

*А.Е. Басманов, д.т.н., профессор, гл. науч. сотр., НУГЗУ,  
И.А. Горпинич, нач. УПСЧ, НУГЗУ,  
Я.С. Кулик, адъюнкт, НУГЗУ*

## ГОРЕНИЕ РАСТЕКАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ, ОГРАНИЧЕННОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ НАСЫПЬЮ

Построена математическая модель, описывающая динамику растекания горячей жидкости в полуплоскости, ограниченной железнодорожной насыпью.

**Ключевые слова:** горючая жидкость, растекание, диаметр разлива.

**Постановка проблемы.** Одним из вариантов развития аварии на железнодорожном транспорте, связанной с разливом горючей жидкости, является ее воспламенение. В связи с этим, при построении оперативных планов ликвидации аварии необходимо учитывать возможное тепловое воздействие пожара на окружающие объекты. Это, в свою очередь, требует построения моделей горения растекающейся жидкости.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [1] рассмотрено растекание жидкости в полуплоскости, ограниченной препятствием в виде нижнего строения пути (железнодорожной насыпи). Построенная модель основывается на гравитационном растекании жидкости и не предполагает ее выгорания.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является построение математической модели горения горючей жидкости, растекающейся в полуплоскости, ограниченной железнодорожной насыпью.

В начальный момент времени жидкость представляет собой цилиндр высотой  $h_0$  и основанием в форме полукруга радиусом  $R_0$ . Под действием силы тяжести жидкость растекается, сохраняя в основании цилиндра форму полукруга. Радиус полукруга  $R$  описывается нелинейным дифференциальным уравнением [1]

$$R'' = \frac{gV(t)}{\pi R^3} - 0,455 \left( \lg \frac{2|R'|R}{\nu} \right)^{-2,58} \frac{\pi |R'|R'R^2}{2 V(t)} - \frac{c_d c_1^3 \pi R^2 R'|R'|}{V(t)\sqrt{2}} - \frac{(\pi + 2)R\sigma}{2\rho V(t)}. \quad (1)$$

с начальными условиями

$$R(0) = R_0; R'(0) = 0, \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $V(t)$  – объемный расход вытекающей жидкости;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости ( $\text{м}^2/\text{с}$ );  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $c_d = 0,09$ ,  $c_1 = 0,25$  – эмпирические константы [2].

Пусть в момент времени  $t = t_b$  происходит воспламенение растекающейся жидкости, причем воспламенение происходит в центре диаметра, ограничивающего полукруг. Обозначим через  $R_2$  – радиус полукруга с горячей жидкостью,  $R_2 \leq R$ ,  $v_n$  – нормальную скорость распространения пламени по поверхности жидкости (рис. 1).

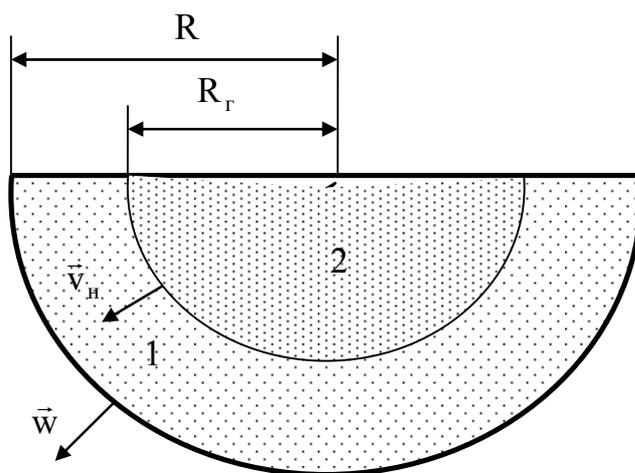


Рис. 1. Распространение пламени по растекающейся горячей жидкости: 1 – негорящая часть жидкости; 2 – горящая часть жидкости

Тогда изменение радиуса горящего полукруга представимо в виде дифференциального уравнения первого порядка

$$R_2' = \begin{cases} 0, & t < t_b, \\ v_n, & t \geq t_b, R_2 < R, \\ \min(v_n, R_2'), & t \geq t_b, R_2 = R \end{cases} \quad (3)$$

с начальным условием

$$R_2(0) = 0. \quad (4)$$

Скорость изменения объема жидкости в разливе будет определяться разностью между расходом жидкости  $v(t)$ , вытекающей из поврежденной емкости, и скоростью выгорания на площади  $S_2 = \pi R_2^2 / 2$

$$V' = v(t) - \pi R_2^2 \frac{v_m}{2\rho}, \quad (5)$$

где  $v_m$  – удельная массовая скорость выгорания. Начальное условие (при разливе радиусом  $R_0$ ) примет вид

$$V(0) = \frac{\pi R_0^2}{2} h_{\min} = \frac{\pi R_0^2}{2} \sqrt{\frac{(2\pi + 4)\sigma}{\pi \rho g}} = R_0^2 \sqrt{\frac{\pi(\pi + 2)\sigma}{2\rho g}}. \quad (6)$$

Уравнения (1), (3), (5) с начальными условиями (2), (4), (6) образуют систему дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих горение растекающейся в полуплоскости горючей жидкости

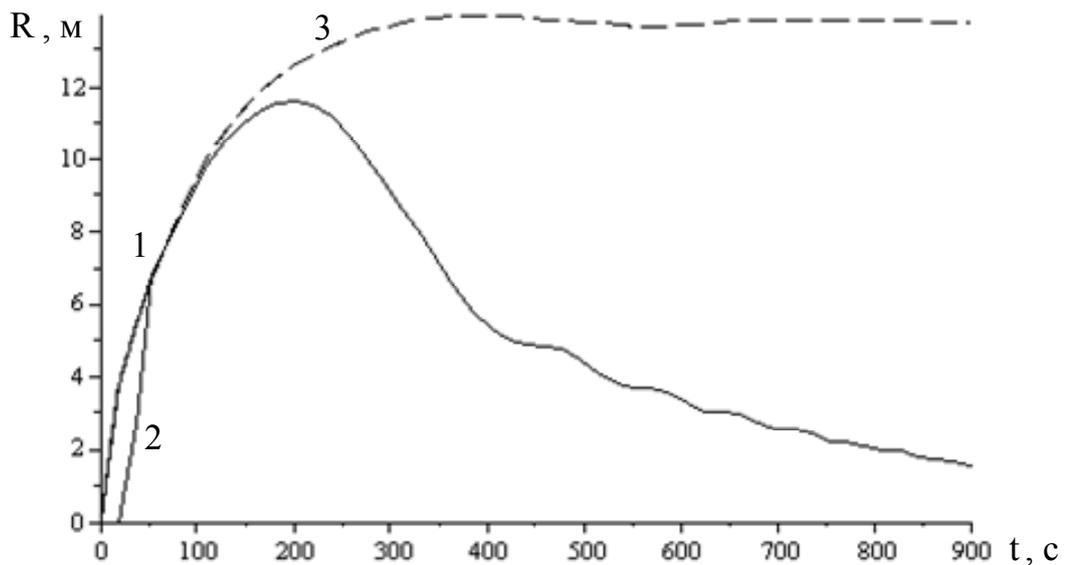
$$R'' = \frac{gV(t)}{\pi R^3} - 0,455 \left( \lg \frac{2|R'|R}{\nu} \right)^{-2,58} \frac{\pi |R'|R'R^2}{2 V(t)} - \frac{c_d c_1^3 \pi R^2 R'|R'}{V(t)\sqrt{2}} - \frac{(\pi + 2)R\sigma}{2\rho V(t)},$$

$$R'_2 = \begin{cases} 0, & t < t_g, \\ v_H, & t \geq t_g, R_2 < R, \\ \min(v_H, R'), & t \geq t_g, R_2 = R; \end{cases}$$

$$V' = v(t) - \pi R_2^2 \frac{v_m}{2\rho};$$

$$R(0) = R_0; R'(0) = 0; R_2(0) = 0; V(0) = R_0^2 \sqrt{\frac{\pi(\pi + 2)\sigma}{2\rho g}}.$$

В качестве примера рассмотрим растекание и горение мазута (рис. 2).



**Рис. 2.** Изменение радиуса разлива мазута во времени: 1 – радиус разлива  $R(t)$ ; 2 – радиус горячей части разлива  $R_2(t)$ ; 3 – радиус разлива при условии отсутствия горения

Вытекание из поврежденной емкости происходит в течение  $t_0 = 100$  с с объемным расходом  $v = 10$  л/с. Воспламенение мазута происходит через  $t_r = 30$  с после начала вытекания. Удельная массовая скорость выгорания  $v_m = 0,015$  кг/м<sup>2</sup>·с, нормальная скорость распространения пламени  $v_H = 0,4$  м/с. Физические характеристики мазута:  $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\sigma = 0,03$  Н/м,  $\nu = 4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с [3].

Из анализа зависимостей на рис. 2 следует, что через минуту после воспламенения горящая область распространяется на всю площадь разлива:  $R_r(t) = R(t)$ . Выгорание жидкости приводит к тому, что радиус разлива не достигает значений, которые были бы при отсутствии горения (пунктирная линия на рис. 2).

**Выводы.** Построена математическая модель, описывающая динамику гравитационного растекания и горения жидкости в полуплоскости, ограниченной железнодорожной насыпью, учитывающая влияние сил трения и сил поверхностного натяжения. Показано, что зависимость диаметра разлива и диаметра горячей области от времени описывается системой двух нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Басманов А.Е. Моделирование разлива горючей жидкости в полуплоскости, ограниченной железнодорожной насыпью / А.Е. Басманов, И.А. Горпинич // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ. 2014. – №35. – С. 26-31.
2. Белов И.А. Моделирование турбулентных течений / И.А. Белов, С.А. Исаев. – СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 108 с.
3. Луканин В.Н. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. – М.: Высш. шк., – 2002. – 671 с.

О.Є. Басманов, І.А. Горпинич, Я.С. Кулик

**Горіння рідини, що розтікається і яка обмежена залізничним насипом**

Побудовано математичну модель, що описує динаміку розтікання горючої рідини, що горить, у напівплощині, обмеженій залізничним насипом.

**Ключові слова:** горюча рідина, розтікання, діаметр розливу.

O.Ye. Basmanov, I.A. Horpynych, Ya.S. Kulyk

**Burning of liquid which is spilling and bounded by the railway embankment**

Mathematical model which describes spill dynamics of burning liquids on horizontal half-plane bounded by railway embankment is constructed.

**Keywords:** flammable liquid, spill, diameter of spill.