

В случае двухкомпонентной смеси с весовым соотношением компонентов $\alpha = m_{\text{ок}}/m_{\text{г}}$ формула (1) приводится к виду

$$\alpha_3 = - \frac{\sum_{\Gamma}^{(-)} + \alpha \frac{\mu_{\Gamma}}{\mu_{\text{ок}}} \sum_{\text{ок}}^{(-)}}{\sum_{\Gamma}^{(+)} + \alpha \frac{\mu_{\Gamma}}{\mu_{\text{ок}}} \sum_{\text{ок}}^{(+)}} \quad (2)$$

где $\sum_{\Gamma}^{(-)}$ — сумма произведений $b_{i\Gamma} \nu_i$ для элементов с электроотрицательной валентностью в горючем; $\sum_{\Gamma}^{(+)}$ — сумма произведений $b_{i\Gamma} \nu_i$ для элементов с электроположительной валентностью в горючем; $b_{i\Gamma}$ — число атомов i -го химического элемента в формуле горючего.

Смысл сумм $\sum_{\text{ок}}^{(-)}$, $\sum_{\text{ок}}^{(+)}$ для окислителя аналогичен.

В качестве примера рассмотрим смеси, приведенные в работе [1]. Окислитель NH_4ClO_4 , $\mu_{\text{ок}} = 117,5$; горючее $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$, $\mu_{\text{г}} = 100$:

$$\alpha_3 = \frac{4 + \alpha \frac{100}{117,5} 9}{28 + \alpha \frac{100}{117,5} 4} = \frac{0,02 + 0,383 \frac{m_{\text{ок}}}{m_{\text{г}}}}{0,14 + 0,017 \frac{m_{\text{ок}}}{m_{\text{г}}}}$$

Окислитель NH_4ClO_4 , горючее $(\text{CH}_2\text{CH}_2)_n$, $\mu_{\text{г}} = 28$:

$$\alpha_3 = \frac{0 + \alpha \frac{28}{117,5} 9}{12 + \alpha \frac{28}{117,5} 4} = \frac{m_{\text{ок}}}{5,6 m_{\text{г}} + \frac{4}{5} m_{\text{ок}}}$$

Окончательные формулы совпадают с приведенными в работе [1]. Следует отметить, что в работе [1] обозначения α и α_3 в таблицах переставлены местами.

Поступила в редакцию
28/XI 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Бахман. ФГВ, 1968, 4, 1.

УДК 536.46+532.507

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЗОНЕ ГОРЕНИЯ ОДНОРОДНОЙ ТОПЛИВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

И. И. Галюн, Ю. А. Иванов
(Москва)

Влияние турбулентности потока, набегающего на факел пламени, на скорость распространения пламени и ширину зоны горения топливно-воздушной смеси в настоящее время общеизвестно.

Однако для более глубокого понимания механизма турбулентного горения необходимо знать характеристики турбулентности потока в самой зоне горения. Авторы ряда теоретических исследований турбулентных пламен [1, 2] приходят к выводу о возможности генерирования пламенем дополнительной турбулентности потока. Работ, посвященных экспериментальной проверке этих выводов, мало, а выводы их противоречивы. В экспериментальных работах [3, 4] обнаружена дополнительная турбулиза-

ция потока в зоне горения, а в работах [5, 6] это явление не зафиксировано. Недостаток в экспериментальных исследованиях турбулентности в пламенах объясняется в первую очередь большими методическими трудностями.

В настоящей работе применялся один из возможных методов измерения характеристик турбулентности в зоне горения: определялась скорость диффузии вещества, подмешиваемого в поток.

В качестве такого вещества был выбран гелий, который удовлетворяет очевидному требованию химической инертности и имеет высокую теплопроводность, что позволяет определить его присутствие при очень малых концентрациях.

Интенсивность турбулентности ϵ определялась по формуле $\epsilon = \sqrt{\overline{Y^2}}/h$ где $\overline{Y^2}$ — дисперсия гелия, а h — расстояние от трубки — источника гелия — до трубки для отбора проб газа. Для определения величины h были проведены специальные методические исследования. В этих опытах при известной величине интенсивности турбулентности потока ($\epsilon_0 = 4,5-5\%$) варьировались расстояния h в диапазоне от 20 до 70 мм. Наиболее удовлетворительное совпадение измеренных ϵ с известной величиной интенсивности турбулентности получено при изменении расстояния h от 25 до 55 мм, поэтому в последующих опытах оно выбиралось равным 30—50 мм.

Величина $\sqrt{\overline{Y^2}}$ определялась как полуширина профиля концентрации гелия $C(y) \approx 0,607$ от концентрации на оси струйки.

Источником гелия служила трубка из нержавеющей стали размером $1 \times 0,2$ мм. Конец трубки был изогнут таким образом, чтобы избежать влияния на поле концентрации гелия турбулизации потока трубкой. Расход гелия контролировался с помощью мерной шайбы. Пробы газа отбирались трубкой размером $1 \times 0,2$ мм. Источник гелия мог перемещаться вместе с отборником или без него вдоль оси потока и в радиальном направлении. Это позволяло определять поля концентрации в любом сечении. Координаты трубок определялись с точностью $\pm 0,1$ мм. Концентрация гелия в отобранной пробе измерялась с помощью стандартного датчика ГЭУК-21. Содержащиеся в продуктах неполного сгорания H_2 и CO_2 удалялись: H_2 — дожиганием в печи прибора, CO_2 — поглощением в растворе КОН; сажа и влага улавливались специальными фильтрами и отстойниками. Время измерения концентрации гелия в одной точке составляло 30—60 сек. По данным специально проведенных исследований, возможная относительная ошибка при измерении величины $\sqrt{\overline{Y^2}}$ в условиях данной работы не превышает 4—5%.

Интенсивность турбулентности измерялась в пламени, стабилизированном на кольцевой кислородно-пропановой горелке диаметром 35 мм (ширина кольца 4 мм). Горелка была установлена на выходе из трубы диаметром 150 мм, по которой подавалась однородная керосино-воздушная смесь, причем ось горелки совпадала с осью трубы. В этих опытах факел пламени располагался в свободной турбулентной струе.

Для получения однородной смеси в воздух, подогретый в газовом подогревателе смесительного типа до температуры 573°К или 773°К, через центробежную форсунку впрыскивался керосин. Коэффициент избытка воздуха на выходе из подогревателя (α) составлял 10—11 при $T_0 = 573^\circ\text{К}$ и 7—8 при $T_0 = 773^\circ\text{К}$.

Все измерения проводились вдоль оси горения по всей ширине зоны горения \bar{d}_r при следующих значениях параметров потока однородной смеси: скорости $u = 37-80$ м/сек, $\alpha = 0,85-1,16$, $\epsilon_0 = 0,045$ (при постановке в трубу решетки $\epsilon_0 = 0,07$).

Измерялись также ширина зоны горения \bar{d}_r на оси горелки и высота внутреннего конуса пламени L_0 . Ширина зоны горения определялась по данным полного химического анализа проб газа, L_0 (расстояние от плоскости горелки до передней границы факела на оси горелки) находилась по данным измерений температуры хромель-алюмелевой термопарой с экранированным спаем (см. таблицу).

На рис. 1, а представлены результаты измерений интенсивности турбулентности в зоне горения при различных значениях коэффициента избытка воздуха. На том же графике приведена величина ϵ_0 в потоке без горения.

Легко заметить существенное влияние на ϵ процесса горения. В начале зоны горения наблюдается увеличение интенсивности турбулентности до ее наибольшего значения ϵ_{\max} , превышающего в некоторых случаях в 1,5—1,7 раза интенсивность турбулентности потока без горения. Достигнув максимума, интенсивность турбулентности начинает затухать и в конце зоны горения практически равна таковой в данной точке при отсутствии горения.

С увеличением α от 0,85 до 1,16 максимальное значение генерируемой пламенем интенсивности турбулентности уменьшается, а положение ϵ_{\max} смещается вниз по потоку.

На рис. 2 показано изменение по ширине зоны горения \bar{d}_r величины дополнительной пульсационной скорости, вызываемой процессом горения:

$$\sqrt{\overline{v'^2}} = u \sqrt{\epsilon^2 - \epsilon_0^2},$$

α	$T_0, ^\circ\text{K}$	$u, \text{м/сек}$	ε_{max}	$x_{\text{max}}, \text{мм}$	$\sqrt{\frac{v'^2}{\text{max}}}$ м/сек	$L_0, \text{мм}$	$\delta_{\Gamma}, \text{мм}$
0,85	573	37	0,077 (0,145)	40	2,35	100	220
1,0	573	37	0,071 (0,115)	50	2,15	110	240
1,16	573	37	0,065 (0,075)	70	1,65 (1,9)	150	320
1,0	773	37	0,074 (0,105)	40	2,15 (3,5)	60	220
1,0	573	37	0,080 (0,115)	25	2,1 (3,5)	100	220*
1,0	573	60	0,056 (0,07)	100	2,0 (3,3)	120	290
1,0	573	80	0,056 (0,065)	120	2,2 (3,6)	140	340

* В трубу поставлена решетка.

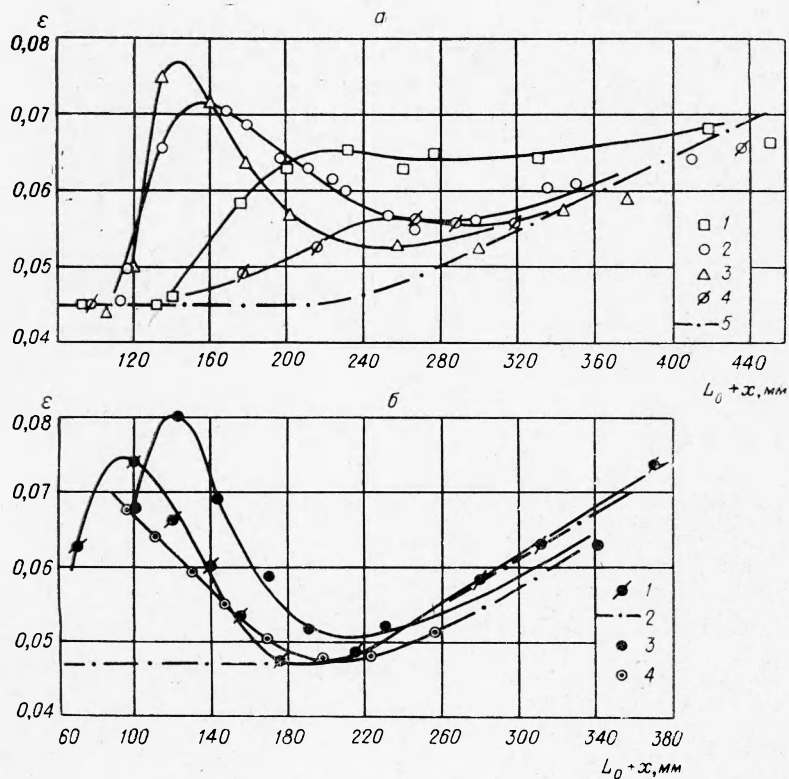


Рис. 1. Изменение интенсивности турбулентности по длине зоны горения ($u=37 \text{ м/сек}$).
 а) $T_0=573^\circ\text{K}$, $\varepsilon_0=0,045$: 1 — $\alpha=1,16$; 2 — $\alpha=1,0$; 3 — $\alpha=0,85$; 4 — $\alpha=1,0$ ($u=80 \text{ м/сек}$); 5 — без горения. б) 1 — $\alpha=1,0$; 2 — без горения ($T_0=773^\circ\text{K}$, $\varepsilon_0=0,045$); 3 — $\alpha=1,0$; 4 — без горения ($T_0=573^\circ\text{K}$, $\varepsilon_0=0,07$).

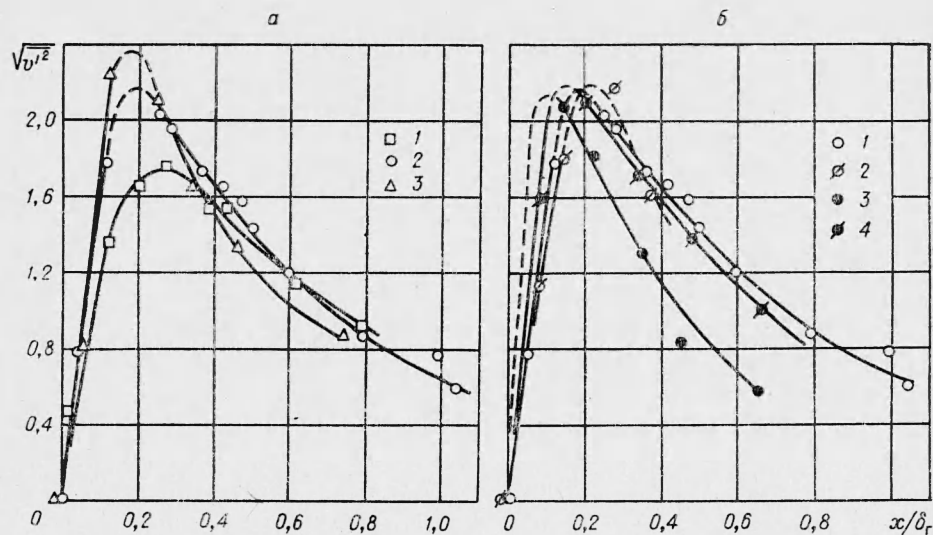


Рис. 2. Изменение по длине зоны горения дополнительной средней пульсационной скорости, генерированной пламенем.

а) $u=37$ м/сек, $T_0=573^\circ\text{K}$, $\varepsilon_0=0,45$: 1 — $\alpha=1,16$; 2 — $\alpha=1,0$; 3 — $\alpha=0,85$. б) $\alpha=1,0$: 1 — $u=37$ м/сек, $T_0=573^\circ\text{K}$, $\varepsilon_0=0,045$; 2 — $u=80$ м/сек, $T_0=573^\circ\text{K}$, $\varepsilon_0=0,045$; 3 — $u=37$ м/сек, $T_0=573^\circ\text{K}$, $\varepsilon_0=0,07$; 4 — $u=37$ м/сек, $T_0=773^\circ\text{K}$, $\varepsilon_0=0,045$.

где ε_0 , u — интенсивность турбулентности и средняя скорость потока в рассматриваемой точке без горения; ε — величина интенсивности турбулентности при горении.

При обеднении смеси турбулизация потока, вызываемая горением, уменьшается (см. рис. 2, а) и, как показали последующие эксперименты, при $\alpha > 1,3$ практически отсутствует. Качественно аналогичное изменение интенсивности турбулентности в зоне горения получено в [3].

Увеличение скорости вызывает смещение положения максимума интенсивности турбулентности, генерированной пламенем, вниз по потоку (см. рис. 1, а). Величина $\sqrt{\frac{v'^2}{v_{\max}^2}}$ (см. рис. 2, б) при этом практически не изменилась.

Полученные данные о независимости $\sqrt{\frac{v'^2}{v_{\max}^2}}$ от скорости потока при $\varepsilon_0 \approx \text{const}$ соответствуют теоретическим результатам работы [1].

На рис. 1, б приведены результаты измерения интенсивности турбулентности в зоне горения при несколько повышенных значениях температуры (773°K) или интенсивности турбулентности потока перед фронтом пламени ($\varepsilon_0=0,07$), а на рис. 2, б — соответствующие значения $\sqrt{\frac{v'^2}{v_{\max}^2}}$. При постоянном составе смеси ($\alpha=1,0$) изменение температуры газа от 573 до 773°K , скорости его от 37 до 80 м/сек и интенсивности турбулентности потока от $0,045$ до $0,07$ не приводит к заметному изменению максимального уровня величины $\sqrt{\frac{v'^2}{v_{\max}^2}}$.

Отметим и тот факт, что в точке, соответствующей $\sqrt{\frac{v'^2}{v_{\max}^2}}$, коэффициент полноты сгорания топлива во всех случаях равен $10\text{--}20\%$. Положение $\sqrt{\frac{v'^2}{v_{\max}^2}}$ относительно ширины зоны горения также практически не изменяется.

В заключение отметим, что полученные экспериментальные величины ε являются результатом определения изменяющейся по длине участка $h=30\text{--}50$ мм интенсивности турбулентности. Это обстоятельство может вызвать занижение измеренных значений ε (особенно в районе x_{\max}) по сравнению с действительными. По данным последовательных измерений, начиная с участка с постоянным значением $\varepsilon=\varepsilon_0$, можно рассчитать поправки и получить величины интенсивности турбулентности, близкие к действительным. Результаты расчетов величин ε_{\max} и $\sqrt{\frac{v'^2}{v_{\max}^2}}$ с учетом поправок приведены в таблице (взяты в скобки). Они заметно отличаются от непосредственно измеренных величин, однако такой способ обработки результатов измерений не повлиял на основные выводы, сделанные в работе.

Проведенные эксперименты показали, что метод диффузии инертного газа можно применять для измерения инертности турбулентности в зоне горения.

В результате измерений обнаружена дополнительная турбулизация потока пламени при составах смеси, близких к стехиометрическому.

Поступила в редакцию
24/IX 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. B. Karlovitz, D. Lennistion, F. Wells. J. Chem. Phys., 1951, 19, 5, 541.
2. A. Scurlock, I. Grover. 4-th Symposium (International) on Combustion, 1953.
3. И. Л. Кузнецов, А. М. Трохан и др. Докл. АН СССР, 1966, 171, 2.
4. А. Вестенберг. ВРТ, 1955, 2.
5. А. Г. Прудников. В сб. «Горение в турбулентном потоке». Изд-во АН СССР, 1959, стр. 88.
6. A. A. Westenberg and J. L. Rice. Combustion and Flame, 1959, VIII, 4.

УДК 662.216.5

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК АЛЮМИНИЯ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ СИСТЕМ С РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ГОРЕНИЯ

А. Н. Шашков, Н. Н. Бахман, Ю. А. Кондрашков
(Москва)

Известно, что добавки алюминия неодинаково влияют на скорость горения различных смесевых систем. Отчасти это может быть связано с различием в температуре горения этих систем.

В работе [1] приведена формула, согласно которой добавка алюминия может увеличивать скорость горения тем сильнее, чем ниже температура горения исходной системы. Другими словами, повысить скорость горения «холодной» системы легче, чем «горячей».

Были проведены опыты, в которых температура горения смесевой системы существенно изменялась за счет введения инертной добавки — окиси алюминия, которая сама является продуктом горения алюминия.

В опытах применялась стехиометрическая (порошкообразная и желатинизированная) смесь¹ мелкодисперсного ($\sim 13 \text{ мк}$)² перхлората аммония (ПХА) и мелкодисперсного ($\sim 3 \text{ мк}$) полиметилметакрилата (ПММА). Методика проведения опытов описана в работе [1].

При разбавлении исходной смеси окисью алюминия скорость горения ее снижается. Поскольку в пределах зоны, влияющей на скорость горения, окись алюминия заведомо не газифицируется (и, вероятно, не плавится), а теплоемкость Al_2O_3 невысока (близка к $0,3 \text{ кал/г} \cdot \text{град}$ и слабо зависит от температуры [2, 3]), снижение скорости горения является значительным лишь при достаточно большом ($\sim 30\text{--}50\%$) проценте добавки окиси алюминия. Результаты измерений для желатинизированной смеси ПХА+ПММА ($\alpha=1$) приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что добавка 25% окиси алюминия при низких давлениях лишь незначительно снижает скорость горения, а при высоких давлениях — практически

¹ При желатинизации к смеси порошкообразных компонентов добавлялось небольшое количество растворителя (дихлорэтана) и смесь выдерживалась при помешивании в течение суток, после чего растворитель удалялся. В ходе желатинизации горючее распределялось в виде тонких пленок по поверхности частиц окислителя и других компонент состава не растворяющихся в дихлорэтано (т. е. обеспечивалось более тщательное смешивание).

² Средний размер частиц вычислен по величине удельной поверхности, измеренной на приборе ПСХ-2.