

УДК 614.8

*Э.М. Улинец, начальник государственного департамента  
пожарной безопасности МЧС Украины*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФАКЕЛА НАД РАЗЛИВОМ НЕФТЕПРОДУКТА В ОБВАЛОВАНИИ РЕЗЕРВУАРА**

Построена математическая модель излучающей поверхности пламени над разливом нефтепродукта произвольной формы в обваловании резервуара. Модель может быть использована для оценки воздействия теплового потока на сооружения резервуарного парка и личный состав, участвующий в ликвидации пожара.

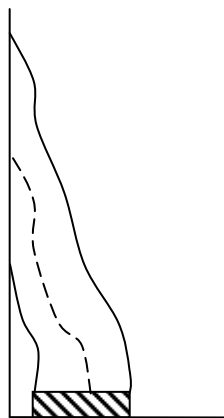
**Постановка проблемы.** Одним из опасных последствий аварий, возникающих при хранении и транспортировке нефтепродуктов, является их разлив. Возгорание разлитого нефтепродукта создает опасность распространения пламени на соседние здания и сооружения, а также представляет серьезную угрозу жизни и здоровью людей. Оценка теплового воздействия пожара на технологическое оборудование, силы и средства, участвующие в его тушении требует построения математической модели излучающей поверхности пламени для разлива произвольной формы.

**Анализ последних исследований и публикаций.** При моделировании излучающей поверхности пламени над горящим нефтепродуктом обычно заменяют действительную форму разлива кругом равной площади [3, 4]. Это позволяет использовать известные модели, построенные для случая горения нефтепродукта в цилиндрическом резервуаре типа РВС, например, представление факела в форме конуса. Однако погрешность такого подхода становится велика, если форма разлива далека от круга. В работе [1] построена модель излучающей поверхности пламени над свободным разливом нефтепродукта. С практической точки зрения важным является случай, когда пламя с одной из сторон ограничено вертикальной стенкой. Такая ситуация, в частности, имеет место при горении разлива в обваловании резервуара.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является построение модели излучающей поверхности пламени над разливом произвольной формы, соприкасающимся с вертикальным стальным резервуаром.

Соприкосновение стенок резервуара с факелом ограничивает приток кислорода в очаг горения, в результате чего пламя вытягивается вдоль стены. Вытягивание пламени связано с тем, что

пары нефтепродукта поднимаются вверх, сгорая лишь тогда, когда достигнут кислорода, поступающего со стороны разлива, не соприкасающейся со стенкой (рис. 1 [3]).



**Рис. 1. Поведение пламени в окрестности вертикальной преграды**

При построении модели будем следовать предположениям, сформулированным в [1]:

1. Под тепловым воздействием факела происходит равномерное испарение со всей поверхности горящего нефтепродукта. При этом пары нефтепродукта движутся вертикально вверх с одинаковой скоростью, перемещение паров в горизонтальном направлении отсутствует.

2. Горение паров нефтепродукта происходит только в месте их контакта с окружающим воздухом.

3. Количество сгорающих паров пропорционально площади поверхности соприкосновения между парами и окружающим воздухом.

Пусть  $\Omega$  – область разлива (односвязная), а  $\partial\Omega$  – ее граница. В этом случае высота пламени над свободным разливом (не соприкасающимся с вертикальными преградами, высоты которых сопоставимы с высотой пламени) в точке  $(x_0, y_0) \in \Omega$  может быть представлена в виде [2]:

$$z(x_0, y_0) = \frac{1}{c} \min_{(x, y) \in \partial\Omega} R(x, y), \quad (1)$$

где  $R(x, y)$  – расстояние между точками  $(x_0, y_0)$  и  $(x, y)$ :  $R(x, y) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ ; константа  $c$  определяется видом нефтепродукта ( $c = 1/2,8$  для легковоспламеняющихся жидкостей и  $c = 1/2,4$  для горючих жидкостей).

Пусть вдоль границы  $\partial\Omega$  области разлива  $\Omega$  задана высота вертикальной преграды  $h(x, y)$ ,  $(x, y) \in \partial\Omega$ . В частности, отсутствие преграды означает  $h = 0$ . Рассмотрим произвольную точку разлива  $(x_0, y_0) \in \Omega$  и точку на границе  $(x, y) \in \partial\Omega$ . Пары нефтепродукта, движущиеся из точки  $(x_0, y_0)$  вертикально вверх, смогут достичь кислорода со стороны точки  $(x, y) \in \partial\Omega$  на высоте

$$z(x, y) = h(x, y) + R(x, y)/c. \quad (2)$$

Учитывая возможность достижения кислорода от любой точки границы, получим высоту пламени над точкой  $(x_0, y_0) \in \Omega$ , как минимума выражения (2) по всем точкам границы разлива:

$$z_0 = \min_{(x, y) \in \partial\Omega} (h(x, y) + R(x, y)/c) = \frac{1}{c} \min_{(x, y) \in \partial\Omega} (h(x, y)c + R(x, y)). \quad (3)$$

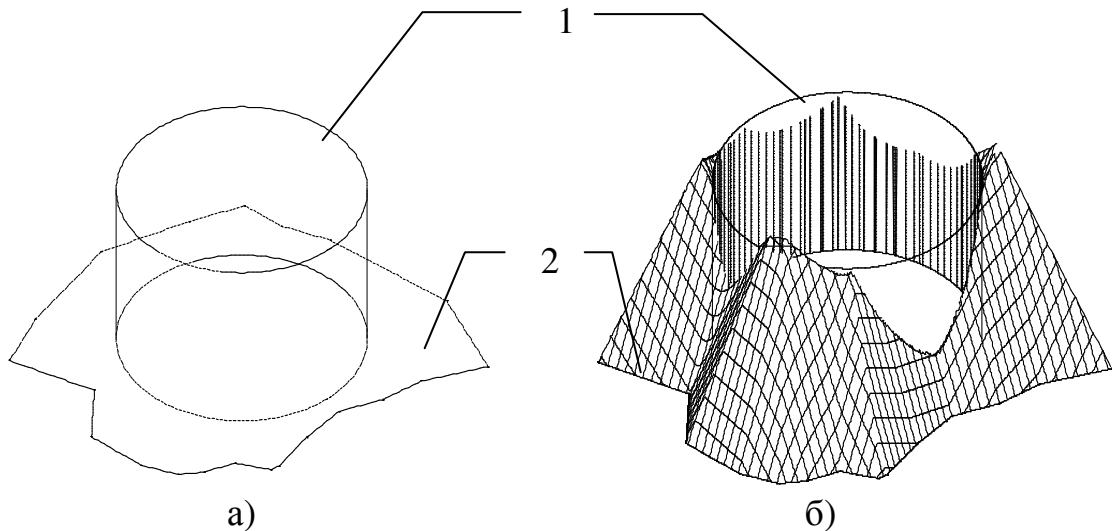
Полученная зависимость аналогична (1), но теперь расстояние до границы разлива вычисляется с учетом высоты вертикальной преграды вдоль границы.

Пусть граница области разлива описывается замкнутой линией, каждому звену  $A_k A_{k+1}$  которой поставлена в соответствие высота преграды  $h_k$ . Тогда поверхность пламени над разливом будет описываться уравнением

$$z = r'/c, \quad (4)$$

где  $r' = \min_k (h_k c + r(x, y, A_k A_{k+1}))$  – расстояние от точки  $(x, y) \in \Omega$  до границы разлива с учетом высоты преграды;  $r(x, y, A_k A_{k+1})$  – расстояние от точки  $(x, y)$  до звена  $A_k A_{k+1}$  линии, ограничивающей область разлива. Если граница области разлива описана с помощью ломаной, то звеньями  $A_k A_{k+1}$  замкнутой линии, ограничивающей область разлива, наряду с отрезками, будут также дуги, соответствующие основанию резервуара. Расстояния до них от данной точки также могут быть вычислены.

В качестве примера на рисунке 2 показано горение разлива нефти ( $c = 1/2,4$ ) вокруг резервуара РВС-10000.



**Рис. 2. Разлив вокруг резервуара (а) и его горение (б): 1 – резервуар РВС-10000 (диаметр 28,5 м, высота 18 м); 2 – разлив нефти**

Следствием соприкосновения разлива с резервуаром является прилегание пламени к стенке резервуара и его вытягивание вдоль нее (рис. 2). Это приводит к увеличению высоты пламени (по сравнению со случаем, когда из свободного разлива исключен круг диаметром, равным диаметру резервуара). Увеличение высоты пламени приводит к увеличению площади поверхности резервуара, соприкасающейся с факелом, и, следовательно, к увеличению теплового потока от пламени к резервуару.

**Выводы.** Построена математическая модель излучающей поверхности пламени для разливов нефтепродуктов, горящих в обваловании резервуара. Особенностью модели является учет произвольности формы разлива и вытягиванием пламени вдоль стенки резервуара, вызванного отсутствием притока кислорода со стороны стенки.

Перспективы дальнейших исследований связаны с учетом влияния ветра на пламя и обтекания цилиндрического резервуара воздушным потоком.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Математическая модель пламени над разливом произвольной формы // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: Сборник тезисов докладов IV Международной научно-практической конференции. В 3 т. – Т. 1. – Минск: МЧС Беларуси, 2007. – С. 25-27.

2. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е., Садковой В.П. Алгоритм оценивания эффективности расстановки стволов для локализации пожара в резервуарном парке // Международная научно-практическая

конференция "Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации"  
// Гомель: ГИИ, 2006. – С. 50-51.

3. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1990. – 420 с.

4. Моделирование пожаров и взрывов / Под общ. ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – 482 с.