

7. Головина Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 176 с.
8. Шестаков С.М., Любов В.К., Павлов А.М. и др. // Горение органического топлива. — Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 1984. — Ч. II. — С. 225—234.
9. Асланян Г.С., Директор Л.Б. // Проблемы газификации углей: Докл. Всесоюз. симп. — Красноярск, 1991. — С. 66—73.
10. Laurendeau N. // Progress in energy and combustion science. — L., United Kingdom: Pergamon Press, 1978. — V. 4. — P. 221—270.
11. Степанов С.Г., Исламов С.Р., Баскаков А.П. // Проблемы тепло- и массопереноса в тепло-энергетических установках с дисперсными потоками. — Минск: ИТМО, 1985. — С. 25—30.
12. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977. — 656 с.
13. Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.Ф., Сулейменов К.А. и др. // Проблемы газификации углей: Докл. Всесоюз. симп. — Красноярск, 1991. — С. 73—76.
14. Weirner A.W., Glough D.E. // Chem. Eng. Sci. — 1981. — 36, N 2. — P. 180—201.
15. Майстренко А.Ю. Горение и газификация высокозольных углей в кипящем слое: Дис. техн. наук. — М.: ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1990. — 270 с.
16. Пацков В.П., Финин Г.С., Майстренко А.Ю. // Химия твердого топлива. — 1990. — № 3. — С. 134—142.
17. Пацков В.П., Редькин В.Б., Анищенко А.А. и др. // Там же. — 1992. — № 2. — С. 101—108.
18. Анищенко А.А., Гленко И.Л. // Проблемы энергосбережения. — 1990. — Вып. 4. — С. 55—57.
19. Пацков В.П., Финин Г.С., Бродацкая И.В. и др. // Сиб. физ.-техн. журн. — 1991. — Вып. 5. — С. 65—71.
20. Основы практической теории горения: Учеб. пособие для вузов // В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. / Под ред. В.В. Померанцева. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 312 с.
21. Sotirhos C.V., Amundson N.-R. // Ind. Eng. Chem. Fundam. — 1984. — 23, N 2. — P. 180—201.
22. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987. — 502 с.

252070, г. Киев,
Институт проблем энергосбережения
АН Украины

Поступила в редакцию — 26/VI 1992,
после доработки — 13/VIII 1993

УДК 614.841.12

*Ю.Н. Шебеко, С.Г. Цариченко, А.Я. Корольченко,
А.Ю. Каплин, Г.А. Попков*

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

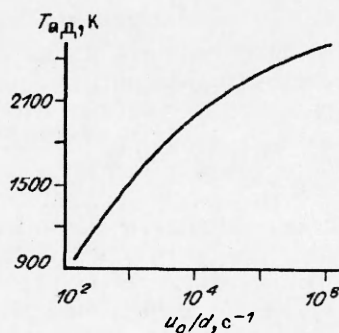
Предложен новый метод расчета предельных условий диффузионного горения водородсодержащих газовых смесей, позволяющий для заданных значений скорости истечения и диаметра горелки определять содержание инертного разбавителя на пределе горения. Проведено сравнение результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными.

Для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности технологических процессов, в которых используются водородсодержащие газовые смеси, представляет интерес знание предельных условий стабилизации диффузионного факела (предельные состав смесей и скорость их истечения). Экспериментальное определение указанных параметров достаточно трудоемко, в связи с чем представляется актуальным создание соответствующих расчетных методов, разработке которых посвящены работы [1—6].

В [1] найдено, что предельные концентрации горючего в смеси с разбавителем или окислителем в смеси с флегматизатором существенно зависят от скорости относительного движения горючего газа и окислительной среды. При этом наиболее благоприятные условия существования диффузионного пламени (максимальная предельная концентрация разбавителя) реализуются при относительно малых скоростях потока, когда срыв пламени

© Ю.Н. Шебеко, С.Г. Цариченко, А.Я. Корольченко, А.Ю. Каплин, Г.А. Попков, 1994.

Рис. 1. Зависимость адиабатической температуры диффузионного пламени от параметра u_0/d .



поток горючего затруднен в силу его малости, а скорость достаточна для предотвращения существенных теплотерь в горелку. Найдено, что на пределе диффузионного горения температура во фронте пламени приблизительно одинакова для различных флегматизаторов и составляет около 1100 для водорода и 1500 К для метана, т.е. существует температура пламени, ниже которой диффузионное горение невозможно.

При этом предельная температура для диффузионных пламен приблизительно совпадает с соответствующей величиной для пламен предварительно перемешанных смесей. Указанный принцип был использован в [2, 3] для расчета минимальных огнетушащих концентраций средств объемного тушения.

В работе [4] для аналогичных расчетов использована аналитическая аппроксимация кривых флегматизации горючего компонента разбавителем. Однако эти методы не учитывают изменение предельных по отношению к диффузионному горению составов при увеличении скорости истечения смеси. В [5, 6] условия срыва диффузионных газовых факелов определяются с использованием нормальных скоростей горения S_u . В то же время нахождение этого параметра представляет собой сложную задачу, что ограничивает область применения указанных методов. Поэтому представляет интерес создание способа расчета предельных условий диффузионного горения водородсодержащих газовых смесей, сочетающего в себе простоту и универсальность методов, основанных на постоянстве адиабатической температуры горения на пределе, с учетом влияния скорости истечения на предельные концентрации разбавителя. Решение указанной задачи посвящена настоящая работа.

В качестве эмпирической основы горения используем экспериментальные данные по зависимости предельного расхода срыва диффузионного пламени смеси водорода с азотом в воздухе от соотношения концентраций H_2 и N_2 . По-видимому, основной параметр, определяющий предельные условия существования диффузионного пламени, — адиабатическая температура горения, которая является функцией параметра $\xi = u_0/d$, где u_0 — скорость истечения, а d — диаметр горелки. Исходя из этого, расчет может быть построен следующим образом.

По известному значению ξ определим по рис. 1, построенному на основе данных [6], предельную адиабатическую температуру горения $T_{ад}$ (значения $T_{ад}$ вычислены без учета диссоциации продуктов сгорания, однако это принципиально не влияет на применимость метода). Далее, зная $T_{ад}$, находим искомую концентрацию инертного разбавителя на пределе стабилизации диффузионного пламени.

Для разработки метода расчета предельных концентраций в настоящей работе использована закономерность, сформулированная в [1]: на пределе диффузионного горения для заданного параметра ξ адиабатическая температура пламени приблизительно постоянна для различных инертных разбавителей, а также известно положение [7] о том, что зона горения располагается там, где за счет молекулярной диффузии получается смесь, близкая к стехиометрической.

Формула расчета предельных составов вытекает из анализа уравнений материального и энергетического баланса реакции горения и в общем случае имеет вид

$$H_2 + 1/2O_2 + m \sum x_i \Psi_i = H_2O + m \sum x_i \Phi_i + Q, \quad (1)$$

$$Q = (\Delta H_{H_2O}^{T^*} - \Delta H_{H_2O}^{T_0^*}) + m \sum x_i (\Delta \bar{H}_i^{T^*} - \Delta H_{\Phi_i}^{T_0^*}), \quad (2)$$

где Q — тепловой эффект реакции; Φ_i — инертный флегматизатор; x_i — мольная доля i -го разбавителя в смеси флегматизаторов; m — число молей сложного флегматизатора, приходящегося на 1 моль водорода; ΔH^T — разность абсолютных энтальпий моля вещества при температуре T и абсолютном нуле; T^0 — начальная температура исходной смеси; T^* — адиабатическая температура продуктов сгорания на пределе горения.

На практике определение предельных составов диффузионного горения сводится к двум частным случаям: нахождение предельного содержания горючей смеси при известном составе окислительной среды и предельного состава окислительной среды при известном составе горючего. В этом случае уравнение энергетического и материального баланса удобнее записать в виде

$$\begin{aligned} \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 + m \sum x_i \Phi_i + 1/2n \sum x_j \Phi_j &= \\ &= \text{H}_2\text{O} + m \sum x_i \Phi_i + 1/2n \sum x_j \Phi_j + Q, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Q &= (\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T^*} - \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T^0}) + m \sum x_i (\Delta H_{\Phi_i}^{T^*} - \Delta H_{\Phi_i}^{T^0}) + \\ &+ n/2 \sum x_j (\Delta H_{\Phi_j}^{T^*} - \Delta H_{\Phi_j}^{T^0}), \end{aligned} \quad (4)$$

где m — число молей составного флегматизатора, приходящегося на 1 моль водорода в горючей смеси; n — число молей флегматизатора, приходящегося на 1 моль O_2 в окислительной среде.

Тогда в первом из упомянутых выше случаев имеем

$$m = \frac{Q - (\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T^*} - \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T^0}) - n/2 \sum x_j (\Delta H_{\Phi_j}^{T^*} - \Delta H_{\Phi_j}^{T^0})}{\sum x_i (\Delta H_{\Phi_i}^{T^*} - \Delta H_{\Phi_i}^{T^0})}, \quad (5)$$

$$c_{\text{H}_2} = \frac{1}{m+1} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где c_{H_2} — предельная концентрация водорода в смеси с флегматизатором.

Соответственно для второго случая

$$n = \frac{Q - (\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T^*} - \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{T^0}) - m \sum x_i (\Delta H_{\Phi_i}^{T^*} - \Delta H_{\Phi_i}^{T^0})}{\sum x_j (\Delta H_{\Phi_j}^{T^*} - \Delta H_{\Phi_j}^{T^0})}, \quad (7)$$

$$c_{\text{O}_2} = \frac{1}{n+1} \cdot 100 \%,$$

где c_{O_2} — концентрация кислорода в окислительной среде на пределе диффузионного горения.

Настоящий метод проверялся сопоставлением с экспериментальными данными. Так, из [1] известно, что при разбавлении водорода азотом и аргоном при истечении в воздух предельные объемные концентрации водорода (для существования диффузионного факела) составляют 11,4 и 8,5 %, а расчет дает соответственно 11,9 и 7,7 % ($T_{\text{ад}} = 1000 \text{ K}$ [1]). В случае с гелием расчетное значение концентрации 7,7 %, а экспериментальное — 10,9 %. Согласно [1], при разбавлении воздуха азотом при диффузионном горении водорода $c_{\text{O}_2} = 5,2 \%$, а расчетное значение $c_{\text{O}_2} = 4,8 \%$. В работе [1] приведены также величины c_{O_2} при горении водорода в окислительных средах, представляющих собой смеси аргона, кислорода и гелия, а также гелия и кислорода (соответственно 3,6 и 4,4 %). В расчете получено значение 3,2 %. Как следует из представленных данных, гелий имеет более высокую флегматизирующую способность, чем это следует из величины его мольной

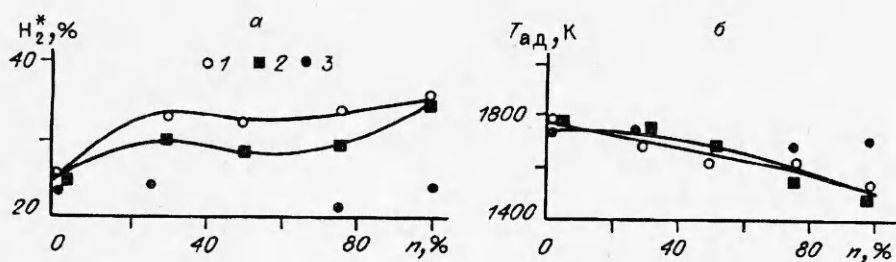


Рис. 2. Зависимость предельных концентраций водорода в смеси с инертными разбавителями (а) и адиабатической температуры (б) при горении в воздухе (скорость истечения смеси 15 м/с). Смеси: 1 – He – CO₂, 2 – Ar – CO₂, 3 – Ar – He; n (объемное содержание CO₂ (He) в разбавителе): 1, 2 – CO₂, 3 – He.

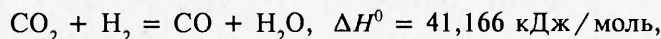
теплоемкости. Причина этого явления состоит, на наш взгляд, в высокой теплопроводности и диффузионной способности He по сравнению с Ar и N₂.

В целом же результаты расчетов и экспериментов неплохо согласуются (за исключением случаев, когда в качестве разбавителя выступает He), и относительная погрешность расчета не превышает 10 %.

С целью дальнейшей апробации настоящей методики ставились эксперименты по диффузионному горению различных смесей водорода с инертным разбавителем в воздухе. Опыты проводились на горелке диаметром 4 мм при комнатной температуре и атмосферном давлении. В качестве разбавителей использовались He, CO₂ и Ar, а также их бинарные смеси. Скорость истечения горючей смеси варьировалась от 7 до 20 м/с. При этом оказалось, что предельные концентрации H₂ в смеси с Ar и He в пределах ошибки эксперимента, составляющей ~15 %, не зависят от соотношения инертных компонентов в флегматизаторе (рис. 2, а), а расчетное значение T_{ад} на пределе горения практически постоянно и составляет 1740 К (рис. 2, б). Тем самым имеет место определенное несоответствие с данными [1] как по величине T_{ад} (в настоящих опытах она выше), так и по относительным флегматизирующим способностям Ar и He (в работе [1] последние заметно отличались). На наш взгляд, причина этого состоит в различии скорости истечения газа (в настоящих опытах она значительно выше): большему u₀ должно соответствовать более высокое значение T_{ад}, и, кроме того, влияние коэффициентов теплопроводности и диффузии Ar и He ослабляется.

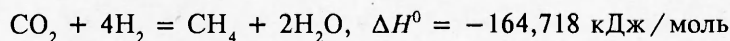
По-другому ведут себя концентрационные пределы в смесях водорода с флегматизатором, содержащим CO₂. Так, из рис. 2, а можно видеть, что предельное содержание H₂ в таких смесях изменяется непропорционально изменению теплоемкости среды. И более того, расчетное значение T_{ад} на пределе горения водорода в смеси с CO₂ (T_{ад} = 1540 К) ниже, чем в смесях с Ar и He, хотя теплоемкость углекислого газа значительно выше. Очевидно, что объяснение данного эффекта необходимо искать в анализе кинетики процесса.

Известно, что в случае диффузионного горения горючая смесь в предпламенной зоне может достаточно сильно прогреться (до 1000 К), еще не вступая в реакцию с окислителем. В данном случае это означает, что CO₂ по отношению к H₂ может не быть инертным флегматизатором, так как может вступать в различные реакции. Примерами этих реакций могут служить процессы



$$K(1000\text{K}) = \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}} = 0,698 \quad (8)$$

или



$$K(1000K) = \frac{p_{\text{CH}_4} p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}^4} = 2,884$$

и другие. Таким образом, в зону реакции в качестве горючего может поступать не смесь H_2 и CO_2 , а частично продукты указанных выше реакций, включая активные радикалы. Это и есть, на наш взгляд, одна из вероятных причин изменения $T_{\text{ад}}$ на пределе диффузионного горения (см. рис. 2, б).

Исходя из изложенного выше, можно сделать вывод о пригодности предложенной методики для оценочных расчетов составов газовых сред на пределах диффузионного горения. Указанная методика применима для горения водорода в воздухе при разбавлении горючего или окислительной среды негорючими газами, влияющими на пламя преимущественно по тепловому механизму (CO_2 , Ar, He, N_2 и т.д.) и не воздействующими существенным образом на химическую кинетику горения (подобно бромсодержащим хладагентам). Погрешности, возникающие при ее использовании, как правило, не превышают 20 % и обусловлены теми или иными особенностями разбавителя (высокая диффузионная способность, способность вступать в реакции без доступа окислителя и т.д.). Предложенный метод, а также качественные объяснения полученных экспериментальных результатов нуждаются в дальнейшем совершенствовании в ходе экспериментальных и теоретических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ishizuka S., Tsuji H. An experimental study of effect of inert gases on extinction of laminar diffusion flames // 18th Symp. (Int.) on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Institute, 1981. — P. 695—703.
2. Tucker D.M., Drisdale D.D., Rasbash D.H. The extinction of diffusion flames burning in various oxygen concentration by inert gases and bromotrifluoromethane // Combust. Flame. — 1981. — 41, N 3. — P. 293—300.
3. Шебеко Ю.Н., Корольченко А.Я., Иванов А.В. Расчет огнетушащих концентраций средств объемного тушения лакокрасочных материалов // Лакокрасочные материалы и их применение. — 1986. — № 5. — С. 71—73.
4. Шебеко Ю.Н., Корольченко А.Я., Баратов А.Н. О возможности расчета составов окислительных сред на пределах диффузионного горения газов и паров органических веществ // Хим. физика. — 1986. — 5, № 3. — С. 400—403.
5. Kaighatgi G.T. Blow — out stability of gaseous jet diffusion flames. Part 1. In still air // Combust. Science and Technology. — 1981. — 26, N 5/6. — P. 233—239.
6. Голиневич Г.Е., Карпов В.Л., Федотов А.П. и др. Естественная стабилизация и срыв оторванного турбулентного диффузионного газового факела // ФГВ. — 1991. — 27, № 5. — С. 76—81.
7. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б. и др. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
8. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник / Под ред. В.П. Глушко. — М.: Наука, 1978.

143900, Балашиха,
ВНИИПО

Поступила в редакцию
10/XI 1992

УДК 536.46

Б.Г. Ефимов, Л.А. Заклязьминский

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ПЛАСТИН В ПОТОКЕ ВОЗДУХА ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Экспериментально исследовано влияние скорости потока воздуха и статического давления в потоке при до-, около- и сверхзвуковом режимах течения на процесс инициирования самоподдерживающегося горения пластин из титанового сплава ОТ4-1В импульсным лазерным излучением. Установлено существование верхнего по скорости потока предела инициирования

© Б.Г. Ефимов, Л.А. Заклязьминский, 1994.