

О РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛАМЕНИ ПО ЗАРАНЕЕ ПЕРЕМЕШАННОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ С ВЫСОКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ

С.А. Гапонов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия*

Введение. Теории распространения турбулентного пламени стала интенсивно развиваться после основополагающих работ Дамкеллера [1] и Щелкин [2]. Согласно их теории возможны две модели: 1) режим мелкомасштабной турбулентности, когда малые вихри участвуют в переносе вещества и температуры внутри пламени; 2) режим крупномасштабной турбулентности, когда толщина ламинарного пламени много меньше масштаба турбулентности. Взаимодействие турбулентного пламени с потоком чисто кинематическое. Первый режим принято называть объемным, а второй поверхностным. В первом случае скорость перемещения пламени определяется аналогично скорости ламинарного пламени после замены ламинарных коэффициентов диффузии и теплопроводности на соответствующие коэффициенты турбулентных течений, и этот механизм является общепринятым и не подвергается дискуссии. Второй режим наиболее дискуссионный. При одномерном распространении турбулентного пламени и умеренной турбулентности, когда поверхность искривленного ламинарного пламени однолиственная, скорость распространения турбулентного пламени $U_T = U_L (F_T / F_L)$. Здесь U_T , U_L – скорости турбулентного и ламинарного пламени, F_T , F_L – площади племён в условиях турбулентного и ламинарного течения. При малой величине пульсационной скорости, $v < U_L$, Дамкеллер получил линейную зависимость турбулентной скорости от пульсационной скорости, $U_L \propto v$, а Щелкин гиперболическую, $U_T / U_L = \sqrt{1 + B(v / U_L)^2}$. При сильной турбулентности Щелкин допускает возможность разрыва пламени и образования “островков” свежей смеси в области догорания. В этом случае Щелкиным получена зависимость $U_T \propto v$.

На протяжении всего последующего времени модель поверхностного горения совершенствовалась. К недостаткам существующих моделей поверхностного горения следует отнести влияние коэффициента расширения $\vartheta = \rho_n / \rho_b$ (отношение плотности свежей смеси к плотности продуктов сгорания) на скорость турбулентного пламени и чрезмерное превышение скорости турбулентного пламени скорости турбулентных пульсаций.

В [3] была сделана попытка объяснить влияние ϑ на U_T порождением дополнительной турбулентности самим пламенем. Однако турбулентность, порожденная пламенем, не была обнаружена экспериментально, и в настоящее время подвергается критике [4].

На несоответствие коэффициента пропорциональности между пульсационной скоростью и турбулентной скоростью распространения пламени в теории и эксперименте (в эксперименте он в несколько раз превышает соответствующее значение теории) было указано в [5]. Там же имеется ссылка на идею М. А. Ривина, заключающуюся в то, “что в теории следовало бы учитывать не среднюю квадратичную скорость турбулентных пульсаций, но более высокую величину, некую эффективную скорость, приближающуюся к максимальной скорости пульсаций. Учет этого замечания мог бы дать коэффициент порядка трех”.

В большинстве теоретических работ по поверхностному горению предполагается, что поверхность искривленного ламинарного пламени однолиственная. Это предположение поставлено под сомнение Соколиком [6]. Там говорится о том, что турбулентное пламя

следует рассматривать как раздробленную зону горения. В [7], на основе шпирен-фотографий, допускается существование очагов продуктов сгорания в свежей смеси.

Необычный подход к задаче распространения пламени был предложен еще в 1964 году в дипломной работе Гапонова С. А., который кратко изложен в [8]. К сожалению, представленные там результаты остались недоступными для широкой научной общности. Это доклад направлен на развитие предложенного там подхода.

Формулировка проблемы. Рассматривается одномерное распространение турбулентного пламени по предварительно подготовленной горючей смеси. Предполагается, что вся газовая среда считается состоящей только из двух компонентов: исходной смеси и продуктов горения. Поверхность горения разделяет продукты сгорания и свежую смесь. Пусть объемная концентрация продуктов сгорания составляет величину C , а соответственно концентрация исходной смеси $1-C$. В системе координат покоящегося фронта

пламени уравнение диффузии имеет вид: $D_T \frac{d^2C}{dx^2} - U_T \frac{dC}{dx} + F(C) = 0$, где $D_T = lv$ - коэф-

фициент турбулентной, l - логранжев масштаб турбулентности. Скорость порождения продуктов сгорания $F = dC / dt = \mathcal{G} S_V U_f$, где S_V - площадь фронта пламени в единичном объеме, U_f - осредненная по искривленному ламинарному фронту горения скорость ламинарного пламени. В [8] сделано, не противоречащее физическому смыслу, предположение о том, что $F(C)$ удовлетворяет условиям КПП (Колмогорова-Петровского-Пискунова) [9]: $F(0) = F(1) = 0$; $F'(0) > 0$; $F(C) > 0$, $F'(C) < F'(0)$, а $U_T = 2\sqrt{lvF'(0)}$. Таким образом, скорость турбулентного пламени определяется свойствами переднего фронта пламени. Это обстоятельство упрощает процедуру расчета турбулентной скорости. В турбулентном потоке спектр по скоростям достаточно широкий и отдельные фрагменты продуктов сгорания проникают в зону свежей смеси [7], и инициируют замкнутые фронты пламени. Пусть объем такого очага будут q_f с площадью ламинарного пламени S_{of} . Тогда общая площадь горения в единичном объеме составит $S_V = NS_f$, где N - число очагов пламени в единичном объеме. Учитывая, кроме того, что $Nq_f = C$, получим $F'(0) = \mathcal{G} U_f S_{of} / q_f$, а $U_T = 2\sqrt{l \mathcal{G} v U_f S_{of} / q_f}$. Минимальное значение величины $S_f / q_f = S_0 / q_0$ соответствует шару, и равно $6/d$, где d - диаметр шара. Если предположить, кроме того, что d соответствует масштабу турбулентности Эйлера $l_E = 2l$, то скорость турбулентного пламени определится формулой:

$$U_T = 3.46 \sqrt{\mathcal{G} v U_f / a_1}. \quad (1)$$

С увеличением пульсационной скорости поверхность пламени вокруг очага и ее отношение к объему увеличиваются. Поскольку очаг пламени окружен свежей смесью скорость ламинарного пламени относительно продуктов сгорания уменьшает ее искривленность. Поэтому принимается $S_f / q_f = (S_0 / q_0)(1 + Bv' / \mathcal{G} U_f)$. Тогда, не нарушая общности, можно получить соотношение:

$$\bar{Y} = a \sqrt{\bar{X}(1 + B\bar{X})}, \text{ где } \bar{Y} = U_T / \mathcal{G} U_f, \bar{X} = v / \mathcal{G} U_f \quad (2)$$

Результаты. Работоспособность зависимостей (1) и (2) проиллюстрируем на двух примерах.

В экспериментах [10] по горению метано-кислородной смеси с одномерным (плоским) фронтом пламени при $v < U_L$ была получена зависимость: $U_T / U_L = 1 + 13.5(v' / U_L)^{0.56}$. Для метано-кислородной смеси вблизи стехиометрии $\mathcal{G} = 10$.

Тогда при $U_f = U_L$ зависимостей (1) принимает вид: $U_T / U_L = 11(v' / U_L)^{0.5}$. С учетом принятых упрощений соответствие теории и эксперимента следует признать удовлетворительным.

Другой пример связан с экспериментами [11], проведенными на конусообразном пламени. Значения скорости турбулентного пламени, измеряемые таким способом, занижены по сравнению с величиной скорости, полученной в условиях плоского пламени в 1.6–2.5 раза [12], поэтому значения коэффициентов a и B в (2) для каждой серии опытов могут быть разными.

На рис.1 приведена аппроксимация экспериментальных данных работы [11] по горению водородо-воздушной смеси при разных значениях объемной концентрации водорода. Для нахождения B и a исходные данные при концентрации водорода 27% переводились в обобщенные координаты: $Y = U_T / \mathcal{G}U_L$, $X = v' / \mathcal{G}U_L$. По данным при $X=0.1$ и 0.5 было получено $a = 1.9$ и $B = 0.87$. Сопоставление всех данных в обобщенных координатах с теоретической зависимостью $Y = 1.9\sqrt{X(1+0.87X)}$, приведено на рис.2. Видно, что экспериментальные данные группируются вблизи теоретической зависимости. Причины их небольшого расслоения будут объяснены в докладе.

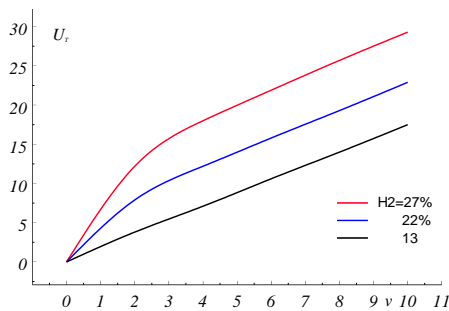


Рис. 1

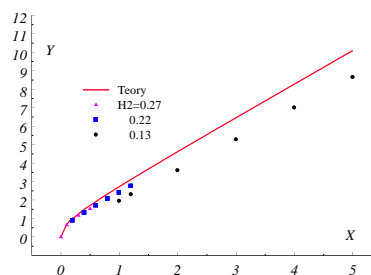


Рис.2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Damkohler G.** The effect of turbulence on the flame velocity in gas mixtures, Washington, NACA, 1947, TM 1112.
2. **Щелкин К.И.** О горении в турбулентном потоке // ЖЭТФ. 1943. Т. 13. № 9-10.
3. **Karlovitz B., Denniston D. W., jr., and Wellst F. E.** Investigation of turbulent flames // Journal of chemical physics. 1951. Vol.19. No 5.
4. **Lipatnikov A.** Fundamentals of Premixed Turbulent Combustion, CRC Press, Boca Raton- London -New York, 2013.
5. **Щелкин К.И., Трошин Я.К.** Газодинамика горения, АН СССР, М., 1963.
6. **Соколик А.С.** Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М., АН СССР, 1960.
7. **Abdel-Gayed R. G., Bradley D., and Lung F. K.-K.** Combustion Regimes and the Straining of Turbulent Premixed Flames // Combustion and Flame. 1989. Vol. 76. P. 213-218.
8. **Гапонов С.А. Роль Н.А. Желтухина** в формировании научных направлений ИТПМ СО АН СССР // Н.А. Желтухин. Ученый - механик XX века, Новосибирск: Параллель, 2015. С. 41-57.
9. **Колмогоров А.Н., Петровский И.Г., Пискунов Н.С.** Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастанием вещества, и его применение к одной биологической проблеме // Бюл. МГУ. Сер. Математика и механика. Vol. 1. № 6. P. 1-26.
10. **Моин Ф.Б., Шевчук В.У.** Турбулентное горение метано-кислородных смесей // ИФЖ. 1964. № 4. P. 111-113.
11. **Козаченко Л.С., Кузнецов И.Л.** Скорость распространения пламени в турбулентном потоке однородной смеси // Научно-технические проблемы горения и взрыва. 1965. №1. С. 31-43.
12. **Моин Ф.Б.** Измерение турбулентной скорости горения методом горелки с плоским турбулентным пламенем, // ИФЖ. 1964. № 3. С. 115-117.