

**ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ
ДИФфуЗИОННО-ТЕМПЕРАТУРНОГО СЛОЯ
НА ВЫСОТУ ПЛАМЕНИ**

В. Н. Подымов, И. Ф. Чучалин

(Казань)

На рис. 1 показан снимок диффузионного факела пропана, полученный с помощью прибора ИАБ-451 таким образом, что одновременно видно пламя и слой продуктов сгорания. Этот слой (его целесообразно назвать диффузионно-температурным слоем) является пограничным для пламени. Изменение толщины и формы диффузионно-температурного слоя влечет за собой изменение режима кислородного питания пламени, а следовательно, высоты и формы пламени.

Задача определения высоты и формы пламени в зависимости от различных факторов является основной в исследованиях диффузионного факела. Теоретическая разработка этой задачи пока не завершена ввиду сложности процессов, протекающих в диффузионном факеле. Предложены теории лишь некоторых частных случаев. Для закрытого диффузионного факела форму и высоту пламени нашли С. Бурке и Т. Шуман [1]; форма и высота открытого пламени диффузионно горящих жидкостей найдена В. И. Блиновым [2]. Другие авторы получили полуэмпирические формулы для оценки только высоты пламени [3, 4].

Поскольку В. И. Блинов рассматривал горение в ничем не ограниченном пространстве, представляет интерес проверить пригодность полученного им уравнения меридианной линии пламени для открытого диффузионного факела газов. На рис. 2 сплошной линией очерчен взятый из работы [2] безразмерный профиль пламени и нанесены экспериментальные точки, полученные с пламенем пропана на горелке диаметром 2 см. Видно, что точки удовлетворительно расположились около теоретической кривой. Подробная проверка обнаруживает, что совпадение имеет место, если изменение диаметра горелки не выходит за пределы от 0,8 до 2,5 см.

Совпадение теоретического и экспериментального профилей пламени свидетельствует о том, что в указанных пределах изменения диаметра горелки предпосылки В. И. Блинова годятся и для открытого диффузионного факела газов.

До сих пор речь шла о стационарных диффузионных пламенах. В случае нестационарных диффузионных пламен высота и форма пла-

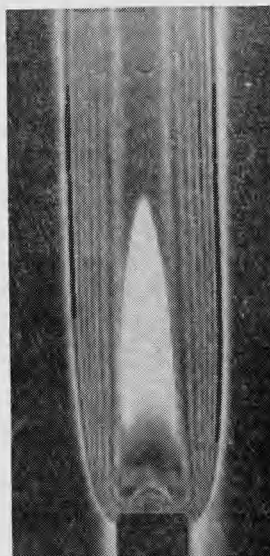


Рис. 1.

мени зависит еще и от времени. Экспериментальные данные свидетельствуют, что в общем случае эта зависимость может быть довольно сложной [5].

В настоящей работе сделана попытка связать изменение высоты пламени с изменением толщины диффузионно-температурного слоя в предположении, что последняя меняется незначительно и по синусои-

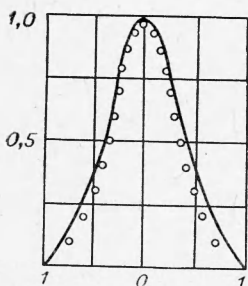


Рис. 2.

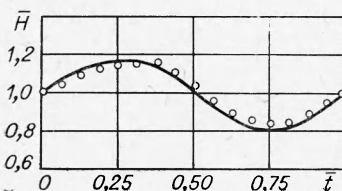


Рис. 3.

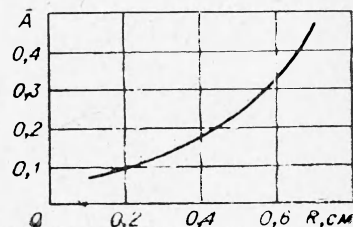


Рис. 4.

дальному закону. Выбор такого закона изменения толщины диффузионно-температурного слоя находится в согласии с работами [6, 7], в которых доказывается, что колебательный режим горения диффузионного факела обуславливается гидродинамической неустойчивостью струи продуктов сгорания. (Вообще, толщина слоя продуктов сгорания может меняться и вследствие других причин. В данном случае это не имеет принципиального значения.)

Задача решается в цилиндрических координатах (z, ξ, φ) , с началом в центре среза горелки и осью z , направленной по оси пламени. Пусть R — радиус горелки, r — расстояние от оси до поверхности пламени, ρ и u — плотность и скорость газа, α — количество кислорода, необходимого для полного сгорания 1 г газа, D — коэффициент диффузии кислорода.

Рассуждениями, аналогичными рассуждениям В. И. Блинова [2], приходим к дифференциальному уравнению

$$-D \left(\frac{dc}{d\xi} \right)_{\xi=r} r d\varphi dz = u \rho \alpha r d\varphi dr, \quad (1)$$

где $\frac{dc}{d\xi}$ определяется из уравнения

$$D \left(\frac{d^2 c}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{dc}{d\xi} \right) = 0, \quad (2)$$

но при граничных условиях:

$$1) \xi = A + a \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad c = c_0; \quad 2) \xi = r, \quad c = 0.$$

Здесь A — толщина диффузионно-температурного слоя стационарного пламени; a — амплитуда возмущения толщины диффузионно-температурного слоя; c_0 — концентрация кислорода в атмосфере, T — период возмущения; t — время.

Находя из уравнения (2) производную

$$\frac{dc}{d\xi} = \frac{c_0}{\ln \left(A + a \sin \frac{2\pi}{T} t \right) - \ln r} \cdot \frac{1}{\xi} \quad (3)$$

и подставляя ее в уравнение (1), будем иметь

$$-\frac{D c_0}{u \rho \alpha} dz = r \left[\ln \left(A + a \sin \frac{2\pi}{T} t \right) - \ln r \right] dr. \quad (4)$$

Проинтегрировав последнее равенство, получим

$$-\frac{D c_0}{u \rho \alpha} z = \frac{r^2}{2} \ln \left(A + a \sin \frac{2\pi}{T} t \right) - \frac{r^2}{2} \ln r + \frac{r^2}{4} + C.$$

Постоянная C определяется из условия, что $z=0$ при $r=R$. Определив постоянную, найдем

$$-\frac{D c_0}{u \rho \alpha} z = \frac{r^2}{2} \ln \frac{A + a \sin \frac{2\pi}{T} t}{r} + \frac{r^2}{4} - \frac{R^2}{2} \left(\ln \frac{A + a \sin \frac{2\pi}{T} t}{R} + 0,5 \right).$$

Из этого равенства высота пламени H получается требованием $z=H$ при $r=0$:

$$H = \frac{R^2 u \rho \alpha}{2 D c_0} \left(\ln \frac{A + a \sin \frac{2\pi}{T} t}{R} + 0,5 \right). \quad (5)$$

Относя мгновенную высоту пламени к высоте в момент $t=0$, получим безразмерную высоту пламени \bar{H} :

$$\bar{H} = \frac{\ln \frac{A + a \sin \frac{2\pi}{T} t}{R} + 0,5}{\ln \frac{A}{R} + 0,5}. \quad (6)$$

Закон изменения высоты пламени со временем для случая $A=0,6$ см, $a=0,1$ см и $R=0,4$ см показан на рис. 3. (Безразмерное время $\bar{t}=t/T$.) Там же нанесены экспериментальные точки. При небольших расходах горючего колебания высоты пламени почти синусоидальны [5] и экспериментальные кривые весьма похожи на теоретическую.

Из формулы (6) следует, что безразмерная амплитуда колебаний высоты пламени тем больше, чем больше амплитуда возмущения толщины диффузионно-температурного слоя. С увеличением радиуса горелки амплитуда колебаний тоже возрастает. Вид кривой показан на рис. 4 для $A=0,6$ см, $a=0,1$ см. Качественные наблюдения над факелом пропана согласуются с последним выводом, но количественную проверку осуществить трудно, так как в эксперименте не всегда реализуются условия, допускающие применение формулы (6).

Уже незначительное увеличение расхода газа приводит к тому, что колебания пламени становятся нелинейными, разрывными [5] и экспериментальные данные существенно отличаются от теоретических предсказаний. (Для пропанового факела на горелке диаметром 0,8 см несоответствие начинается с чисел Рейнольдса, больших 25.) Это рас-

хождение объясняется тем, что при выводе уравнения (6) подразумевали лишь молекулярную диффузию. На самом деле, с увеличением расхода газа, очень скоро на первый план выступают процессы, связанные с подачей кислорода локальными струями и вихрями. Механизм кислородного питания факела, следовательно, меняется, и прежние закономерности перестают быть справедливыми.

ВЫВОДЫ

1. Периодическое изменение толщины диффузионно-температурного слоя вызывает периодические колебания высоты пламени.

2. Механизм синусоидальных или близких к ним колебаний высоты пламени может быть, по крайней мере качественно, объяснен на основе только молекулярной радиальной диффузии кислорода.

*Поступила в редакцию
20/V 1967*

ЛИТЕРАТУРА

1. S. P. Burke and T. S. W. Schumann. *Ind. Eng. Chem.*, 1928, **20**, 998—1009.
2. В. И. Блинов, Г. Н. Худяков. Диффузионное горение жидкостей. М., Изд-во АН СССР, 1961.
3. Г. Хоттель, В. Гаусорн. Сб. «Вопросы горения», ч. 1., М., ИЛ, 1953.
4. К. Уол, Г. Гэзли, Н. Кэп. *VPT*, 1952, 1.
5. В. Н. Подымов, И. Ф. Чучалин. Шестая республиканская межвузовская конференция по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Тез. докл., Изд. Киевского университета, 1966.
6. Kimura Itsuro. 10-th Symposium (International) Combustion, Cambridge, 1964.
7. Toong Tau—Yi, Salant Richard F., Stopford John M., Anderson Griffin Y. 10-th Symposium (International) Combustion, Cambridge, 1964.