

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ ОТ ДАВЛЕНИЯ И НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ГОРЕНИИ МЕТАНА

©2016

- С. В. Лукачѐв** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королѐва, [lucachev@ssau.ru](mailto:lucachev@ssau.ru)
- С. Г. Матвеев** кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королѐва, [pfu@ssau.ru](mailto:pfu@ssau.ru)
- И. А. Зубрилин** ассистент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королѐва, [zubrilin416@mail.ru](mailto:zubrilin416@mail.ru)
- А. В. Сигидаев** магистрант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королѐва, [tophado787@yandex.ru](mailto:tophado787@yandex.ru)

Приведены результаты работы, позволившие получить уточнённую зависимость скорости распространения ламинарного пламени  $S_f$  от состава смеси в широком диапазоне давлений и начальных температур при горении метана. Дан анализ литературы с целью обобщения экспериментальных данных по измерению скорости распространения ламинарного пламени при горении метана. Проведѐн расчёт  $S_f$  с использованием кинетического механизма GRI 3.0 в заданном диапазоне давлений и температур. Проведено обобщение результатов расчёта в программном продукте MATLAB с целью уточнения степенных зависимостей  $S_f$  от давления и начальной температуры. Результаты расчёта по полученной аппроксимирующей зависимости сопоставлены с экспериментальными данными и с результатами расчёта по известным зависимостям. Получено, что показатели степени для зависимостей от давления и температуры должны описываться не константами или линейными зависимостями, а уравнениями второй степени от коэффициента избытка топлива. Результаты могут использоваться при моделировании процессов горения в трёхмерной постановке и в расчётах по инженерным методикам.

*Скорость распространения ламинарного пламени метана; кинетический механизм химических реакций.*

---

**Цитирование:** Лукачѐв С.В., Матвеев С.Г., Зубрилин И.А., Сигидаев А.В. Определение зависимости скорости распространения ламинарного пламени от давления и начальной температуры при горении метана // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 4. С. 224-234. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-224-234

При проектировании и доводке камер сгорания (КС) газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) необходимо учитывать большое количество факторов, влияющих на рабочий процесс. Одна из величин, характеризующих процесс горения в КС – это скорость распространения ламинарного пламени  $S_f$  или, иначе, нормальная скорость пламени. Нормальная скорость пламени  $S_f$  представляет собой фундаментальную характеристику реакционно-способной смеси и определяется как скорость распространения фронта пламени относительно смеси свежих реагентов в направлении по нормали к поверхности фронта пламени [1]. Скорость  $S_f$  зависит от начальной температуры, давления, состава и свойств топлива [2].

В процессе работы двигателя давление  $P_k$  и температура  $T_k$  потока на входе в КС изменяются в широком диапазоне. В связи с этим при расчёте характеристик КС необходимо использовать достоверные зависимости  $S_l$  от температуры и давления.

Скорость  $S_l$  широко используется в вычислительной газовой динамике (CFD), в том числе при определении скорости распространения турбулентного пламени [3; 4], а также в различных полуэмпирических моделях, применяемых на этапе проектирования КС [5–9].

В CFD для расчёта  $S_l$  могут быть использованы два подхода: расчёт детальных механизмов химических реакций и использование приближённых зависимостей. Первый подход сложен из-за большого числа химических реакций и не всегда может быть реализован на практике [10]. Поэтому чаще используется второй подход, в котором  $S_l$  для различных видов топлив является функцией ряда переменных:  $S_l = f(\varphi, T_k, P_k)$ , где  $\varphi$  – коэффициент избытка топлива;  $T_k$  и  $P_k$  – начальная температура и давление соответственно. Так, например, в коммерческих программных продуктах [11] при расчёте  $S_l$  используются следующие зависимости.

Первая зависимость имеет вид [12]:

$$S_l = F Y_{F,u}^m \exp(-G/T^0) \frac{T_k}{T^0} \left( \frac{T_b - T^0}{T_b - T_k} \right)^n, \quad (1)$$

где  $Y_{F,u}$  – массовая доля топлива в топливовоздушной смеси;  $T^0$  – температура внутреннего слоя ламинарного пламени [13];  $T_k$  – начальная температура смеси;  $T_b$  – равновесная адиабатическая температура продуктов сгорания;  $F, G, m, n$  – коэффициенты (табл. 1 [12]).

Влияние давления учитывается за счёт изменения  $T^0$ .

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (1)

Топливо	$F$	$G$	$m$	$n$
CH <sub>4</sub>	22,176	-6444,3	0,5651	2,5158

Вторая зависимость является более распространённой на практике и записывается как [14]

$$S_l = S_{l_0} \left( \frac{T_k}{T_0} \right)^\alpha \left( \frac{P_k}{P_0} \right)^\beta, \quad (2)$$

где  $P_k$  – начальное давление смеси.

В работе [14] значение  $S_{l_0}$  рассчитывается следующим образом:

$$S_{l_0} = C_1 + C_2 (\varphi - C_3)^2,$$

где  $\varphi$  – коэффициент избытка топлива;  $C_1, C_2, C_3$  – константы, зависящие от вида топлива. Показатели степени  $\alpha$  и  $\beta$  рассчитываются как:

$$\alpha = 2,18 - 0,8(\varphi - 1),$$

$$\beta = -0,16 + 0,22(\varphi - 1).$$

Для практического применения необходимо, чтобы значения  $S_{l_0}$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  соответствовали заданному топливу при конкретных рабочих условиях.

Целью данной работы является уточнение зависимости скорости распространения ламинарного пламени метана для применения в CFD.

В качестве основного топлива принят метан, для которого необходимо определить значения  $S_f$  при начальных температурах и давлениях:  $T_k = 300 - 800$  К и  $P_k = 0,1 - 2,0$  МПа. Для валидации значений  $S_f$  использовались экспериментальные данные из работ, представленных в табл. 2.

Таблица 2. Работы по экспериментальному определению  $S_f$  при горении метана

Авторы	Год	$T_k$ , К	$P_k$ , МПа	$\phi$	
Egolfopoulos, F. N., Cho, P. [15]	1989	300	0,05; 0,1; 0,2; 0,3	0,55 – 1,4	
Taylor, S.C. [16]	1991	300	0,1	0,57 – 1,25	
Vagelopoulos, C. M., Egolfopoulos [17]	1994	300	0,1	0,7 – 1,4	
Van Maaren, A., Thung, D. S. [18]	1994	300	0,1	0,65 – 1,5	
Just Th. [19]	1994	400-600	0,5; 2,0	0,8 – 1,2	
Aung, K. T., Tseng, L.-K. [20]	1995	300	0,1	0,6 – 1,35	
Hassan M.I., Aung K.T., Faeth G.M. [21]	1998	300	0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4	0,7 – 1,3	
Gu X.J., Haq M.Z., Lawes M. [22]	2000	300, 350, 400	0,1; 0,5; 1,0	0,6 – 1,2 (0,1 МПа)	0,8; 1,0; 1,2 (0,5; 1,0 МПа)
Rozenchan G., Zhu D. L., Law C. K. [23]	2002	300	0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0	0,6 – 1,4	
Bosschaart K.J., Goey L.P.H. [24]	2004	300, 350	0,1	0,6 – 1,6 (300 К);	0,8; 1,0; 1,2 (350 К)

Анализ известной литературы показал, что основная часть экспериментальных результатов получена при стандартных атмосферных условиях. Для давлений выше 1 МПа и температур выше 500 К экспериментальных данных не обнаружено. В связи с этим в программном пакете Chemical Workbench был проведён расчёт  $S_f$  в необходимом диапазоне давлений и температур. Расчёт проводился с использованием кинетического механизма химических реакций GRI 3.0.

На рис. 1–3 представлены значения  $S_f$ , найденные экспериментально [15–24] и рассчитанные по формулам (1), (2) и по механизму GRI 3.0 [25]. Как видно из представленных данных, формула (1) [12] завышает значения  $S_f$  для  $\phi > 1$  во всём диапазоне  $P_k$  и  $T_k$  по сравнению с данными других авторов. Формулу (2) [14] можно использовать только при давлениях до 0,2 МПа, поскольку для более высоких давлений вычисленная величина  $S_f$  сильно завышена на всём промежутке  $\phi$ .

Полученные графики показывают, что результаты расчёта  $S_f$  по кинетическому механизму химических реакций GRI 3.0 хорошо согласуются с экспериментальными данными и могут быть использованы для уточнения зависимости  $S_f = f(\phi, T_k, P_k)$ .

Для уточнения коэффициентов уравнения (2) использовался программный продукт MATLAB [26]. Для построения трёхмерных графиков использовался пакет расширения Curve Fitting Toolbox, который обычно применяется для различных прикладных задач аппроксимации и интерполяции данных. Для создания собственной параметрической модели применялся метод Custom Equation.

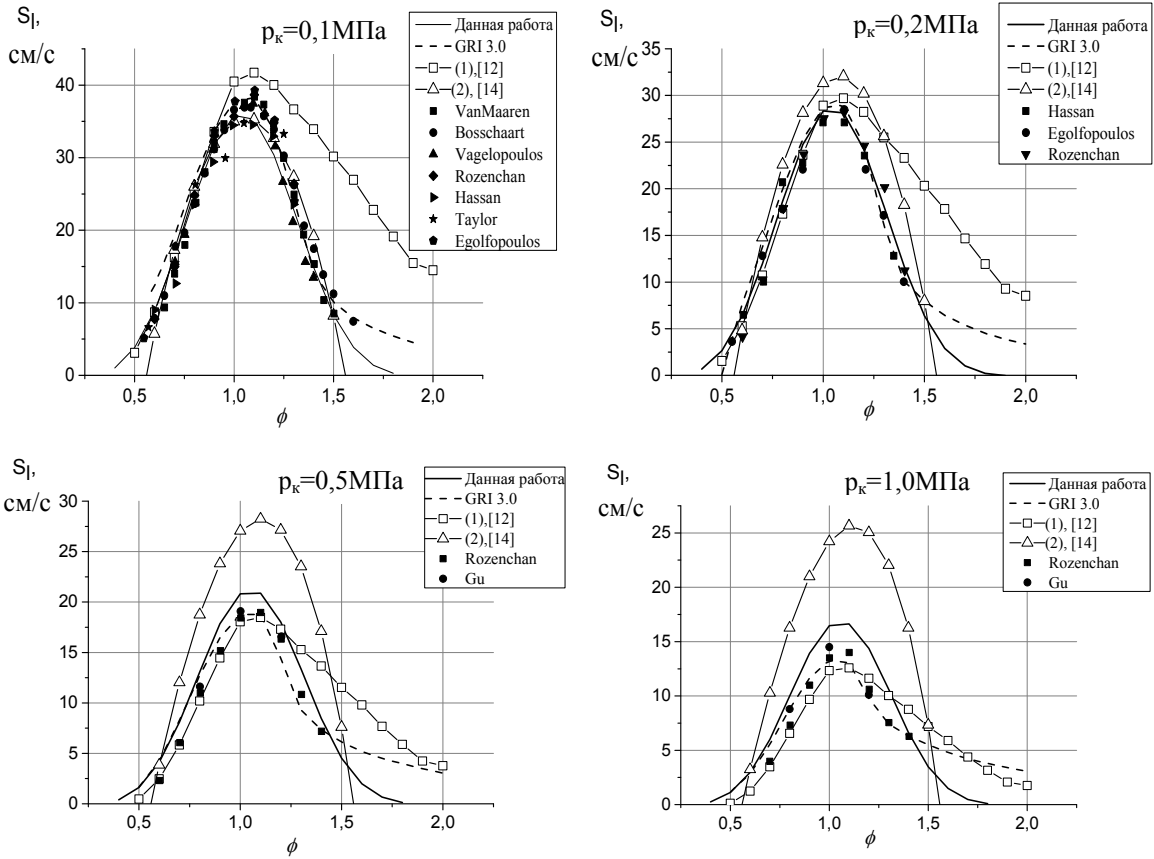


Рис. 1. Скорость распространения ламинарного пламени при  $T_k = 300$  К

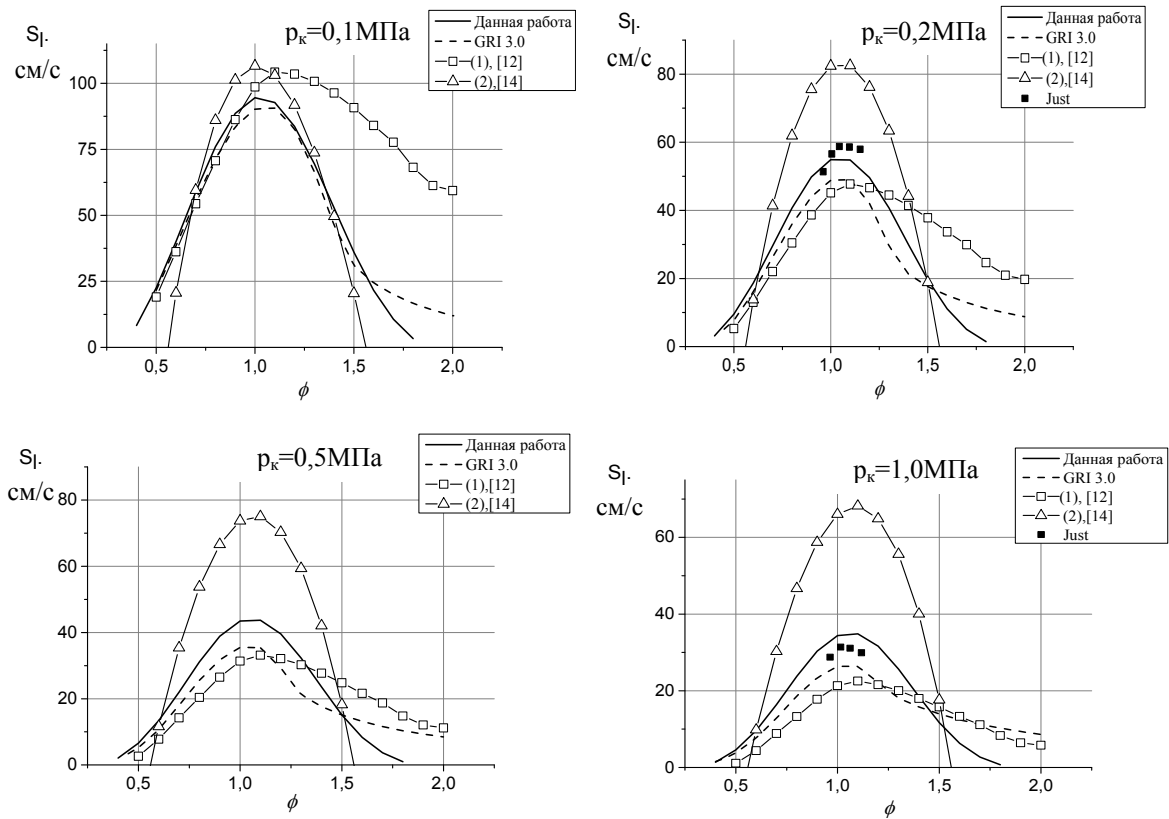


Рис. 2. Скорость распространения ламинарного пламени при  $T_k = 500$  К

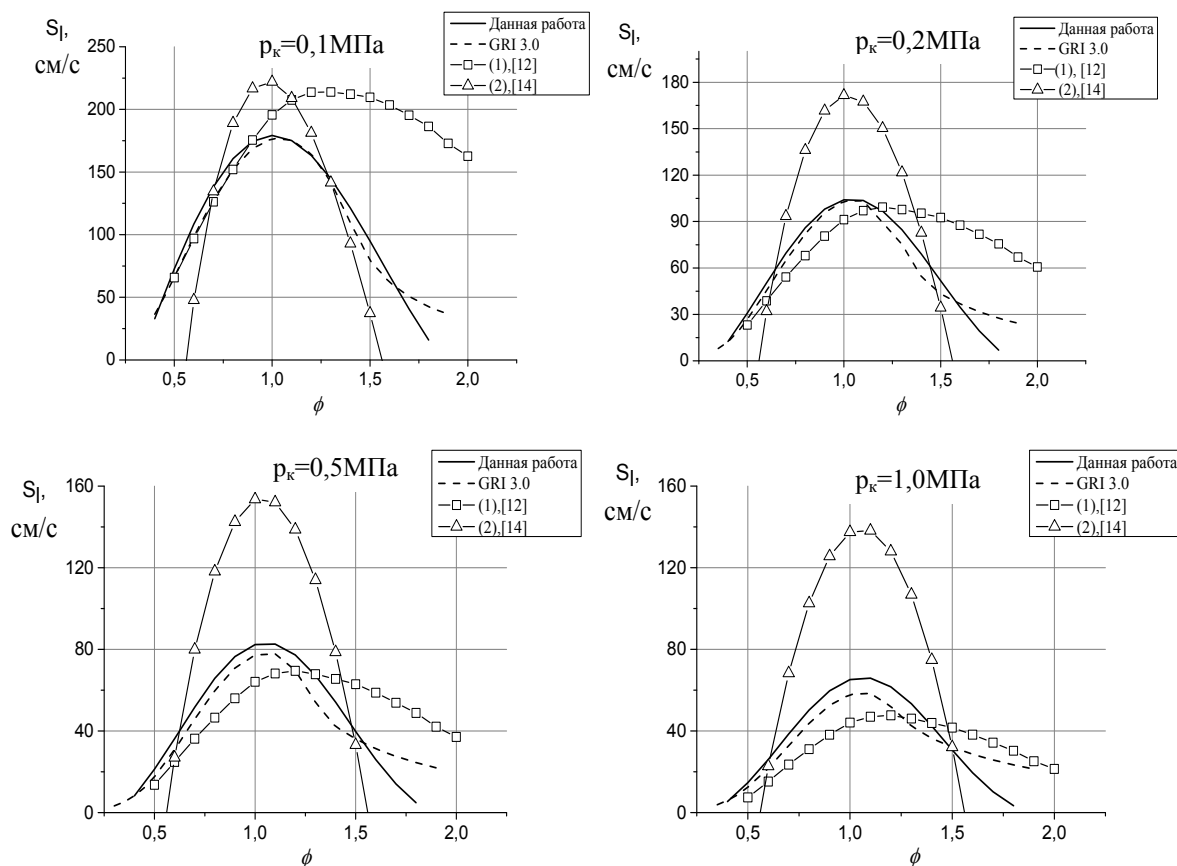


Рис. 3. Скорость распространения ламинарного пламени при  $T_{\kappa} = 700 \text{ K}$

Для определения соответствия полученной модели результатам расчёта кинетического механизма использовался критерий  $R^2$ . Критерий  $R^2$  определяется как отношение суммы квадратов регрессии (сумма квадратов разностей между предсказанным значением переменной и её средним значением)  $SSR$  к общей сумме квадратов  $SST$ :

$$SSR = \sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - \bar{y})^2; \quad SST = \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2; \quad R^2 = \frac{SSR}{SST},$$

где  $\hat{y}_k, y_k$  и  $\bar{y}$  – соответственно расчётные, фактические и средние значения переменной.

Критерий  $R^2$  может принимать значения от нуля до единицы, и чем ближе он к единице, тем лучше параметрическая модель описывает исходные данные. Максимальное значение  $R^2$  для исследуемого диапазона  $P_{\kappa}$  и  $T_{\kappa}$  было получено при значении коэффициентов уравнения (2), представленных в табл. 3, и равно  $R^2 = 0,98$ . Стоит отметить, что при этом используется зависимость  $S_{l_0} = f(\varphi)$  при  $T_{\kappa} = 800 \text{ K}$  и  $P_{\kappa} = 101325 \text{ Па}$ .

Таблица 3. Уточнённая зависимость  $S_l = f(\varphi, T_{\kappa}, P_{\kappa})$

$S_l = S_{l_0} \left( \frac{T_{\kappa}}{T_0} \right)^{\alpha} \left( \frac{P_{\kappa}}{P_0} \right)^{\beta}$	
$S_{l_0} = (145\varphi^3 - 850\varphi^2 + 1265\varphi - 325)$	
$\alpha = a_1 + a_2\varphi + a_3\varphi^2$	$\beta = b_1 + b_2\varphi + b_3\varphi^2$
$T_0 = 800$	$P_0 = 101325$
$a_1 = 7,6$	$b_1 = -0,966$
$a_2 = -10,8$	$b_2 = 1,1$
$a_3 = 5,1$	$b_3 = -0,4715$

На рис. 1–3 рассчитанные по полученной зависимости значения  $S_i$  (сплошная линия) представлены в сравнении с расчётами по формулам (1), (2) и расчётом по кинетическому механизму GRI 3.0. Использование данной зависимости ограничивается диапазоном по составу смеси  $\varphi = 0,33 \dots 1,9$  ( $\alpha = 0,53 \dots 3,0$ ). Поскольку при расчёте по предлагаемой зависимости за пределами данного диапазона величина  $S_i$  принимает отрицательные значения, то необходимо использовать условие:

$S_i = 0$  при  $\varphi < 0,33$  и  $\varphi > 1,9$ ;

$$S_i = (145\varphi^3 - 850\varphi^2 + 1265\varphi - 325) \left( \frac{T_k}{800} \right)^{7,6-10,8\varphi+5,1\varphi^2} \left( \frac{P_k}{101325} \right)^{-0,966+1,1\varphi-0,4715\varphi^2}$$

при  $0,33 \leq \varphi \leq 1,9$ .

Степенные показатели  $\alpha$  и  $\beta$  были сопоставлены с опубликованными данными других авторов (рис. 4, 5). Как видно из рисунков, уравнения для степенных коэффициентов, полученные в работах [27; 28; 29], имеют параболическую форму во всём диапазоне  $\varphi$ . В свою очередь, линейные зависимости показателей степени от  $\varphi$ , представленные в работе [14], приводят к сильно завышенным результатам для  $S_i$  при высоких давлениях (рис. 1–3).

Результаты расчёта  $S_i$  по предлагаемой зависимости при различных давлениях и температурах представлены на рис. 6–8.

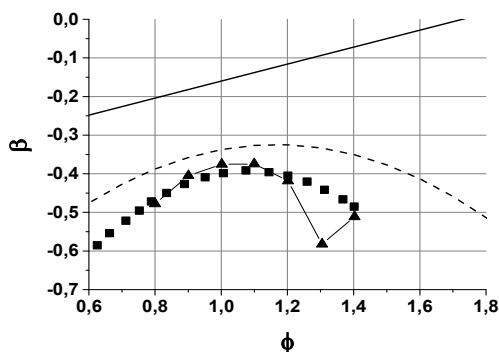


Рис. 4. Изменение коэффициента  $\beta$ :  
сплошная линия [13]; квадраты [27];  
треугольники [28];  
пунктирная линия – полученный коэффициент

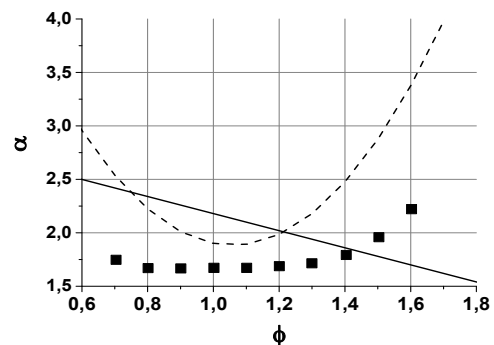


Рис. 5. Изменение коэффициента  $\alpha$ :  
сплошная линия [13]; квадраты [29];  
пунктирная линия – полученный коэффициент

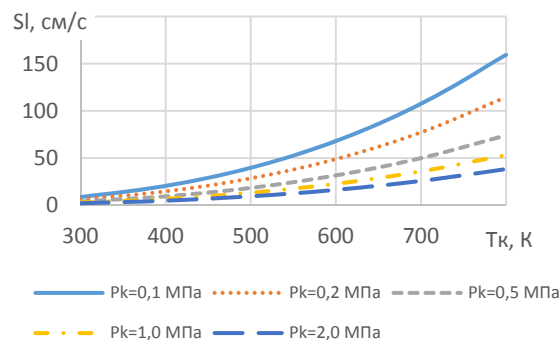


Рис. 6. Зависимость  $S_i$  от температуры при разных давлениях и  $\varphi=0,6$

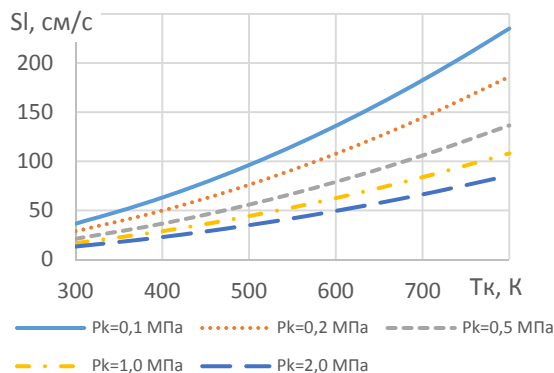


Рис. 7. Зависимость  $S_l$  от температуры при разных давлениях и  $\varphi=1,0$

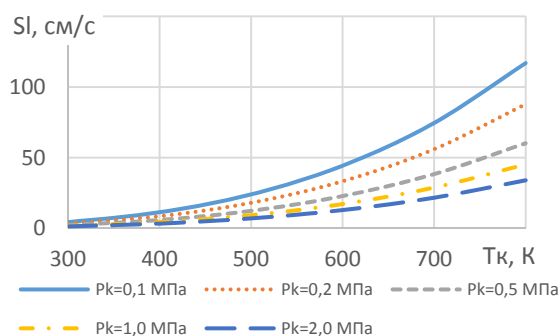


Рис. 8. Зависимость  $S_l$  от температуры при разных давлениях и  $\varphi=1,6$

В результате выполненной работы получены следующие результаты.

1. В опубликованных источниках имеется недостаточное количество экспериментальных данных для определения  $S_l$  при горении метана при начальной температуре смеси более 300 К и давлении выше 0,2 МПа.

2. Для определения  $S_l$  при высоких значениях  $T_k$  и  $P_k$  может быть использован механизм химических реакций GRI 3.0.

3. Получена уточнённая зависимость  $S_l = f(\varphi, T_k, P_k)$ , которая отличается значениями показателей степеней при  $T_k$  и  $P_k$  и может использоваться при моделировании процессов горения и в проекторочных расчётах по инженерным методикам.

Данная работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках соглашения RFMEFI58716X0033.

### Библиографический список

1. Снегирёв А.Ю. Основы теории горения. М.: Политехнический университет, 2014. 350 с.
2. Zeldovich Y.B., Frank-Kamenetskii D.A. Theory of thermal flame propagation // Journal Physical Chemistry. 1938. V. 12. P. 100-105.
3. Herweg R.A., Maly R.R. Fundamental model for flame kernel formation in S. I. Engines // SAE Technical Paper Series. 1992. DOI: 10.4271/922243

4. Zimont V., Polifke M., Bettelini W., Weisenstein A. An efficient computational model for premixed turbulent combustion at high reynolds numbers based on a turbulent flame speed closure // *Journal of Gas Turbines Power*. 1998. V. 120, Iss. 3. P. 526-532. DOI: 10.1115/1.2818178
5. Rao K.V-L., Lefebvre A.H. Flame blowoff studies using large-scale flameholders // *Journal of Engineering for Power*. 1982. V. 104, Iss. 4. P. 853-857. DOI: 10.1115/1.3227355
6. Rizk N.K., Lefebvre A.H. Influence of laminar flame speed on the blowoff velocity of bluff-body-stabilized flames // *AIAA Journal*. 1984. V. 22, Iss. 10. P. 1444-1447. DOI: 10.2514/3.8801
7. Radhakrishnan K., Heywood J.B., Tabaczynsky R.J. Premixed turbulent flame blowoff velocity correlation based on coherent structures in turbulent flows // *Combustion and Flame*. 1981. V. 42. P. 19-33. DOI: 10.1016/0010-2180(81)90139-5
8. Lefebvre A.H., Ballal D.R. *Gas turbine combustion*. New York: CRC Press, 2010. 538 p.
9. Kutsenko Yu.G., Inozemtsev A.A., Gomzikov L.Y. Modeling of turbulent combustion process and lean blowout of diffusion and premixed flames using a combined approach // *ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air*. 2009. V. 2. P. 889-902. DOI: 10.1115/gt2009-60131
10. Chen J.H. Petascale direct numerical simulation of turbulent combustion – fundamental insights towards predictive models // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011. V. 33, Iss. 1. P. 99-123. DOI: 10.1016/j.proci.2010.09.012
11. ANSYS A. Version 15.0; ANSYS. Inc. Canonsburg., 2013.
12. Gottgens J., Mauss F., Peters N. Analytic approximations of burning velocities and flame thicknesses of lean hydrogen, methane, ethylene, ethane, acetylene and propane flames // *Symposium (International) on Combustion*. 1992. V. 24, Iss. 1. P. 129-135. DOI: 10.1016/s0082-0784(06)80020-2
13. Smooke M.D. Reduced kinetic mechanisms and asymptotic approximations for methane-air flames // *Lecture Notes in Physics*. 1991. V. 384. DOI: 10.1007/bfb0035362
14. Metghalchi M., Keck J.C. Burning velocities of mixtures of air with methanol, iso-octane, and indolene at high pressure and temperature // *Combustion and Flame*. 1982. V. 48. P. 191-210. DOI: 10.1016/0010-2180(82)90127-4
15. Egolfopoulos F., Cho N. P., Law C. K. Laminar flame speeds of methane-air mixtures under reduced and elevated pressures // *Combustion and Flame*. 1989. V. 76, Iss. 3-4. P. 375-391. DOI: 10.1016/0010-2180(89)90119-3
16. Taylor S.C. Burning velocity and the influence of flame stretch. Ph.D. Thesis. University of Leeds, 1991.
17. Vagelopoulos C.M., Egolfopoulos F.N., Law C.K. Further considerations on the determination of laminar flame speeds with the counterflow twin-flame technique // *Symposium (International) on Combustion*. 1994. V. 25, Iss. 1. P. 1341-1347. DOI: 10.1016/s0082-0784(06)80776-9
18. Maaren Van A., Thung D.S., De Goey L.R.H. Measurement of flame temperature and adiabatic burning velocity of methane/air mixtures // *Combustion Science and Technology*. 1994. V. 96, Iss. 4-6. P. 327-344. DOI: 10.1080/00102209408935360
19. Just Th. <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/targets30/f5.html>.
20. Aung K.T., Tseng L.-K.M., Ismail A., Faeth G.M. Laminar burning velocities and Markstein numbers of hydrocarbon/air flames // *Combustion and Flame*. 1995. V. 102, Iss. 4. P. 523-525. DOI: 10.1016/0010-2180(95)00034-4
21. Hassan M.I., Aung K.T., Faeth G.M. Properties of Laminar Premixed CO/H/Air Flames at Various Pressures // *Combustion and Flame*. 1997. V. 13, Iss. 2. P. 239-245. DOI: 10.2514/2.5154



22. GU X.J., Haq M.Z., Lawes M., Woolley R. Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane-air mixtures // *Combustion Flame*. 2000. V. 121, Iss. 1-2. P. 41-58. DOI: 10.1016/s0010-2180(99)00142-x
23. Rozenchan G., Zhu D.L., Law C.K., Tse S.D. Outward propagation, burning velocities, and chemical effects of methane flames up to 60 atm // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2002. V. 29, Iss. 2. P. 1461-1470. DOI: 10.1016/s1540-7489(02)80179-1
24. Bosschaart K.J., de Goey L.P.H. The Laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method // *Combustion and Flame*. 2004. V. 136, Iss. 3. P. 261-269. DOI: 10.1016/j.combustflame.2003.10.005
25. GRI 3.0. [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech).
26. Hunt B.R., Lipsman R.L., Rosenberg J.M. A guide to MATLAB: for beginners and experienced users. Cambridge University Press, 2001. 346 p.
27. Goswami M.S., Derks K., Coumans W.J., Slikker M.H. de Andrade Oliveira, Bastiaans R.J.M., Luijten C.C.M., de Goey L.P.H., Konnov A.A. The effect of elevated pressures on the laminar burning velocity of methane + air mixtures // *Combustion and Flame*. 2013. V. 160, Iss. 9. P. 1627-1635. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.03.032
28. Liao S.Y., Jiang D.M., Cheng Q. Determination of laminar burning velocities for natural gas // *Fuel*. 2004. V. 83, Iss. 9. P. 1247-1250. DOI: 10.1016/j.fuel.2003.12.001
29. Christensen M., Nilsson E.J.K., Konnov A.A. The Temperature dependence of the laminar burning velocities of methyl formate + air flames // *Fuel*. 2015. V. 157. P. 162-170. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.04.072

## DEPENDENCE OF METHANE LAMINAR FLAME PROPAGATION SPEED ON THE PRESSURE AND INITIAL TEMPERATURE

©2016

- S. V. Lukachev** Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Thermal Engineering and Thermal Engines, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, [lucachev@ssau.ru](mailto:lucachev@ssau.ru)
- S. G. Matveev** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Thermal Engineering and Thermal Engines, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, [pfu@ssau.ru](mailto:pfu@ssau.ru)
- I. A. Zubrilin** junior researcher, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, [zubrilin416@mail.ru](mailto:zubrilin416@mail.ru)
- A. V. Sigidaev** graduate student, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, [tophado787@yandex.ru](mailto:tophado787@yandex.ru)

The paper presents the results that allowed obtaining the dependence of laminar flame propagation speed  $Sl$  on the equivalence ratio for a wide range of pressures and temperatures during methane combustion. A literature review was carried out to summarize the experimental data on the measurement of the  $Sl$ . The  $Sl$  was calculated using a kinetic mechanism GRI 3.0 within the required pressure and temperature range. The calculation results were generalized in the MATLAB software product to verify the  $Sl$  power dependencies on pressure and initial temperature. The results of calculation on the basis of the obtained approximating dependence were compared with the experimental data and results obtained by other authors. It was found that the exponents of power for the dependency on pressure and temperature are described not by constants or linear relations, but by second-degree equations on the fuel-air ratio. The results can be used in three-dimensional simulation of combustion processes and in calculations performed using engineering practices.

*Methane laminar flame propagation velocity; kinetic mechanisms of chemical reactions; validation.*

---

**Citation:** Lukachev S.V., Matveev S.G., Zubrilin I.A., Sigidaev A.V. Dependence of methane laminar flame propagation speed on the pressure and initial temperature. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 4. P. 224-234. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-224-234

## References

1. Snegirev A.Yu. *Osnovy teorii goreniya* [Basics of the theory of combustion]. Moscow: Polytechnic University Publ., 2014. 352 p.
2. Zeldovich Y.B., Frank-Kamenetskii D.A. Theory of thermal flame propagation. *Journal Physical Chemistry*. 1938. V. 12. P. 100-105.
3. Herweg R.A., Maly R.R. Fundamental model for flame kernel formation in S. I. Engines. *SAE Technical Paper Series*. 1992. DOI: 10.4271/922243
4. Zimont V., Polifke M., Bettelini W., Weisenstein A. An efficient computational model for premixed turbulent combustion at high reynolds numbers based on a turbulent flame speed closure. *Journal of Gas Turbines Power*. 1998. V. 120, Iss. 3. P. 526-532. DOI: 10.1115/1.2818178
5. Rao K.V-L., Lefebvre A.H. Flame blowoff studies using large-scale flameholders. *Journal of Engineering for Power*. 1982. V. 104, Iss. 4. P. 853-857. DOI: 10.1115/1.3227355
6. Rizk N.K., Lefebvre A.H. Influence of laminar flame speed on the blowoff velocity of bluff-body-stabilized flames. *AIAA Journal*. 1984. V. 22, Iss. 10. P. 1444-1447. DOI: 10.2514/3.8801
7. Radhakrishnan K., Heywood J.B., Tabaczynsky R.J. Premixed turbulent flame blowoff velocity correlation based on coherent structures in turbulent flows. *Combustion and Flame*. 1981. V. 42. P.19-33. DOI: 10.1016/0010-2180(81)90139-5
8. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas turbine combustion. New York: CRC Press, 2010. 538 p.
9. Kutsenko Yu.G., Inozemtsev A.A., Gomzikov L.Y. Modeling of turbulent combustion process and lean blowout of diffusion and premixed flames using a combined approach. *ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air*. 2009. V. 2. P. 889-902. DOI: 10.1115/gt2009-60131
10. Chen J.H. Petascale direct numerical simulation of turbulent combustion – fundamental insights towards predictive models. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011. V. 33, Iss. 1. P. 99-123. DOI: 10.1016/j.proci.2010.09.012
11. ANSYS A. Version 15.0; ANSYS. Inc. Canonsburg, 2013.
12. Gottgens J., Mauss F., Peters N. Analytic approximations of burning velocities and flame thicknesses of lean hydrogen, methane, ethylene, ethane, acetylene and propane flames. *Symposium (International) on Combustion*. 1992. V. 24, Iss. 1. P. 129-135. DOI: 10.1016/s0082-0784(06)80020-2
13. Smooke M.D. Reduced kinetic mechanisms and asymptotic approximations for methane-air flames. *Lecture Notes in Physics*. 1991. V. 384. DOI: 10.1007/bfb0035362
14. Metghalchi M., Keck J.C. Burning velocities of mixtures of air with methanol, iso-octane, and indolene at high pressure and temperature. *Combustion and Flame*. 1982. V. 48. P. 191-210. DOI: 10.1016/0010-2180(82)90127-4
15. Egolfopoulos F., Cho N.P., Law C.K. Laminar flame speeds of methane-air mixtures under reduced and elevated pressures. *Combustion and Flame*. 1989. V. 76, Iss. 3-4. P. 375-391. DOI: 10.1016/0010-2180(89)90119-3
16. Taylor S.C. Burning velocity and the influence of flame stretch. Ph.D. Thesis. University of Leeds, 1991.
17. Vagelopoulos C.M., Egolfopoulos F.N., Law C.K. Further considerations on the determination of laminar flame speeds with the counterflow twin-flame technique. *Symposium (International) on Combustion*. 1994. V. 25, Iss. 1. P. 1341-1347. DOI: 10.1016/s0082-0784(06)80776-9

18. Maaren Van A., Thung D.S., De Goey L.R.H. Measurement of flame temperature and adiabatic burning velocity of methane/air mixtures. *Combustion Science and Technology*. 1994. V. 96, Iss. 4-6. P. 327-344. DOI: 10.1080/00102209408935360
19. Just Th. <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/targets30/f5.html>.
20. Aung K.T., Tseng L.-K.M., Ismail A., Faeth G.M. Laminar burning velocities and Markstein numbers of hydrocarbon/air flames. *Combustion and Flame*. 1995. V. 102, Iss. 4. P. 523-525. DOI: 10.1016/0010-2180(95)00034-4
21. Hassan M.I., Aung K.T., Faeth G.M. Properties of Laminar Premixed CO/H/Air Flames at Various Pressures. *Combustion and Flame*. 1997. V. 13, Iss. 2. P. 239-245. DOI: 10.2514/2.5154
22. GU X.J., Haq M.Z., Lawes M., Woolley R. Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane-air mixtures. *Combustion Flame*. 2000. V. 121, Iss. 1-2. P. 41-58. DOI: 10.1016/s0010-2180(99)00142-x
23. Rozenchan G., Zhu D.L., Law C.K., Tse S.D. Outward propagation, burning velocities, and chemical effects of methane flames up to 60 atm. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2002. V. 29, Iss. 2. P. 1461-1470. DOI: 10.1016/s1540-7489(02)80179-1
24. Bosschaart K.J., de Goey L.P.H. The Laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method. *Combustion and Flame*. 2004. V. 136, Iss. 3. P. 261-269. DOI: 10.1016/j.combustflame.2003.10.005
25. GRI 3.0. Available at: [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech).
26. Hunt B.R., Lipsman R.L., Rosenberg J.M. A guide to MATLAB: for beginners and experienced users. Cambridge University Press, 2014. 346 p.
27. Goswami M.S., Derks K., Coumans W.J., Slikker M.H. de Andrade Oliveira, Bastiaans R.J.M., Luijten C.C.M., de Goey L.P.H., Konnov A.A. The effect of elevated pressures on the laminar burning velocity of methane + air mixtures. *Combustion and Flame*. 2013. V. 160, Iss. 9. P. 1627-1635. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.03.032
28. Liao S.Y., Jiang D.M., Cheng Q. Determination of laminar burning velocities for natural gas. *Fuel*. 2004. V. 83, Iss. 9. P. 1247-1250. DOI: 10.1016/j.fuel.2003.12.001
29. Christensen M., Nilsson E.J.K., Konnov A.A. The Temperature dependence of the laminar burning velocities of methyl formate + air flames. *Fuel*. 2015. V. 157. P. 162-170. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.04.072