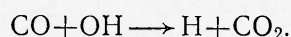


Оценка энергетики процесса, протекающего по приведенной схеме, показывает, что он может проходить при комнатной и даже более низкой температуре исходной газовой смеси. При этом температура газовой смеси не должна сильно возрастать, так как концентрация перекисных пропильных бирадикалов не может быть больше концентрации монорадикала пропила. Число актов разветвления вдоль потока во фронте пламени может нарастать, так как с ростом концентрации атомов Н, О и радикалов ОН отношение скоростей реакций (VI) к сумме скоростей реакций (I)—(III) будет возрастать.

Таким образом, ситуация во фронте углеводородного пламени представляется следующей. Атомы водорода, диффундирующие в свежую смесь, зарождают и продолжают цепь. В реакционной смеси образуются промежуточные продукты, распад которых обеспечивает разветвление цепи в низкотемпературной зоне, что экспериментально обнаруживается как наличие источника атомов Н. По мере продвижения газовой смеси в горячей зоне происходит обогащение газа СО и Н₂, а также радикалами RO₂. В горячей зоне концентрация атомов водорода достигает максимума вследствие горения Н₂ и по реакции



*Поступила в редакцию
27/IX 1976*

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Ксандопуло, Б. Я. Колесников, Д. С. Однорог. Докл. АН СССР, 1974, **216**, 1098.
2. Г. И. Ксандопуло, З. А. Мансуров и др. Сб. работ по химии. Алма-Ата, Изд-во КазГУ, 1973.
3. E. Butewicz, C. G. James, T. M. Sugden. Proc. Roy. Soc., 1956, A 235, 8.
4. C. P. Fenimore, C. W. Jones. J. Phys. Chem., 1958, **62**, 693.
5. Ю. М. Гершензон, В. В. Дубинин и др. Изв. АН СССР, сер. хим., 1972, 464.
6. Г. И. Ксандопуло. Докт. дис. КазГУ, Алма-Ата, 1974.
7. Г. И. Ксандопуло. ЖВХО им. Менделеева, 1976, **XXI**, 4, 396.
8. Г. И. Ксандопуло, А. А. Сагиндыков и др. ФГВ, 1975, **11**, 6, 838.
9. Н. Н. Семенов. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. М., Изд-во АН СССР, 1958.
10. В. И. Веденеев, Л. В. Гурвич и др. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. М., Изд-во АН СССР, 1962.

ТУРБУЛЕНТНЫЕ СКОРОСТИ ВЫГОРАНИЯ ПРОПАНО-ВОЗДУШНЫХ ПЛАМЕН, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ В БОМБЕ С МЕШАЛКАМИ

В. П. Карпов, Е. С. Северин

(Москва)

Известно, что для технических целей важно знать как скорость распространения «передней границы» турбулентного пламени, по которой можно установить время охвата пламенем объема горючей смеси, так и турбулентную скорость выгорания, которой определяется выделение тепла и полнота выгорания в охваченном пламенем объеме [1]. Однако до сих пор отсутствуют экспериментальные работы, посвященные непосредственно нахождению турбулентной скорости выгорания газовых смесей.

В данной работе для определения турбулентных скоростей выгорания пропано-воздушных смесей при разных величинах турбулентной пульсационной скорости горючей смеси использовалась установка, описанная в [2], которая состояла из бомбы радиусом 85 мм, оборудованной четырьмя мешалками, центральным искровым зажиганием, датчиками давления и ионизации. Чувствительным датчиком регистрировался рост давления на начальном участке горения, где размер пламени был меньше половины диаметра бомбы, а увеличение давления в бомбе не превышало 0,2 от первоначального. Считалось, что при этом скорость горения и расширение продуктов горения остаются постоянными.

При вычислении турбулентной скорости выгорания предполагалось:

1) состояние продуктов при горении смеси за мгновенным фронтом турбулентного и ламинарного пламени одинаково;

2) каждому мгновенному значению давления в бомбе соответствует определенное количество продуктов, которые независимо от их распределения в объеме можно представить собранными в центре и отделенными сферической поверхностью от исходной смеси;

3) за скорость выгорания принимается скорость роста радиуса сферической поверхности относительно несгоревшей смеси.

Относительная величина турбулентной скорости выгорания определялась методом, предложенным в [3], путем сопоставления кривых роста давлений при турбулентном и ламинарном горении для одинаковых начальных условий. Относительный среднеквадратичный разброс экспериментальных значений скорости выгорания при повторении опытов не превышал 10% и несколько увеличивался для смесей богатого состава.

Предварительно была измерена средняя скорость потоков и среднеквадратичная пульсационная скорость в бомбе с мешалками, наполненной воздухом без пропана. Поскольку при составлении пропано-воздушных смесей объем добавки пропана к воздуху не превышал 6,5%, принималось, что турбулентность, создаваемая мешалками в бомбе, наполненной чистым воздухом или пропано-воздушной горючей смесью, одинаковая.

Мгновенные скорости измерялись по диффузии ионизованного искрой шнура за время τ , малое по сравнению с лагранжевым временным масштабом турбулентности T . Сущность используемого метода определения мгновенных скоростей, создаваемых мешалками в воздухе, аналогична методам, осуществленным в работах [4, 5], и заключается в том, что после искрового пробоя между двумя электродами создается ионизованный шнур, служащий меткой для изучения газового потока. Образовавшиеся в шнуре после первой искры ионы за время $\tau < 1$ мс не успевают прорекомбинировать и переносятся потоком практически без размытия, так как всегда выполнялось условие $\tau \leq 0,2 T$. Второй искровой пробой через время τ после первой искры происходит по снесенному потоком шнуру, ионизованному первой искрой [4, 5]. При фотографировании большого количества пар искр получается резкое почернение негатива в месте постоянного прямолинейного пробоя между острыми электродами первых искр в парах. Вторые искры в парах создают почернение, плотность изменения которого по оси y , перпендикулярной электродам, пропорциональна вероятности наличия мгновенной скорости $u_y = Y/\tau$, где Y — смещение второй искры от оси электродов. Поскольку время между двумя искрами τ выбирается таким, что $\tau \leq 0,2 T$, то изменением мгновенной скорости за время τ пренебрегалось.

Плотность распределения вероятности величины Y или распределение плотности почернения на фотографии большого количества

пар искр подчиняется нормальному закону распределения [6] с центром в точке

$$Y = \bar{u}_y \cdot \tau,$$

где \bar{u}_y — составляющая средней скорости потока по оси y . Дисперсия плотности почернения σ_y^2 связана со среднеквадратичной пульсационной скоростью среды ($\sqrt{\overline{u'^2}}$) соотношением $\sigma_y^2 = \overline{u'^2} \cdot \tau^2$ [6]. Измерения скорости потоков воздуха на срезе сопла методом диффузии ионизованного искрой шнура, проведенные для проверки используемой аппаратуры, подтвердили зависимость $\bar{u}_y = Y/\tau$ с точностью 5%. При определении средней и пульсационной скорости в разных точках бомбы с мешалками фотографировалась диффузия ионизованного шнура по трем ортогональным осям. Для этого изменялось расположение электродов и объектива.

Измерение среднеквадратичной пульсационной скорости среды в бомбе с мешалками, наполненной воздухом, методом диффузии ионизованного искрой шнура дало те же величины пульсационной скорости, как и измеренные ранее с помощью термоанемометра [7]. Подтверждено также, что в центральной части бомбы (радиус 30 мм) турбулентность однородная и изотропная. Среднеквадратичная пульсационная скорость линейно зависит от напряжения на моторах мешалок и поддерживается в рабочем диапазоне (от 1 до 6,5 м/с) с погрешностью 10%.

Величина средней скорости потоков, создаваемых в бомбе мешалками, составляет менее 20% от пульсационной скорости в точках, расположенных вблизи зажигающей искры, и не превышает 30% на расстоянии 20—30 мм от зажигающей искры, помещенной в центре бомбы.

В данной работе определяются скорости выгорания в зависимости от среднеквадратичной пульсационной скорости горючей смеси, создаваемой мешалками до процесса горения, поэтому делается предположение, что горение существенно не изменяет турбулентность. Данное предположение подтверждается работами [8—11]. Если горение и вызывает изменение турбулентности, то оно определяется начальными параметрами турбулентности до горения и самим процессом горения, что наряду с другими явлениями отражается в изучаемой зависимости скорости выгорания от начальной пульсационной скорости горючей смеси.

На рис. 1 представлены радиусы турбулентного (2) и ламинарного (3) пламени в зависимости от времени, полученные обработкой скоростной тепловосъемки пламени (1) и регистрации роста давления в бомбе. В начальный период времени, пока радиус пламени меньше половины лагранжева масштаба турбулентности (равного 1 см, по данным работы [7]), скорости ламинарного и турбулентного горения одинаковы. Затем турбулентное пламя растет с большей скоростью. При изменении радиуса пламени от 15 до 40 мм турбулентная скорость распространения горения, определяемая кино съемкой пламени, и скорость турбулентного выгорания оказываются постоянными, но скорость выгорания получается меньше, чем скорость распространения пламени. Радиус пламени $r = 15$ мм, при котором

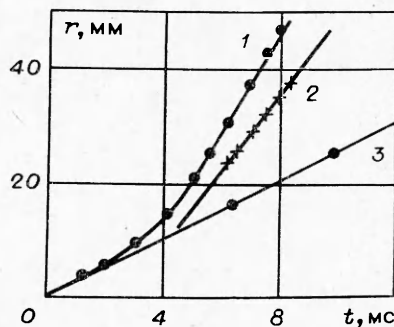


Рис. 1. Зависимость радиуса пламени от времени.

турбулентная скорость горения становится постоянной, соответствует такой поверхности средней сферы пламени, которая составляет более 20 площадей лагранжева масштаба турбулентности ($L^2 \sim 1 \text{ см}^2$).

В [1] показано, что отклонение мгновенного фронта турбулентного пламени от среднего положения поверхности выгорания имеет гауссовский закон распределения, поэтому отклонения в разные стороны мгновенного фронта пламени от радиуса сферы выгорания равновероятны. Зарегистрированная и представленная на рис. 1 разница между радиусом распространения турбулентного пламени и радиусом выгорания равняется приблизительно половине ширины осредненной зоны сгорания турбулентного пламени. Как следует из рис. 1, эта ширина растет линейно со временем, что согласуется с результатами [1], где показано, что для времен $t < 2L/u_{\text{выг}}$ среднестатистическая ширина турбулентного фронта пламени увеличивается линейно со временем.

Экспериментальные данные по величине скорости выгорания пропано-воздушных смесей приведены на рис. 2, а, б. Зависимость скорости выгорания от пульсационной скорости смеси качественно совпадает с ранее исследованной в [2] зависимостью турбулентной скорости горения, измеренной по видимой границе пламени, и степени расширения продуктов, вычисленной по повышению давления в бом-

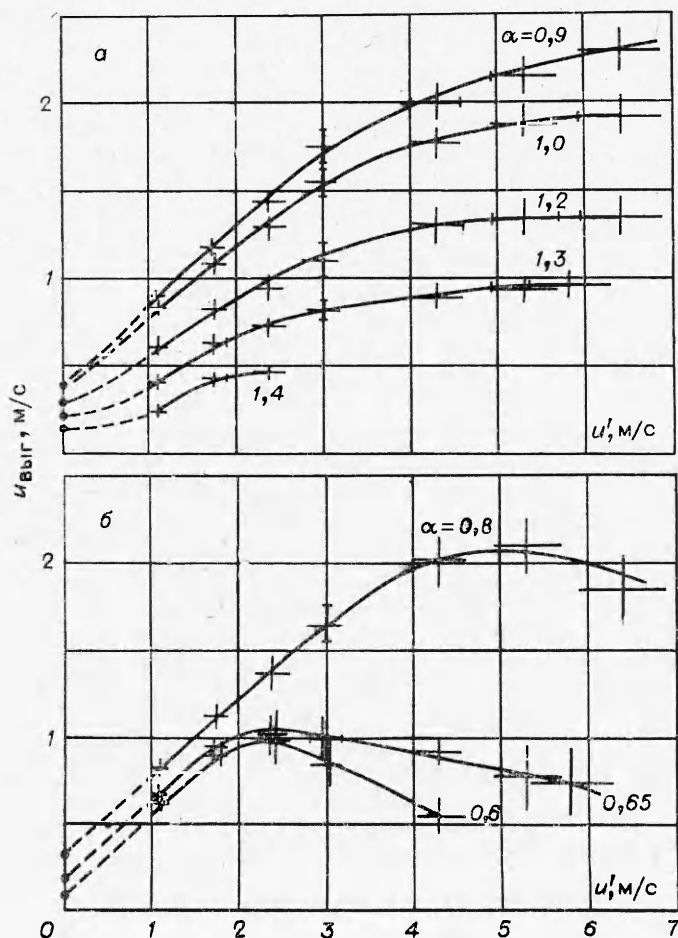


Рис. 2. Скорости выгорания пропано-воздушных смесей в зависимости от пульсационной скорости горючей смеси (α — коэффициент избытка воздуха горючей смеси).

бе. Однако при пульсационной скорости 4 м/с полученные значения скорости выгорания по абсолютной величине оказались примерно в 2 раза меньше скоростей, определенных по «передней границе» пламени.

На рис. 2 видно, что при увеличении пульсационной скорости смеси u' превышение турбулентной скорости выгорания над ламинарной скоростью горения $u_{\text{л}}$ растет пропорционально пульсационной скорости $u_{\text{выг}} - u_{\text{л}} \sim u'$, пока $u' < u_{\text{л}} \cdot \epsilon$, где ϵ — степень расширения продуктов горения смеси. При дальнейшем увеличении пульсационной скорости смеси, турбулентная скорость выгорания бедных пропано-воздушных смесей практически не зависит от u' , а для богатых смесей уменьшается.

Максимальная скорость выгорания наблюдается для смесей с $\alpha = 0,9$, что согласуется с результатами [2]. Максимальная скорость выгорания бедных пропано-воздушных смесей не превышала более чем в 4,5—5 раз ламинарную скорость горения, богатых — в 6—7 раз. Это качественно согласуется с данными по горению бензино-воздушных смесей в турбулентных потоках [1]. Отношение турбулентной скорости выгорания к пульсационной скорости смеси, равное $\sim 0,4$, соответствует горению в горелках [12].

При большой пульсационной скорости для богатых ($\alpha = 0,6$ и $0,65$) и бедных ($\alpha = 1,4$ и $1,35$) смесей наблюдаемые пределы воспламенения совпадают с данными работы [13]. Вблизи пределов воспламенения было зарегистрировано пульсирующее распространение пламени по регистрации роста давления в бомбе (рис. 3), что дополняет типичную картину распространения пламени у предела воспламенения (рис. 4), исследованную теплеровской кино съемкой турбулентного горения в [13], где было замечено развитие и затухание отдельного «языка» турбулентного пламени. Существование пределов воспламенения в турбулизованной смеси объясняется в [13] ростом скорости процессов турбулентной диффузии, приводящим к тому, что характерное время диффузии становится меньше характерного времени выделения тепла химическими реакциями во фронте пламени. В этом случае тепло выделяется со скоростью, недостаточной для поддержания процесса горения, и пламя затухает.

Поскольку лагранжев масштаб турбулентности (10 мм) превышает ширину ламинарного фронта горения (1 мм), то от зажигающей искры в горючей смеси у пределов воспламенения появляется очаг пламени, переносимый турбулентными пульсациями среды (см. рис. 4). Затем при условии, что скорость увеличения среднего размера очага горения ($u_{\text{выг}} \cdot \epsilon$) больше скорости размытия его границы u' (т. е. $u_{\text{выг}} \cdot \epsilon > u'$), пламя разовьется и будет происходить турбулентное горение горючей смеси. В противном случае, когда $u' > u_{\text{выг}} \cdot \epsilon$, очаг горения размоется из-за интенсивного перемешивания турбулентностью его границы.

При $u' > u_{\text{выг}} \cdot \epsilon$ турбулентное перемешивание продуктов и исходной смеси происходит настолько быстро, что средняя ширина фронта горения увеличивается быстрее среднего размера сферы сгорания. Поскольку средний размер объема, занятого только продуктами горения, есть разница между сферой сгорания и средней шириной фронта горения, то продукты горения в среднем будут размываться. Интенсивное перемешивание продуктов с холодной горючей смесью при медленной скорости химиче-

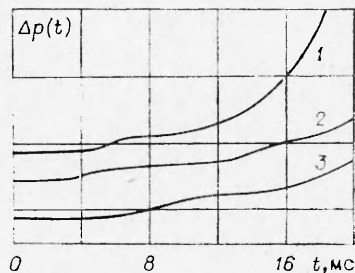


Рис. 3. Регистрация давления при горении смеси вблизи пределов воспламенения.

1, 2 — $\alpha = 0,6$, $u' = 4,3$ м/с; $u' = 2,5$ м/с.
3 — $\alpha = 1,4$.

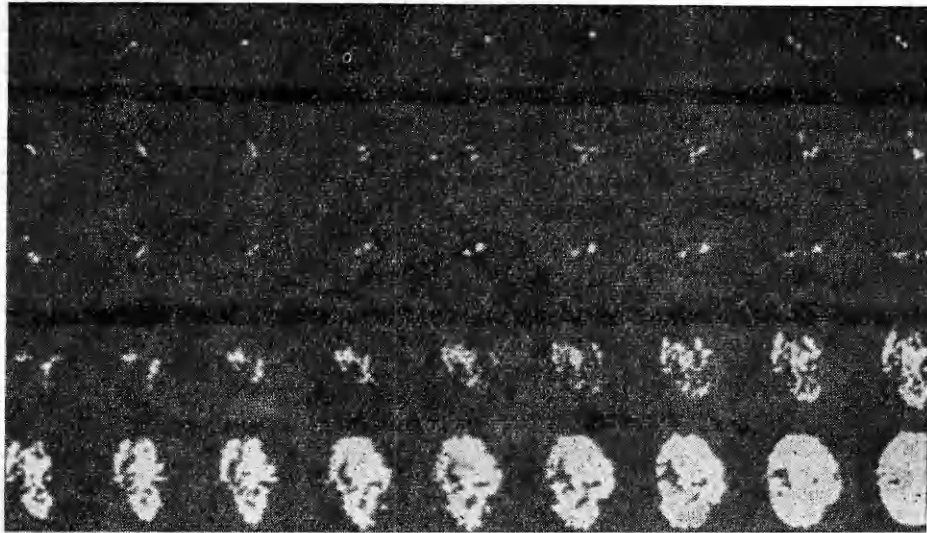


Рис. 4. Теплеровская киносъемка распространения пламени горючей смеси вблизи пределов воспламенения.

ских реакций приводит к понижению температуры продуктов и затуханию тепловыделения. В [11] показано, что перемешивание продуктов и их турбулентный перенос по горючей смеси без сгорания не является турбулентным горением. Следовательно, равенство скорости увеличения среднего размера турбулентного пламени $u_{\text{выг}} \cdot \epsilon$ и среднеквадратичной пульсационной скорости смеси u' есть условие предела воспламенения в турбулентной горючей смеси. Действительно, все измеренные скорости выгорания соответствуют условию $u_{\text{выг}} \cdot \epsilon > u'$. Тот факт, что кривые скорости выгорания на рис. 2, б не опускаются ниже, а на рис. 2, а не продолжают дальше значения $u_{\text{выг}} \cdot \epsilon = u'$, подтверждает справедливость условия предела воспламенения в турбулизованной горючей смеси.

При больших пульсационных скоростях горючей смеси вблизи пределов воспламенения процессы турбулентной диффузии настолько убыстряются, что скорость выгорания лимитируется временем химических процессов в отдельных языках пульсирующего фронта пламени. Тогда $u_{\text{выг}}$ обратно пропорциональна времени химических реакций t_x [11, 13] и по известной зависимости $u_{\text{выг}} \sim t_x^{-1} \sim e^{-E/RT}$ (где E — эффективная энергия активации, T — температура продуктов горения, R — газовая постоянная) можно определить эффективную энергию активации по скорости выгорания. Наклоны прямых на рис. 5 соответствуют следующим значениям эффективных энергий активации: для ламинарного пламени (3) — 42 ккал/моль, для турбулентного пламени богатой пропано-воздушной смеси (2) — 43 ± 7 ккал/моль, а для бедной смеси (1) — 27 ± 4 ккал/моль. Эти значения E турбулентных пламен в несколько раз превышают E , вычисляемые по турбулентным скоростям рас-

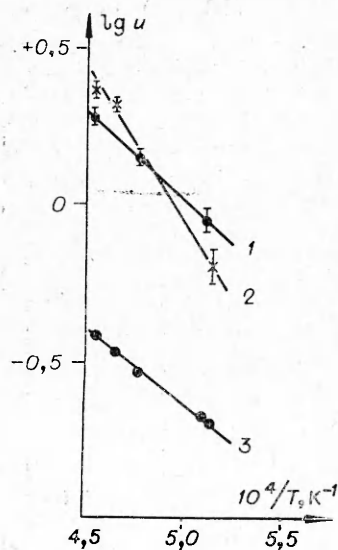


Рис. 5. Зависимость логарифма скорости выгорания от температуры продуктов горения.

пространения пламени [11]. Эффективные энергии активации турбулентных пропано-воздушных пламен, полученные по зависимости скорости выгорания от температуры продуктов горения, хорошо согласуются как с E ламинарного пламени, так и с данными работ по горению в химических реакторах, где сообщаются величины 40 [14] и 27 ккал/моль [15]. Полученные значения эффективных энергий активации химических процессов в турбулентном пламени качественно подтверждают измеряемые вблизи пределов воспламенения величины скоростей выгорания.

*Поступила в редакцию
30/XI 1976,
после доработки — 22/II 1977*

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Раушенбах, С. А. Белый и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М., Машиностроение, 1964.
2. А. С. Соколик, В. П. Карпов, Е. С. Семенов. ФГВ, 1967, 3, 1, 61.
3. В. П. Карпов. ФГВ, 1970, 6, 4, 504.
4. Ю. А. Гостинцев, В. С. Илюхин, П. Ф. Похил. ИФЖ, 1971, XX, 6, 1036.
5. П. И. Богданов, П. Г. Зыков, П. Е. Суетин. ПТЭ, 1976, 2, 195.
6. А. С. Монин, А. М. Яглом. Статистическая гидромеханика, ч. 1. М., «Наука», 1965.
7. Е. С. Семенов. НТПГВ, 1965, 2, 83.
8. R. J. Baker, P. Hutchinson а. о. 15-th Symposium on Combustion, Tokyo, 1974, Abstracts, 107.
9. В. Б. Либрович, В. И. Лисицын. ПМТФ, 1975, 4, 74.
10. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М., Изд-во АН СССР, 1960.
11. Е. С. Щетинков. Физика горения газов. М., «Наука», 1965.
12. Е. С. Щетинков. ФГВ, 1976, 12, 4, 483.
13. В. П. Карпов, А. С. Соколик. Докл. АН СССР, 1961, 141, 2, 393.
14. H. Hottel, G. W. Williams, M. Baker. 6-th Symposium on Combustion, N. Y., 1957.
15. A. Clarke, J. Odgers. P. Ryan. 8-th Symposium on Combustion, Baltimore, 1962.

ВЛИЯНИЕ РАСТЕКАНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ПЛЕНКИ РАСПЛАВА И ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОМАСООБМЕНА, ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ПММА

А. М. Гришин, А. С. Якимов

(Томск)

Пластические массы в технике и в быту получают все большее распространение. Полимерные материалы применяются в качестве связки в смесевых твердых топливах [1] и в качестве горючего в гибридных ракетных двигателях [2].

Исследованию режимов абляции композиционных материалов и горению полимеров, образующих вязкий расплав на рабочей поверхности, посвящены многие теоретические [3—9] и экспериментальные работы [10—14]. Большинство авторов этих исследований рассматривают квазиустановившийся процесс абляции при течении жидкой пленки. В то же время, как показывает эксперимент [13, 14], начальная стадия разрушения полиметилметакрилата (ПММА) имеет существенно неустановившийся характер. К тому же появление газовых вклю-