

**УДК 614.8**

*М.Р. Байтала, Государственный департамент пожарной безопасности МЧС Украины,  
В.П. Садковой, канд. психол. наук, доц., ректор НУГЗУ*

## **ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ФАКЕЛА, ФОРМИРУЕМОГО ВОСХОДЯЩИМИ ПОТОКАМИ, НА ЦИСТЕРНУ С НЕФТЕПРОДУКТАМИ**

(представлено д-ром техн. наук Басмановым А.Е.)

С использованием методов теории струй построены оценки температуры и скорости движения продуктов горения и разогретого воздуха, поднимающихся над очагом горения.

**Ключевые слова:** осесимметричная струя, пожар, очаг горения, конвективный поток

**Постановка проблемы.** Пожар на железнодорожном транспорте представляет повышенную опасность ввиду угрозы его быстрого распространения, что чревато как значительным материальным ущербом, так и человеческими жертвами. Анализ статистики пожаров на железнодорожном транспорте показывает, что около 80% пожаров связаны с горением жидких нефтепродуктов. Разработка плана пожаротушения и оценка необходимых сил и средств невозможны без учета влияния пожара на подвижной состав, в частности, на другие цистерны с нефтепродуктом.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В литературе широко представлены два предельных случая теплового воздействия пожара на емкость с нефтепродуктом:

- очаг горения расположен достаточно далеко от емкости, вследствие чего теплопередача от пожара к емкости осуществляется только излучением, а воздух, соприкасающийся со стенками емкости, имеет температуру окружающей среды [4];
- очаг горения расположен настолько близко к емкости, что пламя соприкасается с ее стенками – в этом случае полагают, что температура среды, с которой соприкасаются стенки емкости, равна температуре пламени [6].

При этом нерассмотренным остается общий случай, когда на стенки емкости оказывают тепловое воздействие продукты горения и разогретый воздух, поднимающиеся над очагом горения.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является оценка параметров (температуры и скорости) продуктов горения и

Тепловое воздействие факела, формируемого восходящими потоками, на цистерну с 27  
нефтепродуктами

разогретого воздуха, воздействующих на емкость с нефтепродуктом, т.е. факела, формируемого восходящими потоками [3].

Для оценки температуры восходящих конвективных потоков воспользуемся теорией свободных турбулентных струй [1, 2, 5] и будем полагать, что из области разлива вертикально вверх выходит круговая осесимметричная струя, имеющая температуру факела  $T_{\phi}$  и начальную скорость  $u_0$ . В этом случае в струе выделяют два участка: начальный OF и основной FZ (рис. 1). При этом в внутри ядра струи (часть потока, лежащая внутри конуса AFB) скорость потока и его температура равны начальным значениям –  $u_0$  и  $T_{\phi}$  соответственно. За пределами границы струи (поверхность бесконечного усеченного конуса CABD) среда неподвижна и имеет температуру  $T_0$ . В пограничном слое (часть потока, заключенная между ядром струи и границей струи) скорость потока убывает от  $u_0$  до 0, а температура – от  $T_{\phi}$  до  $T_0$ .

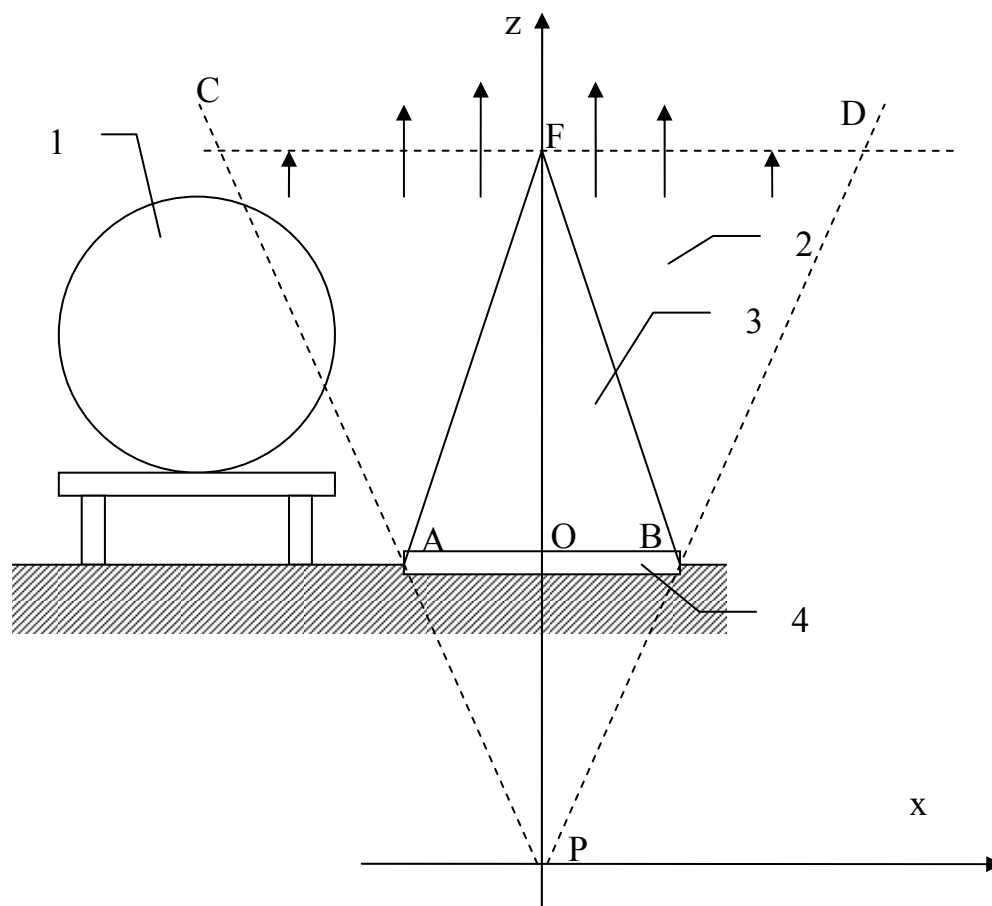


Рис. 1 – Воздействие конвективных струй от очага горения на железнодорожную цистерну: 1 – цистерна; 2 – восходящие конвективные потоки разогретого воздуха и продуктов горения; 3 – ядро струи; 4 – горящая жидкость

В системе координат, приведенной на рис.1, радиус границы струи  $r_{гр}$  описывается выражением [5]:

$$r_{гр} = \varphi_{гр} az, \quad (1)$$

где  $\varphi_{гр}$  – безразмерная граница струи, зависящая только от формы поперечного сечения и для круглой струи равная  $\varphi_{гр} = 3,4$ . Величина  $a$  определяется турбулентностью потока и изменяется от 0,066 для потока с малой турбулентностью (при истечении из сопел) до 0,27 для потока за турбулезирующей решеткой; при истечении из цилиндрической трубы –  $a = 0,076$ . Тогда для рассматриваемого случая

$$r_{гр} = 0,2584z. \quad (2)$$

За пределами ядра скорость струи  $u_m$  на ее оси подчиняется соотношению [5]:

$$\frac{az}{r_0} = \frac{0,975}{\sqrt{\theta}} \frac{u_0}{u_m} \sqrt{1 + 0,526(\theta - 1) \frac{u_m}{u_0}}, \quad (3)$$

где  $r_0$  – радиус струи в начальном сечении, т.е. радиус разлива;  
 $\theta = \frac{T_\phi}{T_0}$ .

Аналогичное соотношение имеет место и для избыточной температуры вдоль оси струи:

$$\frac{az}{r_0} = \frac{0,71}{\sqrt{\theta}} \frac{\Delta T_0}{\Delta T_m} \sqrt{1 + 0,72(\theta - 1) \frac{\Delta T_m}{\Delta T_0}}, \quad (4)$$

где  $\Delta T_0 = T_\phi - T_0$ ;  $\Delta T_m = T_m - T_0$ ;  $T_m$  – температура струи вдоль ее оси за пределами ядра.

Решая уравнения (3), (4) относительно  $u_m$  и  $\Delta T_m$ , а затем подставляя  $a = 0,076$ , получим

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{43,29r_0^2(\theta - 1) + r_0 \sqrt{3562r_0^2(\theta - 1) + 164,6z^2\theta}}{z^2\theta}, \quad (5)$$

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_0} = \frac{31,42r_0^2(\theta - 1) + r_0 \sqrt{1371r_0^2(\theta - 1) + 87,27z^2\theta}}{z^2\theta}, \quad (6)$$

где координата  $z$  отсчитывается от точки фокуса струи  $F$  (рис. 1). При этом центр разлива имеет координату

$$z_0 = \frac{r_0}{\varphi_{гр} a} = 3,870r_0, \quad (7)$$

а начало основного участка

$$z_1 = \frac{3,3r_0}{\varphi_{гр} a} = 12,77r_0; \quad (8)$$

радиус ядра струи  $r_я$ :

$$r_я = 1,435r_0 - 0,1124z, \quad (9)$$

где учено, что начало основного участка характеризуется свойством  $r_{гр} = 3,3r_0$  [5].

Профиль безразмерных избыточных температур в горизонтальном срезе на расстоянии  $z$  от фокуса струи связан с безразмерным профилем скоростей формулой

$$\frac{\Delta T(r, z)}{\Delta T_m(z)} = \sqrt{\frac{u(r, z)}{u_m(z)}}, \quad (10)$$

где  $\Delta T(r, z)$ ,  $u(r, z)$  – избыточная температура и скорость струи на расстоянии  $r$  от оси струи  $z$ ;  $\Delta T_m(z)$ ,  $u_m(z)$  – значения этих параметров на оси струи.

Безразмерная скорость функционально связана с безразмерной координатой [1, 2]

$$\frac{u(r, z)}{u_m(z)} = f\left(\frac{r}{R_{гр}(z)}\right), \quad (11)$$

где  $R_{гр}$  – полуширина струи для основного участка и ширина пограничного слоя для начального участка, т.е.

$$R_{гр}(z) = \begin{cases} 0,3708z - 1,435r_0, & 3,87r_0 \leq z < 12,77r_0, \\ 0,2584z, & 12,77r_0 \leq z < \infty, \end{cases} \quad (12)$$

где учтены соотношения (2), (7)-(9). Значения функции  $f$  задаются таблицей 1 [1, 2].

Таблица 1

Зависимость безразмерной скорости струи от координаты

$r/R_{гр}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$u/u_m$	1	0,907	0,758	0,596	0,443	0,300	0,186	0,098	0,044	0,13	0

Таким образом, выражения (5), (6), (10)-(12) позволяют найти распределение температур и скоростей в восходящем конвективном потоке. Входящая в них начальная скорость струи может быть оценена, исходя из максимальной скорости восходящего потока в пламени пожара [3]:

$$u_0 = 1,9Q^{0,2},$$

где  $Q$  – интенсивность тепловыделения пожара, заданная в кВт.

На рис. 2 приведены скорости восходящих потоков при пожарах некоторых горючих жидкостей.

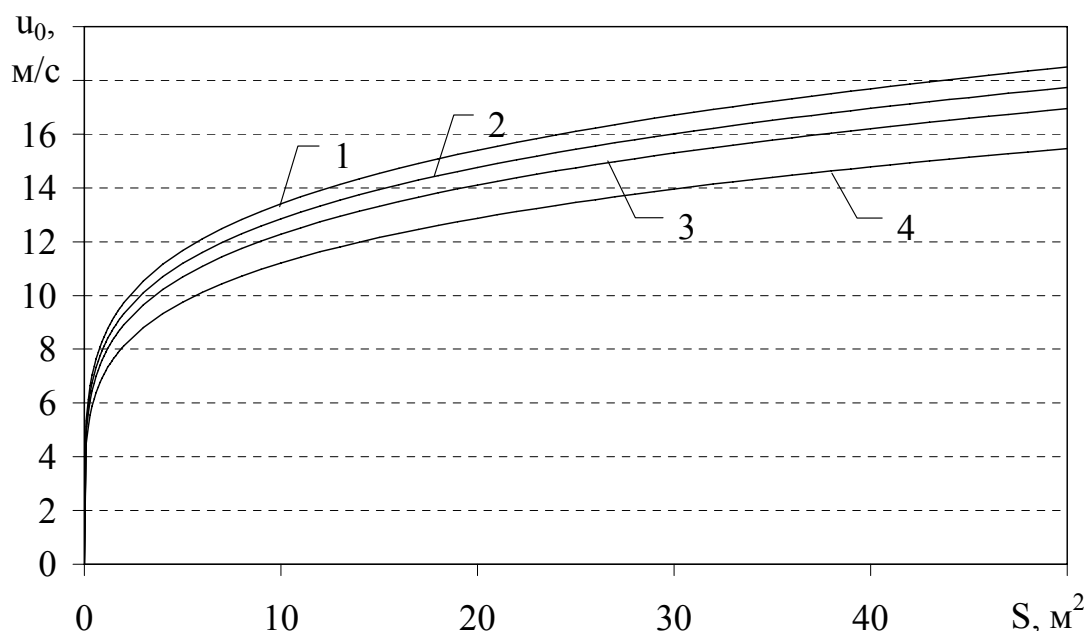


Рис. 2 – Зависимость максимальной скорости восходящего потока от площади пожара для некоторых жидкостей: 1 – бензин; 2 – керосин; 3 – мазут; 4 – нефть

Из анализа зависимостей на рис. 2 следует, что такие скорости имеют порядок 10 м/с и, следовательно, ними нельзя пренебрегать при рассмотрении режима конвективного теплообмена цистерны с окружающей средой.

**Выводы.** Построены оценки распределения температур и скоростей в восходящем над очагом горения конвективном потоке. Полученные оценки могут быть использованы в модели теплового воздействия пожара на цистерну с нефтепродуктом при оценке конвективной составляющей теплового потока.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1991. – 600 с.
2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: Физматгиз, 1960. – 715 с.
3. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1990. – 420 с.
4. Исхаков Х.И., Хабибуллин Р.Ш. Оценка воздействия тепловых потоков пожара на цистерну автомобиля для транспортирования нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – № 1. – С. 75-80.
5. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
6. Улинец Э.М. Математическая модель пожара в обваловании резервуара в условиях ветровой нагрузки / Э.М. Улинец // Науковий вісник будівництва. – 2008. – Вип. 50. – С. 223–228.

nuczu.edu.ua

М.Р. Байтала, В.П. Садковий

**Тепловий вплив факела, утвореного висхідними потоками, на цистерну з нафтопродуктом.**

З використанням методів теорії струменів побудовано оцінки температури і швидкості руху продуктів горіння і розігрітого повітря, що підіймаються над осередком горіння.

**Ключові слова:** вісесиметричний струмінь, пожежа, осередок горіння, конвекційний потік

M.R. Baytala, V.P. Sadkovoy

**Thermal impact of upstream torch to the fuel tank.**

Estimations of temperature and speed of combustion products and warm air over the fire burning are constructed. Methods of jets theory are used for this purpose.

**Keywords:** axisymmetric jet, fire, forward combustion, convective flow.