

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ТОКА ИОНИЗАЦИИ И МАКСИМАЛЬНОГО ИНДИКАТОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ СГОРАНИИ БЕНЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ, ОБОГАЩЕННОЙ ВОДОРОДОМ

© 2017

А.П. Шайкин, доктор технических наук,
профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления»
П.В. Ивашин, кандидат технических наук, научный сотрудник НИЧ
А.Д. Дерячев, кандидат технических наук, техник НИЧ
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: датчик ионизации; химионизация; термоионизация; поршневой двигатель; процесс сгорания; индикаторное давление; добавка водорода в топливно-воздушную смесь; коэффициент избытка воздуха; одноцилиндровая экспериментальная установка.

Аннотация: Ионный ток, возникающий в результате химических реакций горения углеводородного топлива, называют током химионизации. Анализ исследовательских работ показал, что величина тока химионизации может характеризовать интенсивность и скорость химических реакций горения в камере сгорания поршневого двигателя, а следовательно, и эффективность тепловыделения в процессе сгорания двигателя внутреннего сгорания. В работе показано, что исследование взаимосвязи ионного тока и индикаторного давления сгорания, в наибольшей мере определяющего эффективность рабочего процесса, является актуальной задачей, особенно для бензиновых двигателей с добавками водорода. Цель работы – анализ зависимости индикаторного давления сгорания и ионного тока при различных начальных условиях горения топливно-воздушной смеси. На основе экспериментальных исследований, проведенных на одноцилиндровой моторной установке УИТ-85, получены данные об ионном токе, возникающем на удаленном от свечи зажигания электроде датчика ионизации вследствие прохождения через него фронта пламени. Получены индикаторные диаграммы с помощью пьезоэлектрического датчика давления фирмы Kistler, совмещенного со свечой зажигания. Представлены данные обработки пиков ионного тока и индикаторного давления и построены графики зависимости их от состава смеси при различных начальных условиях. В результате работы представлен график взаимосвязи максимумов индикаторного давления и ионного тока при варьировании состава смеси при различной частоте вращения коленчатого вала, массовой доле добавляемого водорода в топливно-воздушную смесь, степени сжатия и двух углов опережения зажигания.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных методов улучшения энергетических и экологических показателей работы двигателя внутреннего сгорания (далее – ДВС) является организация его работы на альтернативном виде топлива [1; 2]. Согласно исследованиям [2–5], наиболее благоприятным видом топлива представляется водород. Так, например, департамент энергетики США (DOE) в январе 2006 г. принял план развития водородной энергетики “Roadmap on Manufacturing R&D for the Hydrogen Economy” [6], где уже к 2025 году поставлена задача широкомасштабного применения водорода в автомобильной промышленности. Однако существует ряд нерешенных проблем, связанных с производством чистого водорода, условиями его хранения и рядом конструктивных проблем. В связи с этим на данный момент наибольшее количество публикаций посвящено исследованию процесса сгорания топливно-воздушной смеси (далее – ТВС) с микродобавками водорода [3; 7–9].

Динамика тепловыделения в рабочем цикле двигателя внутреннего сгорания, являющаяся основным параметром оценки эффективности его работы, определяется по индикаторному давлению цикла [10]. Для глубокого понимания динамики тепловыделения необходима информация о протекании рабочего процесса в камере сгорания (КС) поршневого ДВС, которую можно получить, благодаря относительно простому методу, основанному на электропроводности углеводородного пламени.

В работе [10] академик Б.С. Стечкин теоретически связывает энергетический баланс рабочего цикла со

скоростью распространения пламени и приходит к выводу, что для исследования рабочего процесса ДВС недостаточно информации, полученной только из индикаторной диаграммы. Особенно важно понимание влияния характеристик пламени на состояние внутреннего теплового баланса и процессов образования токсичных компонентов продуктов сгорания.

Среди известных способов экспериментального исследования горения в ДВС выделяется метод, основанный на аномально высокой электропроводности пламени углеводородов [11; 12], характеризующийся достаточно высокой информативностью и относительно недорогой аппаратной реализацией. В исследованиях ионизации пламени углеводородов [12] с помощью ионизационных датчиков показано, что концентрация заряженных частиц во фронте пламени значительно превышает равновесную для температуры горения и определяется химическими механизмами реакций горения углеводородов. Поэтому в ДВС с искровым зажиганием метод ионизационных зондов активно используется для исследовательских целей [13]. Также известны попытки его использования в системах адаптивного управления ДВС [14; 15].

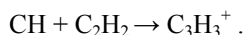
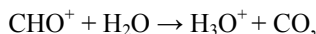
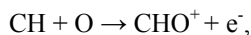
Согласно работе [12] по природе происхождения различают два вида ионизации, возникающей в пламени: химионизация, возникающая в результате химических реакций горения в пламени, и термоионизация, возникающая вследствие высокой температуры продуктов сгорания.

Эксперименты многих ученых, например [16; 17], показали, что ионный ток мгновенно достигает максимального



Рис. 1. Камера сгорания УИТ-85 с установленными датчиками

значения в момент соприкосновения фронта пламени с ионизационным датчиком, после чего уменьшается почти до нуля, несмотря на дальнейшее увеличение температуры и давления в камере сгорания. Данный факт объясняется химической природой процесса горения, то есть выделением значительного количества электронов при образовании промежуточных продуктов горения углеводородного топлива, которая определяется следующими реакциями:



Это говорит о том, что ток хемионизации определяется интенсивностью химических реакций, протекающих непосредственно в зоне горения, и не зависит от температуры продуктов сгорания. Таким образом, анализ исследований [16; 17], посвященных физике ионизации пламени углеводородов, позволил высказать гипотезу: величина ионного тока пламени в камере сгорания ДВС зависит от скорости реакций горения.

В работе [18] представлено исследование взаимосвязи максимума термоионизации и максимального индикаторного давления сгорания, где показано, что их максимумы совпадают по углу поворота коленчатого вала. Однако имеет место достаточно большой разброс экспериментальных точек зависимости между величинами пиков давления и ионного тока (порядка 60 %), особенно в зоне бедной смеси.

Поэтому исследование взаимосвязи пика хемионизации, наиболее характерного для анализа интенсивности химических реакций во фронте пламени, и максимума индикаторного давления представляется наиболее актуальным, особенно при горении бензовоздушной смеси с добавками водорода.

В связи с этим целью данной работы является анализ зависимости индикаторного давления сгорания и ионного тока при различных начальных условиях горения бензоводородовоздушной смеси.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленной задачи собрана экспериментальная установка на базе одноцилиндровой испытательной установки УИТ-85 [19]. В камеру сгорания УИТ-85 устанавливался двухэлектродный датчик, регистрирующий ионный ток при моменте прохождения пламени через электроды датчика. Для индикации применялся пьезоэлектрический датчик давления фирмы Kistler, интегрированный в корпус свечи зажигания. Камера сгорания с установленными датчиками представлена на рис. 1.

Методика эксперимента заключалась в записи осциллограмм ионного тока и индикаторного давления при изменении варьируемых параметров. В экспериментах изменялся состав ТВС (α) при различных добавках водорода в ТВС (g_{H_2}), углах опережения зажигания ($\theta_{o.z.}$) и степенях сжатия (ϵ). Влияние этих факторов было оценено на двух частотах вращения коленчатого вала (n), которые поддерживались электромотором, то есть при различных скоростях потока в цилиндре двигателя. При анализе осциллограмм ионного тока (см. рис. 2) определялись следующие параметры протекания ионного тока:

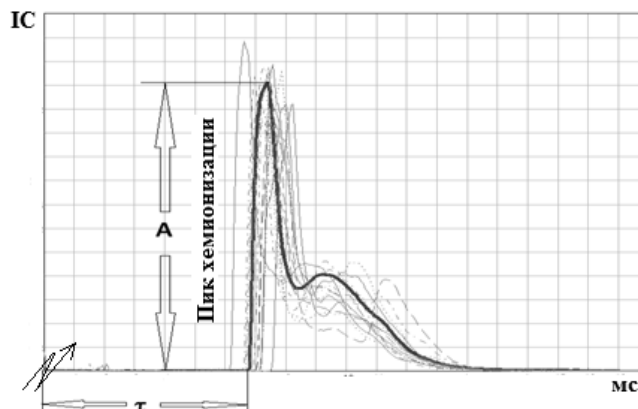


Рис. 2. Осциллограмма импульса ионного тока и параметры оценки

– время τ от искрового разряда до возникновения импульса ионного тока (т. е. до момента подхода фронта пламени к ионизационному зонду);

– амплитуда A импульса ионного тока (пик хемио-ионизации). Величина максимума ионного тока определялась по закону Ома:

$$IC = \frac{A}{R},$$

где R – сопротивление (характерная постоянная для измерительной цепи).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты обработки результатов экспериментов, проведенных на моторной установке УИТ-85, представлены на рис. 3, 4, 5 и 6. На рис. 3 представлен график зависимости максимального индикаторного давления сгорания от состава смеси при различной доле добавляемого водорода и частоте вращения коленчатого вала.

Отмечается характерное влияние состава ТВС на максимум индикаторного давления, которое подтверждается экспериментальными работами, проведенными на ДВС [20]. На режимах работы одноцилиндровой установки добавки водорода в количестве 3 и 5 % по массе от ТВС заметно увеличивают максимальное давление только в области бедных смесей, что позволяет сделать выводы об эффективности использования таких топливных композиций в указанных диапазонах по составу смеси.

С увеличением частоты вращения коленчатого вала максимальное давление в цилиндре экспериментальной установки уменьшается при прочих равных условиях. Это объясняется тем, что время на процесс сгорания уменьшается в большей степени, чем снижается продолжительность основной фазы сгорания за счет повышения скорости распространения пламени. Такие условия сгорания приводят к большим потерям теплоты

в системе охлаждения и, как следствие, уменьшению максимального давления сгорания.

На рис. 4 и 5 приведены графики зависимости максимального значения ионного тока от состава смеси при различной доле добавляемого водорода в ТВС (представлены результаты ионного тока у первого электрода ионизационного датчика (ИД), ионный ток у второго электрода ИД имеет аналогичный характер изменения).

Из рис. 3–5 видно, что характер изменения ионного тока и давления в зависимости от состава смеси и дозаводок водорода аналогичен.

На основании этих данных построен график взаимосвязи максимального индикаторного давления и максимального значения ионного тока, который показан на рис. 6. Для исследования указанной взаимосвязи при изменении состава ТВС в разных начальных условиях (при различной массовой доле добавляемого водорода в ТВС, частоте вращения коленчатого вала, двух углах опережения зажигания и степенях сжатия) были введены относительные единицы величины ионного тока I_0 и максимального индикаторного давления сгорания:

$$IC_{\text{отн}} = \frac{IC_i}{IC_{(\alpha=1)_i}},$$

$$Pz_{\text{отн}} = \frac{Pz_i}{Pz_{(\alpha=1)_i}},$$

где IC_i, Pz_i – максимальные значения ионного тока и индикаторного давления при текущем коэффициенте избытка воздуха α на i -м режиме;

$IC_{(\alpha=1)_i}, Pz_{(\alpha=1)_i}$ – максимальные значения ионного тока и индикаторного давления при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1, g_{H_2}=0$ % на i -м режиме.

На рис. 6 видно, что все экспериментальные точки, полученные при различных начальных условиях (состава ТВС, частоты вращения КВ, степени сжатия, угла опережения зажигания, доле водорода в ТВС),

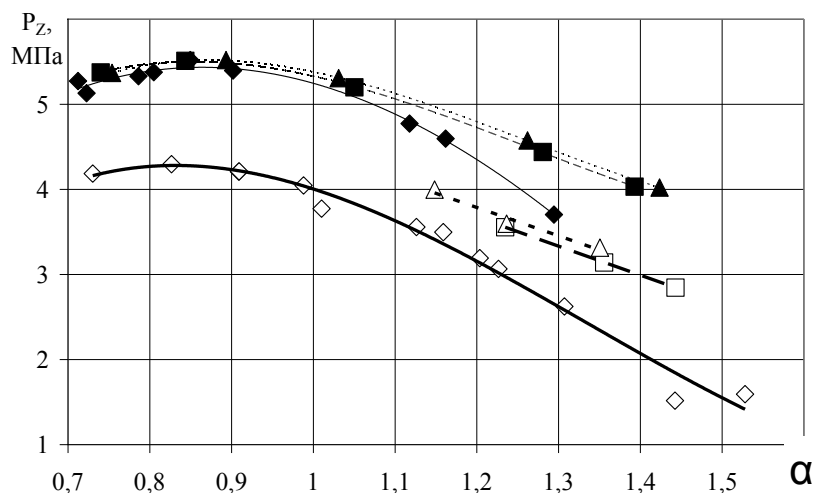


Рис. 3. Зависимость максимального давления в цилиндре УИТ-85 от состава ТВС ($\theta_{o.z.}=16$ гр., $\epsilon=5,9$):
 $n=600 \text{ мин}^{-1}, g_{H_2}$: \blacklozenge – 0 %, \blacksquare – 3 %, \blacktriangle – 5 %;
 $n=900 \text{ мин}^{-1}, g_{H_2}$: \diamond – 0 %, \square – 3 %, \triangle – 5 %

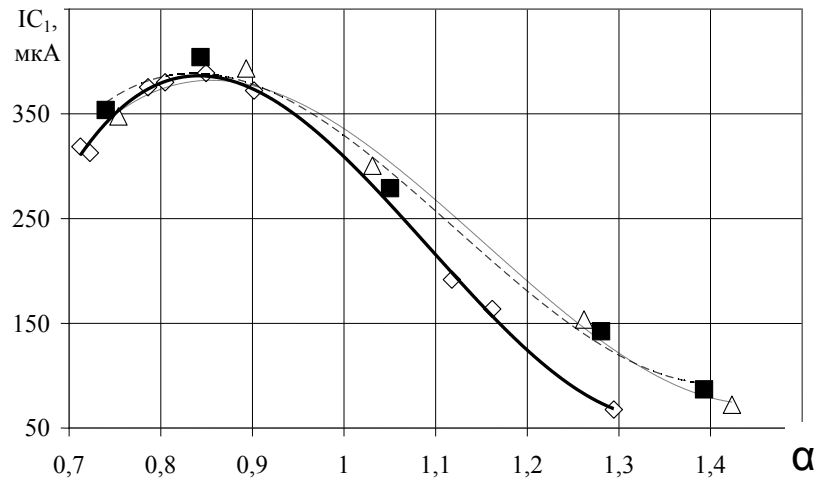


Рис. 4. Зависимость ионного тока от состава ТВС при $n=600 \text{ мин}^{-1}$ ($\theta_{o.з.}=16 \text{ зр.}$, $\varepsilon=5,9$): g_{H_2} : \diamond – 0 %, \blacksquare – 3 %, Δ – 5 %

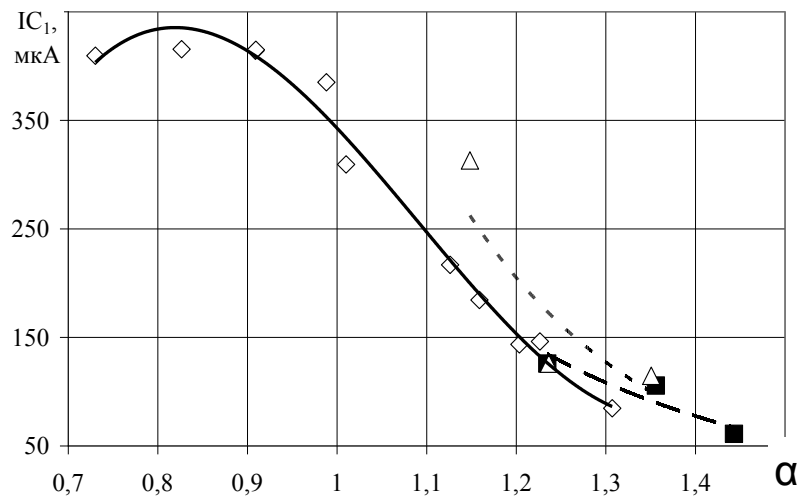


Рис. 5. Зависимость ионного тока от состава ТВС при $n=900 \text{ мин}^{-1}$ ($\theta_{o.з.}=16 \text{ зр.}$, $\varepsilon=5,9$): g_{H_2} : \diamond – 0 %, \blacksquare – 3 %, Δ – 5 %

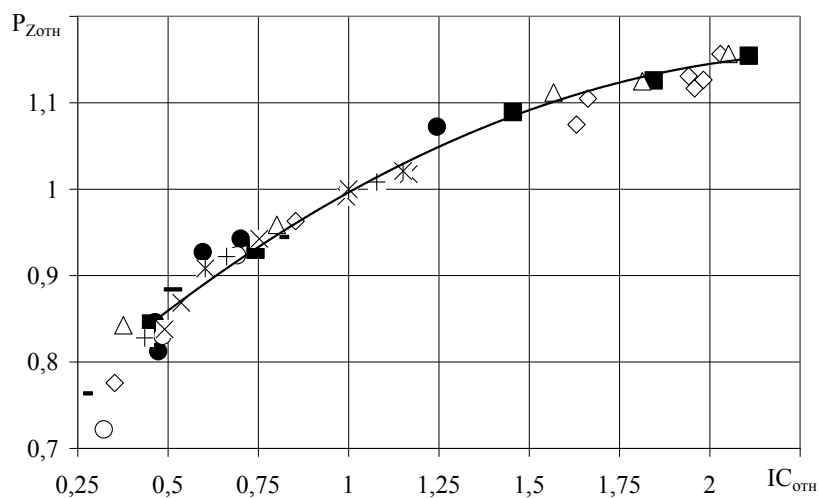


Рис. 6. Взаимосвязь максимального давления сгорания и максимума ионного тока при изменении состава смеси ($0,7 < \alpha < 1,6$):
 $n=600 \text{ мин}^{-1}$, $\varepsilon=5,9$; $\theta_{o.з.}=16 \text{ зр.}$, g_{H_2} : \diamond – 0%; \blacksquare – 3%; Δ – 5%;
 $n=900 \text{ мин}^{-1}$, $\varepsilon=5,9$; $\theta_{o.з.}=16 \text{ зр.}$, g_{H_2} : \bullet – 0%;
 $n=900 \text{ мин}^{-1}$, $\varepsilon=7$; $\theta_{o.з.}=22 \text{ зр.}$, g_{H_2} : \circ – 0%; \times – 3%; $+$ – 5%;
 $n=600 \text{ мин}^{-1}$, $\varepsilon=7$; $\theta_{o.з.}=16 \text{ зр.}$, g_{H_2} : \ast – 0%; \square – 3%; \triangle – 5%

могут быть описаны полиномом 2-го порядка. С практической точки зрения это говорит о возможности косвенной оценки максимальной величины индикаторного давления сгорания по максимуму ионному току.

Что особенно важно, данная закономерность сохраняется и при работе на бензоводородовоздушной смеси.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлена взаимосвязь зависимостей максимального индикаторного давления ионного тока у удаленного от свечи зажигания датчика ионизации от состава смеси при горении бензовоздушной смеси с добавками водорода.

2. Проведенный анализ показал взаимосвязь пиков ионного тока, косвенно характеризующего интенсивность химических реакций горения углеводородного топлива, и индикаторного давления, в большей мере определяющего эффективность тепловыделения в цилиндре двигателя. Представленные экспериментальные точки могут быть описаны полиномом 2-го порядка, причем независимо от добавок водорода в ТВС, состава смеси, частоты вращения коленчатого вала, угла опережения зажигания и степени сжатия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективные автомобильные топлива: виды, характеристики, перспективы / под ред. Я.Б. Чертова. М.: Транспорт, 1982. 319 с.
2. Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ, 2000. 311 с.
3. Приходьков К.В., Бастраков А.М., Рязанова Т.Н. Исследование влияния коэффициента избытка воздуха на характеристики горения водородо-воздушных смесей в условиях камеры сгорания постоянного объема // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 5. № 12. С. 37–39.
4. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей. Киев: Наукова думка, 1984. 143 с.
5. Малышенко С.П. Водородный автомобиль в России? // Энергия: экономика, техника, экология. 2003. № 7. С. 33–39.
6. State activities that promote fuel cells and hydrogen infrastructure development. Washington: Breakthrough Technologies Institute, 2006. 231 p.
7. Бортников Л.Н., Павлов Д.А., Русаков М.М., Смоленский В.В. Применение водорода для повышения полноты сгорания ТВС на режимах пуска и прогрева // Естественные и технические науки. 2013. № 1. С. 346–350.
8. Бортников Л.Н., Павлов Д.А., Русаков М.М., Шайкин А.П. Состав продуктов сгорания бензоводородовоздушных смесей в сферической камере постоянного объема // Химическая физика. 2011. Т. 30. № 1. С. 56–65.
9. Шайкин А.П., Дерячев А.Д. Взаимосвязь ширины зоны горения со скоростью распространения пламени и ионным током в условиях двигателя с искровым зажиганием // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2014. № 3. С. 82–86.

10. Стечкин Б.С., Генкин К.И., Золоторевский В.С. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 199 с.
11. Калькот Г. Процессы образования ионов в пламени // Вопросы ракетной техники. 1958. № 4. С. 78–94.
12. Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. М.: Metallurgy, 1968. 311 с.
13. Corcione F.E., Vaglieco V.M., Merola S.S. Evaluation of Knocking Combustion by an Ion Current System and Optical Diagnostics of Radical Species // Proceeding of 6th COMODIA Symposium. 2004. № 6. P. 487–495.
14. Kramer M., Wolf K. Approaches to gasoline engine control involving the use of ion current sensory analysis // Proceedings – SAE. 1990. P. 79–86.
15. Balles E.N., VanDyne E.A., Wahl A.M., Ratton K., Lai M.C. In cylinder air/fuel ratio approximation using spark gap ionization // SAE Technical Papers. 1998. DOI: 10.4271/980166.
16. Аравин Г.С. Ионизация пламени и пламенных газов в условиях бомбы и двигателя : дис. ... канд. техн. наук. М., 1951. 157 с.
17. Иноземцев Н.Н. Ионизация в ламинарных пламенах // Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. Энергетика и автоматика. 1960. № 2. С. 59–66.
18. Saitzkoff A., Reinmann R., Mauss F., Glavmo M. In-cylinder pressure measurements using the spark plug as an ionization sensor // SAE Technical Papers. 1997. DOI: 10.4271/970857.
19. Ясников И.С., Ивашин П.В., Шайкин А.П. К вопросу о турбулентном распространении пламени в замкнутом объеме // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 11. С. 39–43.
20. Раменский А.Ю. Исследование рабочих процессов автомобильного двигателя на бензино-водородных топливных композициях : дис. ... канд. техн. наук. М., 1981. 202 с.

REFERENCES

1. Chertov Ya.B., ed. *Perspektivnyye avtomobilnye topliva: vidy, kharakteristiki, perspektivy* [Prospective automotive fuels: types, characteristics, perspectives]. Moscow, Transport Publ., 1982. 319 p.
2. Lyotko V., Lukanin V.N., Khachiyani A.S. *Primenenie alternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [The use of alternative fuels in internal combustion engines]. Moscow, MADI Publ., 2000. 311 p.
3. Prikhodkov K.V., Bastrakov A.M., Ryazanova T.N. Investigation of the effect of excess air ratio in the combustion characteristics of hydrogen-air mixtures in a combustion chamber of constant volume. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 5, no. 12, pp. 37–39.
4. Mishchenko A.I. *Primenenie vodoroda dlya avtomobilnykh dvigateley* [The use of hydrogen for automobile engines]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1984. 143 p.
5. Malysenko S.P. Hydrogen car in Russia?. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2003, no. 7, pp. 33–39.
6. *State activities that promote fuel cells and hydrogen infrastructure development*. Washington, Breakthrough Technologies Institute, 2006. 231 p.

7. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Smolensky V.V. The use of hydrogen to increase the completeness of combustion of fuel air mixture to start mode and heating. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 1, pp. 346–350.
8. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Shaykin 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, vol. 5, no. 1, pp. 75–83.
9. Shaykin A.P., Deryachev A.P. The relation of combustion area width with flame propagation velocity and ionic current within the spark-ignition engine. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 3, pp. 82–86.
10. Stechkin B.S., Genkin K.I., Zolotarevsky V.S. *Indikatornaya diagramma, dinamika teplovydeleniya i rabochiy tsikl bystrokhodnogo porshneвого dvigatelya* [The indicator diagram, the dynamics of heat and the duty cycle of a piston engine-speed]. Moscow, AN SSSR Publ., 1960. 199 p.
11. Kalkot G. The processes of formation of ions in the flame. *Voprosy raketnoy tekhniki*, 1958, no. 4, pp. 78–94.
12. Stepanov E.M., Dyachkov B.G. *Ionizatsiya v plameni i elektricheskoe pole* [Ionization in the flame and the electric field]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968. 311 p.
13. Corcione F.E., Vaglietto B.M., Merola S.S. Evaluation of Knocking Combustion by an Ion Current System and Optical Diagnostics of Radical Species. *Proceeding of 6th COMODIA Symposium*, 2004, no. 6, pp. 487–495.
14. Kramer M., Wolf K. Approaches to gasoline engine control involving the use of ion current sensory analysis. *Proceedings – SAE*, 1990, pp. 79–86.
15. Balles E.N., VanDyne E.A., Wahl A.M., Ratton K., Lai M.C. In cylinder air/fuel ratio approximation using spark gap ionization. *SAE Technical Papers*, 1998. DOI: 10.4271/980166.
16. Aravin G.S. *Ionizatsiya plameni i plamennykh gazov v usloviyakh bomby i dvigatelya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Ionization flame and the flame of a gas in a bomb and engine]. Moscow, 1951. 157 p.
17. Inozemtsev N.N. Ionization in laminar flames. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk. Energetika i avtomatika*, 1960, no. 2, pp. 59–66.
18. Saitzkoff A., Reinmann R., Mauss F., Glavmo M. In-cylinder pressure measurements using the spark plug as an ionization sensor. *SAE Technical Papers*, 1997. DOI: 10.4271/970857.
19. Yasnikov I.S., Ivashin P.V., Shaykin A.P. On the turbulent propagation of a flame in a closed volume. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 58, no. 11, pp. 1587–1591.
20. Ramensky A.Yu. *Issledovanie rabochikh protsessov avtomobilnogo dvigatelya na benzino-vodorodnykh toplivnykh kompozitsiyakh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Research workflows car engine on gasoline-hydrogen fuel compositions]. Moscow, 1981. 202 p.

**THE STUDY OF INTERRELATIONSHIP OF IONIZATION CURRENT
AND MAXIMUM INDICATED PRESSURE
DURING THE COMBUSTION OF HYDROGEN RICH GASOLINE-AIR MIXTURE**

© 2017

A.P. Shaikin, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair “Energy Machines and Control Systems”

P.V. Ivashin, PhD (Engineering), researcher of Research Department

A.D. Deryachev, PhD (Engineering), mechanic of Research Department

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: ionization sensor; chemi-ionization; thermal ionization; piston engine; combustion process; indicated pressure; hydrogen transfer to fuel-air mixture; excess air ratio; single-cylinder experimental assembly.

Abstract: Ion current occurring in the result of chemical reactions of hydrocarbon fuel combustion is called the chemi-ionization current. The analysis of the research works displayed that the chemi-ionization current value can characterize the intensity and velocity of chemical reactions of burning in the combustion chamber of a piston engine, and therefore, the efficiency of heat generation during the combustion in the internal combustion engine. The paper shows that the study of the interrelationship of ion current and indicated combustion pressure determining, to the greatest extent, the workflow efficiency is the critical task, especially for gasoline engines with hydrogen transfer. The goal of the paper is to analyze the dependence of indicated combustion pressure and ion current under various initial conditions of fuel-air mixture combustion. Based on the experimental studies carried out on the single-cylinder motor unit UIT-85, the authors obtained data on the ion current occurring on the ionization sensor electrode remote from the ignition spark plug in the result of the flame front passing through it. Using the Kistler’s piezoelectric pressure sensor combined with the ignition spark plug, the authors created the indicator diagrams. The paper presents the data on the processing of the ion current peaks and the indicated pressure and the diagrams of their dependence on the mixture composition under various initial conditions. As the result of the study, the authors presented the diagram of the interrelationship of maxima of indicated pressure and ion current when varying the mixture composition at various crankshaft speeds, mass fraction of hydrogen added to the fuel-air mixture, compression and two angles of ignition advance.