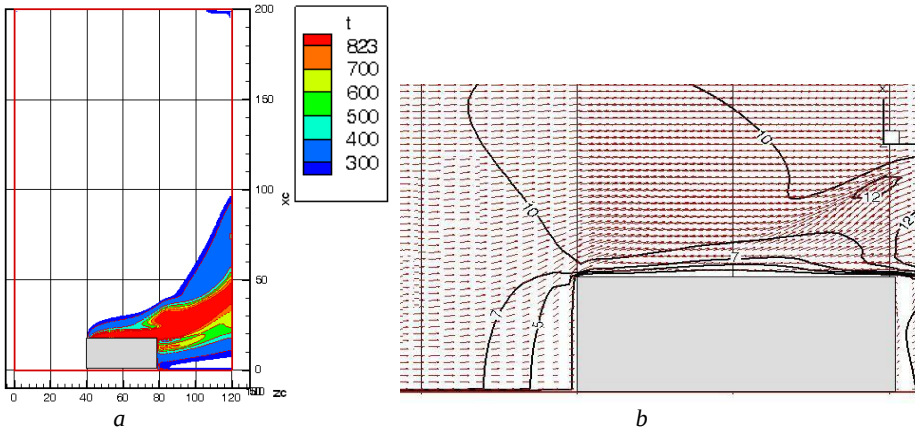
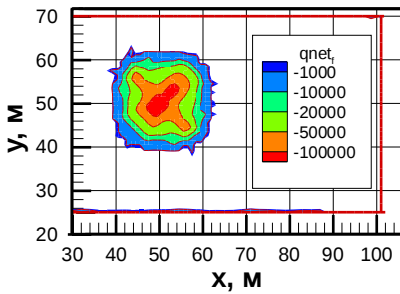
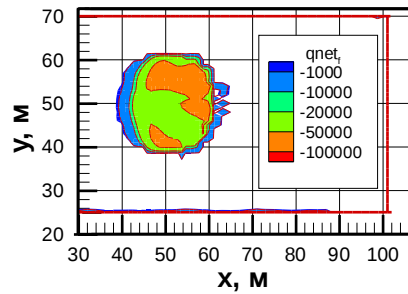


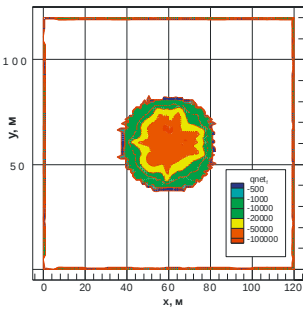
Рис. 6. Горение в полностью заполненном резервуаре объемом 20 000 м³ (время горения 60 с), скорость ветра 10 м·с⁻¹: *a* – температурное поле (K); *b* – скорости потоков (м·с⁻¹)
Fig. 6. Combustion in a fully filled tank with a volume of 20000 м³ (combustion time is 60 s), the wind speed is 10 м·с⁻¹: (*a*) temperature field (K) and (*b*) flow velocities (м·с⁻¹)



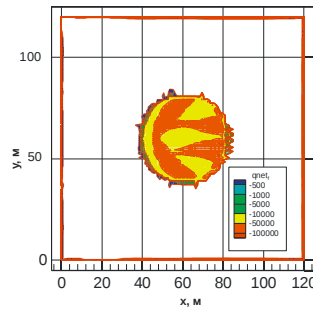
d = 21 м, *v_b* = 0 м·с⁻¹, высота свободного борта 0 м, момент времени 300 с



d = 21 м, *v_b* = 10 м·с⁻¹, высота свободного борта 0 м, момент времени 270 с



d = 40 м, *v_b* = 0 м·с⁻¹, высота свободного борта 0 м, момент времени 180 с



d = 40 м, *v_b* = 10 м·с⁻¹, высота свободного борта 0 м, момент времени 180 с

Рис. 7. Результаты расчетов плотности теплового потока q_{netf} (Вт·м⁻²) на уровне зеркала жидкости для резервуаров диаметром *d* = 21 и 40 м (объем 5 000 м³ и 20 000 м³) при скорости ветра 0 и 10 м·с⁻¹

Fig. 7. Results of calculations of the heat flux density q_{netf} (W·м⁻²) at the liquid surface level for tanks with diameters *d* = 21 and 40 m (the volumes are 5000 м³ and 20000 м³) at wind speeds of 0 and 10 м·с⁻¹

Если учесть при анализе пожара также фактор высокой температуры, то легко видеть, что если пена будет подана спустя 3 мин свободного горения (максимально допустимое время задержки подачи пены), то она будет контактировать с температурной зоной 1 000–1 100°C и будет интенсивно разрушаться (см. рис. 2, 4, 5). Разрушение пены происходит также при воздействии на нее теплового излучения от факела пламени (см. рис. 7 и данные статьи [26]). Плотность теплового потока на поверхности горючего для резервуаров объемом более 5 тыс. м³ имеет значение 50–100 кВт·м⁻². Известно, что даже если огнетушащая пена образует слой на поверхности горящей жидкости, то она разрушается со скоростью 0,2–0,4 см·с⁻¹ [27]. На этом основании можно заключить, что традиционный подход, когда предполагается, что пена подается на холодный свободный борт резервуара, не работает в случае больших топливных резервуаров.

Все полученные результаты показывают, что нормативные интенсивности подачи пены недостаточны для преодоления эффектов деструкции пены и потери пены через конвективную колонку при тушении пожаров в резервуарах с объемом более 5 тыс. м³.

Для определения параметров подачи пены, которые были бы достаточны для преодоления указанных выше эффектов, были выполнены дополнительные расчеты. Для того чтобы исключить унос пены вертикальными потоками, формирующимися при пожаре в резервуаре, вектор направления движения пены должен отклоняться от горизонтали в пределах допустимой погрешности, т.е. на величину угла $\alpha \leq 10^\circ$. Скорость вертикальных потоков, как показали приведенные выше расчеты, составляет $V_v = 6\text{--}7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Тогда скорость выхода пены из подающего устройства $V_n = V_v/\text{tg}\alpha \approx 35 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Объемный расход огнетушащего вещества при подаче на тушение должен быть таким, чтобы компенсировать его потери от разрушающего действия теплоизлучения. Выбрав диаметр подающего трубопровода в 159 мм, получим расход $Q = V_n \cdot S \approx 700 \text{ л}\cdot\text{с}^{-1}$ ($S = 0,02 \text{ м}^2$ – площадь отверстия трубы).

Новая технология пенного пожаротушения

Используя уравнение Бернулли для горизонтального течения жидкости, можно определить, какое давление необходимо создать в емкости при работе твердо-топливных газогенераторов:

$$\frac{\rho V_n^2}{2} + P_1 = \frac{\rho V_v^2}{2} + P_2,$$

где ρ – плотность раствора; V_n – начальная скорость движения раствора; V_v – скорость движения раствора на выходе; P_1 – давление, создаваемое газогенераторами; P_2 – атмосферное давление.

$V_n = 0$, тогда

$$P_1 = \frac{\rho V_v^2}{2} + P_2.$$

Полагая, что $V_v = 35 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, $\rho = 1\,000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, $P_2 = 1 \text{ бар}$, получим $P_1 \approx 7 \text{ бар}$.

На основе сделанных теоретических прогнозов был разработан новый метод пенного пожаротушения в больших топливных резервуарах. Чтобы получить требуемые интенсивности и скорости подачи пены, огнетушащая пена формиру-

ется внутри специальной емкости при помощи твердотопливных газогенераторов. Вода с добавлением 3% пенообразователя заливается в емкость (стальную или пластиковую). После того как внутри емкости срабатывают газогенераторы, происходит насыщение газом раствора пенообразователя, давление в емкости растет до 7 бар. В ходе этого процесса газы и аэрозоли растворяются (сорбируются) в растворе пенообразователя.

Когда давление в сосуде достигает 7 бар, вскрывается мембрана, и смесь направляется по трубопроводу на тушение пожара. Из-за разницы между давлением в растворе и атмосферным давлением происходит десорбция газа из раствора (аналогично эффекту при вскрытии бутылки с шампанским) и образуется пена низкой кратности (кратность пены 10–18). Пузырьки пены заполнены не воздухом, а CO_2 и N_2 , при этом тонкодисперсный аэрозоль оседает на поверхности пузырьков, обеспечивая их большую стабильность [28].

Параметры подачи пены в описанном методе имеют значения: интенсивность подачи пены $700 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$, скорость подачи около $35 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Необходимо также отметить, что предложенный способ нечувствителен к взрыву в топливном резервуаре, так как пена формируется вне резервуара, и способ не требует применения пеногенераторов.

Натурные эксперименты и их результаты

Для подтверждения теоретических результатов по оценке эффективности нового метода пенного пожаротушения была проведена серия натурных экспериментов по тушению полностью развитого пожара бензина в резервуарах объемом 5 тыс. и 20 тыс. м^3 при различных уровнях заполнения. Время свободного горения перед подачей пены составляло 180 с. В экспериментах была использована одна емкость с раствором пенообразователя общим объемом $7,5 \text{ м}^3$.

В 21 успешном эксперименте было показано, что эффективное тушение пожара достигается всего за 30–90 секунд (рис. 8). Требуемое количество пенообразователя для тушения пожара в топливном резервуаре объемом 20 тыс. м^3 составляет всего 450 л, что несопоставимо с традиционным пенным пожаротушением, когда десятки тысяч литров пенообразователя расходуются в неэффективных попытках тушения пожара (например, при тушении пожара в Бансфилде на 1 резервуар расходовалось приблизительно 32,5 тыс. литров пенообразователя и 2,4 млн литров воды [1]).



Рис. 8. Эффективное тушение пожара новым методом в полностью заполненном топливном резервуаре объемом $20\,000 \text{ м}^3$

Fig. 8. Effective fire extinguishing with a new method in a fully filled fuel tank with a volume of $20\,000 \text{ м}^3$

Эксперименты также подтвердили результаты математического моделирования по значениям температуры свободного борта, скорости потоков на кромке резервуара, высоты конвективной колонки. Скорость выхода пены совпала с расчетными значениями с точностью 10–20%.

Выводы

1. Расчетами давления взрыва газозвоздушных смесей под крышей топливного резервуара установлено, что пеногенераторы автоматической системы пожаротушения с высокой вероятностью будут повреждены или уничтожены и огнетушащая пена не будет подана на тушение.

2. Методами математического моделирования показано, что в зависимости от уровня взлива топлива в резервуарах объемом более 5 тыс. м³ на их кромке формируются постоянно действующие сильные вертикальные потоки, имеющие скорость 5–10 м·с⁻¹ при отсутствии ветра, или горизонтальные потоки, имеющие скорость 7–10 м·с⁻¹ при скорости ветра 10 м·с⁻¹, которые будут предотвращать попадание пены к поверхности горящей жидкости (нормативная интенсивность подачи пены от 27,4 до 114 л·с⁻¹, скорость подачи 2–3 м·с⁻¹. Проведенные расчеты также показывают, что поданная на тушение пена будет контактировать с высокотемпературной зоной 1 000–1 100°C и подвергаться воздействию теплового излучения от факела пламени (плотность теплового потока 50–100 кВт·м⁻². В результате пена будет разрушаться со скоростью 0,2–0,4 см·с⁻¹.

На этом основании можно утверждать, что традиционный подход при тушении пожара в больших резервуарах не работает.

3. Теоретически и экспериментально показано, что пенное пожаротушение в больших резервуарах будет эффективным, если пена будет подаваться с интенсивностью 700 л·с⁻¹ и более и скоростью 35 м·с⁻¹ и более.

4. Разработан инновационный метод пенного пожаротушения в больших резервуарах. Для получения требуемых интенсивностей и скоростей подачи огнетушащая пена в этом методе формируется внутри специальной емкости при помощи твердотопливных газогенераторов.

5. В 21 успешном эксперименте подтверждено, что тушение пожара достигается за 30–90 секунд. Для тушения пожара в резервуаре объемом 20 тыс. м³ используется емкость объемом 7,5 м³, а количество пенообразователя составляет 450 л.

Список источников

1. The Buncefield Incident 11 December, 2005. The Final Report of the Major Incident Investigation Board. V. 1. Buncefield Major Incident Investigation Board, 2008.
2. Fire and Explosion at Konda Oil Depot. 2018. URL: <http://www.travmatizma.net/> (accessed: 19.12.2018).
3. Fire at fuel depot near Kiev not suppressed, new explosions occur. 2018. URL: <http://www.eadaily.com/> (accessed: 19.12.2018).
4. Fire at oil refinery kills 4 in Nizhny Novgorod Region. <http://www.interfax.com/>, 2018 (дата обращения: 19.12.2018).
5. Безродный И.Ф., Гилетич А.Н., Меркулов В.А. и др. Тушение нефти и нефтепродуктов : пособие. М. : ВНИИПО, 1996. 216 с.

6. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по пожаровзрывоопасности. URL: <http://www.docs.cntd.ru/> (дата обращения: 19.12.2018).
7. Горячев С.А., Молчанов С.В., Назаров В.П. и др. Пожарная безопасность технологических процессов : учебник / под общ. ред. В.П. Назарова, В.В. Рубцова. М. : Акад. ГПС МЧС России, 2007. Ч. 2: Анализ пожарной опасности и защиты технологического оборудования. 221 с.
8. Welch S., Rubini P. *SOFIE, Simulations of Fires in Enclosures : User Guide*. Cranfield University, South England, UK, 1996.
9. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flow // *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 1974. V. 3. P. 269–289.
10. Hossain M.S., Rodi W. A Turbulence Model for Buoyant Flows and Its Application for Vertical Buoyant Jets // *Turbulent Buoyant Jets and Plums*. Oxford, 1982. P. 121–172. (HMT Series; book 6).
11. Cox G. *Combustion Fundamentals of Fire*. London : Academic Press, 1995.
12. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // *Proc. Combust. Inst.* 1977. V. 16. P. 719–729. doi: 10.1016/S0082-0784(77)80366-4
13. Lockwood F.C., Shah N.G. A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures // *Proc. Combust. Inst.* 1981. Vol. 18. P. 1405–1414. doi: 10.1016/S0082-0784(81)80144-0
14. Bressloff N.W., Moss J.B., Rubini P.A. Assessment of a Total Absorptivity Solution to the Radiative Transfer Equation as Applied in the Discrete Transfer Radiation Model // *Numerical Heat Transfer. Part B*. 1996. V. 29. P. 381–397. doi: 10.1080/10407799608914988
15. Truelove J.S. The two-flux model for radiative transfer with strongly anisotropic scattering // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1984. V. 27 (3). P. 464–466. doi: 10.1016/0017-9310(84)90294-1
16. Van Doormaal J.P., Raithby G.D. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows // *Numerical Heat Transfer*. 1984. V. 7 (2). P. 147–163. doi: 10.1080/01495728408961817
17. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамика жидкостей. М. : Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
18. Spalding D.B. A novel finite difference formulation for differential expressions involving both first and second derivatives // *Int. J. Num. Mech. Eng.* 1972. No. 4. P. 551. doi: 10.1002/nme.1620040409
19. Stone H.L. Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations // *SIAM J. Numer. Anal.* 1968. V. 5 (3). P. 530–558. doi: 10.1137/0705044
20. Рыжов А.М., Хасанов И.Р., Карпов А.В., Волков А.В., Лицкевич В.В., Дектерев А.А. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях : метод. рекомендации. М. : ВНИИПО, 2002. 35 с.
21. Weckman E.J., Strong A.B. Experimental Investigation of epe Turbulence Structure of Medium Scale Methanol Pool Fires // *Combustion and Flame*. 1996. V. 105 (3). P. 245–266. doi: 10.1016/0010-2180(95)00103-4
22. Карпов А.В., Крюков А.П., Рыжов А.М. Полевое моделирование процессов тепло- и массопереноса в пламени и восходящей свободноконвективной струе // *Пожаровзрывобезопасность*. 2001. Т. 10, № 2. С. 35–41.
23. Adiga K.C., Ramaker D.E., Tatem P.A., Williams F.W. Modeling thermal radiation in open liquid pool fires // *Fire Safety Science : Proc. of II Int Symp. on Fire Safety Science*. 1989. P. 241–250. doi: 10.3801/IAFSS.FSS.2-241
24. Gengembre E., Cambray P., Karmad D., Bellet J.C. Turbulent diffusion flames with large buoyancy effects // *Combustion Science and Technology*. 1984. V. 41. P. 55–67. doi: 10.1080/00102208408923822
25. Blunsdon C.A., Beeri Z., Malalasekera W.M.G., Dent J.C. Modeling Buoyant Turbulent Diffusion Flames in Coherent Flame-sheet model // *Symposium on Fire and Combustion*, ASME Winter Annual Meeting, November 1994. Chicago : ASME, 1994.

26. Копылов Н.П., Федоткин Д.В., Карпов А.В., Сушкина Е.Ю. Моделирование тушения пожаров нефтепродуктов в резервуарах с применением водопенных огнетушащих веществ // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 8. С. 12–22. doi: 10.24000/0409-2961-2020-8-14-22
27. Безродный И.Ф., Бабенко В.В. О разрушающем воздействии пламени на пену // Пожарная техника и пожаротушение. М. : ВНИИПО. 1998. С. 80–82.
28. Милёхин Ю.М., Деревякин В.А., Кононов Б.В., Краушанский Я.М., Красов А.В., Копылов Н.П., Федоткин Д.В. Автономная установка пенного пожаротушения крупных резервуаров с легковоспламеняющимися жидкостями. Патент № 2674710 РФ. 2018.

References

1. (2008) The Buncefield Incident 11 December, 2005. The Final Report of the Major Incident Investigation Board. Volume 1. Buncefield Major Incident Investigation Board.
2. (2018) Fire and Explosion at Konda Oil Depot. <http://www.travmatizma.net/>
3. (2018) Fire at fuel depot near Kiev not suppressed, new explosions occur. <http://www.eadaily.com/>
4. (2018) Fire at oil refinery kills 4 in Nizhny Novgorod Region. <http://www.interfax.com/>
5. Bezrodnyy I.F., Giletych A.N., Merkulov V.A. (1996) Tusheniye nefi i nefteproduktov [Extinguishing oil and oil products]. Moscow: VNIPO.
6. SP 12.13130.2009. *Opredeleyeniye kategoriy pomeshcheniy, zdaniy i naruzhnykh ustanovok po pozharovzryvoopasnosti* [Determination of categories of rooms, buildings and external installations by explosion and fire hazard]. <http://docs.cntd.ru/document/1200071156>
7. Goryachev S.A., Molchanov S.V., Nazarov V.P. (2007) *Pozharnaya bezopasnost' tekhnologicheskikh protsessov. Chast' 2. Analiz pozharnoy opasnosti i zashchity tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Fire safety of technological processes. Part 2. Analysis of fire hazard and protection of technological equipment]. Moscow: SFA of EMERCOM of Russia.
8. Welch S, Rubini P. (1996) *SOFIE, Simulations of Fires in Enclosures, User Guide*. Cranfield University, South England, United Kingdom.
9. Launder B.E., Spalding D.B. (1974) The numerical computation of turbulent flow. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 3. 269–289.
10. Hossain M.S., Rodi W. (1982) A turbulence model for buoyant flows and its application for vertical buoyant jets. *Turbulent Buoyant Jets and Plumes*. HMT Series, Oxford, England. pp. 121–178.
11. Cox G. (1995) *Combustion Fundamentals of Fire*. London: Academic Press.
12. Magnussen B.F., Hjertager B.H. (1977) On mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Symposium (International) on Combustion*. 16(1). pp. 719–729. doi:10.1016/S0082-0784(77)80366-4
13. Lockwood F.C., Shah N.G. (1981) A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures. *Symposium (International) on Combustion*. 18(1). pp. 1405–1414. doi: 10.1016/S0082-0784(81)80144-0
14. Bressloff N.W., Moss J.B., Rubini P.A. (1996) Assessment of a differential total absorptivity solution to the radiative transfer equation as applied in the discrete transfer radiation model. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*. 29(3). pp. 381–397. doi: 10.1080/10407799608914988
15. Truelove J.S. (1984) The two-flux model for radiative transfer with strongly anisotropic scattering. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 27(3). pp. 464–466. doi: 10.1016/0017-9310(84)90294-1
16. Van Doormaal J.P. and Raithby G.D. (1984) Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows. *Numerical Heat Transfer*. 7(2). pp. 147–163. doi: 10.1080/01495728408961817

17. Patankar S. (1980) *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
18. Spalding D.B. (1972) A novel finite difference formulation for differential expressions involving both first and second derivatives. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 4(4). pp. 551–559. doi: 10.1002/nme.1620040409/
19. Stone H.L. (1968) Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations. *SIAM Journal on Numerical Analysis*. 5(3). pp. 530–558. doi: 10.1137/0705044
20. Ryzhov A.M., Khasanov I.R., Karpov A.V., Volkov A.V., Litskevich V.V., Dekterev A.A. (2002) *Primeneniye polevogo metoda matematicheskogo modelirovaniya pozharov v pome-shcheniyakh. Metodicheskiye rekomendatsii* [Application of the field method of mathematical modeling of fires in enclosures. Methodical recommendations]. Moscow: VNIPO.
21. Weckman E.J., Strong A.B. (1996) Experimental investigation of the turbulence structure of medium scale methanol pool fires. *Combustion and Flame*. 105(3). pp. 245–266. doi: 10.1016/0010-2180(95)00103-4
22. Karpov A.V., Kryukov A.P., Ryzhov A.M. (2001) Polevoye modelirovaniye protsessov teplo- i massoperenosa v plameni i voskhodyashchey svobodnokonvektivnoy struye [Field modeling of heat and mass transfer in a flame and in an ascending free-convection jet]. *Pozharovzryvbezopasnost' - Fire and Explosion Safety*. 10(2). pp. 35–41.
23. Adiga K.C., Ramaker D.E., Tatem P.A., Williams F.W. (1989) Modeling thermal radiation in open liquid pool fires. *Fire Safety Science—Proceedings of the Second International Symposium*. pp. 241–250. doi: 10.3801/IAFSS.FSS.2-241
24. Gengembre E., Cambray P., Karmad D., Bellet J.C. (1984) Turbulent diffusion flames with large buoyancy effects. *Combustion Science and Technology*. 41(1-2). pp. 55–67. doi: 10.1080/00102208408923822
25. Blunsdon C.A., Beeri Z, Malalasekera W.M.G., Dent J.C. (1994) Modeling buoyant turbulent diffusion flames in coherent flame-sheet model. *Symposium on Fire and Combustion, ASME Winter Annual Meeting*. Chicago: ASME.
26. Kopylov N.P., Fedotkin D.V., Karpov A.V., Sushkina E. Yu. (2020) Modelirovaniye tusheniya pozharov nefteproduktov v rezervuarakh s primeneniym vodopennykh ognetchishchikh veshchestv [Modeling of extinguishing oil product fires in tanks using water-based extinguishing agents]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Occupational safety in industry*. 8. pp. 14–22. doi: 10.24000/0409-2961-2020-8-14-22
27. Bezrodnyy I.F., Babenko V.V. (1998) *O razrushayushchem vozdeystvii plameni na penu* [On the destructive effect of flame on foam]. *Pozharnaya tekhnika i pozharotushenie*. Moscow: VNIPO. pp. 80–82.
28. Milekhin Yu.M., Derevyakin V.A., Kononov B.V., Kraushanskiy Ya.M., Krasov A.V., Kopylov N.P., Fedotkin D.V. (2018) *Avtonomnaya ustanovka pennogo pozharotusheniya krupnykh rezervuarov s legkovosplamenyayushchimisya zhidkostyami* [Autonomous foam fire extinguishing system for large tanks with flammable liquids]. RF Patent 2674710.

Сведения об авторах:

Копылов Николай Петрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Отдела специальных исследований ФГБУ ВНИИПО МЧС России (Балашиха, Россия). E-mail: np.nanpb@mail.ru

Копылов Сергей Николаевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник Научно-исследовательского центра автоматических установок обнаружения и тушения пожаров ФГБУ ВНИИПО МЧС России (Балашиха, Россия). E-mail: firetest@mail.ru

Карпов Алексей Васильевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования ФГБУ ВНИИПО МЧС России (Балашиха, Россия). E-mail: k708@yandex.ru

Федоткин Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, заместитель начальника Отдела специальных исследований ФГБУ ВНИИПО МЧС России, доцент НИТУ МИСиС (Москва, Россия). E-mail: fdv982@mail.ru

Сушкина Елена Юрьевна – кандидат технических наук, начальник Отдела ученого секретаря – ученый секретарь ФГБУ ВНИИПО МЧС России (Балашиха, Россия). E-mail: sushkina@bk.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kopylov Nikolay P. (Doctor of Technical Science, Professor, Main Researcher, FGBU VNIIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russia). E-mail: np.nanpb@mail.ru

Kopylov Sergey N. (Doctor of Technical Science, Main Researcher, FGBU VNIIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russia). E-mail: firetest@mail.ru

Karpov Aleksey V. (Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher FGBU VNIIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russia). E-mail: k708@yandex.ru

Fedotkin Dmitry V. (Candidate of Technical Sciences, Deputy Chef of Department, FGBU VNIIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russia; assistant professor, MISiS, Moscow, Russia). E-mail: fdv982@mail.ru

Sushkina Elena Yu. (Candidate of Technical Sciences, Head of Department – Academic Secretary, FGBU VNIIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russia). E-mail: sushkina@bk.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.02.2021; принята к публикации 22.03.2022

The article was submitted 08.02.2021; accepted for publication 22.03.2022