

рость горения в конце заряда парастает практически только из-за отсутствия теплообмена на торцевой поверхности ( $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ ). Расчет проведен для короткого заряда, и горение (см. рис. 2, г, кривая 1) не вышло на стационарный режим (согласно расчету сильно меняется давление в зоне горения и ширина зоны спутной фильтрации газа), ввиду чего скорость горения на всем протяжении превышает стационарную.

### Выводы

Рассмотрены характерные нестационарные явления, имеющие место при развитии и завершении горения МГС и связанные со структурой волны горения и условиями тепло- и массообмена через боковую и торцевую поверхности заряда.

Показано, что максимальное значение нестационарной скорости горения и длительность выхода на установившийся режим увеличиваются при наличии спутной фильтрации газа. Максимальное значение нестационарной скорости горения в переходном процессе снижается при газоотводе через торцевую поверхность в начале образца (при газообразовании в зоне ведущей экзотермической реакции). Скорость горения при газоотводе через боковую поверхность (если газообразование происходит в зоне прогрева) возрастает.

Скорость горения перед газонепроницаемой торцевой поверхностью уменьшается и парастает при наличии сброса газа спутного потока в конце заряда. Проявления нестационарных эффектов при завершении горения ослабевают с увеличением газоотвода через боковую поверхность.

Прогнозирование концевых нестационарных явлений возможно при знании условий тепло- и массообмена с окружающей средой, соотношения ширины зоны спутной фильтрации газа и зоны прогрева в волне горения ( $lv_r/a \geq 1$ ), параметра устойчивости стационарного режима горения  $K$ , отношения теплоемкостей газообразного продукта и исходных конденсированных компонентов с учетом их доли в смеси  $j = \frac{c_3 \rho_2 (1 - v)}{[c_1 \rho_1 v + c_2 \rho_2 (1 - v)]}$ . Рост величин  $lv_r/a$ ,  $K$  и  $j$  приводит к усилению концевых эффектов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Щербаков В. А., Сычев А. Е., Штейнберг А. С. Макрокинетика дегазации в процессе СВС // ФГВ.— 1986.— 22, № 4.— С. 55—61.
2. Алдушин А. П. Фильтрационное горение металлов // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах.— М.: Наука, 1988.
3. Шкадинский К. Г., Струвина А. Г. и др. Математическое моделирование горения пористых малогазовых составов // ФГВ.— 1991.— 27, № 5.— С. 84—91.
4. Вспомогательные системы ракетно-космической техники/Под ред. И. В. Тишущина.— М.: Мир, 1970.

*п. Черноголовка*

*Поступила в редакцию 13/VIII 1992,  
после доработки — 23/X 1992*

УДК 614.841.12

*Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, В. Г. Шамонин, С. Г. Цариченко*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ МЕТАНО- И ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ОТ ДАВЛЕНИЯ И СОСТАВА

Численными методами исследована зависимость нормальной скорости горения метано- и водородно-воздушных смесей от давления в диапазоне от 0,005 до 2,0 МПа и состава. Найдено, что чем ближе горючая смесь по своему составу к окислительной, тем ниже величина барического показателя нормальной скорости горения. Показано, что химические реакции в предпламенной зоне не оказывают существенного влияния на нормальную скорость горения бедной метановоздушной смеси.

© Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, В. Г. Шамонин, С. Г. Цариченко, 1993.

Исследованию зависимости нормальной скорости горения  $S_u$  газоздушных смесей от давления и состава посвящено достаточно большое число работ (см., например, [1—6]), однако большая их часть относится к стехиометрическим составам. Для прогнозирования же сгорания парогазовых смесей в технологических аппаратах представляет интерес определение роли давления и для смесей, состав которых отличается от стехиометрического. Имеющиеся данные по  $S_u$  для нестехиометрических составов относятся, как правило, к нормальному атмосферному давлению.

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию зависимости нормальной скорости горения газоздушных смесей от давления и состава на примере таких горючих, как метан и водород, для которых достаточно хорошо известны кинетические схемы процесса.

Проведено численное моделирование процесса распространения ламинарного пламени с детальным учетом как процессов диффузии и теплопроводности, так и кинетики химических реакций. Методика расчета подробно изложена в [5, 7]. Кинетическая схема для метана включала 23 прямые и 23 обратные реакции, константы скоростей которых заимствованы из работы [8]. Кинетическая схема для водорода и соответствующие константы скоростей взяты из [9]. Температура исходной газоздушной смеси принята равной 298 К,  $p = 0,005 \div 2,0$  МПа, объемная концентрация метана  $c_{\text{CH}_4}$  находилась в пределах от нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) до 12 %, концентрация водорода — от 10 до 30 %.

Для установления адекватности используемой модели проведены предварительные расчеты, результаты которых сравнивались с экспериментом (рис. 1). Наблюдалось неплохое согласие, что свидетельствует об определенной надежности методики вычислений, использованной в настоящей работе.

Результаты расчета зависимости  $S_u$  от концентрации метана при различных давлениях представлены на рис. 2. Согласно [1], максимальное значение  $S_u$  реализуется не для стехиометрических, а для слегка богатых смесей. Зависимость  $S_u(p)$  при  $c_{\text{CH}_4} = 9,5$  % (стехиометрическая смесь), полученная в настоящей работе, находится в удовлетворительном согласии с имеющимися литературными данными и может быть с хорошей точностью описана эмпирической формулой

$$S_u = S_{u0}(p/p_0)^n, \quad (1)$$

где  $S_u$ ,  $S_{u0}$  — значения нормальной скорости горения при давлениях  $p$  и  $p_0$  соответственно;  $n$  — барический показатель нормальной скорости горения. Для стехиометрических метановоздушных смесей  $n = -0,5$  [1] (рис. 3).

Как и ожидалось, значение  $S_u$  метановоздушных смесей существенно уменьшается с ростом давления для всех изученных составов смесей (см. рис. 2). При этом изменяется и величина  $n$  в формуле (1). Так, при  $[\text{CH}_4] = 8, 7,5$  и  $7$  %  $n = -0,64 \div 0,54, -0,59 \div -0,78$  и  $-0,9$  соответственно, т. е. по мере приближения к концентрационному пределу распространения пламени величина барического показателя уменьшается. Качественно аналогичная тенденция обнаружена в [6] при разбавлении водородно-воздушных смесей водяным паром.

Экстраполяция зависимости  $S_u(p)$  на рис. 2 к  $S_u = 0$  дает приближенные значения НКПР метановоздушных смесей при различных давлениях, которые представлены на рис. 2, б. Наблюдается рост НКПР с увеличением  $p$  как в области пониженных давлений, так и в области давлений выше атмосферного. Данные при  $p < 1$  атм качественно совпадают с результатами экспериментов [12]. В работах [13, 14] показано, что НКПР метана в воздухе при  $p > 1$  атм от значения  $p$  практически не зависит. Причина указанного различия не ясна.

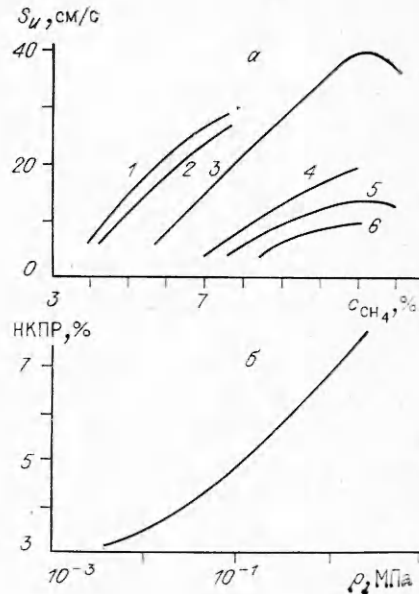
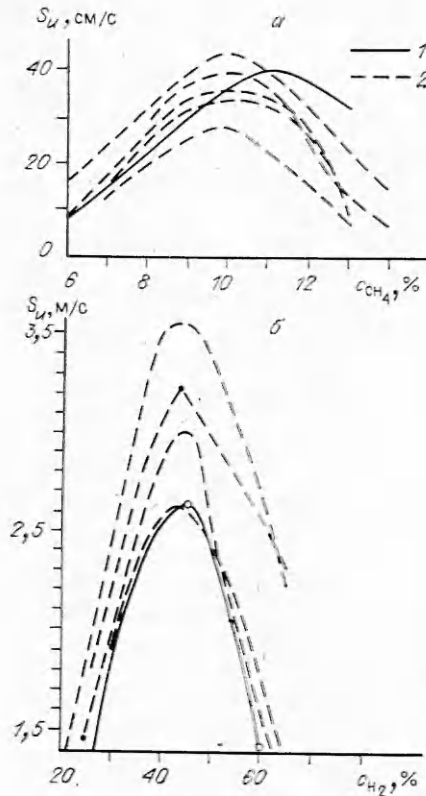


Рис. 2. Зависимость нормальной скорости горения (а) и НКПР (б) метана от концентрации и давления.

$p$ , МПа: 1 — 0,005, 2 — 0,01, 3 — 0,1, 4 — 0,5, 5 — 1,0, 6 — 2,0.

Рис. 1. Зависимость нормальной скорости горения  $S_u$  метана (а) и водорода (б) от состава горючей смеси при атмосферном давлении.

1 — расчет; 2 — экспериментальные кривые из [1] (для метана) и [10] (для водорода).

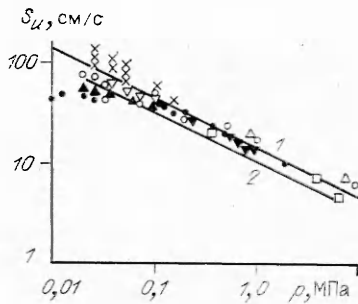


Рис. 3. Влияние давления на нормальную скорость горения стехиометрической метановоздушной смеси (экспериментальные точки заимствованы из [1]).

1 — эмпирическая аппроксимация работы [1]; 2 — результаты расчета настоящей работы.

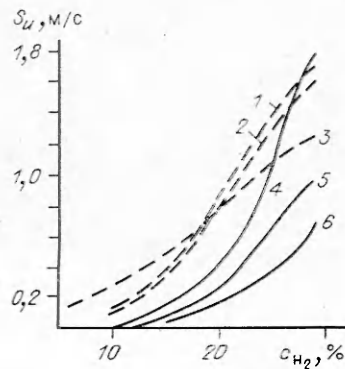


Рис. 4. Зависимость нормальной скорости горения водорода от концентрации и давления.

— расчет для  $k_i$  из [9]; ---- расчет для  $k_i$ , уменьшенных в 100 раз.  $p$ , МПа: 1, 6 — 1,0, 2, 5 — 0,5, 3, 4 — 0,1.

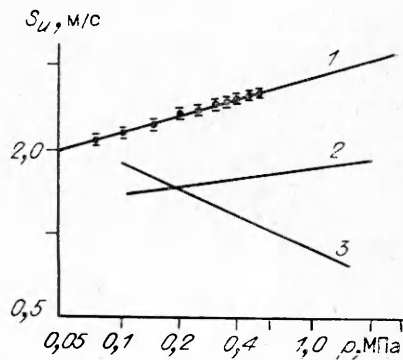
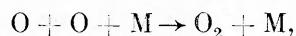
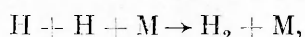
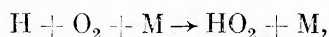


Рис. 5. Зависимость  $S_u(p)$  для стехиометрической водородно-воздушной смеси.

1 — экспериментальные данные [11]; 2 — расчет для  $k_i$ , уменьшенных в 100 раз; 3 — расчет для  $k_i$  из [9].

В [15] изучена взаимосвязь кинетики тримолекулярных реакций во фронте пламени и барического показателя нормальной скорости горения. Найдено, что чем выше константы скоростей тримолекулярных реакций при прочих неизменных условиях, тем меньше значение  $n$ . Как известно [11], величина  $S_u$  для стехиометрических водородно-воздушных смесей растет с увеличением  $p$ , однако в работе [15] указанный рост удалось смоделировать лишь при значениях констант скоростей тримолекулярных реакций



уменьшенных по сравнению с приведенными в [8] в 100 раз. В связи с этим расчеты  $S_u$  для водородно-воздушных смесей в настоящей работе выполнены как с использованием констант скоростей  $k_i$  указанных выше тримолекулярных реакций из работы [9], так и для случая  $k_i$ , уменьшенных в 100 раз (на фактор 100 разделены предэкспоненциальные факторы в аррениусовской формуле для константы скорости).

Результаты расчетов представлены на рис. 4, 5. Видно, что для стехиометрических водородно-воздушных смесей расчет дает значение  $n$ , достаточно близкое к экспериментальному, лишь при уменьшении в 100 раз величин  $k_i$ . Причина этого, по-видимому, заключается в неточности величин  $k_i$  из работы [9] для указанных выше тримолекулярных реакций.

Как и в случае метановоздушных смесей,  $S_u$  уменьшается с приближением к нижнему концентрационному пределу распространения пламени. Однако при этом характер изменения  $S_u$  с концентрацией горючего в околопредельных смесях несколько иной, чем для метана. Различие заключается в разнице знаков вторых производных  $S_u$  по концентрации, т. е. в характере выпуклости (вогнутости) кривой. В соответствии с данными [15], для значений  $k_i$  из работы [8] (вариант 1) величина  $n$  для стехиометрических смесей отрицательна, а для  $k_i$ , уменьшенных в 100 раз (вариант 2), положительна. Если для варианта 1 величина  $n$  остается отрицательной для всех исследованных концентраций водорода, то для варианта 2 при  $c_{\text{H}_2} \approx 18 \div 20\%$  наблюдается изменение знака  $n$ , т. е. при  $c_{\text{H}_2} < 18\%$   $S_u$  уменьшается с ростом  $p$ . Этот результат качественно согласуется с экспериментом [4], где показано, что для водородно-воздушных смесей, по составу близких к предельным, величина  $n$  отрицательна. При этом наблюдается та же качественная тенденция, что и для метановоздушных смесей, а именно: с приближением состава смеси к пределу величина  $n$  уменьшается. Вероятно, это — общая тенденция изменения нормальной скорости горения газовых смесей при изменении их состава.

Как и в случае метановоздушных смесей, качественно проанализирована зависимость НКПР, определенного с помощью экстраполяции  $S_u$  к нулевому значению, от давления. Наблюдается рост НКПР с увеличением  $p$ . Это качественно согласуется с имеющимися экспериментальными данными [13].

В работе [7] рассмотрены влияние химических реакций в различных областях

$c_{\text{H}_2}, \%$	$T_{\text{кр}}, \text{K}$	$S_u, \text{м/с}$
6,0	300	0,08
	1000	0,07
	1200	0,07
	1400	0,07
7,0	300	0,15
	1000	0,12
	1200	0,12
	1400	0,12
8,0	300	0,21
	1400	0,16
9,5	300	0,34 *
	800	0,34 *
	1200	0,33 *
	1600	0,25 *
	1800	0,14 *

\* Данные [7].

фронта пламени на величину нормальной скорости горения и профили концентраций реагентов и продуктов реакций для стехиометрической метановоздушной смеси. Найдено, что равенство нулю констант скоростей всех химических процессов при температуре ниже  $T_{кр} \approx 1400$  К несущественно сказывается на величине  $S_u$ , т. е. химические реакции в предпламенной зоне не оказывают заметного влияния на нормальную скорость горения.

Представляет интерес исследовать, каким образом изменится величина  $T_{кр}$  при переходе от стехиометрических к околопредельным смесям. С этой целью рассчитаны нормальные скорости горения метановоздушных смесей при  $c_{CH_4} = 6 \div 9,5\%$  в предположении, что константы скоростей всех химических реакций при  $T < T_{кр}$  равны нулю, как это сделано в работе [7]. Результаты представлены в таблице, откуда следует, что  $S_u$  относительно слабо зависит от  $T_{кр} < 1400$  К, т. е. химические реакции в предпламенной зоне фронта слабо влияют на величину  $S_u$ .

Таким образом, в настоящей работе численно исследована зависимость нормальной скорости горения метановоздушных смесей от давления и состава. Найдено, что чем ближе горючая смесь по своему составу к околопредельной, тем ниже величина барического показателя нормальной скорости горения. Показано, что наличие или отсутствие химических реакций в предпламенной зоне слабо влияет на величину  $S_u$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Anderews G. E., Bradley D. The burning velocity of methane-air mixtures // *Combust. Flame.*— 1972.— 19, N 2.— P. 275—288.
2. Behrendt F., Warnatz J. The dependence of flame propagation in  $H_2 - O_2 - N_2$  mixtures on temperature, pressure and initial composition // *Int. J. Hydrogen Energy.*— 1985.— 10, N 11.— P. 749—755.
3. Басевич В. Я., Беляев А. А., Новожилов Б. В. и др. Численное исследование ламнарного распространения характеристик пламени для определения физико-химических характеристик горючей смеси // *Горение гетерогенных и газовых смесей: Материалы VIII Всесоюз. симп. по горению и взрыву.*—Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1986.— С. 8—11.
4. Бабкин В. С., Вьюн А. В. Ингибирование водородно-воздушных пламен при высоких давлениях // *ФГВ.*— 1981.— 17, № 5.— С. 8—13.
5. Мольков В. В., Шамонин В. Г., Баратов А. Н. Распространение пламени гомогенной газовой смеси при повышенных давлениях и температурах // *Горение гетерогенных и газовых систем: Материалы VIII Всесоюз. симп. по горению и взрыву.*—Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1986.— С. 11—14.
6. Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Цариченко С. Г. и др. Влияние начального давления и температуры на характеристики горения водородсодержащих смесей // *ФГВ.*— 1989.— 25, № 3.— С. 32—36.
7. Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Баратов А. Н. и др. Влияние процессов переноса на распространение метановоздушного пламени // *Там же.*— 1988.— 24, № 5.— С. 79—83.
8. Smoot L. D., Hecker W. G., Williams G. A. Prediction of propagation methane-air flames // *Combust. Flame.*— 1976.— 26, N 3.— P. 323—342.
9. Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Баратов А. П. и др. Численное моделирование распространения водородовоздушного пламени с переменными коэффициентами переноса // *ФГВ.*— 1989.— 25, № 5.— С. 54—58.
10. Liu D. D. S., Mac Farlane R. Laminar burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-air-steam flames // *Combust. Flame.*— 1983.— 49, N 1—3.— P. 59—71.
11. Iijima T., Takeno T. Effects of temperature and pressure on burning velocity // *Ibid.*— 1986.— 65, N 1.— P. 35—43.
12. Essegir M., Polymeropoulos C. E. Spark ignition of near the lean limit  $CH_4 - air$  mixtures at low pressures // *Ibid.*— 1988.— 73, N 1.— P. 99—105.
13. Coward H. F., Jones G. W. Limits of flammability of gases and vapors. Bull. 503. Bureau of Mines.— Washington, 1952.— 144 p.
14. Zabetakis M. G. Flammability characteristics of combustible gases and vapors. Bull. 627. Bureau of Mines.— Washington, 1965.— 121 p.

15. Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Шамонин В. Г. и др. О взаимосвязи барического показателя нормальной скорости горения газозвоздушных смесей и кинетики тримолекулярных реакций во фронте пламени // ФГВ.— 1991.— 27, № 2.— С. 46—49.

г. Балашиха

Поступила в редакцию 27/IX 1991,  
после доработки — 10/1 1993

УДК 536.46

А. В. Флорко, В. В. Головки

## ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ И УСЛОВИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ ОКСИД ПРИ ГОРЕНИИ МАГНИЯ

В диапазоне  $p = 10^4 \div 10^5$  Па исследованы излучательные характеристики зоны горения частиц MgO. Определены факторы эффективности поглощения  $Q_a$  частиц MgO для различных длин волн и температур. Определена глубина залегания уровней в запрещенной зоне  $E_g = 3,3 \pm 0,4$  эВ, обуславливающих высокие значения величин  $Q_a$ . Исследован состав зоны реакции, определяющей возникновение дефектов кристаллической решетки MgO и влияющей на режим конденсации.

Влияние внешнего давления и температуры на оптические характеристики дисперсных продуктов сгорания магния. В работе [1] показано, что излучение конденсированной фазы продуктов сгорания частиц Mg существенно несерое. Это объясняется зависимостью факторов эффективности поглощения  $Q_a$  субмикронных частиц MgO от длины волны и связывается с размерными эффектами [2]. Полученные величины на 2—3 порядка отличаются от рассчитанных в [3] и не могут быть объяснены только температурной зависимостью собственной проводимости кристаллов MgO. В связи с этим цель настоящей работы — выяснение механизма, обеспечивающего высокие значения факторов  $Q_a$ , а также изучение условий зарождения и роста субмикронных частиц оксид магния.

Эксперименты проводились с частицами Mg радиусом 1—3 мкм в диапазоне давлений  $p = 10^4 \div 10^5$  Па на установке, описанной в [4]. Сплошной спектр излучения регистрировался скоростным спектральным прибором, изготовленным на основе интерференционных клиньев [1]. Молекулярный и атомарный спектры исследовались с помощью сканирующего дифракционного прибора, позволяющего регистрировать до 100 спектров в секунду. В качестве эталонного источника использовалась светоизмерительная лампа СИ-10-300.

На рис. 1 приведены зависимости спектральной светимости  $r_\lambda$  зоны конденсации горящих частиц Mg от длины волны  $\lambda$ . Все кривые для  $p > 10^4$  Па имеют локальный пепиновский максимум, что свидетельствует о несерости источника излучения. Сильная зависимость  $r_\lambda$  от  $p$  обусловлена уменьшением концентрации частиц оксид магния и температуры в зоне горения с понижением внешнего давления. По данным рис. 1 и температурам, приведенным в работе [5], рассчитаны спектральные коэффициенты черноты  $\epsilon_\lambda = r_\lambda / r_{\lambda,b}$ , где  $r_{\lambda,b}$  — спектральная светимость абсолютно черного тела.

На рис. 2 представлены зависимости  $\epsilon_\lambda$  зоны конденсации от  $\lambda^2$  для различных давлений. Видно, что ход зависимостей при всех давлениях среды подобен, однако абсолютные значения существенно отличаются. Значение температуры в зоне реакции хорошо аппроксимируется функцией

$$T = 2630 + 87 \ln \left( \frac{p}{10^5} \right).$$

© А. В. Флорко, В. В. Головки, 1993.

2 Физика горения и взрыва № 5. 1993 г.

17