

Доклад-5: ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЛАМЕНИ В ГАЗО- И ПЫЛЕВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Полетаев Н.Л.

ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Хотя понятие о скорости распространения турбулентного пламени u_t в газо- и пылевоздушной смеси не может быть определено достаточно строго, изучение влияния различных параметров на тем или иным способом введенную величину u_t может оказаться полезным. Здесь анализируются опубликованные результаты исследований двух разновидностей u_t на установках, упрощенные схемы которых приводятся на рис.1. Цель работы - эмпирическая оценка зависимости $u_t(u')$, где u' - пульсационная скорость однородно турбулированной газовой фазы горючей газо- или пылевоздушной смеси (далее - смеси).

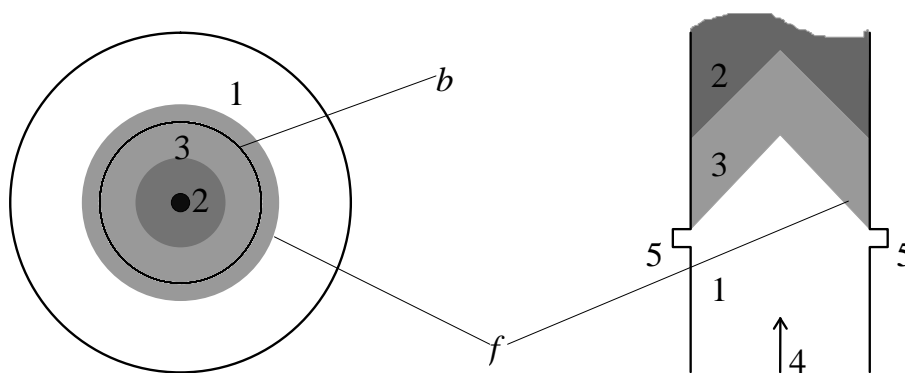


Рис.1. Турбулированная смесь (1), продукты горения (2) и зона значительных градиентов концентрации реагентов (3) со сглаженными границами в камере (слева) и канале; 4 - поток смеси; 5 - стабилизатор пламени; линии f и b указывают соответственно положение передних границ пламени и воображаемой поверхности шара с объемом, равным текущему значению объема продуктов горения.

В камере под u_t понимается скорость поглощения смеси сферой b . Эта скорость обозначается символами $u_{t,b}$, именуется скоростью турбулентного выгорания смеси и рассчитывается по зависимости давления в камере от времени [1]. В канале u_t по аналогии с "методом горелки" именуется скоростью турбулентного горения, оценивается из положения передней границы пламени и обозначается символами $u_{t,c}$.

Некоторые результаты экспериментальных исследований $u_{t,b}$ и $u_{t,c}$ [2-7] приводятся на рисунках 2, 3 и 4.

Результаты исследования $u_{t,b}$ для гомогенных смесей (см. рис.3) взяты из работ Карпова В.П. с коллегами [2-5], где варьировалась горючая компонента

смеси (водород, этан, метан, ...), молекулярная масса смеси μ (от 9 г/моль до 30 г/моль) смеси, u' (от 1 м/с до 5 м/с) и (для смесей с метанолом) начальная температура T_0 (385 °С).

Результаты исследования $u_{t,c}$ для бензино-воздушных смесей (см. рис.4 и 5) взяты из работ Талантова А.В. с коллегами [6, 7], где варьировалась сторона канала квадратного сечения (от 50 мм до 150 мм), T_0 (от 393 К до 793 К через 50 К), начальное давление P_0 (от 0,02 МПа до 0,45 МПа), избыток горючего (от 0,6 до 1,4), скорость смеси U в канале (от 30 м/с до 140 м/с). Полагали, что $u' = 0,05U$.

Здесь и далее выход оси u' на графиках в область отрицательных значений является способом наглядной геометрической интерпретации соотношения (1).

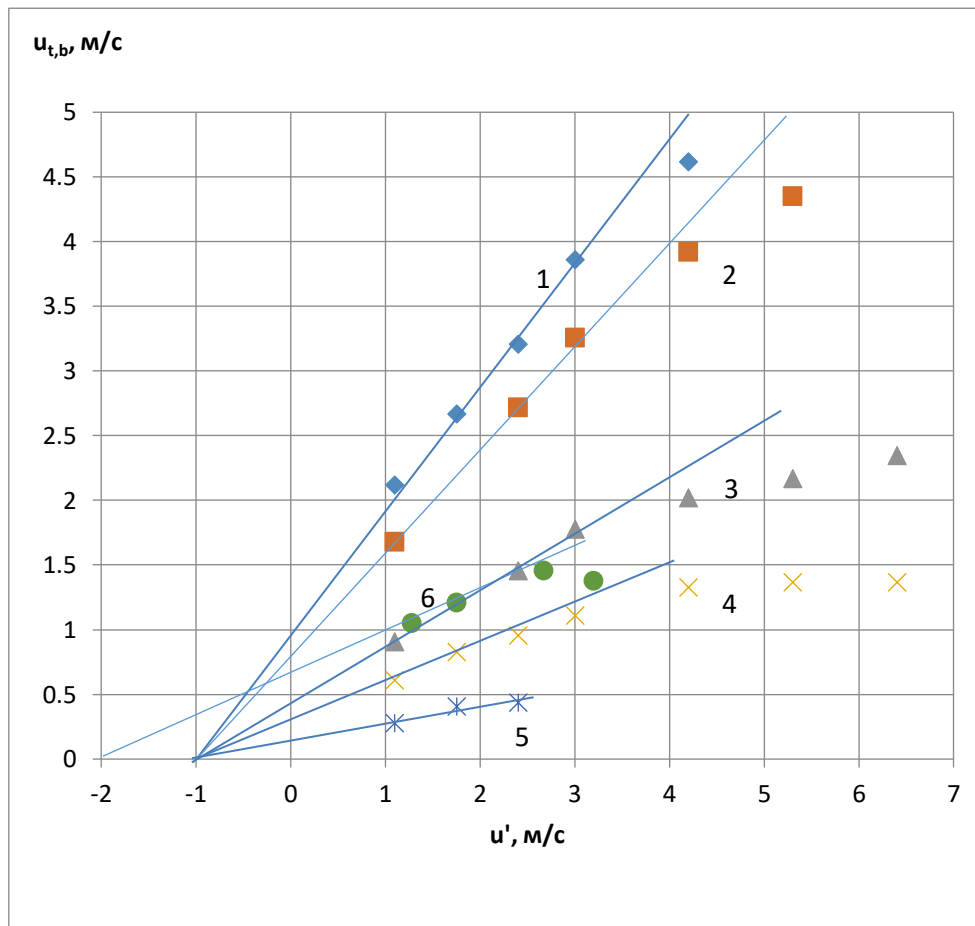


Рис.2. Зависимость турбулентной скорости выгорания гомогенных смесей (№№ 1-6 по табл.1) от пульсационной скорости [2-4]. Отрезками прямых представлена расчетная зависимость (1). Продолжение отрезков до оси абсцисс дает общую точку пересечения $-u^*$. Дополнительные сведения о характеристиках смесей содержатся в табл.1

Таблица 1. Характеристики гомогенных смесей [2-4]

Группа данных по рис.2	Состав смеси	$u_{l,t}$, м/с	Нормальная скорость горения u_n , м/с
1	$2\text{H}_2 + (\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) \cdot 1,4$	1,00	1,15
2	$2\text{H}_2 + (\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) \cdot 2$	0,80	0,75
3	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) \cdot 0,9$	0,44	0,39
4	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) \cdot 1,2$	0,29	0,29
5	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) \cdot 1,4$	0,14	0,16
6	$2\text{H}_2 + (\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) \cdot 0,17$	0,60	0,78

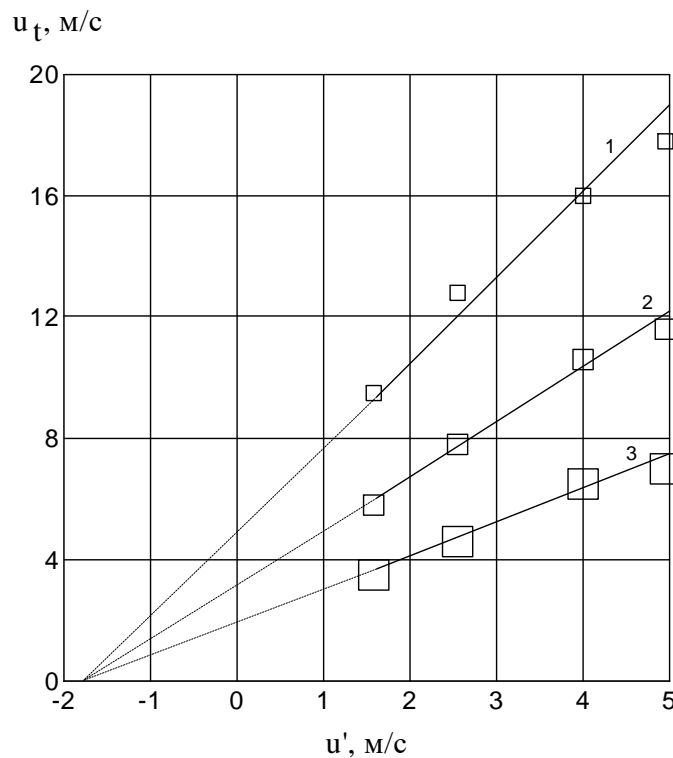


Рис.3. Зависимости скорости турбулентного пламени в бензино-воздушной смеси от пульсационной скорости для $T_o = 768$ К, $P = 100$ кПа при различных значениях коэффициента избытка окислителя по данным [6]: 1 - $\alpha = 0,9$; 2 - $\alpha = 1,2$; 3 - $\alpha = 1,5$. Отрезками прямых представлена зависимость (1), $u^* = 1,7$ м/с.

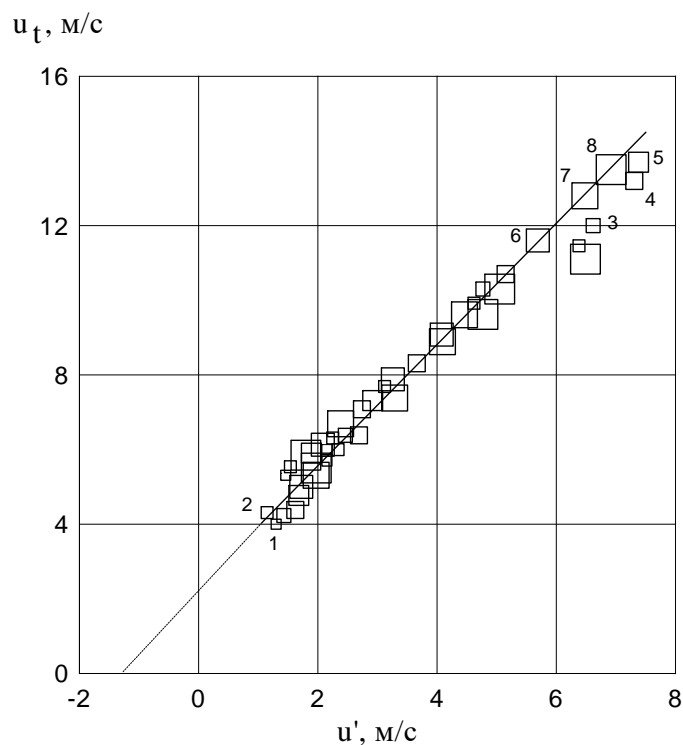


Рис.4. Зависимость скорости турбулентного пламени в стехиометрической бензино-воздушной смеси от пульсационной скорости при различном давлении смеси при $T_o = 493 \text{ К}$ [7]: 1 - $P = 20 \text{ кПа}$; 2 - $P = 30 \text{ кПа}$; 3 - $P = 40 \text{ кПа}$; 4 - $P = 60 \text{ кПа}$; 5 - $P = 80 \text{ кПа}$; 6 - $P = 120 \text{ кПа}$; 7 - $P = 250 \text{ кПа}$; 8 - $P = 450 \text{ кПа}$ (большему значению P соответствует символ большего размера). Отрезком прямой представлена расчетная зависимость (1) при $U_{l,t} = 2,3 \text{ м/с}$; $u^* = 1,3 \text{ м/с}$.

Обзор результатов экспериментальных исследований $u_{t,b}$ и $u_{t,c}$ [2-7] позволяет получить представления о характерном виде графика $u_t(u')$, который не зависит от разновидности u_t и приводится на рис.5.

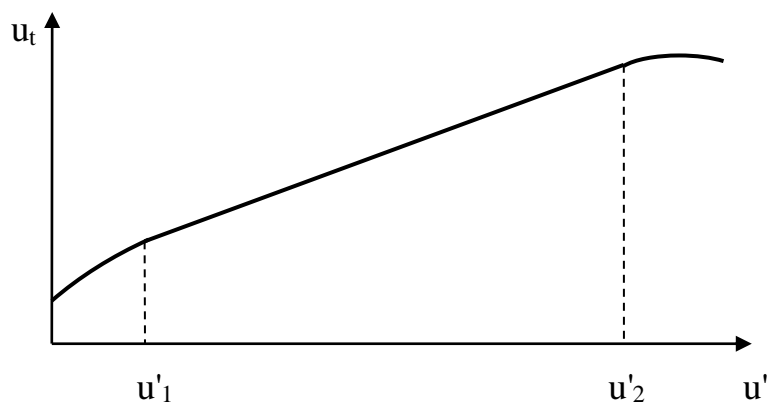


Рис.5. Типичный сглаженный график зависимости $u_t(u')$ для смесей.

Дальнейшее изложение будет касаться основного диапазона аргументов $u'_1 < u' < u'_2$ графика на рис.5, в пределах которого зависимость $u_t(u')$ может быть аппроксимирована линейной функцией.

В [8, 9] на основе обобщения результатов упомянутых опытов получены эмпирические оценки, имеющие относительную точность, близкую к точности экспериментальных данных (около 15%):

$$u_{t,b}(u') = u_{l,b}(1 + u'/u^*); u_{t,c}(u') = u_{l,c}(1 + u'/u^*), \quad (1)$$

где $u_{l,b}$ и $u_{l,c}$ - коэффициенты пропорциональности, зависят от состава смеси, T_0 и P_0 ; $u^* = 0,003c$, где $c \propto \mu^{0,5}T_0^{0,5}P_0^0$ - скорость звука в смеси.

Следует подчеркнуть, что величины $u_{l,b}$ и $u_{l,c}$, в общем случае, не совпадают для одинаковых по составу и параметрам состояния (T_0, P_0) смесей, и не совпадают с нормальной скоростью горения смеси u_n (см., например, табл.1). Последнее отличие можно обосновать, например, различной зависимостью u_n и $u_{l,c}$ от P_0 для метано-воздушной смеси [10]: в диапазоне изменения P_0 от 0,1 МПа до 3 МПа, $u_n \propto P_0^{-0,5}$, $u_{l,c}$ практически не зависит от P_0 .

Иллюстрация возможности аппроксимировать зависимости $u_t(u')$ линейными функциями (1) приводится на графиках рисунков 2, 3 и 4.

Для проверки правомерности распространения (1) на случай горения турбулизированных аэрозвесей, проанализированы результаты нескольких подобных исследований $u_{t,b}(u')$ [11 - 13]. Несмотря на значительный разброс и, в ряде случаев, невоспроизводимость (для одинаковых образцов пыли) результатов, все же отмечена возможность удовлетворительного описания $u_{t,b}(u')$ первым из соотношений (1), что иллюстрируется на графике рис.6.

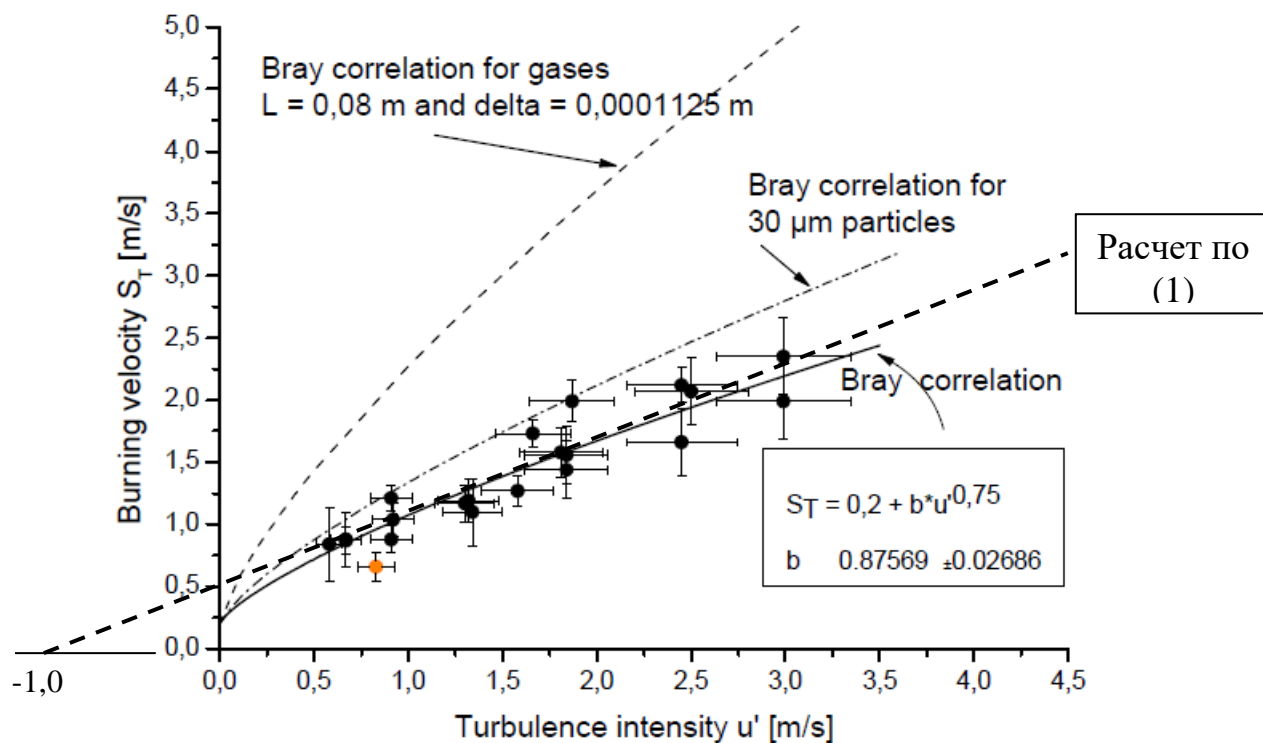


Рис.6. Зависимость скорости турбулентного пламени в стехиометрической смеси картофельный крахмал/воздух от пульсационной скорости [12]

Таким образом, предложена единая (в части параметра u^*) эмпирическая зависимость скорости турбулентного пламени в газоздушных и пылевоздушных смесях, что дает основание для предположения о близости механизмов турбулентного горения данных смесей.

Присутствие скорости звука в соотношениях (1) показывает, что влияние звука на распространение пламени в турбулизированной смеси может оказаться более значимым, чем принято полагать.

Список литературы

1. Карпов В.П. Определение ускорения горения при взаимодействии ударной волны с пламенем. Физика горения и взрыва, 1970, т.5, JS 4, с.504-510.1970, ФГВ, 6, 4, 504 - 510.
2. Соколик А.С., Карпов В.П., Семенов Е.С. О турбулентном горении газов. - ФГВ, 1967, т.3, № 1. - С.61-76.
3. Карпов В.П., Северин Е.С. Турбулентные скорости выгорания пропановоздушных пламен, определенные в бомбе с мешалками. - ФГВ, 1978, т. 14, №2. - С.33-39.
4. Карпов В.П., Северин Е.С. Влияние коэффициентов молекулярного переноса на турбулентную скорость выгорания. - ФГВ, 1980, т.16, №1. - С.45-51.

5. Карпов В.П., Политенкова Г.Г., Северин Е.С. Турбулентное горение спиртов. ФГВ 1986 №4, с.12-14.
6. Талантов А.В. Горение в потоке, М.: «Машиностроение», 1978. - 160 с.
7. Голубев В. В., Янковский В. М., Постнов В. Ф., Талантов А. В. Влияние давления на скорость распространения пламени в турбулентном потоке // Известия ВУЗов, сер. Авиационная техника. 1973. № 2, С. 77 - 86.
8. Полетаев Н.Л. Эмпирическая оценка турбулентной скорости выгорания // Пожаровзрывобезопасность, 1998, т.7, № 1, с. 19 - 23.
9. Полетаев Н.Л. Эмпирическая оценка скорости турбулентного пламени // Пожаровзрывобезопасность, 1998, т.7, № 4, 7-10.
10. Kobayashi, H., Tamura, T., Maruta, K., Niioka, T., and F.A. Williams. (1996). Burning velocity of turbulent premixed flames in a high-pressure environment. Proc. Combust. Inst. 26:389–96.
11. Kaufman C.W., Srinath S.R., Tezok F.I., Nicholls J.A., Sichel M. Turbulent and accelerating dust flames. - 20-th Symp.(Int) on Combustion, pp.1701-1708, The Combustion Institute, 1985.
12. Hamberger P., Schneider H., Jamois D., Proust Ch. Correlation of Turbulent Burning Velocity and Turbulence Intensity for Starch Dust Air Mixtures / Third European Combustion Meeting ECM 2007, p.1-5.
13. Proust, C. Turbulent flame propagation in large dust clouds / Journal of Loss Prevention in the Process Industries (2017), doi: 10.1016/j.jlp.2017.05.011.