

## СТРУЙНО-ФАКЕЛЬНОЕ ГОРЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ ТОПЛИВ

## АННОТАЦИЯ

Рассмотрено влияние температуры, химического состава и давления на нормальную скорость распространения пламени  $S_B^0$  в предварительно перемешанных смесях горючих газов с окислителем. Проведено обобщение опытных данных по  $S_B^0$  для стехиометрических смесей углеводородов с кислородом и воздухом и получена единая зависимость  $S_B^0$  от адиабатической температуры горения  $T_a$ . Предложена формула для расчета скорости турбулентного горения топливных смесей.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Горение – это сложный химико-физический процесс, протекающий с выделением теплоты и, как правило, света. Его основой являются экзотермические химические реакции горючего вещества с окислителем.

Долгое время изучение процесса горения было прерогативой химиков. Ими были достаточно глубоко исследована кинетика горения и создана теория цепных реакций, протекающих на молекулярном уровне. Однако постепенно выяснилась большая роль физических факторов, сопровождающих горение.

Многое в этом направлении уже сделано, о чем можно судить как по ставшим классическими монографиям середины прошлого века [1, 2], так и по современным книгам [3].

Предметом настоящего доклада являются струйные (факельные) пламена предварительно подготовленных смесей горючих газов с окислителем, при истечении их из горелки (отверстий, насадков, сопел) в свободный объем. В идеале такая смесь является гомогенной, и режим ее горения при истечении из горелки носит название кинетического.

## 2. КИНЕТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ. НОРМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ

Схема распространения пламени (волны горения) в кинетическом режиме представлена на рис. 1. В выделенной для представления трубке тока слева направо движется предварительно подготовленная смесь (массовый поток). Справа, навстречу ему, движется фронт пламени. При определенных условиях, когда скорость подаваемой смеси равна скорости распространения фронта пламени, наблюдается устойчивое горение с неподвижным для наблюдателя фронтом пламени. Обычно выделяют три зоны:

– зона подогрева топлива, заканчивающаяся воспламенением смеси;

– зона реакции, где выделяется вся теплота химической реакции, температура в конце зоны достигает своего максимума;

– зона продуктов сгорания.

Характер изменения температуры в процессе представлен кривой 1, изменения концентрации горючего газа – кривой 2, выделения теплоты – кривой 3.

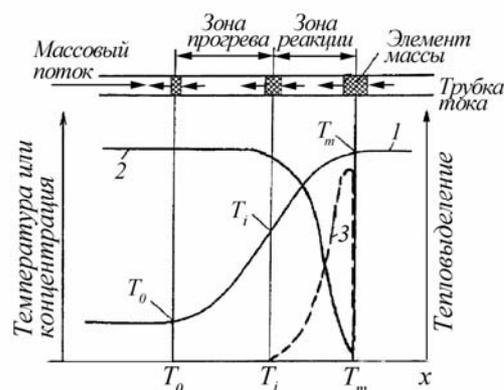


Рис. 1. Схема волны горения: 1 – температура газов; 2 – концентрация горючего; 3 – тепловыделение

Таким образом, при факельном горении предварительно перемешанных смесей собственно зона горения окутана облаком горячих продуктов сгорания.

Главный интерес в исследовании процессов горения предварительно перемешанных газовых смесей представляет определение нормальной скорости распространения пламени  $S_B^0$ .

Определение величины  $S_B^0$  для широкого круга топливных смесей активно проводилось в 1950-х – начале 1970-х годов. Было разработано и получило широкое распространение до десятка разных способов определения нормальной скорости горения. Это и горелки, и сопла, и прозрачные трубки, и бомбы постоянного объема, и мыльные пузыри постоянного давления, с применением фото, шпирен-метода, термоанемометров, трассеров.

Подробное рассмотрение этих способов и точности получаемых ими определений  $S_B^0$  дано в обзорах [4, 5]. И все они подтвердили независимость величины  $S_B^0$ , как от скорости истечения смеси из горелки, так и от размеров самой горелки. Это позволило принять нормальную скорость горения  $S_B^0$  за некоторую теплофизическую константу, свойственную каждой топливной смеси. Как и все теплофизические свойства веществ, величина  $S_B^0$  зависит от таких параметров системы, как давление, температура и химический состав смеси. Относится она

только к горению предварительно перемешанных смесей.

Не имея заведомых погрешностей, все применяемые методы определения дают существенный разброс значений  $S_B^0$ , оцениваемый в  $\pm 35\%$ .

### 3. ЗАВИСИМОСТЬ $S_B^0$ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ, ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СМЕСИ И ДАВЛЕНИЯ

Увеличение скорости горения с температурой общеизвестно. В формулу Зельдовича–Франк-Каменецкого температура входит под экспоненту, что означает едва ли не определяющую роль ее в процессе горения. Но какую температуру использовать? На рис. 2 приведена характерная сложность температурной картины внутри кинетического факела при горении гомогенной смеси  $\text{CH}_4$ –воздух. Локальные температуры измерялись по обращению линий натрия. Видно, что выбор температуры, интегрально определяющей скорость горения, является большой проблемой. Неожиданным ее решением стало принятие за основу характеристики горячей смеси легко рассчитываемой адиабатической температуры пламени  $T_a$ .

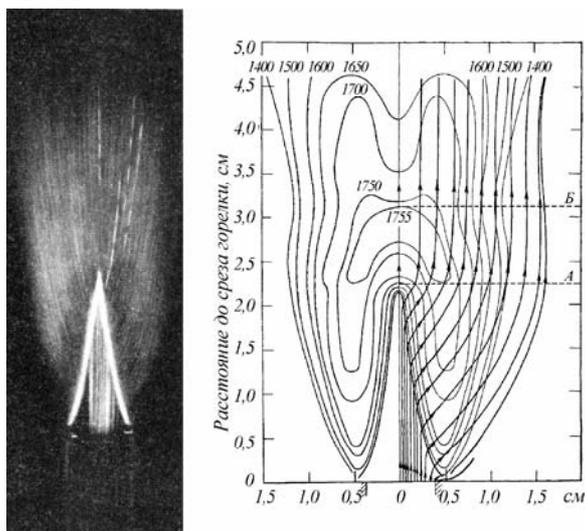


Рис. 2. Кинетический факел горения метано-воздушной смеси и поле температур внутри него в  $^{\circ}\text{C}$  [2]

Построив в полулогарифмических координатах зависимости нормальной скорости горения  $S_B^0$  от  $T_a$  для разных топливных смесей, авторы [1] показали (рис. 3), что для определенных групп горючих газов и окислителей экспериментальные точки ложатся на свои прямые. Выше всех располагаются значения  $S_B^0$  для смесей  $\text{H}_2$ – $\text{O}_2$ – $\text{N}_2$ , ниже и на более крутой линии лежат  $S_B^0$  для углеводородов с кислородом в качестве окислителя и азотом в качестве разбавителя. Аналогичные данные для углеводородов, но с окислителем  $\text{N}_2\text{O}$ , смещаются вниз и правее, в зону более высоких температур  $T_a$ . И уже совсем в правом нижнем углу лежат данные по  $S_B^0$  для углеводородов, горящих в смеси с  $\text{NO}$ . Представленная картина практически только обозначена отдельными экспериментальными точками.

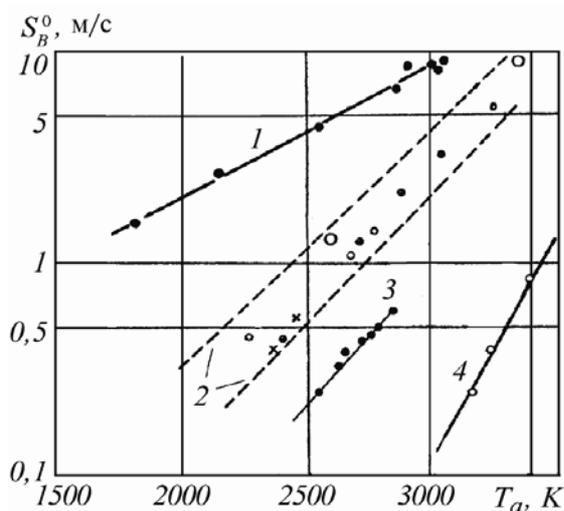


Рис. 3. Зависимости  $S_B^0$  от температуры пламени для смесей углеводородов с разными окислителями [1]: 1 –  $\text{H}_2$ – $\text{O}_2$ – $\text{N}_2$ ; 2 –  $\text{C}_n\text{H}_m$ – $\text{O}_2$ – $\text{N}_2$ ; 3 –  $\text{C}_n\text{H}_m$ – $\text{N}_2\text{O}$ ; 4 –  $\text{C}_n\text{H}_m$ – $\text{NO}$

Нами был произведен в литературе широкий поиск данных о нормальной скорости горения  $S_B^0$  для разных, подчас довольно экзотичных, топливных пар, и на единую прямую  $AB$  (рис. 4) [6] положены значения  $S_B^0$  для пятнадцати стехиометрических газо-кислородных и газозвушных смесей четырнадцати разных углеводородов. Линия  $AB$  отвечает экспоненте

$$S_B^0 = 9,92 \cdot 10^3 \cdot \exp\left(-\frac{2,3 \cdot 10^{-4}}{T_a}\right), \quad (1)$$

обобщающей экспериментальные данные с разбросом  $\pm 30\%$ .

Заслуживают внимание кривые  $ab$  и  $a_1b_1$ , отвечающие значениям  $S_B^0$  для горящих метанокисло-

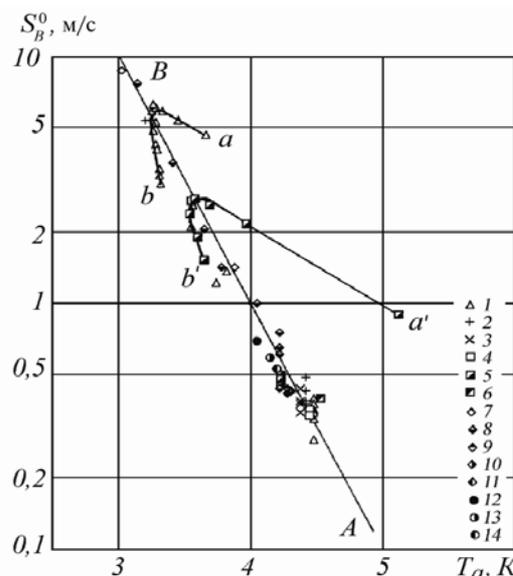


Рис. 4. Обобщение данных по  $S_B^0$  для топливных смесей  $\text{C}_n\text{H}_m$ – $\text{O}_2$ – $\text{N}_2$  и  $\text{C}_n\text{H}_m$ –воздух: 1 –  $\text{CH}_4$ ; 2 –  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; 3 –  $\text{C}_3\text{H}_8$ ; 4 –  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ; 5 –  $\text{C}_6\text{H}_{14}$ ; 6 –  $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ; 7 –  $\text{C}_2\text{H}_2$ ; 8 –  $\text{C}_2\text{H}_4$ ; 9 –  $\text{C}_3\text{H}_6$ ; 10 –  $\text{C}_4\text{H}_8$ ; 11 –  $\text{C}_6\text{H}_6$ ; 12 –  $\text{C}_3\text{H}_4$ ; 13 –  $\text{C}_4\text{H}_6$ ; 14 –  $\text{C}_5\text{H}_8$

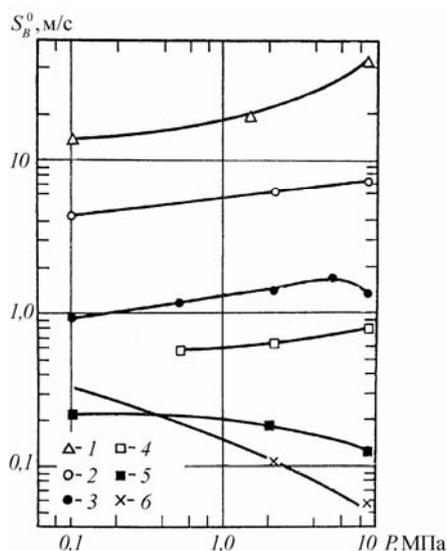


Рис. 5. Влияние давления на  $S_B^0$  смесей горящих быстро и медленно:

1 –  $H_2-O_2$ ; 2 –  $CH_4-O_2$ ; 3 –  $CO-O_2$ ; 4 –  $H_2-NO$ ; 5 –  $CO$ -воздух; 6 –  $CH_4$ -воздух

родных и гексаноокислородных смесей, соответственно, в широком диапазоне исходных концентраций в них горючих газов: от 0,6 до 1,4 от стехиометрического состава. Область пересечения этими кривыми линии  $AB$  отвечает стехиометрии. Влево от  $AB$  располагаются так называемые «бедные» смеси, вправо – «богатые». Оказывается, при одних и тех же значениях  $T_a$  нормальная скорость горения  $S_B^0$  «бедных» смесей значительно выше, чем «богатых», что объясняется значительно большим содержанием в «бедных смесях» активного центра горения – радикала  $OH$ .

Все вышеописанные исследования проводились при атмосферном давлении. На практике же процесс горения часто реализуется при давлениях существенно отличающихся от атмосферного, причем как в сторону разрежения, так и в сторону высоких давлений, до 10 МПа и выше. Между тем скольнибудь четкая зависимость  $S_B^0$  от давления пока не установлена. Согласно многочисленным исследованиям она зависит от самой величины скорости (рис. 5) [2]. При горении газовых смесей с малыми

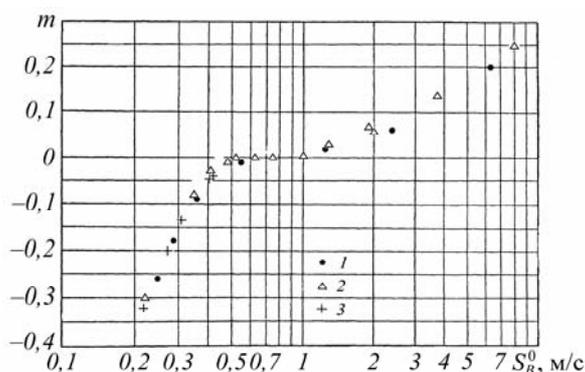


Рис. 6. Характер влияния давления на стандартную скорость горения  $S_B^0$  в зависимости от ее величины:

1 –  $CH_4$ ; 2 –  $C_2H_4$ ; 3 –  $C_3H_8$

$S_B^0$ , например,  $CH_4$  в воздухе, повышение давления приводит к снижению скорости горения, и, наоборот, при больших  $S_B^0$  (смесь  $H_2-O_2$ ) – к ее повышению. Границами малых и больших  $S_B^0$  являются 0,5 м/с и 1 м/с. Между ними лежит область скоростей горения, в которой зависимость  $S_B^0$  от  $P$  практически отсутствует (например, для смеси  $CO-O_2$  на рис. 5).

Более полная картина влияния давления на нормальную скорость горения приведена на рис. 6 [7]. Взяв за основу соотношение

$$\frac{S_{B1}^0}{S_{B2}^0} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^m, \quad (2)$$

принятое при обработке экспериментальных данных, получаемых в опытах с бомбами постоянного объема, автор [7] построил зависимость показателя степени « $m$ » от величины  $S_B^0$ , используя для этого данные для смесей метана, этилена и пропана с кислородом, разбавленным в разной степени азотом.

На рис. 6 четко видно, что при  $S_B^0 < 0,5$  м/с показатель « $m$ » отрицателен (скорость горения с ростом  $P$  падает) и чем меньше  $S_B^0$ , тем больше абсолютная величина « $m$ », т.е. падение  $S_B^0$  с ростом давления усиливается. Аналогичная зависимость, но в другую сторону, наблюдается при  $S_B^0 > 1$  м/с – чем больше  $S_B^0$ , тем более интенсивно идет рост  $S_B^0$  с ростом  $P$ .

Опыты других исследователей с другими топливными смесями качественно, и, в большей или меньшей степени, количественно подтверждают приведенную зависимость. К сожалению, прогресса в установлении более строгой зависимости величины нормальной скорости горения от давления до сих пор нет.

#### 4. ГОРЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАНЫХ СМЕСЕЙ В ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ

Переход от ламинарного режима горения к турбулентному влечет за собой не только дальнейшую интенсификацию теплопереноса, но и существенно увеличивает эффективную скорость горения за счет искривления поверхности фронта пламени и, тем более, разрывов ее, создания горящих островков, вихрей разного масштаба.

Классической работой, в которой изучалось горение турбулентных струй предварительно перемешанной смеси в свободном пространстве, явилось исследование [9]. Предварительное смешение горючего газа с окислителем – воздухом производилось на бунзеновской горелке с трубкой, длина которой была достаточной, как для полного смешения компонентов, так и для обеспечения в ней развитого турбулентного течения. Экспериментальные данные [8] с указанием используемых газов и диаметров трубок приведены на рис. 7 в виде зависимости скорости турбулентного горения  $S_{BT}$  от числа  $Re_0$  с указанием величины нормальной скорости  $S_B^0$  для каждой из топливных смесей. Из рассмотрения ри-

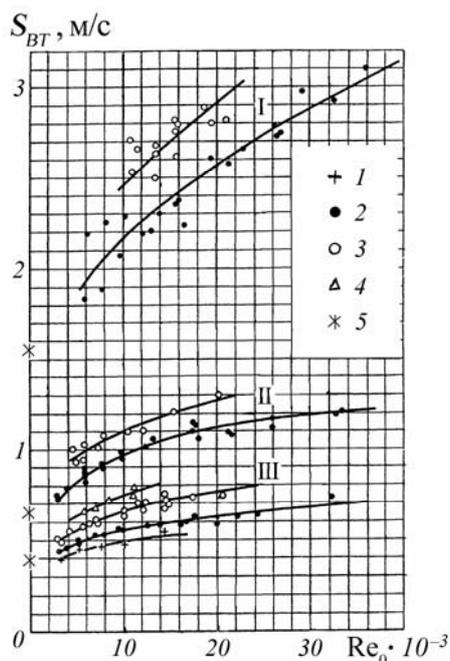


Рис. 7. Зависимость скорости турбулентного горения  $S_{BT}$  от числа Рейнольдса  $Re$ :  
 I –  $C_2H_2$ ; II –  $C_2H_4$ ; III –  $C_3H_8$ ; 1 –  $d_0 = 6,35$  мм; 2 – 9,53; 3 – 15,90; 4 – 28,60; 5 –  $S_B^0$

сунка следует, что скорость  $S_{BT}$  зависит не только от вида горючего газа и от  $Re_0$ , но и, дополнительно, от выходного диаметра горелки: чем больше  $d_0$ , тем при  $Re = idem$ , выше  $S_{BT}$ . Это было учтено при обобщении экспериментальных данных [9] с целью получения единой расчетной зависимости. Результаты такого обобщения приведены на рис. 8. Все экспериментальные данные по  $S_{BT}$  при турбулентном горении предварительно подготовленных смесей ацетилена, этилена и пропана с воздухом при вертикальном истечении их в атмосферу из трубок диаметром от 6,3 до 28,6 мм легли вдоль одной линии

$$S_{BT}/S_B^0 = 0,165 Re_0^{0,2} (d_0/d_*)^{0,3} \quad (3)$$

с разбросом, не превышающим  $\pm 20\%$ . О величине  $d_*$  и дополнительной роли  $d_0$  см. следующий доклад настоящей конференции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ большого количества опубликованных экспериментальных данных.

2. Проанализирована зависимость нормальной скорости горения  $S_B^0$  разных топливных смесей от давления, температуры и химического состава в зоне горения.

3. Получена единая зависимость для углеводородных газов нормальной скорости горения  $S_B^0$  от адиабатической температуры горения  $T_a$  в воздухе или кислороде с разной степенью его разбавления инертным газом ( $N_2$ , Ar).

4. Получена обобщенная расчетная формула для скорости турбулентного горения  $S_{BT}$  предварительно перемешанных топливных смесей.

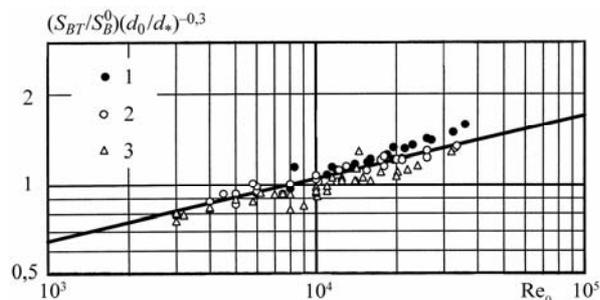


Рис. 8. Обобщение экспериментальных данных по горению турбулентных газовых струй предварительно перемешанных топливных смесей:

I –  $C_2H_2$ ; 2 –  $C_2H_4$ ; 3 –  $C_3H_8$

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $d_0$  – диаметр сопла, м;
  - $d_*$  – характерный диаметр, м;
  - $P$  – давление, МПа;
  - $S_B^0$  – нормальная скорость распространения пламени, м/с;
  - $S_{BT}$  – скорость турбулентного горения, м/с;
  - $T$  – температура, К;
  - $Re$  – число Рейнольдса;
  - $\Delta$  – разность.
- Индексы:
- $B$  – горение;
  - 0 – начальная;
  - 1, 2 – некоторое состояние.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура / Пер. с англ.; под ред. С.А. Гольдберга. М.: ГНТИЛ по черной и цветной металлургии, 1959. 334 с.
2. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. 2-е изд. / Пер. с англ.; под ред. К.И. Щелкина, А.А. Борисова М.: Мир, 1968. 592 с.
3. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ.; под ред. П.А. Власова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 352 с.
4. Andrews G.E., Bradley D. The Burning Velocity of Methane-Air Mixtures // Combustion and Flame. 1972. Vol. 19. P. 275.
5. Andrews G.E., Bradley D. Determination of Burning Velocities: A Critical Review. // Combustion and Flame. 1972. Vol. 18. P. 133.
6. Полежаев Ю.В., Мостинский И.Л. Нормальная скорость распространения пламени и анализ влияния на нее параметров системы // ТВТ. 2005. Т. 43. №6. С. 933–942.
7. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965. 740 с.
8. Дубовкин Н.Ф., Брещенко Е.М. Легкие моторные топлива и их компоненты. М.: Химия, 1999. 480 с.
9. Bollinger L.M., Williams D.T. NACA Tech. Note, 1707, 1948.
10. Полежаев Ю.В., Мостинский И.Л., Габбасова Г.В. Диффузионное горение газовых струй в ламинарном и турбулентном режиме. Докл. наст. конф.