

О СВЯЗИ ХЕМИИОНИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ С ТЕМПЕРАТУРОЙ И ДАВЛЕНИЕМ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ОБЪЁМА

© 2017

А. П. Шайкин доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления»;
Тольяттинский государственный университет;
td@tltsu.ru

И. Р. Галиев кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей»;
Тольяттинский государственный университет;
sbs777@yandex.ru

Приведены результаты исследования связи хемионизации пламени с температурой пламени и давлением в камере сгорания переменного объёма. Представлены функциональные зависимости температуры пламени и максимального давления от электронного тока, обусловленного хемионизацией пламени, фундаментальных характеристик распространения пламени и полноты сгорания топлива. Сравнение температуры, рассчитанной по предлагаемой методике, с экспериментальными данными показало, что при коэффициенте избытка воздуха от 0,8 до 1,15 сходимость составляет более 85%. Сравнение максимального давления, полученного экспериментально и рассчитанного по уточнённой модели И.И. Вибе с использованием предложенных формул, показало хорошее соответствие между данными. Результаты работы могут быть применены для прогнозирования и мониторинга ионизационным зондом максимальной температуры пламени и давления в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и других энергетических установок.

Температура пламени; давление; хемионизация; ионизационный зонд; зона химических реакций; hythane.

Цитирование: Шайкин А.П., Галиев И.Р. О связи хемионизации пламени с температурой и давлением в камере сгорания переменного объёма // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 4. С. 91-100. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-4-91-100

Введение

Развитие энергетики и транспорта востребовало широкое использование альтернативных видов топлива, в том числе и в виде смесей традиционных топлив с химическими регуляторами горения [1]. Научная сторона этого развития, направленная на повышение эффективности сжигания углеводородов, формируется в том числе и исследованиями активации горения добавками водорода в традиционные углеводородные топлива [2]. Начиная с 2000-х годов большую популярность набирает hythane – смесь природного газа с водородом [3]. Hythane успешно сочетает в себе преимущества природного газа (дешевизна топлива) и водорода (экологичность и высокая теплота сгорания). Для создания новых двигателей и энергетических установок, использующих hythane, необходимо изучение процесса сгорания композитного топлива.

На современном уровне для экспериментального исследования процесса сгорания в условиях камеры сгорания (КС) переменного объёма популярность набирает метод, основанный на явлении хемионизации пламени, т.е. использование ионизационных зондов (ИЗ) [4]. Известно, что при хемионизации экзотермические стадии реакции, идущие с участием молекул, находящихся в возбуждённом состоянии, приводят к выделению энергии, достаточной для возникновения ионизации, которая возникает в элементарном химическом акте, с образованием пары из иона и электрона. В пламени такой процесс идёт как побочная реакция между компонентами, участвующими в основной реакции горения. Таким образом, процесс хемионизации в зоне фронта пла-

мени неразрывно связан как с процессами горения, так и с природой топлива [5]. Полученные экспериментальные результаты [6; 7] позволяют говорить о химионизации пламени как о характеристике горения в камерах сгорания энергетических установок. Однако, несмотря на значительные успехи в данной области, ещё до конца не изучена взаимосвязь химионизации пламени с максимальным давлением в камере сгорания и адиабатической температурой пламени.

Целью работы является исследование связи химионизации зоны химических реакций турбулентного пламени с его температурой и максимальным давлением в камере сгорания переменного объёма.

Вывод основных соотношений

Согласно традиционным представлениям электродинамики, электронный ток пламени зависит от концентрации электронов в области взаимодействия ИЗ с зоной химических реакций пламени, температуры пламени (T_b), площади контакта ИЗ с зоной химических реакций пламени (S), заряда (e^-) и массы (m_e) электрона.

Концентрация электронов в области взаимодействия ИЗ с зоной химических реакций пламени зависит: 1) от количества углеродсодержащих частиц топлива в камере сгорания [5]; 2) количества частиц, проникающих из зоны подогрева в зону химических реакций пламени; 3) доли частиц с энергией, достаточной для вступления в химическую реакцию; 4) вероятности, что химическая реакция будет сопровождаться выделением электронов; 5) доли электронов, попадающих на ИЗ.

Таким образом, температура пламени описывается формулой

$$T_b = 0,5 \left(\frac{I}{N A} \right)^2 + \frac{E_a}{R} + \frac{I}{2 N A} \sqrt{\left(\frac{I}{N A} \right)^2 + 4 \frac{E_a}{R}}, \quad (1)$$

$$N = \frac{M_f}{M_{fi}} g_c \frac{V_i}{V_c V_f} \exp \left[-\frac{a}{D_m + D_t} \right] P, \quad (2)$$

$$A = e^{-\sqrt{\frac{8k}{\pi m_e}}} S. \quad (3)$$

Здесь I – показания ионизационного зонда, А; N – концентрация электронов во фронте пламени, частиц/м³; A – константа, А·м³/К; M_f – масса топлива в камере сгорания, кг; M_{fi} – масса одной молекулы топлива, кг; g_c – массовая доля углерода в топливе; V_f – объём зоны химических реакций пламени, равный произведению ширины зоны химических реакций на площадь поверхности пламени, м³; V_c – объём камеры сгорания, м³; V_i – объём зоны химических реакций пламени, контактирующей с ИЗ, м³; E_a – энергия активации, $E = 7,1$ кДж/моль [8]; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К); P – вероятность химионизации, $P \in [0; 1]$; k – постоянная Больцмана, Дж/К; a – температуропроводность, м²/с; D_m – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; D_t – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; m_e – масса электрона, кг;

S – площадь поверхности ИЗ, контактирующей с зоной химических реакций пламени, м^2 ; e^- – заряд электрона, Кл.

Поскольку в настоящее время существует большое количество модификаций ИЗ, то влияние их формы на значение электронного тока в формуле (1) учитывается через объём V_i , который равен произведению площади поверхности S , контактирующей с пламенем, на толщину дебаевского слоя, обусловленного напряжённостью электрического поля.

Давление в камере сгорания определялось с использованием уравнения состояния

$$P = \frac{M R}{V_c} (T_b \chi + T_0 [1 - \chi]), \quad (4)$$

где M – число молей горючей смеси и продуктов сгорания, моль; T_0 – температура несгоревшего топлива, К; χ – доля сгоревшего топлива.

Доля сгоревшего топлива была найдена с использованием уравнения состояния идеального газа и с учётом равенства давлений в сгоревшей и несгоревшей зоне КС:

$$\chi = \frac{1}{\frac{R_b T_b}{R_f T_{b \min}} \frac{V_u}{V_c - V_u} + 1}, \quad (5)$$

где R_b – газовая постоянная продуктов сгорания, Дж/(моль·К); R_f – газовая постоянная топливовоздушной смеси (ТВС), Дж/(моль·К); $T_{b \min}$ – температура погасания пламени, К; V_u – объём несгоревшего топлива, м^3 .

Поскольку смесь *hythane* с воздухом сжигается во всём объёме КС, то объём несгоревшего топлива зависит от объёма щелей в КС, толщины несгоревшего слоя топлива у стенок КС и от площади КС в момент окончания сгорания:

$$V_u = \delta_u S_k + V_{cr}, \quad (6)$$

где δ_u – толщина несгоревшего слоя топлива у стенки КС, м; S_k – площадь КС в момент окончания сгорания топлива, м^2 ; V_{cr} – объём щелей в КС, м^3 .

Площадь и объём КС в момент завершения сгорания зависят от размеров и формы КС, расположения свечи зажигания и продолжительности процесса сгорания, которая была найдена по политропе расширения.

Толщина пристеночного несгоревшего слоя рассчитывалась по формуле:

$$\delta_u = \frac{U_n \delta_t}{\left(\frac{S_{kc}}{S_{\phi n}} \right)_{\max} U_t}, \quad (7)$$

где U_n – нормальная скорость пламени, м/с; $\left(S_{kc} / S_{\phi n} \right)_{\max}$ – предельно возможное отношение площади контакта фронта пламени с КС (S_{kc}) к площади поверхности фронта

пламени ($S_{\phi n}$); δ_t – ширина зоны турбулентного горения, м; U_t – скорость распространения турбулентного пламени, м/с.

Нормальная скорость пламени с учётом экспериментальных данных [9] и поправок [10; 11], учитывающих особенности сжигания метановодородовоздушных смесей в ДВС, рассчитывалась по формуле:

$$U_n = U_{n0} \left(\frac{T_u}{T_0} \right)^\gamma \left(\frac{P_u}{P_0} \right)^\beta, \quad (8)$$

где U_{n0} – нормальная скорость пламени при температуре T_0 и давлении P_0 , м/с; T_u, P_u – соответственно температура и давление при сгорании; γ, β – постоянные.

Температура погасания пламени и предельно возможное отношение площади контакта фронта пламени с КС (S_{kc}) к площади поверхности фронта пламени ($S_{\phi n}$) определялось с использованием теории пределов распространения пламени академика Я.Б. Зельдовича. В результате было выявлено, что сжигание стехиометрических смесей с добавкой водорода приводит к увеличению $(S_{kc} / S_{\phi n})_{\max}$, т.е. повышает устойчивость горения. Полученный результат соответствует исследованиям [12], зафиксировавшим увеличение устойчивости горения и расширение концентрационных пределов распространения пламени при добавках водорода.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для проверки предлагаемого метода расчёта температуры пламени и давления в КС были экспериментально найдены величины, входящие в (1)–(8). Эксперименты проводились в камере сгорания переменного объёма, в качестве топлива использовался *hythane* с содержанием водорода (g_H) при 5, 10 и 15%.

В результате проведённых исследований были получены значения давления в камере сгорания, электронного тока, ширины зоны химических реакций и скорости распространения турбулентного пламени при разных добавках водорода в *hythane* и коэффициентах избытка воздуха α (рис. 1).

Анализ графиков на рис. 1 показывает, что максимальные значения электронного тока, температуры пламени и давления наблюдаются при сжигании стехиометрических смесей *hythane*.

Результаты (рис. 1, а) показали, что только при 5%-й добавке водорода в топливо происходит увеличение электропроводности зоны химических реакций пламени. Причём с обеднением смеси влияние добавки водорода усиливается. Подобные результаты известны для поршневого двигателя [7] при изучении влияния на электронный ток добавок (в массовых долях) 4 и 8% водорода в природный газ. Причина этого заключается в зависимости электропроводности пламени от концентрации свободного радикала CH^+ , которая зависит от доли углерода в топливе и скорости химических реакций. Количество углерода в топливе определяет потенциальный резерв образования CH^+ , а скорость химических реакций характеризует интенсивность его образования во время процесса сгорания. При добавке водорода в топливо одновременно происходит уменьшение концентрации углерода и увеличение скорости химических реакций.

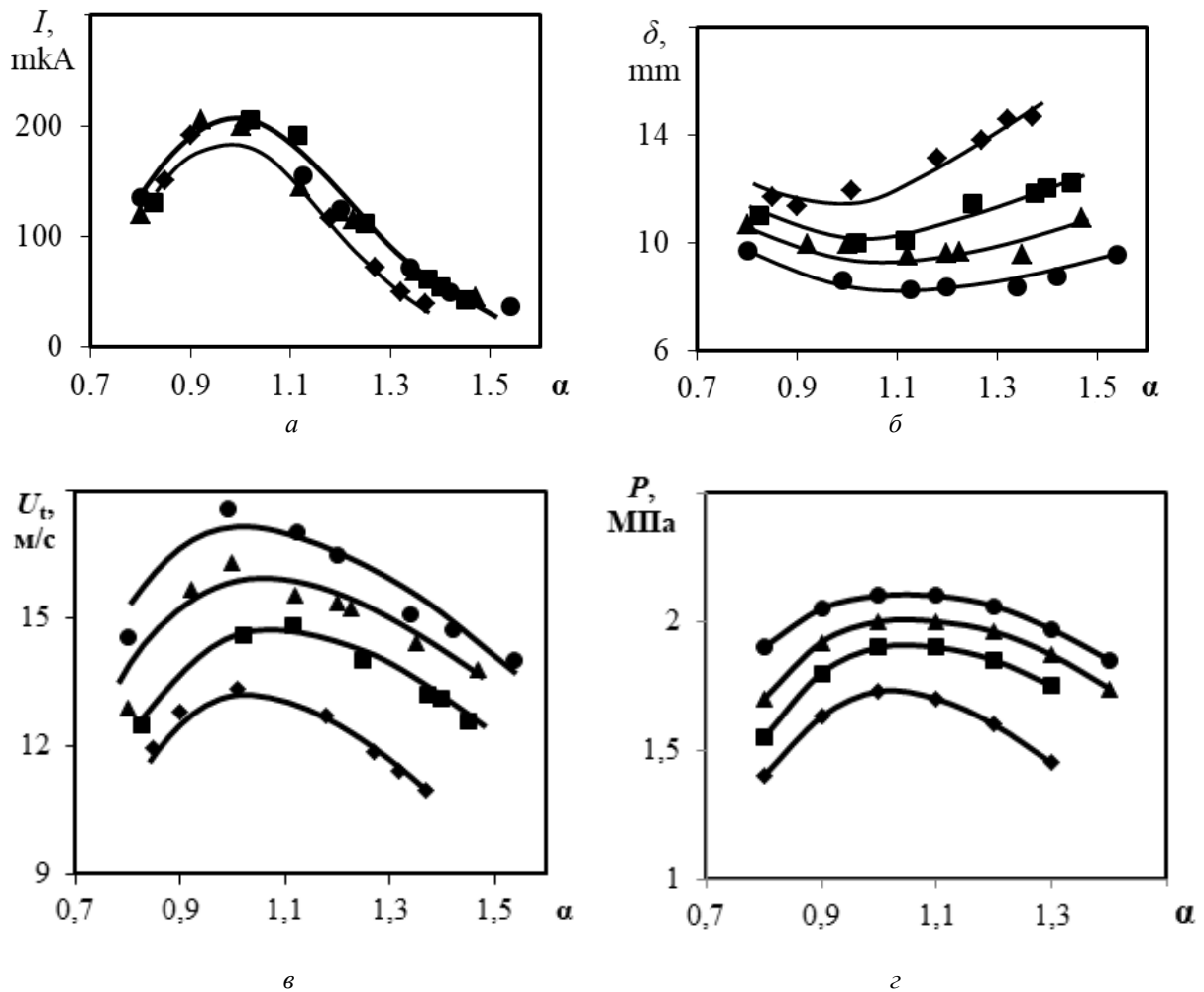


Рис. 1. Зависимость электронного тока (а), ширины зоны химических реакций (б), скорости распространения пламени (в) и максимального давления в КС (г) от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода:
 $g_n=0\%$ – \blacklozenge ; $g_n=5\%$ – \blacksquare ; $g_n=10\%$ – \blacktriangle ; $g_n=15\%$ – \bullet

Из данных, представленных на рис. 1, б, видно, что добавление водорода приводит к сужению ширины зоны химических реакций турбулентного пламени. Данный эффект объясняется возрастанием скорости химических реакций во фронте пламени. Чем выше скорость реакций, тем быстрее сгорает топливо и интенсивнее сокращается ширина зоны химических реакций пламени. Отмечено, что уменьшение ширины пламени происходит интенсивнее с увеличением коэффициента избытка воздуха. Так, например, при $\alpha = 1$ добавка 15% водорода приводит к сокращению ширины пламени на 18%, а для $\alpha = 1,2$ соответственно на 26%.

Зависимость скорости распространения пламени от состава ТВС и доли водорода в nuthane показана на рис. 1, в. Анализ выявил увеличение скорости пламени при добавке водорода. Причиной этого является то, что добавка водорода способствует формированию большего количества активных центров химических реакций и снижению энергии воспламенения. Следовательно, происходит интенсификация химических реакций горения.

Данные экспериментов на рис. 1, г показывают заметный рост максимального давления сгорания в цилиндре ДВС при увеличении доли водорода в топливе. Причём с обеднением смеси влияние добавок водорода усиливается. Подобное поведение давления при изменении химического состава топлива наблюдалось при сжигании смесей

метана с водородом в поршневых двигателях разной конструкции [13–15], а также при сжигании смесей бензина с водородом в двигателе [16] и в бомбе постоянного объёма [17]. Позитивное влияние водорода на давление объясняется тем, что водород способствует увеличению теплоты сгорания топлива и скорости распространения пламени. В результате при сгорании выделяется больше тепла, а само топливо сгорает в меньшем объёме. Таким образом, добавление водорода может обеспечить устойчивое сгорание бедной ТВС без потерь мощности ДВС.

Сравнение T_b , рассчитанной по формуле (1), с температурой, рассчитанной по общепринятой методике (с использованием уравнения состояния и функции Вибе) [10], при экспериментальных значениях давления показало наличие хорошей сходимости при изменении коэффициента избытка воздуха α от 0,8 до 1,15. Однако с дальнейшим обеднением топлива расхождение расчётных и экспериментальных данных увеличивается. Например для $\alpha = 1,3$ расхождение достигает 14%. На рис. 2 представлена расчётная зависимость температуры пламени в камере сгорания переменного объёма от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода в топливо.

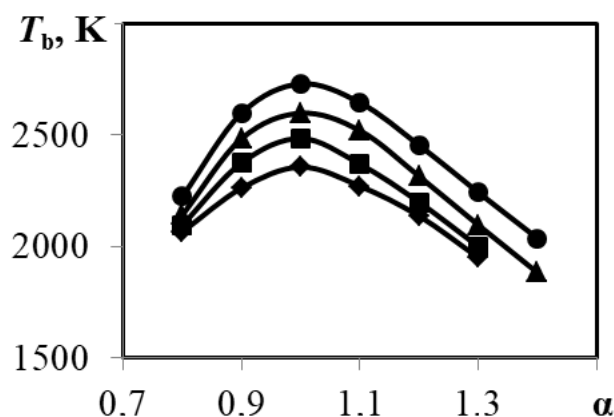


Рис. 2. Зависимость температуры пламени от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода: $g_H2=0\%$ – ♦; $g_H2=5\%$ – ■; $g_H2=10\%$ – ▲; $g_H2=15\%$ – ●

Использование добавок водорода приводит к повышению температуры пламени. Например, при $\alpha=1$ добавка водорода в количестве 15% приводит к росту температуры на 22%. Данный эффект качественно схож с известными результатами [18;19] и объясняется промотирующим влиянием водорода на процесс сгорания и повышением теплоты сгорания топлива.

На рис. 3 представлена зависимость полноты сгорания топлива и максимального давления в КС от коэффициента избытка воздуха и доли водорода в топливе.

Из зависимостей, показанных на рис. 3, а, видно, что с увеличением доли водорода в топливе растёт полнота сгорания топлива. Это объясняется ростом скорости сгорания реакций пламени. Стоит отметить, что формула (5) позволяет уточнить модель И.И. Вибе и могут быть рассчитаны три из четырёх параметров, входящих в модель.

На рис. 3, б представлены значения максимального давления в цилиндре ДВС, полученные экспериментально и рассчитанные по уточнённой модели И.И. Вибе с использованием формул (4), (5). Приведённые зависимости показывают хорошее соответствие экспериментальных и расчётных данных, что свидетельствует о достоверности формул.

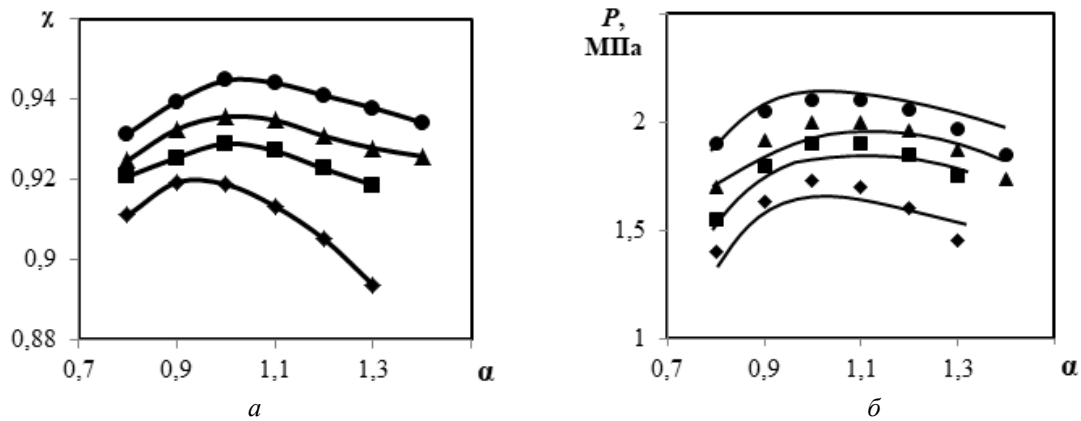


Рис. 3. Зависимость полноты сгорания топлива (а) и максимального давления (б) от коэффициента избытка воздуха и доли водорода: расчёт - —; эксперимент - \diamond , \blacksquare , \blacktriangle , \bullet ; \diamond - $r_H=0\%$; \blacksquare - $r_H=29\%$; \blacktriangle - $r_H=47\%$; \bullet - $r_H=58\%$

Заключение

Результаты экспериментального определения характеристик распространения турбулентного пламени, электропроводности в зоне химических реакций пламени и анализа их воздействия на температуру пламени и максимальное давление в камере сгорания переменного объёма позволяют сделать следующие выводы.

1. Максимальные значения электронного тока, температуры пламени и давления наблюдаются при сжигании стехиометрических смесей.

2. Повышение электропроводности пламени свидетельствует об интенсификации кинетики химических реакций горения, что в результате приводит к росту температуры пламени и давления в камере сгорания.

3. Теоретически и экспериментально доказано, что связь хемионизации пламени с температурой и давлением в камере сгорания имеет сложный, нелинейный характер, которая зависит, в том числе, от химического состава горючей смеси, фундаментальных характеристик распространения пламени и конструкции камеры сгорания.

4. Предложенный метод, основанный на использовании явления хемионизации углеводородного пламени, позволяет с требуемой точностью рассчитать температуру пламени и максимальное давление в камере сгорания переменного объёма. Это говорит о целесообразности применения ионизационных зондов на этапе проектирования и доводки малоэмиссионных и энергоэффективных камер сгораний двигателей и энергоустановок.

Работа выполнена в рамках государственного заказа, проект № 394, и при поддержке Правительства Самарской области в рамках программы назначения денежных выплат для молодых учёных и конструкторов, работающих в Самарской области.

Библиографический список

1. Nanthagopal K., Subbarao R., Elango T., Baskar P., Annamalai K. Hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG): A futuristic fuel for internal combustion engines // Thermal Science. 2011. V. 15, Iss. 4. P. 1145-1154. DOI: 10.2298/tsci100730044n
2. Rakopoulos C.D., Scott M.A., Kyritsis D.C., Giakoumis E.G. Availability analysis of hydrogen/natural gas blends combustion in internal combustion engines // Energy. 2008. V. 33, Iss. 2. P. 248-255. DOI: 10.1016/j.energy.2007.05.009

3. Molina D., Restrepo F., Bedoya I. Combustion Monitoring System On A Natural Gas Fuelled Spark Ignition Engine With High Compression Ratio Using Ionization Current Sensors // *Proceedings Energy and Sustainability VI*. 2015. V. 195. P. 209-218. DOI: 10.2495/esus150181

4. Ясников И.С., Ивашин П.В., Шайкин А.П. К вопросу о турбулентном распространении пламени в замкнутом объёме // *Журнал технической физики*. 2013. Т. 83, № 11. С. 39-43.

5. Шайкин А.П., Галиев И.Р. О влиянии температуры и ширины зоны турбулентного горения на показания ионизационного датчика // *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86, № 8. С. 87-89.

6. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р., Дерячев А.Д. Характеристики распространения пламени и их влияние на образование несгоревших углеводородов и оксида азота в отработавших газах при добавке водорода в топливно-воздушную смесь энергетических установок с искровым зажиганием. Самара: Самарский научный центр РАН, 2016. 259 с.

7. Gao Z., Wu X., Gao H., Liu B. Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends with BSS de-noising method // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. V. 35, Iss. 23. P. 12918-12929. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.08.129

8. Гардинер У. Химия горения. М.: Мир, 1988. 464 с.

9. Hermanns R.T. *Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures*. Veenendaal: Universal Press, 2007. 144 p.

10. Heywood J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988. 930 p.

11. Verhelst S., Woolley R., Lawes M., Sierens R. Laminar and unstable burning velocities and Markstein lengths of hydrogen-air mixtures at engine-like conditions // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2005. V. 30, Iss. 1. P. 209-216. DOI: 10.1016/j.proci.2004.07.042

12. Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород: параметры горения и взрыва. М.: Физматлит, 2008. 288 с.

13. Ma F., Naeve N., Wang L. Hydrogen-enriched compressed natural gas as a fuel for engines // *Natural Gas*. 2010. P. 307-333. DOI: 10.5772/9852

14. Mohammed S.E., Baharom M.B., Aziz A.R.A. Analysis of engine characteristics and emissions fueled by in-situ mixing of small amount of hydrogen in CNG // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. V. 36, Iss. 6. P. 4029-4037. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.12.065

15. Ceper B.A. Usability of hydrogen-natural gas mixtures in internal combustion engines. Phd thesis. Erciyes University, Institute of Natural Sciences, 2009. 230 p.

16. Negurescu N., Pana C., Cernat A. Aspects of using hydrogen in SI engine // *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2012. V. 74, Iss. 1. P. 11-20.

17. Бортников Л.Н., Павлов Д.А., Русаков М.М., Шайкин А.П. Состав продуктов сгорания бензоводородовоздушных смесей в сферической камере постоянного объёма // *Химическая физика*. 2011. Т. 30, № 1. С. 56-65.

18. Арутюнов В.С., Борисов А.А., Политенкова Г.Г., Рахметов А.Н., Трошин К.Я. Влияние добавок водорода на нижний концентрационный предел воспламенения метана // *Горение и взрыв*. 2012. № 5. С. 28-32.

19. Cho E.-S., Chung S.H. Improvement of flame stability and NO_x reduction in hydrogen-added ultra lean premixed combustion // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009. V. 23, Iss. 3. P. 650-658. DOI: 10.1007/s12206-008-1223-x

RELATION BETWEEN FLAME CHEMIIONIZATION AND VARIABLE-VOLUME COMBUSTION CHAMBER TEMPERATURE AND PRESSURE

© 2017

A. P. Shaikin Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Energy Machines and Control Systems; Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation; td@tltsu.ru

I. R. Galiev Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Vehicle Design and Operation; Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation; sbs777@yandex.ru

The article presents the results of investigating the relation between flame chemiionization and the flame temperature and pressure in a variable- volume combustion chamber. Functional dependences of flame temperature and maximum pressure on the electron current caused by flame chemiionization, fundamental characteristics of flame propagation and combustion efficiency are presented. Comparison of the temperature calculated by the proposed method with experimental data shows that with the excess air factor of 0.8 to 1.15, the precision is more than 85%. Comparison of the maximum pressure obtained experimentally and calculated by the refined Vibe model, using the proposed formulas, showed good agreement. The results of the work can be used to predict and monitor maximum flame temperature and pressure in the combustion chamber of an internal combustion engine and other power plants using an ionization probe.

Flame temperature; pressure; chemiionization; ionization probe; chemical reaction zone; hythane.

Citation: Shaikin A.P., Galiev I.R. Relation between flame chemiionization and variable-volume combustion chamber temperature and pressure. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 4. P. 91-100. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-4-91-100

References

1. Nanthagopal K., Subbarao R., Elango T., Baskar P., Annamalai K. Hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG): A futuristic fuel for internal combustion engines. *Thermal Science*. 2011. V. 15, Iss. 4. P. 1145-1154. DOI: 10.2298/tsci100730044n
2. Rakopoulos C.D., Scott M.A., Kyritsis D.C., Giakoumis E.G. Availability analysis of hydrogen/natural gas blends combustion in internal combustion engines. *Energy*. 2008. V. 33, Iss. 2. P. 248-255. DOI: 10.1016/j.energy.2007.05.009
3. Molina D., Restrepo F., Bedoya I. Combustion Monitoring System On A Natural Gas Fuelled Spark Ignition Engine With High Compression Ratio Using Ionization Current Sensors. *Proceedings Energy and Sustainability VI*. 2015. V. 195. P. 209-218. DOI: 10.2495/esus150181
4. Yasnikov I.S., Ivashin P.V., Shaikin A.P. On the turbulent propagation of a flame in a closed volume. *Technical Physics*. 2013. V. 58, Iss. 11. P. 1587-1591. DOI: 10.1134/s1063784213110297
5. Shaikin A.P., Galiev I.R. On the effect of temperature and the width of the turbulent combustion zone on the ionization detector readings. *Technical Physics*. 2016. V. 61, Iss. 8. P. 1206-1208. DOI: 10.1134/s1063784216080247
6. Shaikin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R., Deryachev A.D. *Kharakteristiki rasprostraneniya plameni i ikh vliyaniye na obrazovaniye nesgorevshikh uglevodorodov i oksida azota v otrabotavshikh gazakh pri dobavke vodoroda v toplivno-vozdushnuyu smes' energeticheskikh ustanovok s iskrovym zazhiganiyem* [Characteristics of flame propagation and their influence on the formation of unburned hydrocarbons and nitric oxide in the exhaust gases with the addition of hydrogen to the fuel-air mixture of spark-ignition power plants]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2016. 259 p.

7. Gao Z., Wu X., Gao H., Liu B. Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends with BSS de-noising method. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. V. 35, Iss. 23. P. 12918-12929. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.08.129

8. Gardiner W.C. *Combustion Chemistry*. New York: Springer-Verlag, 1984. 351 p.

9. Hermanns R.T. *Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures*. Veenendaal: Universal Press, 2007. 144 p.

10. Heywood J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988. 930 p.

11. Verhelst S., Woolley R., Lawes M., Sierens R. Laminar and unstable burning velocities and Markstein lengths of hydrogen – air mixtures at engine-like conditions. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2005. V. 30, Iss. 1. P. 209-216.

DOI: 10.1016/j.proci.2004.07.042

12. Gel'fand B.E., Popov O.E., Chayvanov B.B. *Vodorod: parametry goreniya i vzryva* [Hydrogen: parameters of combustion and explosion]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2008. 288 p.

13. Ma F., Naeve N., Wang L. Hydrogen-enriched compressed natural gas as a fuel for engines // *Natural Gas*. 2010. P. 307-333. DOI: 10.5772/9852

14. Mohammed S.E., Baharom M.B., Aziz A.R.A. Analysis of engine characteristics and emissions fueled by in-situ mixing of small amount of hydrogen in CNG. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. V. 36, Iss. 6. P. 4029-4037.

DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.12.065

15. Ceper B.A. Usability of hydrogen–natural gas mixtures in internal combustion engines. Phd thesis. Erciyes University, Institute of Natural Sciences, 2009. 230 p.

16. Negurescu N., Pana C., Cernat A. Aspects of using hydrogen in SI engine. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2012. V. 74, Iss. 1. P. 11-20.

17. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Shaikin A.P. The composition of combustion products formed from gasoline-hydrogen-air mixtures in a constant-volume spherical chamber. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2011. V. 5, Iss. 1. P. 75-83. DOI: 10.1134/s1990793111010039

18. Arutyunov V.S., Borisov A.A., Politenkova G.G., Rakhmetov A.N., Troshin K.Ya. The effect of hydrogen additives on the lean flammability limit of methane. *Combustion and Explosion*. 2012. No. 5. P. 28-32. (In Russ.)

19. Cho E.-S., Chung S.H. Improvement of flame stability and NOx reduction in hydrogen-added ultra lean premixed combustion. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009. V. 23, Iss. 3. P. 650-658. DOI: 10.1007/s12206-008-1223-x