УДК 614.8

А.Е. БАСМАНОВ, И.А. ГОРПИНИЧ
Национальный университет гражданской защиты Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЖИДКОСТИ, РАСТЕКАЮЩЕЙСЯ ПРИ АВАРИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

A.E. BASMANOV, I.A. GORPINICH

THE MODELING OF BURNING OF LIQUID SPREADING IN RAILWAY ACCIDENT

Построена математическая модель, описывающая распространение пожара по поверхности жидкости, растекающейся по горизонтальной поверхности.

Аварии на железнодорожном транспорте, сопровождающиеся разливом горючих жидкостей, представляют особую опасность в связи с возможностью воспламенения и распространения пожара на подвижной состав или технологические сооружения. Поэтому проведение работ по ликвидации разлива или его тушению требует получения оценки теплового воздействия пожара на окружающие объекты. Это невозможно без построения математических моделей растекания и горения жидкости.

В работе [1] построены модели теплового воздействия пожара разлива горючей жидкости на железнодорожные цистерны в предположении, что размеры разлива не изменяются во времени. Процесс растекания, зависимость радиуса разлива от объема вылившейся жидкости и конечность времени выгорания жидкости в работе не рассматриваются. В [3] построена модель гравитационного растекания жидкости по горизонтальной поверхности, но при отсутствии ее горения.

Целью работы является построение математической модели динамики распространения пожара по поверхности жидкости при ее истечении из поврежденной емкости и растекании по горизонтальной поверхности.

В работе [3] построена математическая модель гравитационного растекания жидкости по горизонтальной поверхности, учитывающая влияние сил трения и поверхностного натяжения и позволяющая описать изменение радиуса разлива нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка

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

с начальными условиями

$$R(0) = R_0,\ R'(0) = 0, \tag{2}$$

где R – радиус разлива; $V(t)$ – объем жидкости в разливе; g – ускорение свободного падения; ν – кинематическая вязкость жидкости ($м^2/с$); ρ, σ – плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкости; $c_1 = 0{,}25$, $c_d = 0{,}09$ – эмпирические константы [2].

Пусть в момент времени $t = t_в$ происходит воспламенение растекающейся жидкости, причем воспламенение происходит в центре разлива и пламя распространяется с нормальной скоростью $v_н$. Обозначим через $R_г$ – радиус горящей жидкости, $R_г \le R$. Тогда изменение радиуса горящей части разлива может быть представлено в виде обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка

$$R'_г = \begin{cases} 0,\ t < t_в, \\ v_н,\ t \ge t_в,\ R_г < R, \\ \min(v_н, R'),\ t \ge t_в,\ R_г = R. \end{cases} \tag{3}$$

с начальным условием

$$R_г(0) = 0. \tag{4}$$

Изменение объема жидкости в разливе будет определяться расходом жидкости, вытекающей из поврежденной емкости, и ее выгоранием на площади $S_г = \pi R_г^2$:

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

где $v(t)$ – объемный расход жидкости из поврежденной емкости; v_m – удельная массовая скорость выгорания. Начальное условие, как и в [3] зададим в виде

$$V(0)=\pi R_0^2\sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}}, \tag{6}$$

где R_0 – начальный радиус, необходимость введения которого вызвана наличием полюсов в правой части уравнения (1) при $V=0$.

Уравнения (1), (3), (5) с начальными условиями (2), (4), (6) образуют систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих горение растекающейся по горизонтальной поверхности жидкости.

Система уравнений (1)-(6) может быть решена численно, например, с использованием математического пакета Maple. В качестве примера на рис. 1 приведен результат моделирования процесса растекания и горения мазута с объемным расходом $v=10$ л/с в течение времени $t_0=100$ с. Горение мазута начинается в момент времени $t_г=30$ с, удельная массовая скорость выгорания $v_m=0{,}015$ кг/м$^2\cdot$с, нормальная скорость распространения пламени $v_н=0{,}4$ м/с [4]. Физические характеристики мазута приняты $\rho=900$ кг/м^3, $\sigma=0{,}03$ Н/м, $\nu=4\cdot10^{-6}$ м^2/с.

Из анализа зависимостей на рис. 1 следует, что примерно через минуту после начала горения горящая область распространяется на всю площадь разлива. После этого $R_г(t)=R(t)$. Выгорание жидкости приводит к тому, что максимальное значение радиуса разлива оказывается меньше, чем в случае, когда жидкость не горит (пунктирная линия 3 на рис. 1). Вследствие выгорания, сокращается площадь горения.

Построена математическая модель, описывающая динамику распространения пожара по поверхности жидкости при ее истечении из поврежденной емкости и растекании по горизонтальной поверхности. Показано, что зависимость радиуса разлива, радиуса горящей области и объема жидкости в разливе от времени системой описывается нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Зависимость радиуса горящей области от времени может быть использована для определения интенсивности тепловыделения пожара и его влияния на подвижной состав.

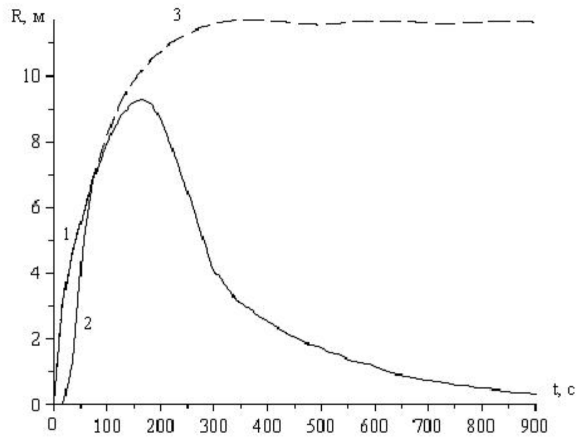

Рис.1. Изменение радиуса разлива мазута во времени: 1 – радиус разлива $R(t)$; 2 – радиус горящей части разлива $R_г(t)$; 3 – радиус разлива при условии отсутствия горения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Ю.О. Математична модель пожежі нафтопродукту на залізничному транспорті / Ю.О. Абрамов, М.Р. Байтала // Пожежна безпека: теорія і практика: Збірник наукових праць. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2009. – №4. – С. 10-13.

2. Белов И.А. Моделирование турбулентных течений / И.А. Белов, С.А. Исаев. – СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 108 с.

3. Горпинич И.А. Моделирование динамики разлива горючей жидкости на горизонтальной поверхности / И.А. Горпинич // Пожарная безопасность. – Харьков: НУГЗУ, 2012. – Вып. 32. – С. 50-56.

4. Иванников В.П. Справочник руководителя тушения пожара / В.П. Иванников, П.П. Клюс. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.