

А.Е. Басманов, д.т.н., профессор, гл. науч. сотр., НУГЗУ,
И.А. Горпинич, нач. УПСЧ, НУГЗУ

МОДЕЛЬ ПЛАМЕНИ НАД КРУГОВЫМ РАЗЛИВОМ НЕФТЕПРОДУКТА

Построена математическая модель, описывающая динамику изменения параметров излучающей поверхности пламени над разливом нефтепродукта.

Ключевые слова: горючая жидкость, растекание, диаметр разлива, длина пламени.

Постановка проблемы. Оценка теплового воздействия пожара нефтепродукта на подвижной состав при аварии на железнодорожном транспорте требует знания излучающей поверхности пламени над разливом. В отличие от случая горения нефтепродукта в резервуаре, характеристики разлива изменяются во времени, как за счет вытекания горючей жидкости из поврежденной емкости, так и за счет ее выгорания. Поэтому построение модели пламени над разливом горючей жидкости является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [2] построена математическая модель растекания жидкости в форме круга на неровной горизонтальной поверхности. В [4, 5, 6] приведена зависимость длины пламени над разливом круговой формы, но ее изменение, вызванное растеканием и выгоранием жидкости, остается не рассмотренным.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является построение модели пламени над круговым разливом, учитывающей растекание и выгорание жидкости.

Следуя [4, 5, 6] будем полагать, что при отсутствии ветра длина факела подчиняется зависимости

$$L = 42D \left(\frac{v_m}{\rho_v \sqrt{gD}} \right)^{0,61},$$

где H_f – высота факела; D – диаметр разлива; v_m – удельная массовая скорость выгорания; ρ_v – плотность воздуха; g – ускорение свободного падения.

При моделировании формы факела будем предполагать, что вертикальная координата z границы пламени в точке, находящейся на расстоянии r от края разлива, совпадает с высотой факела над разливом диаметром $2r$ (рис. 1), т.е. форма факела является самоподобной.

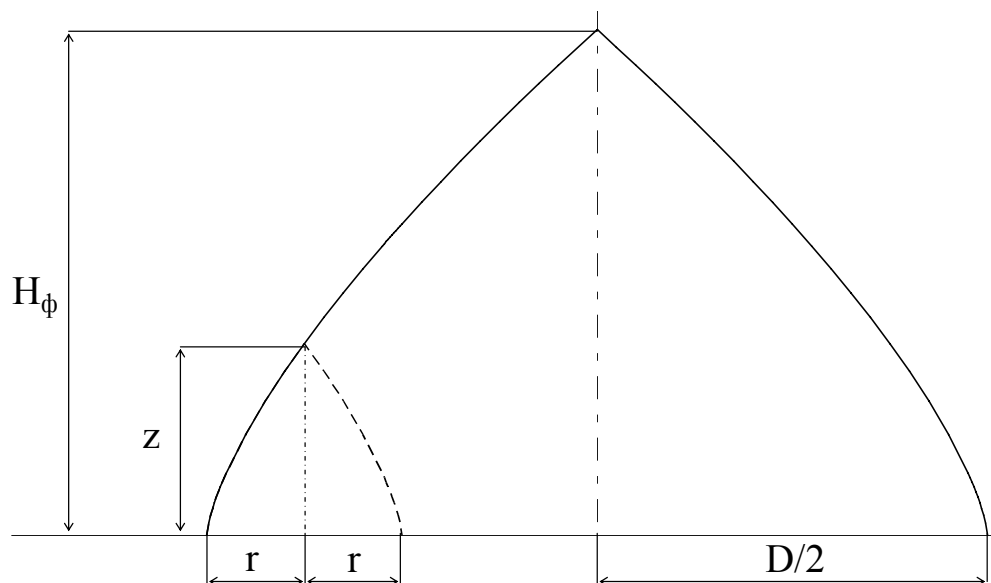


Рис. 1. Форма пламени над разливом

Тогда при отсутствии ветра поверхность факела над круговым разливом описывается уравнением

$$z(x, y) = 42(D - 2r)^{0,7} \left(\frac{v_m}{\rho_b \sqrt{g}} \right)^{0,61},$$

где r – расстояние от точки (x, y) до границы разлива.

По мере выгорания жидкости, разлившейся на негладкой поверхности, площадь ее поверхности сокращается, а площадь, занятая разливом, остается неизменной (рис. 2).

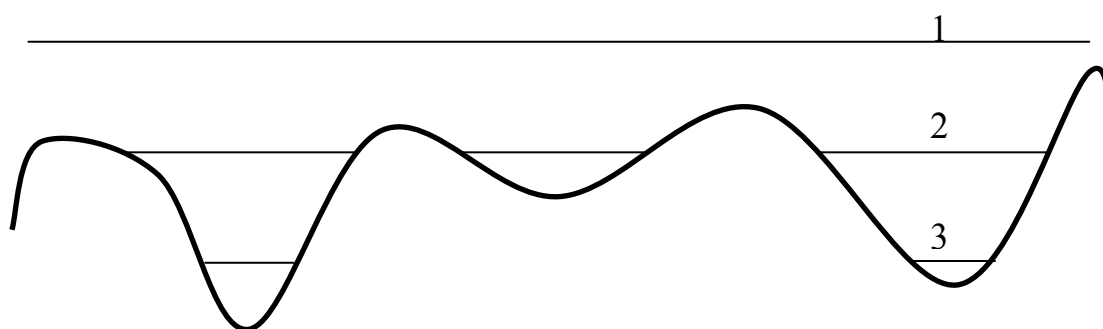


Рис. 2. Сокращение площади поверхности жидкости при ее выгорании на негладкой поверхности: 1, 2, 3 – уровни жидкости в моменты времени t_1 , t_2 , t_3 соответственно, $t_1 < t_2 < t_3$

Несмотря на то, что очаг горения в таком случае является уже не сплошным, а состоящим из отдельных очагов, пламя над ним остается сплошным, но меньшей длины. Поэтому, для оценки длины факела с

учетом выгорания жидкости будем использовать среднюю массовую скорость выгорания:

$$\bar{v}_m = \frac{v_m S_{\text{э}}}{S},$$

где $S_{\text{э}}$ – эффективная площадь горения (площадь поверхности жидкости); S – площадь разлива; $\bar{v}_m \leq v_m$.

В частности, для круговой формы разлива

$$\bar{v}_m(t) = v_m \frac{\pi R_{\text{г}}^2(t)}{\pi R_{\text{max}}^2(t)} = v_m \frac{R_{\text{г}}^2(t)}{R_{\text{max}}^2(t)},$$

где $R_{\text{г}}(t)$ – эффективный радиус разлива; $R_{\text{max}}(t)$ – максимально достигнутый радиус горячей жидкости к моменту времени t

$$R_{\text{max}}(t) = \max_{0 \leq \tau \leq t} R_{\text{г}}(\tau).$$

Функции $R_{\text{г}}(t)$, $R_{\text{max}}(t)$ являются решением системы дифференциальных уравнений [2] с добавлением дополнительного уравнения для $R_{\text{max}}(t)$:

$$R'' = \frac{g(V(t) - \pi R^2 \delta)}{\pi R^3} - 0,455 \left(\lg \frac{2R|R'|}{v} \right)^{-2,58} \frac{|R'|R'}{(V(t) - \pi R^2 \delta)} \pi R^2 -$$

$$- \frac{\sqrt{2} \pi c_d c_l^3 R'|R'|R^2}{(V(t) - \pi R^2 \delta)} - \frac{2\pi R \sigma}{\rho(V(t) - \pi R^2 \delta)}.$$

$$R'_{\text{г}} = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{в}}, \\ v_{\text{н}}, & t \geq t_{\text{в}}, R_{\text{г}} < R, \\ \min(v_{\text{н}}, R'), & t \geq t_{\text{в}}, R_{\text{г}} = R. \end{cases}$$

$$R_{\text{max}}(t) = \max_{0 \leq \tau \leq t} R_{\text{г}}(\tau).$$

$$V' = v(t) - \pi R_{\text{г}}^2(t) \frac{v_m}{\rho},$$

$$R(0) = R_0, R'(0) = 0, R_{\text{г}}(0) = 0, V(0) = \pi R_0^2 \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}}.$$

Тогда диаметр факела основания факела будет равен

$$D(t) = 2R_{\text{max}}(t),$$

а длина факела

$$L(t) = 42D(t) \left(\frac{\bar{v}_m}{\rho_B \sqrt{gD(t)}} \right)^{0,61} = 84R_{\max}(t) \left(\frac{v_m R_r^2(t)}{\rho_B R_{\max}^2(t) \sqrt{2gR_{\max}(t)}} \right)^{0,61}.$$

При этом тепловыделение пожара составит

$$q(t) = \pi R_r^2(t) q_0,$$

где q_0 – удельное тепловыделение пожара.

В качестве примера на рис. 3 показаны изменения со временем длины и диаметра факела, теплового потока (по правой оси) от пожара бензина.

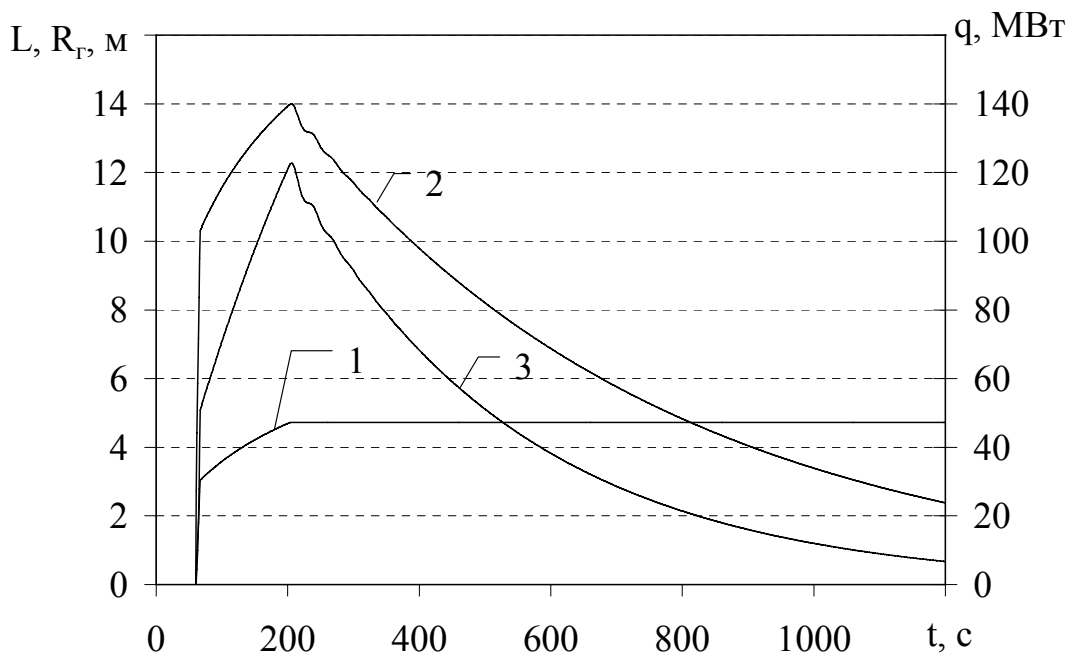


Рис. 3. Изменение параметров факела со временем: 1 – диаметр факела; 2 – длина факела; 3 – тепловой поток от пожара (по правой оси)

Вытекание бензина происходит с объемным расходом $v = 10$ л/с в течение времени $t_0 = 100$ с. Средняя глубина неровностей поверхности $\delta = 0,02$ м. Горение начинается в момент времени $t_r = 30$ с, удельная массовая скорость выгорания $v_m = 0,048$ кг/м² · с, нормальная скорость распространения пламени $v_n = 0,45$ м/с [1]. Физические характеристики бензина приняты $\rho = 740$ кг/м³, $\sigma = 0,021$ Н/м, $\nu = 8,32 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Удельное тепловыделение пожара бензина $q_0 = 1,75 \cdot 10^6$ Дж/м²с.

Анализ графических зависимостей на рис. 3 показывает, что на начальном этапе высота факела и тепловыделение пожара увеличивается вместе с ростом радиуса разлива. После достижения максимального значения радиуса, высота пламени и тепловыделение начинают сокращаться за счет выгорания жидкости и уменьшения площади ее поверхности.

Выводы. Построена модель, описывающая форму пламени над круговым разливом, основанная на предположении о самоподобности формы пламени, и описывающая изменение диаметра и высоты факела по мере растекания и выгорания жидкости. Модель может быть использована для оценки теплового воздействия пожара на окружающие объекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баратов А.Н. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд. в 2 книгах; кн. 1 / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук. – М.: Химия, 1990. – 496 с.
2. Басманов А.Е. Растекание жидкости на негладкой горизонтальной поверхности при аварии на железнодорожном транспорте / А.Е. Басманов, Л.Н. Куценко, И.А. Горпинич // Проблемы надзвичайних ситуацій – Харків: НУЦЗУ, 2014. – Вип. 20. – С. 16-20.
3. Иванников В.П. Справочник руководителя тушения пожара / В.П. Иванников, П.П. Ключ. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
4. Иванов Е.Н. Расчет и проектирование систем противопожарной защиты / Е.Н. Иванов. – М.: Химия, 1990. – 384 с.
5. Less F. Loss prevention in the process industries / Frank P. Less. – Elsevier. – 497 p.
6. Thomas P.H. The size of flames from natural fires / P.H. Thomson // Proc. Combust. Inst., 1963. – V. 9. – P. 844.

О.Є. Басманов, І.А. Горпинич

Модель полум'я над круговим розливом нафтопродукта

Побудовано математичну модель, що описує динаміку зміни параметрів випромінюючої поверхні полум'я над розливом нафтопродукту.

Ключові слова: горюча рідина, розтікання, діаметр розливу, довжина полум'я.

A.E. Basmanov, I.A. Gorpinch

Model of fire of round oil spill

Mathematical model of radiation surface of spill is constructed. It describes dynamics of fire parameters.

Keywords: flammable liquids, spill, diameter of spill, fire length.