

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА НОРМАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ*

А. В. Арутюнов¹, А. А. Беляев², И. Н. Иновенков³, В. С. Арутюнов⁴

Аннотация: Скорость ламинарного пламени стехиометрических смесей метан–водород–воздух в диапазоне начальных температур 300–600 К определена путем кинетического моделирования процесса. Показано, что современные кинетические модели адекватно описывают такие пламена. При низких концентрациях водорода $[H_2] < 50\%$ удовлетворительное описание может быть получено даже в рамках простого глобального механизма. В исследованном диапазоне начальных температур при концентрации водорода в смеси менее 50% его присутствие слабо сказывается на скорости ламинарного пламени. Однако по мере увеличения начальной температуры влияние водорода на скорость пламени проявляется при более низких концентрациях водорода.

Ключевые слова: метан; водород; нормальная скорость пламени

DOI: 10.30826/CE19120401

Введение

Среди наиболее важных проблем на пути дальнейшего развития энергетики — повышение эффективности использования топлива и снижение экологически вредных выбросов при производстве энергии. Один из широко обсуждаемых путей решения этих задач — добавление к углеводородному топливу, в первую очередь к природному газу (метану), водорода или синтез-газа, в котором водород является одним из двух основных компонентов. Это делает необходимым тщательное исследование процесса горения метановодородных смесей.

К числу основных параметров, характеризующих горение углеводородных топлив, относятся задержка самовоспламенения и нормальная скорость горения. Проведенные нами экспериментальные исследования задержки самовоспламенения стехиометрических смесей метан–водород–воздух и кинетическое моделирование процесса их воспламенения, а также моделирование их воспламенения в двигателе внутреннего сгорания [1], выявили ряд интересных и неожиданных особенностей в поведении таких смесей. Было показано существенное различие в температурной зависимости задержек самовоспламенения метана и водорода,

связанное с принципиальными отличиями в механизмах их окисления. Нами была также экспериментально определена нормальная скорость горения метано–водородных смесей при повышенных (1–10 атм) давлениях и температурах (до 300 °С) методом бомбы постоянного объема [2]. Установлено, что небольшие добавки водорода практически не сказываются на горении метана, а заметное повышение скорости горения наблюдается при добавлении к метану не менее 20 % (об.) водорода.

Нормальная скорость ламинарного пламени является важной характеристикой процесса горения газообразного топлива. Ее величина определяет устойчивость горения и условия подачи газовой смеси для обеспечения дефлаграционного режима, поэтому ее исследование для метановодородных смесей крайне важно. Известен ряд работ, посвященных экспериментальному исследованию скорости ламинарного пламени воздушных смесей метана с добавками водорода [2–15]. В этих работах показано, что добавление водорода к метановоздушным смесям увеличивает нормальную скорость ламинарного пламени и расширяет пределы его распространения, хотя для заметного эффекта эти добавки должны быть значительными. В то же

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90022\19 «Аспиранты».

¹ Федеральний исследовательський центр хімічної фізики ім. Н. Н. Семёнова Російської академії наук; Московський державний університет ім. М. В. Ломоносова, aarutyunov@gmail.com

² Федеральний дослідницький центр хімічної фізики ім. Н. Н. Семёнова Російської академії наук, belyaevIHF@yandex.ru

³ Московський державний університет ім. М. В. Ломоносова, inov@cs.msu.su

⁴ Федеральний дослідницький центр хімічної фізики ім. Н. Н. Семёнова Російської академії наук; Московський державний університет ім. М. В. Ломоносова, arutyunov@chph.ras.ru

время пока мало данных по скорости пламени при повышенных начальных температурах. Для смесей метан–водород–воздух с начальной температурой выше 450 К такие данные фактически отсутствуют. Впрочем, и для температур ниже 450 К (но выше комнатной) имеется информация о скоростях ламинарного пламени лишь при небольших добавках водорода. Известно только, что увеличение начальной температуры смеси повышает скорость пламени, но данных о количественном влиянии добавок водорода на это повышение нет. Чтобы восполнить этот пробел, в данной работе численным моделированием были определены скорости ламинарного пламени смесей метана и водорода с воздухом при повышенных начальных температурах.

В расчетах использовали кинетический механизм NUI Galway [16, 17]. Ранее на основе кинетической модели NUI Galway было получено вполне удовлетворительное описание процесса самовоспламенения как в смесях метан–водород–воздух [1], так и в смесях метана с легкими алканами в воздухе [18]. Основные вычисления проводили с использованием пакета программ CHEMKIN III [19]. Исследование проводили для смесей стехиометрического состава при начальном атмосферном давлении.

Результаты расчетов

Прежде чем проводить расчеты при повышенных начальных температурах, адекватность применения кинетического механизма NUI Galway была проверена на экспериментах при комнатной начальной температуре исходной смеси, для которой

имеется значительно больше экспериментальных данных.

Наряду с расчетами по модели NUI Galway для некоторых случаев проводили расчеты с использованием глобального кинетического механизма горения метана, включающего 10 реакций с участием 9 компонент (CH_4 , O_2 , CO , CO_2 , H_2 , H_2O , N_2 , NO и условный радикал $\text{HO}_{0.5}$) [20, 21]. Данный механизм неоднократно проверялся при расчетах процессов самовоспламенения и распространения ламинарных пламен. В условиях данной работы он вполне удовлетворительно описывал процесс при небольших концентрациях водорода, но при больших его концентрациях становился непригодным. При использовании кинетического механизма [20, 21] (условно будем называть его ГМ — глобальная модель) расчеты проводили с помощью вычислительной программы, разработанной в ИХФ РАН. В расчетах использовали параметр α_{H_2} , определяющий мольную долю водорода в топливе:

$$\alpha_{\text{H}_2} = \frac{X_{\text{H}_2}}{X_{\text{CH}_4} + X_{\text{H}_2}}, \quad (1)$$

где X_{CH_4} и X_{H_2} — мольные доли водорода и метана в смеси топлива с воздухом.

На рис. 1 представлены результаты сравнения рассчитанных значений скорости ламинарного пламени u_n с экспериментальными данными работ [2, 3, 5–10, 22–25] для смесей метан–водород–воздух при начальной температуре 298 К и изменении доли водорода от 0 до 1. Поскольку скорость водородно-воздушного пламени примерно в 7 раз больше скорости метановоздушного пламени, то для наглядности представления результа-

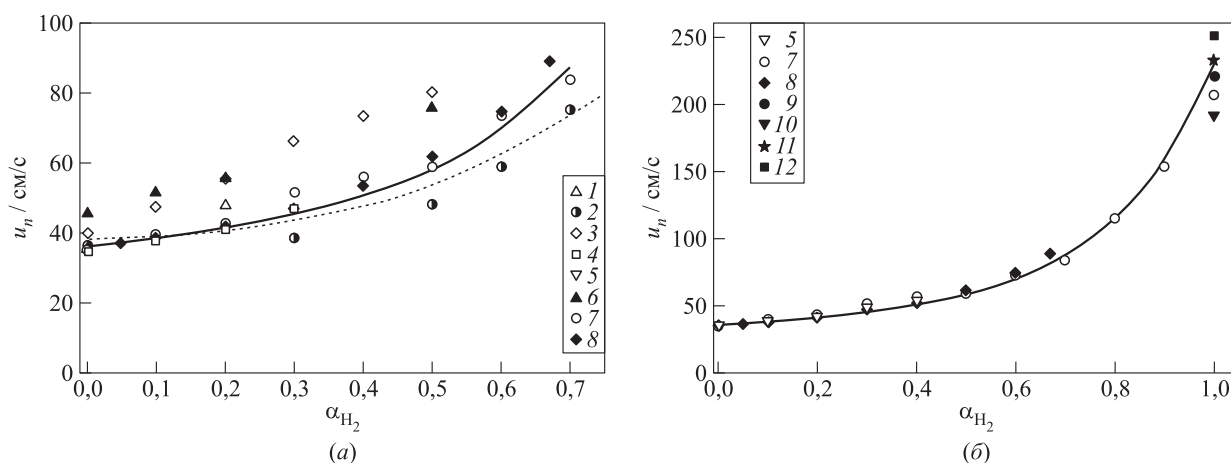


Рис. 1 Зависимость скорости ламинарного пламени в стехиометрических смесях метан–водород–воздух от добавок водорода при $T_0 = 293$ К. Линии — расчет (сплошные — NUI Galway, пунктирная — глобальный механизм); символы — экспериментальные значения (1 — [2]; 2 — [3]; 3 — [5]; 4 — [6]; 5 — [7]; 6 — [8]; 7 — [9]; 8 — [10]; 9 — [22]; 10 — [23]; 11 — [24]; 12 — [25])

тов на рис. 1, а приведены данные для $0 \leq \alpha_{\text{H}_2} \leq 0,7$, а на рис. 1, б — для всего интервала изменения α_{H_2} . На рис. 1, а представлены также расчеты с использованием ГМ. Экспериментальные результаты различных работ достаточно сильно различаются между собой. Тем не менее расчетная зависимость, полученная на основе модели NUI Galway, вполне укладывается в разброс экспериментальных значений. При небольших значениях α_{H_2} расчеты по обоим кинетическим механизмам дают близкие результаты.

Учитывая полученное удовлетворительное согласие для комнатной начальной температуры, провели серию расчетов для повышенных начальных температур. На рис. 2 сопоставлены рас-

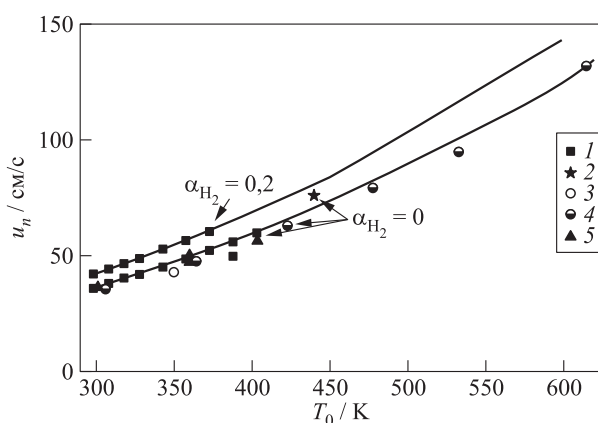


Рис. 2 Расчетная и экспериментальная зависимости скорости ламинарного пламени от начальной температуры при $\alpha_{\text{H}_2} = 0$ и 0,2; линии — расчет по NUI Galway; символы — эксперименты (1 — [7]; 2 — [13]; 3 — [15]; 4 — [26]; 5 — [27])

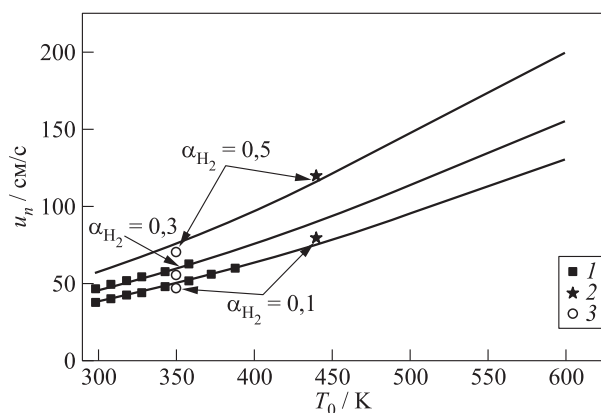


Рис. 3 Расчетная и экспериментальная зависимости скорости ламинарного пламени от начальной температуры при $\alpha_{\text{H}_2} = 0,1, 0,3$ и 0,5. Линии — расчет по NUI Galway; символы — эксперименты (1 — [7]; 2 — [13]; 3 — [15])

четные и экспериментальные значения нормальной скорости ламинарного пламени для смесей метана с воздухом и смеси метан–водород–воздух с $\alpha_{\text{H}_2} = 0,2$ при разных начальных температурах. Аналогичное сопоставление для смесей метан–водород–воздух с $\alpha_{\text{H}_2} = 0,1, 0,3$ и 0,5 представлено на рис. 3, а с $\alpha_{\text{H}_2} = 0,9$ и для водородно-воздушной смеси — на рис. 4. Рассчитанные значения вполне удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Несколько хуже согласие для водородно-воздушного пламени, но нужно признать, что здесь есть большой разброс и в экспериментальных данных.

На рис. 5 показаны расчетные зависимости скорости ламинарного пламени от концентрации водорода при начальных температурах 300, 400, 500 и 600 К. Рисунок 5 наглядно демонстрирует, что, в полном соответствии с ранее полученными экспериментальными данными [2], добавление водорода к метановоздушной смеси сначала слабо сказывается на скорости ламинарного пламени, но по мере увеличения доли водорода в топливе начинается быстрый рост величины u_n . При этом, чем выше температура исходной смеси, тем раньше начинается резкий подъем кривой $u_n(\alpha_{\text{H}_2})$.

В качестве индикатора влияния добавок водорода на полноту сгорания топлива и, следовательно, эмиссионных характеристик процесса горения, интересно оценить изменение максимальной концентрации образующегося в пламени оксида углерода (CO) по мере увеличения концентрации водорода в метане и изменения начальной температуры процесса горения.

На рис. 6 представлена зависимость максимальной мольной доли оксида углерода во фронте пла-

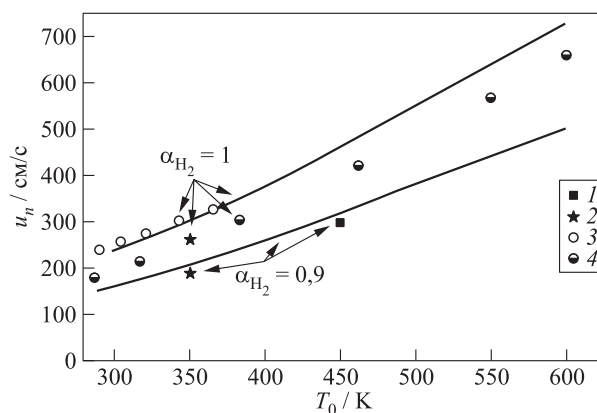


Рис. 4 Расчетная и экспериментальная зависимости скорости ламинарного пламени от начальной температуры при $\alpha_{\text{H}_2} = 0,9$ и 1. Линии — расчет по NUI Galway; символы — эксперименты (1 — [14]; 2 — [15]; 3 — [24]; 4 — [28])

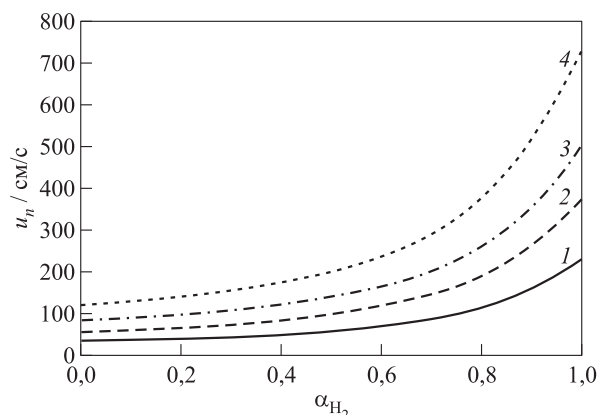


Рис. 5 Расчетные зависимости скорости ламинарного пламени от доли водорода в топливе при начальных температурах T_0 : 1 — 300 К; 2 — 400; 3 — 500; 4 — 600 К

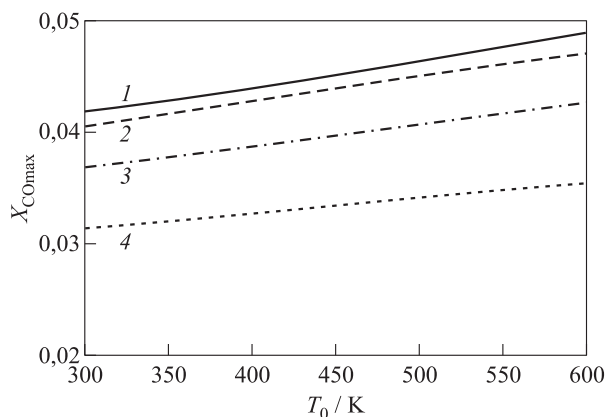


Рис. 6 Расчетная зависимость максимальной мольной доли CO от начальной температуры при разных значениях α_{H_2} : 1 — 0; 2 — 0,2; 3 — 0,5; 4 — 0,7

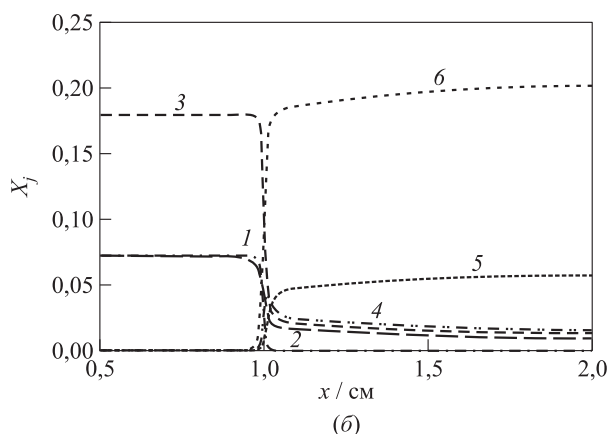
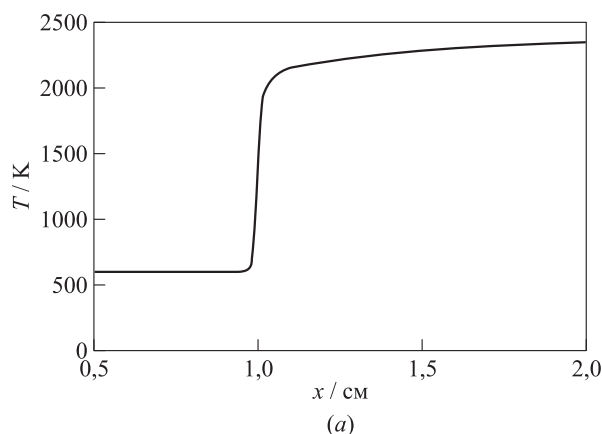


Рис. 7 Расчетные распределения по зоне пламени температуры (а) и мольных долей CH_4 (1), H_2 (2), O_2 (3), CO (4), CO_2 (5) и H_2O (б) при $T_0 = 600$ К и $\alpha_{H_2} = 0,5$

мени от начальной температуры смеси при разных начальных концентрациях водорода. С увеличением начальной температуры максимальная доля CO растет, однако по мере добавления водорода в топливо этот рост замедляется, хотя и довольно слабо. Максимального значения концентрация CO достигает во фронте пламени, а в продуктах она ниже.

Распределение температуры и мольных долей основных компонент газовой смеси по зоне пламени показано на рис. 7.

Выводы

Полученные результаты показывают, что современные кинетические модели, в частности, NUI Galway, вполне удовлетворительно описывают скорость распространения пламени в стехиометрических смесях метан–водород–воздух в широком диапазоне начальных температур от 300 до 600 К.

При концентрации водорода $[H_2] < 50\%$ вполне удовлетворительное описание может быть получено даже в рамках простого глобального механизма работ [20, 21]. Во всем исследованном диапазоне начальных температур при концентрации водорода в метане менее 50% его присутствие слабо сказывается на скорости ламинарного пламени. Только при более значительной доле водорода в топливе начинается быстрый рост величины u_n . По мере увеличения начальной температуры смеси заметный рост скорости горения начинается при более низких концентрациях водорода.

Литература

1. Арутюнов В. С., Беляев А. А., Трошин К. Я., Арутюнов А. В., Царенко А. А., Никитин А. В. Об использовании метан-водородных смесей в ДВС // НефтеГаз-Химия, 2019. № 3.

2. Трошин К. Я., Борисов А. А., Рахметов А. Н., Арутюнов В. С., Политенкова Г. Г. Скорость горения метан-водородных смесей при повышенных давлениях и температурах // Хим. физика, 2013. Т. 32. № 5. С. 76–87.
3. Sholte T. G., Vaags P. B. Burning velocities of mixtures of hydrogen, carbon monoxide and methane with air // Combust. Flame, 1959. Vol. 3. P. 511–524.
4. Milton B. E., Keck J. C. Laminar burning velocities in stoichiometric hydrogen and hydrogen–hydrocarbon gas mixtures // Combust. Flame, 1984. Vol. 58. P. 13–22.
5. Yu G., Law C. K., Wu C. K. Laminar flame speeds of hydrocarbon + air mixtures with hydrogen addition // Combust. Flame, 1986. Vol. 63(3). P. 339–347.
6. Halter F., Chauveau C., Djebaili-Chaumeix N., Gokalp I. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures // P. Combust. Inst., 2005. Vol. 30. P. 201–208.
7. Hermanns R. T. E. Laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures / Proefschrift. — Technische Universiteit Eindhoven, 2007. 150 p. <http://alexandria.tue.nl/extra2/200711972.pdf>.
8. Burluka A. A., Fairweather M., Ormsby M. P., Sheppard C. G. W., Woolley R. The laminar burning properties of premixed methane–hydrogen flames determined using a novel analysis method // 3rd European Combust. Meeting, 2007.
9. Hu E., Huang Z., He J., Jin Ch., Zheng J. Experimental and numerical study of laminar burning characteristics of premixed methane–hydrogen–air flames // Int. J. Hydrogen Energ., 2009. Vol. 34. P. 4876–4888.
10. Dirrenberger P., Le Gall H., Bounaceur R., Herbinet O., Glaude P.-A., Konnov A., Battin-Leclerc F. Measurements of laminar flame velocity for components of natural gas // Energ. Fuel., 2011. Vol. 25(9). P. 3875–3884.
11. Goswami M., Derks S., Coumans K., de Anderade Olivera M. H., Konnov A. A., Bastiaans R. J. M., Luijten C. C. M., de Goey P. H. Effect of elevated pressures on laminar burning velocity of methane + air mixtures // 23rd ICDERS. — Irvine, CA, USA, 2011.
12. Moccia V., D'Alessio J. Burning behaviour of high-pressure CH₄–H₂–air mixtures // Energies, 2013. Vol. 6. P. 97–116.
13. Gockeler K., Albin E., Kruger O., Paschereit C. O. Burning velocities of hydrogen–methane–air mixtures at highly steam-diluted conditions // 4th Conference (International) on Jets, Wakes and Separated Flows. — Nagoya, Japan, 2013.
14. Donohoe N., Heufer A., Metcalfe W. K., Curran H. J., Davis M. L., Mathieu O., Plichta D., Morones A., Petersen E. L., Guthe F. Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures // Combust. Flame, 2014. Vol. 161. P. 1432–1443.
15. Okafor E. C., Hayakawa A., Nagano Yu., Kitagawa T. Effects of hydrogen concentration on premixed laminar flames of hydrogen–methane–air // Int. J. Hydrogen Energ., 2014. Vol. 39. P. 2409–2417.
16. Healy D., Kalitan D. M., Aul C. J., Petersen E. L., Bourque G., Curran H. J. Oxidation of C₁–C₅ alkane quaternary natural gas mixtures at high pressures // Energ. Fuel., 2010. Vol. 24. No. 3. P. 1521–1528.
17. Combustion Chemistry Center at NUI Galway: Database Mechanism of Natural Gas (including C₅) Oxidation. http://c3.nuigalway.ie/media/researchcentres/combustionchemistrycentre/files/mechanismdownloads/nc5_49_mech.dat.
18. Никитин А. В., Трошин К. Я., Беляев А. А., Арутюнов А. В., Кирюшин А. А., Арутюнов В. С. Газомоторное топливо из попутного нефтяного газа. Селективный окискрекинг тяжелых компонентов ПНГ // Нефте-ГазХимия, 2018. № 3. С. 22–34.
19. Kee R. J., Rupley F. M., Meeks E., Miller J. A. CHEMKIN III. Livermore, CA, USA: Sandia National Laboratories, 1996. Technical Report No. SAND96-8216.
20. Басевич В. Я., Беляев А. А., Фролов С. М. «Глобальные» кинетические механизмы для расчета турбулентных реагирующих течений. Ч. I. Основной химический процесс тепловыделения // Хим. физика, 1998. Т. 17. № 9. С. 112–128.
21. Басевич В. Я., Беляев А. А., Фролов С. М. «Глобальные» кинетические механизмы для расчета турбулентных реагирующих течений. Ч. II. Образование окиси азота // Хим. физика, 1998. Т. 17. № 10. С. 71–79.
22. Козаченко Л. С. Исследование зависимости скорости распространения пламени от физико-химических свойств топлива и аэродинамики течения газа: Дис. . . . д-ра физ.-мат. наук. — М.: ИХФ АН СССР, 1954.
23. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах / Пер. с англ. — М.: Мир, 1968. 592 с. (Lewis B., von Elbe G. Combustion, flames and explosions of gases. — New York, NY, USA: Academic Press, 1961. 731 p.)
24. Iijima T., Takeno T. Effects of temperature and pressure on burning velocity // Combust. Flame, 1986. Vol. 65. No. 1. P. 35–43.
25. Shebeko Yu. N., Tsarichenko S. G., Korolchenko A. Ya., Truneev A. V., Navzenya V. Yu., Parkov S. N. Burning velocities and flammability limits of gaseous mixtures at elevated temperatures and pressures // Combust. Flame, 1995. Vol. 102. No. 4. P. 427–437.
26. Zabetakis M. G. Flammability characteristics of combustible gases and vapors // Washington, D.C., USA: U.S. Bureau of Mines, 1965. No. 627.
27. Gu X. J., Haq M. Z., Lawes M., Woolley R. Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane–air mixtures // Combust. Flame, 2000. Vol. 121. No. 1–2. P. 41–58.
28. Heimeel S. Effect of initial mixture temperature on burning velocity of hydrogen–air mixtures with preheating and simulated preburning. NACA TN 4156, 1957.

Поступила в редакцию 08.10.19

THE INFLUENCE OF HYDROGEN ON THE BURNING VELOCITY OF METHANE–AIR MIXTURES AT ELEVATED TEMPERATURES

A. V. Arutyunov^{1,2}, A. A. Belyaev¹, I. N. Inovenkov², and V. S. Arutyunov^{1,2}

¹N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

²M. V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation

Abstract: The laminar burning velocity of stoichiometric methane–hydrogen–air mixtures was determined in the initial temperature range of 300–600 K by kinetic modeling. It was shown that the modern kinetic models adequately describe such flames. At low concentrations of hydrogen (< 50%) satisfactory description can be obtained by using a simple overall mechanism. The presence of hydrogen has a little effect on the burning velocity in the investigated temperature range at hydrogen concentrations less than 50%. As the initial temperature increases, the effect of hydrogen on the burning velocity manifests itself at lower concentrations of hydrogen.

Keywords: methane; hydrogen; laminar burning velocity

DOI: 10.30826/CE19120401

Acknowledgments

The reported study was funded by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-31-90022\19.

References

1. Arutyunov, V. S., A. A. Belyaev, K. Ya. Troshin, A. V. Arutyunov, A. A. Tsarenko, and A. A. Nikitin. 2019. Ob ispol'zovanii metan-vodorodnykh smesey v DVS [About using methane-hydrogen mixtures in ICE]. *Oil Gas Chemistry* 3.
2. Troshin, K. Ya., A. A. Borisov, A. N. Rakhmetov, V. S. Arutyunov, and G. G. Politenkova. 2013. Burning velocity of methane–hydrogen mixtures at elevated pressures and temperatures. *Russ. J. Phys. Chem. B* 7(3):290–301.
3. Sholte, T. G., and P. B. Vaags. 1959. Burning velocities of mixtures of hydrogen, carbon monoxide and methane with air. *Combust. Flame* 3:511–524.
4. Milton, B. E., and J. C. Keck. 1984. Laminar burning velocities in stoichiometric hydrogen and hydrogen–hydrocarbon gas mixtures. *Combust. Flame* 58:13–22.
5. Yu, G., C. K. Law, and C. K. Wu. 1986. Laminar flame speeds of hydrocarbon + air mixtures with hydrogen addition. *Combust. Flame* 63(3):339–347.
6. Halter, F., C. Chauveau, N. Djebaili-Chaumeix, and I. Gokalp. 2005. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures. *P. Combust. Inst.* 30:201–208.
7. Hermanns, R. T. E. 2007. Laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures. *Proefschrift*. Technische Universiteit Eindhoven, 2007. Available at: <http://alexandria.tue.nl/extra2/200711972.pdf> (accessed November 25, 2019).
8. Burluka, A. A., M. Fairweather, M. P. Ormsby, C. G. W. Sheppard, and R. Woolley. 2007. The laminar burning properties of premixed methane–hydrogen flames determined using a novel analysis method. *3rd European Combustion Meeting*.
9. Hu, E., Z. Huang, J. He, Ch. Jin, and J. Zheng. 2009. Experimental and numerical study of laminar burning characteristics of premixed methane–hydrogen–air flames. *Int. J. Hydrogen Energ.* 34:4876–4888.
10. Dirrenberger, P., H. Le Gall, R. Bounaceur, O. Herbinet, P.-A. Glaude, A. Konnov, and F. Battin-Leclerc. 2011. Measurements of laminar flame velocity for components of natural gas. *Energ. Fuel.* 25(9):3875–3884.
11. Goswami, M., S. Derks., K. Coumans, M. H. de Anderade Olivera, A. A. Konnov, R. J. M. Bastiaans, C. C. M. Luijten, and P. H. de Goeij. 2011. Effect of elevated pressures on laminar burning velocity of methane + air mixtures. *23rd ICDERS*. Irvine, CA.
12. Moccia, V., and J. D'Alessio. 2013. Burning behaviour of high-pressure CH₄–H₂–air mixtures. *Energies* 6:97–116.
13. Gockeler, K., E. Albin, O. Kruger, and C. O. Paschereit. 2013. Burning velocities of hydrogen–methane–air mixtures at highly steam-diluted conditions. *4th Conference (International) on Jets, Wakes and Separated Flows*. Nagoya, Japan.
14. Donohoe, N., A. Heufer, W. K. Metcalfe, H. J. Curran, M. L. Davis, O. Mathieu, D. Plichta, A. Morones, E. L. Petersen, and F. Guthe. 2014. Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures. *Combust. Flame* 161:1432–1443.
15. Okafor, E. C., A. Hayakawa, Yu. Nagano, and T. Kitagawa. 2014. Effects of hydrogen concentration on premixed laminar flames of hydrogen–methane–air. *Int. J. Hydrogen Energ.* 39:2409–2417.

16. Healy, D., D. M. Kalitan, C. J. Aul., E. L. Petersen, G. Bourque, and H. J. Curran. 2010. Oxidation of C_1 – C_5 alkane quaternary natural gas mixtures at high pressures. *Energ. Fuel.* 24(3):1521–1528.
17. Combustion Chemistry Center at NUI Galway: Database Mechanism of Natural Gas (including C_5) Oxidation. Available at: http://c3.nuigalway.ie/media/researchcentres/combustionchemistrycentre/files/mechanismdownloads/nc5_49_mech.dat (accessed November 25, 2019).
18. Nikitin, A. V., K. Ya. Troshin, A. A. Belyaev, A. V. Arutyunov, A. A. Koryushin, and V. S. Arutyunov. 2018. Gazomotornoe toplivo iz poputnogo neftyanogo gaza. Selektivnyy oksikreking tyazhelykh komponentov PNG [Gas motor fuel from associated petroleum gas. Selective oxyeracing of heavier components of APG]. *Oil Gas Chemistry* 3:22–34.
19. Kee, R. J., F. M. Rupley, E. Meeks, and J. A. Miller. 1996. CHEMKIN III. Livermore, CA: Sandia National Laboratories. Technical Report No. SAND96-8216.
20. Basevich, V. Ya., A. A. Belyaev, and S. M. Frolov. 1998. “Global” kinetic mechanisms for calculating turbulent reactive flows. I. The basic chemical heat release process. *Chem. Phys. Rep.* 17(9):1747–1772.
21. Basevich, V. Ya., A. A. Belyaev, and S. M. Frolov. 1998. “Global” kinetic mechanisms for calculating turbulent reactive flows. II. Formation of nitrogen oxide. *Chem. Phys. Rep.* 17(10):1895–1908.
22. Kozachenko, L. S. 1954. Issledovanie zavisimosti skorosti rasprostraneniya plameni ot fiziko-khimicheskikh svoystv topliva i aerodinamiki techeniya gaza [Investigation of the dependence of the flame propagation velocity on physico-chemical properties of fuel and aerodynamics of gas flow]. Moscow: IChPh of the USSR Academy of Sciences. DSc. Diss.
23. Lewis, B., and G. von Elbe. 1961. *Combustion, flames and explosions of gases*. New York, NY: Academic Press. 731 p.
24. Iijima, T., and T. Takeno. 1986. Effects of temperature and pressure on burning velocity. *Combust. Flame* 65(1):35–43.
25. Shebeko, Yu. N., S. G. Tsarichenko, A. Ya. Korolchenko, A. V. Trunev, V. Yu. Navzenya, and S. N. Parkov. 1995. Burning velocities and flammability limits of gaseous mixtures at elevated temperatures and pressures. *Combust. Flame* 102(4):427–437.
26. Zabetakis, M. G. 1965. Flammability characteristics of combustible gases and vapors. Washington, D.C.: U.S. Bureau of Mines. No. 627.
27. Gu, X. J., M. Z. Haq, M. Lawes, and R. Woolley. 2000. Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane–air mixtures. *Combust. Flame* 121(1-2):41–58.
28. Heimel, S. 1957. Effect of initial mixture temperature on burning velocity of hydrogen–air mixtures with preheating and simulated preburning. NACA TN 4156.

Received October 8, 2019

Contributors

Arutyunov Artem V. (b. 1994) — post-graduate student, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation; research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; aarutyunovv@gmail.com

Belyaev Andrey A. (b. 1954) — Candidate of Science in physics and mathematics, leading research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; belyaevIHF@yandex.ru

Inovenkov Igor N. (b. 1949) — Candidate of Science in physics and mathematics, professor, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation; inov@cs.msu.su

Arutyunov Vladimir S. (b. 1946) — Doctor of Science in chemistry, professor, chief research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; chief research scientist, Institute of Problems of Chemical Physics, 1 Acad. N. N. Semenov Prosp., Chernogolovka 142432, Russian Federation; professor, I. M. Gubkin Russian State Oil and Gas University, 65 Leninsky Prosp., Moscow 119991, Russian Federation; professor, Faculty of Fundamental Physical and Chemical Engineering, M. V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow 119991, GSP-1, Russian Federation arutyunov@chph.ras.ru