

$\geq 0,45$, давление водорода ниже критического, а также применение в синтезе мелкодисперсного титана и таблеток с большими диаметрами и плотностями. В табл. 5 приведены характеристики некоторых полученных карбогидридов.

Поступила в редакцию
8/V 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1972, **204**, 2.
2. А. Г. Мержанов, В. М. Шкиро, И. П. Боровинская. Авт. свид. № 255221, Бюл. изобр., 1971, 10.
3. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких неорганических соединений. Отчет ОИХФ АН СССР, Черногловка, 1970.
4. А. Б. Авакян, А. Р. Баграмян и др.— В сб.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черногловка, 1975.
5. А. Г. Акопян, С. К. Долуханян, И. П. Боровинская. ФГВ, 1978, **14**, 3.
6. А. Р. Саркисян, С. К. Долуханян. Тез. II Всес. конф. по технологическому горению. Черногловка, 1978.
7. В. М. Шкиро, И. П. Боровинская.— В сб.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черногловка, 1975.
8. С. К. Долуханян, М. Д. Нерсисян и др. Докл. АН СССР, 1976, **231**, 3.
9. Н. П. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение конденсированных систем. М.: Наука, 1967.
10. В. М. Маслов, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1978, **14**, 5.
11. Г. В. Самсонов, М. М. Антонова, В. В. Морозов. Порошковая металлургия, 1970, 4.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СТРУИ ВОДОРОДА В ВОЗДУХЕ

Ю. И. Данилов, П. П. Кузнецов, С. А. Клевцур
(Москва)

Исследование горения струй нагретого водорода интересно как в плане уточнения представлений о влиянии предпламенных химических реакций на механизм распространения пламени [1], так и в прикладном [2]. Задача данной работы — выяснить размеры факелов горения и определяющие параметры процессов горения высокотемпературных ($300 \leq T \leq 1700$ К) струй водорода при больших скоростях истечения ($800 \leq Re \leq 6000$).

Экспериментальная установка состояла из системы подачи водорода, электрического нагревателя и открытой рабочей части. Водород пропусклся через нагреватель, выполненный в виде трубки, нагреваемой электрическим током, и истекал в воздух через сопло диаметром 1—3 мм. Основная часть экспериментов проведена на установке с горизонтальным направлением оси сопла, контрольные опыты с турбулентными пламенами — на установке с вертикальным направлением оси сопла. В обоих

случаях число Фруда струи $Fr = u^2/(dg) \geq 10^6$, отличий в размерах факелов в зависимости от направления оси сопла не наблюдалось, что совпадает с результатами [3].

В ходе опытов определялись расход водорода, давление и температура водорода перед истечением и характерные размеры светящейся части факела горения. Точность определения расхода газа составляла 10%, давления 2%, температуры ± 50 К, линейных размеров факела 10%. Пуск установки начинался подачей водорода с малым расходом, создавшим на выходе из сопла ламинарный факел. Затем включался электрический нагреватель. В течение опыта постепенно увеличивались мощность нагревателя и расход водорода.

В опытах с ламинарными струями диаметром 2 мм при $Re = 450 \div 1800$ получено, что с ростом T от 500 до 800 К длина ламинарного факела практически от нее не зависит. При $T > 860$ К длина ламинарного факела уменьшается, а при $T > 900$ К начинается турбулизация факела, которая полностью развивается при $T = 950 \div 1150$ К.

На рис. 1 представлены схемы факела и результаты измерений размеров светящейся части факела горения струи нагретого водорода, выполненных в ходе одного опыта при повышении температуры водорода и практически постоянном числе Рейнольдса. В ходе опыта при $T = 800 \div 900$ К возникали крупномасштабные продольные пульсации ко-

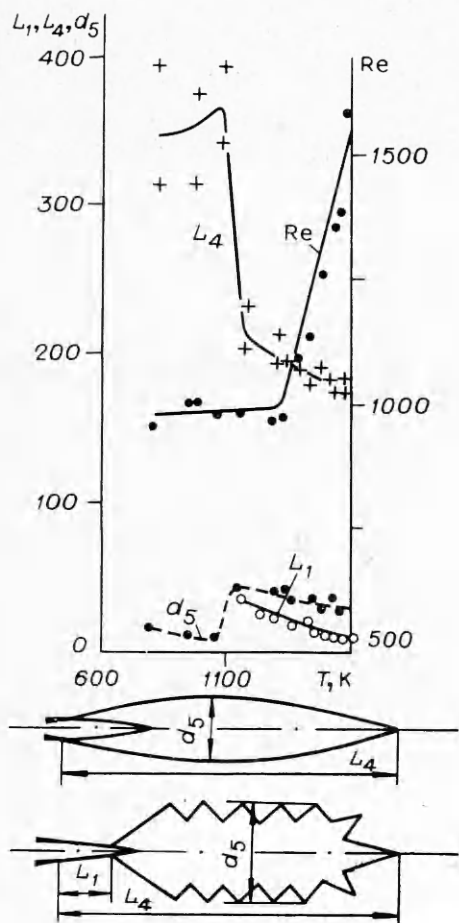


Рис. 1.

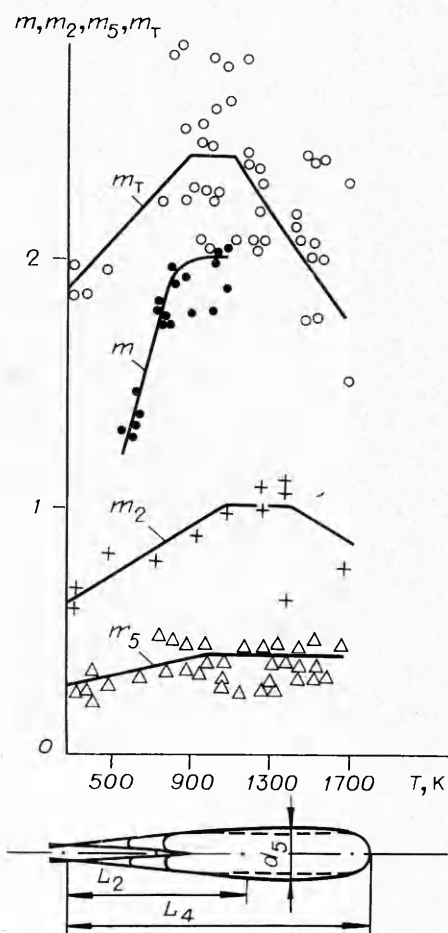


Рис. 2.

нечной части факела. При $T \geq 950$ К на конце факела появляется зона поперечных колебаний, сопровождающихся образованием светящихся турбулентных молей с размерами порядка диаметра невозмущенной части факела в данном сечении. С дальнейшим ростом температуры водорода диаметр турбулентной части факела увеличивается, а граница начала турбулентной зоны приближается к основанию факела и при $T = 1100 \div 1150$ К охватывает практически всю длину факела, за исключением небольшого начального участка L_1 , на котором яркосветящегося фронта пламени нет, а наблюдается слабое голубое свечение по всему объему ламинарного пограничного слоя.

На начальном участке струи в этом случае образуется область, где нет фронта пламени и существует струйный пограничный слой переменного состава по толщине. С повышением температуры водорода в той части пограничного слоя, где присутствует водородно-воздушная смесь с избытком водорода, температура смеси возрастает, по-видимому, до уровня, при котором создаются условия для протекания предпламенных химических реакций.

Переход от предпламенных реакций к реакциям образования конечных продуктов горения вызывает изменение объема газовой смеси, что приводит к нарушению структуры потока и образованию турбулентных молей. Горение происходит по всему объему такого моля, но, поскольку состав его нестехиометрический, для завершения горения требуется некоторое расстояние, на котором происходит смещение моля с необходимым количеством воздуха. Переход от ламинарной части факела к турбулентной похож по форме на переход от ламинарного участка к турбулентному при потере устойчивости течения негорящих струй [4].

В диапазоне температур водорода $1150 < T \leq 1350$ К форма факела горения меняется незначительно, размеры ламинарных турбулизованных факелов практически совпадают с размерами турбулентных факелов, имеющих равный диаметр сопла и одинаковую статическую температуру. Форма турбулентного факела струи нагретого водорода показана на рис. 2. В турбулентном факеле горение также начинается на некотором расстоянии от сопла (оторванный факел), но в отличие от ламинарной струи начальный участок здесь турбулентный.

Светящаяся зона возникает в начальном участке струи на некотором расстоянии от сопла и от установившегося фронта пламени. Наблюдавшиеся в зоне горения турбулентного факела горящие моли имели меньшие размеры, чем аналогичные моли в зоне горения турбулизованных факелов ламинарных струй.

Размеры светящейся части факелов горения — полная длина L_1 , наибольший диаметр d_5 — обработаны с помощью зависимостей, описывающих изменение расхода вещества окружающей среды вдоль оси ламинарной [5] и турбулентной [6] изометрических струй. Конец факела соответствует достижению стехиометрического состава смеси на оси факела [7]. Вывод этих зависимостей аналогичен приведенному в работе [3]. В связи с тем, что струя водорода дозвуковая ($p_a = p_b$, число $Fr \geq 10^6$), подъемные силы в факеле не учитывались.

В отличие от работы [3], в данном случае, аналогично [7], принято, что на оси струи состав смеси стехиометрический, а относительное превышение общего количества воздуха в конечном сечении факела над стехиометрическим охарактеризовано коэффициентом m или m_T для ламинарного и турбулентного факелов соответственно. Из теории струй следует, что в случае негорящих струй величина m или m_T определяется количеством воздуха, подмешавшегося в струе на ее начальном участке, и находится в интервале $1 < m \leq 3$. Как показано ниже, выведенные зависимости удовлетворяют ограничениям, накладываемым теорией струй на величины m и m_T .

Длина светящейся части ламинарного факела определяется из выражения

$$L_i/d = (Re/32)(\mu/\mu_r) \{ m(1 + L_0) - 1 \} (\rho/\rho_r), \quad (1)$$

где $(\rho/\rho_r) = (T_r/T)(M/M_r)$ — отношение плотностей водорода и продуктов горения; T , M , μ , T_r , M_r , μ_r — температура, молекулярный вес и вязкость водорода и продуктов горения; Re , d — число Рейнольдса и диаметр струи водорода; L — стехиометрическое отношение масс воздуха и водорода; m — экспериментальный коэффициент.

Размеры светящейся части турбулентного (см. рис. 2) и турбулизированного ламинарного факелов (см. рис. 1) описываются следующими соотношениями:

$$(L_i/d) = m_r F, (L_2/d) = m_2 F, (D_3/d) = m_3 F, \quad (2)$$

где $F = 3,12(1 + L_0)\sqrt{\rho/\rho_r} = 31,5\sqrt{T_r/T} = 31,5\sqrt{(2400 + 0,277 T_0)/T}$; T_0 — температура торможения струи водорода; m_r , m_2 , m_3 — экспериментальные коэффициенты, значения которых приведены на рис. 2 в зависимости от температуры водорода. Они получены в результате обработки экспериментальных данных по размерам факелов горения струй нагретого водорода.

Из экспериментов следует зависимость формы и размеров факелов горения струй водорода в воздухе не только от числа Re , но и непосредственно от температуры водорода (см. рис. 1). Это можно наблюдать по изменению величин m и m_r от температуры водорода (см. рис. 2). По-видимому, эта зависимость отражает существенное влияние скоростей химических реакций горения, особенно на начальном участке струи, на структуру течения в факеле, в частности на переход ламинарного факела в турбулизированный.

Интересно также прямое сопоставление размеров факелов горения по данным настоящей работы с известными ранее результатами, например с приведенными в работах [3, 8]. В [8] предложена зависимость длины факела горения струй горючих газов от свойств горючего. С целью сопоставления экспериментальных данных и расчетов по формуле [8] последняя применительно к водороду приведена к виду, аналогичному формуле (2)

$$(L_i/d) = 53,5\sqrt{T_r/T}. \quad (3)$$

Величина числового коэффициента в формуле (3) при сопоставлении ее с (2) соответствует $m_r = 1,7$, тогда как в условиях опытов получено $m_r = 1,8 \div 2,4$.

В работе [3] указано, что результаты расчетов совпадают с данными расчетов по формуле [8], если принять средний по конечному сечению факела коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2$.

Таким образом, в проведенных экспериментах при нормальной температуре водорода длина факела практически совпадает с длиной, рассчитанной по формуле [8], и с длиной, рассчитанной по формуле [3] при условии $\alpha = 2$ в конечном сечении факела. С повышением температуры водорода проведенные опыты показывают относительное увеличение длины факела и коэффициента m_r .

В связи с тем, что изменение названных коэффициентов отражает существенное влияние скоростей химических реакций, зависящих от температуры водорода, на структуру течения в факеле, можно ожидать, что величины коэффициентов m_r , m , m_2 и m_3 могут изменяться также в зависимости от диаметра и скорости истечения струи при увеличении последних по сравнению с условиями проведенных опытов.

Поступила в редакцию
17/VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
2. Либби. Ж. амер. ракетного об-ва (русский перевод), 1962, 32, 3.
3. В. К. Баев, П. П. Кузнецов и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
4. Г. П. Абрамович. — В сб.: Турбулентные течения. М.: Наука, 1970.
5. Бай Ш и-И. Теория струй вязкой жидкости. М.: Наука, 1965.
6. Л. А. Вулис, В. П. Кашкаров. Теория струй вязкой жидкости. М.: Наука, 1965.
7. Л. А. Вулис, Ш. А. Ершин, Л. П. Ярип. Основы теории газового факела. Л.: Энергия, 1968.
8. W. R. Hawthorne, D. S. Weddell, H. C. Hottel. Third Symposium of Combustion and Flame and Explosion Phenomena, Baltimore, 1949.

О МЕХАНИЗМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТИТАНА С УГЛЕРОДОМ В ВОЛНЕ ГОРЕНИЯ

А. И. Кирдяшкин, Ю. М. Максимов, Е. А. Некрасов
(Томск)

Существующие представления о механизме горения гетерогенных безгазовых систем, как правило, выделяют лимитирующую роль стадии смешения компонентов в волне горения [1]. Наиболее вероятными путями транспорта компонентов в таких системах к поверхностям раздела фаз (на которых происходит тепловыделение) могут быть процессы взаимной диффузии реагентов в твердом и жидком состоянии, а также процессы фильтрации (капиллярного растекания) жидких компонентов по участкам среды, занятым другим тугоплавким реагентом [1—3]. Реализация того или иного механизма определяется физико-химическими параметрами процесса, агрегатным состоянием компонентов и продуктов реакции в волне горения, а также структурой гетерогенной среды.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению закономерностей горения смесей мелкодисперсного титана с диаметром частиц $r_{Ti} \sim 10^{-2}$ см с углеродом. При таком r_{Ti} стадия капиллярного растекания в соответствии с оценками [3] не должна оказывать заметного влияния на процесс взаимодействия.

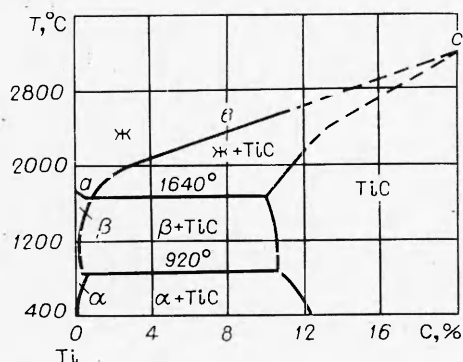


Рис. 1. Диаграмма состояния системы титан — углерод [6].

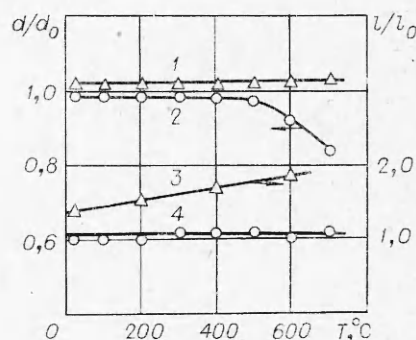


Рис. 2. Зависимость относительного удлинения и изменения диаметра сгоревших образцов от начальной температуры.

1, 3 — Ti+20% С; 2, 4 — Ti+11% С.