



Д-р техн. наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Университет гражданской защиты
Украины
Ю. А. Абрамов



Д-р техн. наук,
ведущий научный сотрудник,
Университет гражданской защиты
Украины
А. Е. Басманов

УДК 614.8

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА РЕЗЕРВУАРА С НЕФТЕПРОДУКТОМ ПОД ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОЖАРА

Построена стохастическая модель нагрева резервуара с нефтепродуктом под тепловым воздействием горящего соседнего резервуара. Особенностью модели является учет случайных пульсаций формы факела и температуры. Модель может быть использована для оценки вероятности достижения негорящим резервуаром температуры самовоспламенения и каскадного распространения пожара. Проведенное сравнение детерминированного и стохастического подходов выявило условия, при которых указанные модели дают близкие результаты и при которых их результаты существенно различаются.

Постановка проблемы. Прогнозирование времени достижения температуры самовоспламенения резервуаром с нефтепродуктом является необходимым этапом разработки плана локализации и ликвидации пожара в резервуарном парке. В настоящее время для этих целей используются модели детерминированного типа — в них предполагается постоянство формы факела и температуры пламени [1, 6]. Но даже простое наблюдение показывает, что факел меняется во времени случайным образом. Следовательно, случайными будут тепловой поток от него и температура нагреваемого резервуара.

В работе [1] построена детерминированная модель нагрева резервуара под тепловым воздействием пожара, предполагающая постоянные форму факела и температуру. На практике обычно приближенно полагают форму пламени конической, что является “средней” формой пламени, и не учитывают ее случайные изменения.

Целью работы является оценка вероятности достижения резервуаром с нефтепродуктом критической температуры при тепловом воздействии соседнего горящего резервуара путем построения математической модели стохастического типа, учитывающей случайные пульсации формы и температуры пламени.

Математическая модель. Следствием пульсаций формы пламени являются случайные изменения площади поперечного сечения факела $\zeta(t)$ и площадей взаимного облучения $\eta_k(t)$ между облас-

тями резервуара и факелом. При построении модели будем предполагать, что:

$$\eta_k(t) = \xi(t)H_k^+; \quad \zeta(t) = \xi(t)S,$$

где $\xi(t)$ — случайный процесс, стационарный в широком смысле [8], $M\xi(t) = 1$;

H_k^+ — площадь взаимного облучения между факелом и областью k резервуара [1];

S — площадь поперечного сечения факела в детерминированном случае.

Мы вводим в рассмотрение площадь поперечного сечения, поскольку именно эта характеристика может быть измерена экспериментально. Площадь поперечного сечения, наблюдаемая из некоторой точки, определяет телесный угол, занимаемый факелом, т.е. локальный коэффициент взаимного облучения. Это позволяет, определив характеристики случайного процесса $\zeta(t)$ (закон и параметры распределения, корреляционную функцию), перейти затем к характеристикам случайных процессов $\eta_k(t)$.

Для оценки вероятностных характеристик пульсаций площади поперечного сечения факела $\zeta(t)$ и его температуры $\theta(t)$ была проведена серия экспериментов, в ходе которых осуществлялась видеосъемка горения мазута в модели резервуара диаметром 6 м. Для каждого кадра определялась площадь поперечного сечения, что позволило оценить дисперсию пульсаций σ_ξ и корреляционную функцию $K_\xi(\tau)$ [3]. Связь между температурой абсолютно

черного тела и его цветом позволяет оценить дисперсию средней температуры факела и ее корреляционную функцию, также исходя из видеозаписи процесса горения [4].

Проведенные эксперименты [2–4] позволяют сделать вывод о совместном нормальном законе распределения стационарного процесса (ξ, θ) с корреляционными функциями вида $K_\xi(\tau) = \sigma_\xi^2 e^{-\alpha_\xi |\tau|}$, $K_\theta(\tau) = \sigma_\theta^2 e^{-\alpha_\theta |\tau|}$ и взаимной корреляционной функцией $K_{\xi\theta}(\tau) = r \sigma_\xi \sigma_\theta e^{-\alpha_{\xi\theta} |\tau|}$, где $\sigma_\xi^2, \sigma_\theta^2$ — дисперсии случайных процессов ξ, θ ; r — коэффициент корреляции между ними, $r \sim 0,6-0,7$. Диапазоны изменения параметров корреляционных функций приведены в таблице.

С учетом случайных изменений температуры факела и площади взаимного облучения уравнение теплового баланса [1] для области k поверхности резервуара принимает вид:

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{\varepsilon_c c_0}{S_k \delta \rho_c c_c} \left[\varepsilon_\phi \xi(t) H_k^+ \left(\left(\frac{\theta(t)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_1+N_2} H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) (S_k - \xi(t) H_k^+) \right] + \frac{\alpha_z (T_z - T_k)}{\delta \rho_c c_c} + \frac{\alpha_\theta (T_0 - T_k)}{\delta \rho_c c_c}, \quad k = 1, 2, K, N_1. \quad (1)$$

Теперь температуры $T_k(t)$ будут случайными функциями. Определить аналитически закон их распределения невозможно ввиду их сложной зависимости от случайных процессов $\xi(t)$ и $\theta(t)$. Для определения закона распределения $T_k(t)$ была проведена серия численных экспериментов, в ходе которых генерировались реализации процессов $\xi(t)$, $\theta(t)$ и решалась система уравнений теплового баланса резервуара с нефтепродуктом. На основании экспериментальных данных была выдвинута и проверена гипотеза о нормальном законе распределения случайных функций $T_k(t)$ [4].

Нормальность закона распределения для $T_k(t)$ позволяет найти его параметры (математическое

Параметры корреляционных функций

Корреляционная функция	Среднеквадратическое отклонение, в долях от среднего значения	α, c^{-1}
Площадь поперечного сечения факела	0,1–0,3	0,1–0,5
Температура поверхности факела	0,03–0,06	0,3–3,0
Взаимная	–	0,1–1,0

ожидание $\bar{T}_k(t)$ и дисперсию σ_k^2) из уравнений баланса энергии. Применение оператора математического ожидания к левой и правой частям уравнения (1) позволяет перейти к дифференциальным уравнениям относительно математических ожиданий [4]:

$$\frac{d\bar{T}_k}{dt} = \frac{\varepsilon_c c_0}{S_k \delta \rho_c c_c} \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\left(\frac{\bar{T}_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_k}{100} \right)^4 \right) + \varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_1+N_2} H_{ik} \left(\left(\frac{\bar{T}_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_k}{100} \right)^4 \right) + \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_k}{100} \right)^4 \right) (S_k - H_k^+) \right] + \frac{\alpha_z (\bar{T}_z - \bar{T}_k)}{\delta \rho_c c_c} + \frac{\alpha_\theta (T_0 - \bar{T}_k)}{\delta \rho_c c_c}, \quad k = 1, 2, K, N_1, \quad (2)$$

где $\bar{T}_\phi = [\bar{T}_\phi^4 + 4r\bar{T}_\phi^3\sigma_\xi\sigma_\theta + 6\bar{T}_\phi^2\sigma_\theta^2 + 12r\bar{T}_\phi\sigma_\xi\sigma_\theta^3 + 3\sigma_\theta^4]^{1/4}$.

Уравнение (1) также позволяет получить выражения для дисперсий $\sigma_k^2(t)$ и корреляционных функций $K_{\xi k}(t)$, $K_{\theta k}(t)$ случайных процессов $T_k(t)$ и $\xi(t)$, $T_k(t)$ и $\theta(t)$ соответственно:

$$\frac{d\sigma_k^2}{dt} = \frac{2\varepsilon_c c_0}{S_k \delta \rho_c c_c} \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\frac{A}{100^4} - \frac{\bar{T}_k^4 K_{\xi k} + 4\bar{T}_k^3 \sigma_k^2}{100^4} \right) + 4\varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_1+N_2} H_{ik} \left(\frac{\bar{T}_i^3 \sigma_i \sigma_k}{100^4} - \frac{\bar{T}_i^3 \sigma_k^2}{100^4} \right) - H_k^+ \left(\frac{K_{\xi k} T_0^4}{100^4} - \frac{\bar{T}_k^4 K_{\xi k} + 4\bar{T}_k^4 \sigma_k^2}{100^4} \right) - \frac{4\bar{T}_k^3 \sigma_k^2}{100^4} S_k \right] - 2\sigma_k^2 \frac{\alpha_z + \alpha_\theta}{\delta \rho_c c_c}; \quad (3)$$

$$\frac{dK_{\xi k}}{dt} = \frac{\varepsilon_c c_0}{S_k \delta \rho_c c_c} \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\frac{B_\phi}{100^4} - \frac{B_k}{100^4} \right) + 4\varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_1+N_2} H_{ik} \left(\frac{\bar{T}_i^3 K_{\xi j}}{100^4} - \frac{\bar{T}_i^3 K_{\xi k}}{100^4} \right) - H_k^+ \left(\sigma_\xi^2 \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \frac{B_k}{100^4} \right) - \frac{4\bar{T}_k^3 K_{\xi k}}{100^4} S_k \right] - K_{\xi k} \frac{\alpha_z + \alpha_\theta}{\delta \rho_c c_c} - \alpha_\xi K_{\xi k}; \quad (4)$$

$$\frac{dK_{\theta k}}{dt} = \frac{\varepsilon_c c_0}{S_k \delta \rho_c c_c} \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\frac{C_\phi}{100^4} - \frac{C_k}{100^4} \right) + 4\varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_1+N_2} H_{ik} \left(\frac{\bar{T}_i^3 K_{\theta i}}{100^4} - \frac{\bar{T}_i^3 K_{\theta k}}{100^4} \right) - \right]$$

$$-H_k^+ \left[K_{\xi\theta} \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \frac{C_k}{100^4} \right] - \frac{4\bar{T}_k^3 K_{\theta k}}{100^4} S_k - K_{\theta k} \frac{\alpha_z + \alpha_a}{\delta \rho_c c_c} - \alpha_{\theta} K_{\theta k}, \quad k = 1, 2, \dots, N_1, \quad (5)$$

где $B_{\phi} = \bar{T}_{\phi}^4 \sigma_{\xi}^2 + 4\bar{T}_{\phi}^3 K_{\xi\theta} + 6\bar{T}_{\phi}^2 (\sigma_{\xi}^2 \sigma_{\theta}^2 + 2K_{\xi\theta}^2) + 3\sigma_{\theta}^2 (4\bar{T}_{\phi} K_{\xi\theta} + \sigma_{\xi}^2 \sigma_{\theta}^2 + 4K_{\xi\theta}^2);$

$$B_k = \bar{T}_k^4 \sigma_{\xi}^2 + 4\bar{T}_k^3 K_{\xi k} + 6\bar{T}_k^2 (\sigma_{\xi}^2 \sigma_k^2 + 2K_{\xi k}^2) + 3\sigma_k^2 (4\bar{T}_k K_{\xi k} + \sigma_{\xi}^2 \sigma_k^2 + 4K_{\xi k}^2);$$

$$C_{\phi} = \bar{T}_{\phi}^4 K_{\xi\theta} + 4\bar{T}_{\phi}^3 \sigma_{\theta}^2 + 18\bar{T}_{\phi}^2 K_{\xi\theta} \sigma_{\theta}^2 + 12\bar{T}_{\phi} \sigma_{\theta}^4 + 15K_{\xi\theta} \sigma_{\theta}^4;$$

$$C_k = \bar{T}_k^4 K_{\xi\theta} + 4\bar{T}_k^3 K_{\theta k} + 12\bar{T}_k^2 K_{\xi k} K_{\theta k} + 3\sigma_k^2 (\sigma_k^2 K_{\xi\theta} + 4K_{\xi k} K_{\theta k});$$

$$A = \bar{T}_{\phi}^4 K_{\xi k} + 4\bar{T}_{\phi}^3 K_{\theta k} + 6\bar{T}_{\phi}^2 (\sigma_{\theta}^2 K_{\xi k} + 2K_{\xi\theta} K_{\theta k}) + 12\bar{T}_{\phi} \sigma_{\theta}^2 K_{\theta k} + 3\sigma_{\theta}^2 (\sigma_{\theta}^2 K_{\xi k} + 4K_{\xi\theta} K_{\theta k}).$$

Совместное решение системы уравнений (1)–(5) позволяет найти математическое ожидание и дисперсию температуры резервуара с нефтепродуктом (рис. 1). Вместе с законом распределения температур это полностью определяет поведение резервуара в рамках стохастической модели. Скорость изменения температуры $V_k(t) = dT_k/dt$ также распределена нормально, а параметры определяются уравнением (1) (рис. 2).

Коэффициент корреляции между температурой и скоростью ее изменения остается значимым только в первые минуты (см. рис. 2), затем он быстро уменьшается, температура и скорость ее изменения становятся некоррелированными случайными процессами. Ввиду их нормальности из некоррелированности следует независимость указанных величин.

Знание закона и параметров распределения температуры и скорости ее изменения позволяет найти вероятность $p_k(t)$ достижения областью k резервуара критической температуры $T_{кр}$ на отрезке времени $[0, t]$. Разобьем этот отрезок системой точек t_1, t_2, \dots, t_f на равные отрезки с малым шагом Δt . Для того чтобы температура не достигла критического значения на отрезке $[0, t]$, необходимо, чтобы она не достигла его на каждом из частичных отрезков:

$$1 - p_k(t) = \prod_{i=1}^f \left(1 - \frac{P_k(t, t + \Delta t)}{P(T_k(t) < T_{кр})} \right), \quad (6)$$

где $p_k(t, t + \Delta t)$ — вероятность того, что область k , имея в момент времени t температуру ниже крити-

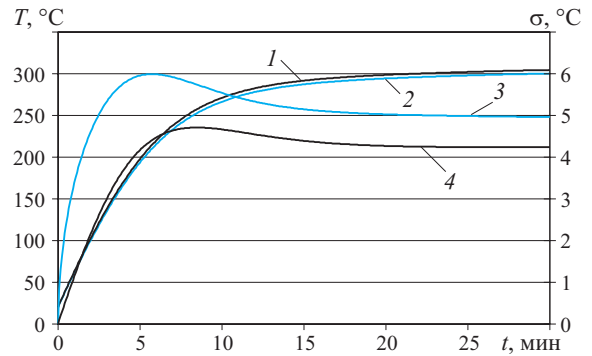


Рис. 1. Температура стенки резервуара РВС-10000, обращенной в сторону факела такого же горящего резервуара с нефтью, находящегося на расстоянии $0,75D$: 1 — математическое ожидание; 2 — детерминированное решение; 3 — среднее квадратическое отклонение (правая ось); 4 — различие между математическим ожиданием и детерминированным решениями (правая ось)

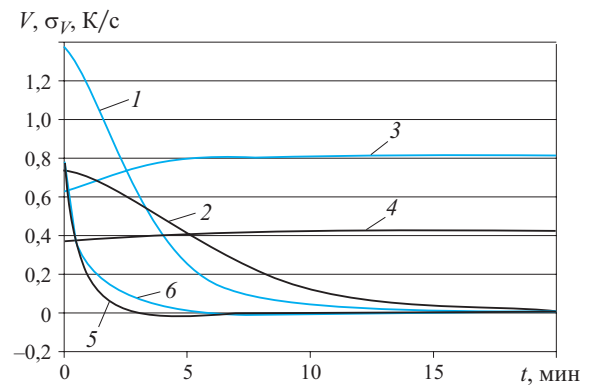


Рис. 2. Параметры скорости изменения температуры части резервуара, обращенной в сторону факела: 1, 2 — математическое ожидание \bar{V} для крыши и стенки соответственно; 3, 4 — среднее квадратическое отклонение σ_V ; 5, 6 — коэффициент корреляции между температурой и скоростью ее изменения

ческой, в момент времени $t + \Delta t$ превысит ее. Знаменатель $P(T_k(t) < T_{кр})$ означает вероятность того, что в момент времени t температура ниже критической, и определяется из условия нормального распределения температуры:

$$P(T_k < T_{кр}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{T_{кр} - \bar{T}_k}{\sigma_k \sqrt{2}} \right),$$

где $\operatorname{erf}(z) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^z \exp(-t^2/2) dt$.

Выполняя предельный переход $\Delta t \rightarrow 0$ в выражении (6) и применяя теорию выбросов случайного процесса за предельный уровень на бесконечно малом отрезке [8], получим формулу [4]:

$$p_k(t) = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{\pi} \int_0^t \frac{\sigma_V \exp(-y^2)}{\sigma_T (1 + \operatorname{erf}(y))} \times \right. \\ \left. \times (z\sqrt{\pi}(1 + \operatorname{erf}(z)) + \exp(-z^2)) dt \right\}, \quad (7)$$

где $y(t) = \frac{T_{кр} - \bar{T}}{\sigma_T \sqrt{2}}$; $z(t) = \frac{\bar{V}}{\sigma_V \sqrt{2}}$;

$\bar{T}(t)$, $\sigma_T^2(t)$ — математическое ожидание и дисперсия температуры области k в момент времени t ;

$\bar{V}(t)$, $\sigma_V^2(t)$ — математическое ожидание и дисперсия скорости изменения температуры.

Сравнение детерминированной и стохастической моделей. Анализ пожарной ситуации в резервуарном парке можно проводить на основе детерминированной или стохастической модели. В первом случае речь идет о значениях температур в заданный момент времени, во втором — о законе и параметрах распределения температур. Второй подход является обобщением первого: он учитывает случайные факторы, влияющие на тепловой поток от факела. Случайность теплового потока приводит к тому, что наступление критического события (взрыв негорящего резервуара, возникновение факельного горения на дыхательных клапанах) происходит с некоторой вероятностью. В том частном случае, когда дисперсии пульсаций пламени равны нулю, зависимости температур от времени приобретают детерминированный характер. При этом вероятность наступления критического события к заданному моменту времени вырождается в 0 или 1, т.е. оно происходит или не происходит.

Таким образом, стохастическая модель является обобщением детерминированной. Недостатками же стохастической модели являются ее сложность и больший объем вычислений. Поэтому возникает вопрос, существенно ли различаются результаты, полученные с применением детерминированного и стохастического подходов.

Рассмотрим сначала следующий пример. Пусть горит резервуар РВС-10000 (диаметром 28,5 м и высотой 18 м), заполненный нефтью до уровня 17 м. На расстоянии 20 м от него находится другой такой же резервуар, заполненный нефтью до уровня 12 м. Температура самовоспламенения паров нефти лежит, главным образом, в интервале от 230 до 320°C [7]. На рис. 3 приведены зависимости от времени температуры стенки, обращенной к факелу (детерминированная модель), и вероятностей достижения некоторых температур (стохастическая модель).

Рассмотрим температуру $T_{кр} = 280^\circ\text{C}$. Вероятность того, что эта температура будет достигнута до

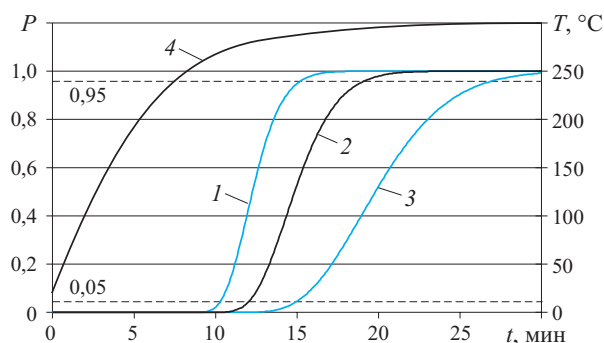


Рис. 3. Вероятность достижения критической температуры $T_{кр}$ на отрезке времени $[0, t]$: 1 — $T_{кр} = 280^\circ\text{C}$; 2 — $T_{кр} = 290^\circ\text{C}$; 3 — $T_{кр} = 300^\circ\text{C}$; 4 — детерминированное решение для температуры (правая ось)

момента времени $t_{0,05} = 10,5$ мин, составляет 0,05. Вероятность достижения этой же температуры к моменту времени $t_{0,95} = 15$ мин равна уже 0,95. Это означает, что с вероятностью 0,9 критическая температура будет достигнута на интервале времени $(t_{0,05}; t_{0,95})$. Из детерминированной модели следует, что температура 280°C будет достигнута через 12,5 мин. Из сравнения полученных результатов видно, что вероятность достижения критической температуры локализована на интервале длиной 4,5 мин, а детерминированное время лежит почти в его середине.

Чем короче будет интервал $(t_{0,05}; t_{0,95})$ и чем ближе к нему будет находиться точка t , тем меньше будет отличие между моделями. Отметим, что при стохастическом подходе любая температура достижима, хотя, возможно, и с малой вероятностью. Другими словами, $t_{0,05}$ и $t_{0,95}$ всегда принимают конечные значения. При детерминированном подходе некоторые температуры оказываются вообще недостижимыми, т.е. $t = \infty$. Если в течение заданного промежутка времени τ вероятность достижения некоторой температуры T не превосходит 0,05, т.е. $t_{0,05} > \tau$, то будем также называть эту температуру недостижимой. Определим относительное различие δ между моделями следующим образом:

$$\delta = \frac{\max \{ |t_{0,95} - t|, |t_{0,05} - t| \}}{t}, \quad (8)$$

где вместо любого из времен t , $t_{0,05}$, $t_{0,95}$, превышающих длину рассматриваемого промежутка времени τ , подставляется само значение τ . Найденное по уравнению (8) значение δ будет зависеть от τ . Значение τ следует выбирать таким образом, чтобы за это время температуры нагреваемых частей резервуара успевали стабилизироваться. Расчеты, проведенные во втором и третьем разделах, показывают, что для этого можно ограничиться величиной

$\tau = 60$ мин. Этого же времени заведомо достаточно, чтобы начать охлаждение резервуаров.

Для рассматриваемого случая с критической температурой в 280°C обе модели дают эквивалентные результаты, а относительное различие между ними составляет

$$\delta = \frac{\max\{|t_{0,95} - t|, |t_{0,05} - t|\}}{t} = 0,2.$$

Иная ситуация с критической температурой в 300°C . Применение детерминированной модели дает время ее достижения $t = 29$ мин. Стохастический подход показывает, что к моменту времени $t_{0,05} = 15$ мин эта температура достижима с вероятностью 0,05, а к моменту $t_{0,95} = 26,5$ мин — с вероятностью 0,95. Сказанное означает, что с вероятностью 0,9 критическая температура будет достигнута на интервале времени от 15 до 26,5 мин после начала пожара. Теперь различие между моделями достигает

$$\delta = \frac{\max\{|t_{0,95} - t|, |t_{0,05} - t|\}}{t} \approx 0,48.$$

Кроме того, из рис. 3 видно, что через 19 мин после начала пожара вероятность достижения критической температуры составляет 0,5. С практической точки зрения это означает, что в половине случаев взрыв негорящего резервуара произойдет на 30% ранее, чем это предсказывает детерминированная модель. Учитывая масштабы возможного ущерба и опасность для человеческой жизни, с такой вероятностью нельзя не считаться. Таким образом, из последнего примера видно, что стохастическая модель более адекватно описывает развитие ситуации при пожаре в резервуарной группе.

Время, необходимое для достижения критической температуры (в детерминированной модели) и вероятностей ее достижения 0,5 и 0,95 (в стохастической модели), проиллюстрировано на рис. 4. Возникающее при этом относительное различие δ отложено на правой оси.

Для температур, меньших 280°C (см. рис. 4), время, необходимое для их достижения в детерминированной модели, заключено между временами достижения этой же температуры с вероятностью 0,05 и 0,95: $t_{0,05} < t < t_{0,95}$. При этом ширина интервала не превосходит 5 мин: $t_{0,95} - t_{0,05} < 5$. После 285°C этот интервал начинает увеличиваться, а функция $t(T_{кр})$ резко возрастает. Если до сих пор относительное различие между моделями составляло ~20%, то теперь оно начинает увеличиваться и с приближением критической температуры к максимально достижимой (~ 310°C согласно детерминированной модели) приобретает максимальное

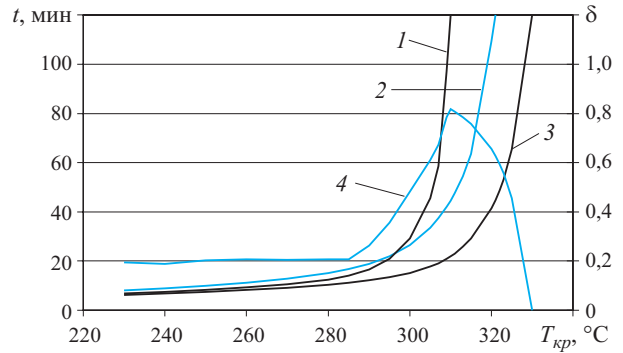


Рис. 4. Время достижения критической температуры: 1 — детерминированная модель; 2 — с вероятностью 0,95; 3 — с вероятностью 0,05; 4 — относительное различие δ между моделями

значение. Причина такого поведения состоит в следующем. Математическое ожидание скорости изменения температуры стремится к нулю по мере приближения к максимально достижимой температуре, а дисперсия скорости почти не изменяется с течением времени (см. рис. 2). Поэтому с уменьшением модуля скорости изменения температуры все больше сказываются ее случайные пульсации, т.е. проявляется стохастическая природа процесса нагрева. Напротив, когда математическое ожидание скорости велико, влияние дисперсии несущественно и модель близка к детерминированной.

Изучим зависимость значимости различий между моделями от свойств нефтепродукта. Рассмотрим резервуарную группу с расстоянием между резервуарами $0,75D$ (согласно СНиП) с произвольным нефтепродуктом, имеющим температуру пламени T_ϕ , степень черноты ϵ_ϕ , относительную высоту факела (отношение высоты факела к диаметру резервуара) k , температуру самовоспламенения T_g . Построим зависимость значимости различий между моделями от указанных четырех параметров: $\delta(T_\phi, \epsilon_\phi, k, T_g)$, предполагая при этом отсутствие ветра. Из перечисленных параметров три первых определяют тепловой поток от факела:

$$q = c_0 \epsilon_\phi \epsilon_c \left[\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \Psi,$$

- где $\epsilon_c = 0,8$ — степень черноты стенки резервуара;
- ϵ_ϕ — степень черноты факела;
- T — температура облучаемой поверхности;
- Ψ — площадь взаимного облучения, зависит от относительной высоты факела $k = L/D$;
- L — длина факела;
- D — диаметр резервуара.

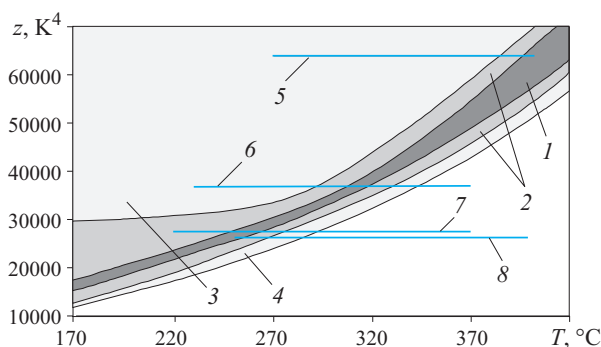


Рис. 5. Влияние свойств нефтепродукта (характеристики теплового потока z и температуры самовоспламенения T_c) на различие δ между стохастической и детерминированной моделями: 1 — область значений, в которой $\delta > 0,4$; 2 — $0,2 < \delta < 0,4$; 3 — $0,1 < \delta < 0,2$; 4 — $0 < \delta < 0,2$; диапазон температур самовоспламенения: 5 — бензина; 6 — нефти; 7 — дизельного топлива; 8 — мазута

С увеличением высоты взаимная площадь облучения растет. Введем параметр z , характеризующий излучение факела:

$$z = \varepsilon_{\phi} \left(\frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 k.$$

Рис. 5 иллюстрирует влияние свойств нефтепродукта на относительное различие между детерминированной и стохастической моделями [4, 5]. В области 1 это различие превосходит 40%, в области 2 — 20%. В областях 3 и 4 это различие несущественно: от 10 до 20% и от 0 до 20% соответственно. Незаштрихованная область соответствует полному совпадению моделей ($\delta = 0$).

С приближением к левому верхнему (малые критические температуры и большие тепловые потоки) и правому нижнему (большие критические температуры и малые тепловые потоки) углам различие между моделями уменьшается. При этом левый верхний угол соответствует ситуации, когда скорость изменения температуры нагреваемого резервуара велика по сравнению с ее случайными пульсациями, и поэтому обе модели дают почти одинаковый результат. Правый нижний угол, напротив, описывает ситуацию, в которой критическая температура оказывается недостижимой. Этим и объясняется совпадение результатов для обеих моделей в данной области.

Из рис. 5 видно, что наибольшее различие между детерминированной и стохастической моделями наблюдается для нефти, для большинства сортов δ будет превосходить 20 и даже 40%. Для большинства бензинов различие лежит в пределах 10–20%, и только для бензинов с температурой самовоспламенения более 370°C начинает сказываться влияние

случайных пульсаций теплового потока: $\delta > 20\%$. Температура самовоспламенения большинства мазутов и дизельных топлив при данных условиях недостижима (незаштрихованная область на рис. 5), но для некоторых мазутов и дизельных топлив (с температурой самовоспламенения менее 270°C) эта температура достижима, различие между моделями достигает 40%.

При построении рис. 5 предполагалось, что расстояние между горящим и негорящим резервуаром составляет 0,75 диаметра. Изменение расстояния приводит к изменению теплового потока и, следовательно, величины z . Тепловой поток от факела убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до него. Поэтому для учета произвольного расстояния L между резервуарами достаточно определить характеристику теплового потока в виде:

$$z = \varepsilon_{\phi} \left(\frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 \left(\frac{0,75}{d} \right)^2 k, \quad (9)$$

где d — относительное расстояние между резервуарами, $d = L/D$;

D — диаметр резервуара.

Таким образом, формула (9) позволяет определить характеристику теплового излучения z от факела горящего нефтепродукта, а затем по диаграмме (см. рис. 5) оценить различие между стохастической и детерминированной моделями и выяснить, существенно ли влияют случайные факторы на процесс нагрева. Это, в свою очередь, позволяет принять решение о необходимости применять стохастическую модель либо возможности ограничиться детерминированной моделью.

Выводы

1. Предложен и теоретически обоснован вероятностный подход к моделированию пожарных ситуаций в резервуарном парке нефтепродуктов. Подход основан на использовании теории случайных функций для описания тепловых процессов, происходящих в горящем и соседних с ним резервуарах. Исходными данными для модели являются случайные процессы, характеризующие факел, результатом — закон и параметры распределения случайных процессов, описывающих температуры резервуаров.

2. Предложен метод оценивания вероятности достижения негорящим резервуаром температуры самовоспламенения паров нефтепродукта в течение заданного промежутка времени, основанный на расчете вероятности выброса случайного процесса за критический уровень. Разработанный метод позволяет прогнозировать каскадное распространение

пожара в резервуарном парке и принять решение о необходимости охлаждения данного резервуара.

3. Проведено теоретическое обобщение детерминированного и стохастического подходов к моделированию пожара в резервуарном парке. Стохастическая модель прогнозирования каскадного развития аварийной ситуации в резервуарном парке является обобщением детерминированной модели. Она позволяет более адекватно описать пожарную ситуацию за счет учета случайных факторов. Выяв-

лены условия, при которых обе модели дают эквивалентные результаты, а также при которых влияние случайных факторов существенно и пренебрегать ими нельзя. Показано, что в ряде случаев наличие случайных факторов приводит к относительно большому различию между моделями более 50%. Метод сравнения стохастической и детерминированной моделей основывается на сопоставлении прогнозируемого времени достижения негорящим резервуаром температуры самовоспламенения нефтепродукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е. Влияние пожара на резервуар с нефтепродуктом // Вестник национального автомобильно-дорожного университета; Сб. науч. тр. — Харьков: ХНАДУ, 2005. — Вып. 29. — С. 131–133.
2. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е. Влияние случайных пульсаций пламени на нагрев резервуара при пожаре // Проблемы пожарной безопасности. — Харьков: Фолио, 2005. — Вып. 18. — С. 3–8.
3. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е. Оценка пульсаций пламени при горении нефтепродуктов // Радиоэлектроника и информатика. — Харьков: ХНУРЭ, 2006. — № 1(32). — С. 40–42.
4. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках с нефтепродуктами. — Харьков: АГЗУ, 2006 — 256 с.
5. Басманов А. Е. Сравнение стохастического и детерминированного подходов при моделировании пожарной ситуации в резервуарном парке // Вестник международного славянского университета. — Харьков: ТОВ ПКФ “Яна”, 2006. — Т. 9, № 1. — С. 14–17.
6. Волков О. М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. — М.: Недра, 1984. — 151 с.
7. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд., в 2-х кн. / Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. Н. и др. — М.: Химия, 1990. — 496 с.
8. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. — М.: Наука, 1968. — 463 с.

Поступила в редакцию 15.06.07.