

**МАКСИМАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ СГОРАНИЯ И ЕГО СВЯЗЬ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СГОРАНИЯ  
В ДВИГАТЕЛЯХ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ**

© 2019

*А.П. Шайкин*, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления»  
*А.Д. Дерячев*, кандидат технических наук, техник научно-исследовательской части  
*М.В. Сазонов*, аспирант кафедры «Энергетические машины и системы управления»  
*С.С. Хлопоткин*, студент кафедры «Энергетические машины и системы управления»  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

**Ключевые слова:** сгорание; турбулентность; давление сгорания; добавка водорода; ионный ток; двигатель внутреннего сгорания; тепловыделение; характеристики сгорания; интенсивность химических реакций.

**Аннотация:** Представлены результаты исследования возможной взаимосвязи максимального давления сгорания, характеризующего эффективность тепловыделения, с основными характеристиками сгорания в поршневых ДВС. При проведении экспериментов для изменения характеристик распространения пламени в бензовоздушную смесь добавлялся водород в количестве 3 и 5 % от массового расхода топлива, а также изменялась турбулентность рабочего тела при использовании двух значений частот вращения коленчатого вала. Определены зависимости максимального давления сгорания  $P_{zmax}$  топливно-воздушной смеси (ТВС) и величины ионного тока пламени в зоне, наиболее удаленной от свечи зажигания, от состава бензовоздушной смеси с добавками водорода при ее горении в камере сгорания переменного объема. Добавка водорода приводит к сокращению времени сгорания, росту величины ионного тока и максимального давления сгорания ТВС. Рассмотрены основные характеристики сгорания: время, ионный ток, объем в момент достижения максимума давления, турбулентность, частота вращения коленчатого вала – и их влияние на величину максимального давления сгорания. Определена взаимосвязь максимального давления сгорания с величиной ионного тока, отражающей интенсивность химических реакций горения в зоне, наиболее удаленной от свечи зажигания, а также с объемом завершения сгорания. Экспериментальные точки с высокой степенью точности соединяются одной кривой. Полученные экспериментальные зависимости могут быть представлены в виде полинома 2-го порядка. Определено влияние изменения турбулентности за счет смены частоты вращения коленчатого вала на  $P_{zmax}$ .

Предложена эмпирическая математическая зависимость, связывающая максимальное давление сгорания и частоту вращения коленчатого вала. Зная максимальное значение давления сгорания на одном скоростном режиме и используя полученную зависимость, можно прогнозировать значение его величины для всего диапазона скоростных режимов работы двигателя.

**ВВЕДЕНИЕ**

В поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) механическое перемещение поршня осуществляется за счет преобразования химической энергии топлива в тепловую при его сгорании; тепловая энергия, в свою очередь, превращается в энергию давления продуктов сгорания. Работа цикла ДВС, его мощность и крутящий момент оцениваются индикаторным давлением, изменяющимся в течение нескольких миллисекунд от максимального давления сжатия до максимального давления сгорания и давления выпуска. В существующих методиках теплового расчета для определения эффективности работы двигателей, разработанных отечественными учеными, используется или величина максимального давления сгорания ( $P_z$ ) – метод Гриневецкого – Мазинга [1], или наиболее распространенный в настоящее время в России и за рубежом метод И.И. Вибе [2; 3] – интегрирование текущих значений давления при сгорании топлива по углу поворота коленчатого вала. Следует отметить, что в методике Гриневецкого – Мазинга используются только значения максимального давления сгорания, но не учитываются ни угол опережения зажигания, ни время достижения  $P_z$ . В методике И.И. Вибе длительность процесса сгорания (период тепловыделения) определяется на основании многочисленных экспериментальных данных, полученных при использовании в качестве топлива бензина или дизельного топлива.

Следует отметить, что во всех существующих эмпирических и полуэмпирических методиках, по которым рассчитываются параметры работы двигателей сгорания, крайне мало экспериментальных данных о взаимосвязи изменения давления рабочего тела с характеристиками сгорания топливно-воздушной смеси.

Авторы [4] теоретически обосновали связь энергетического баланса рабочего цикла и скорости распространения пламени и недостаточности информации, полученной только из индикаторной диаграммы, для исследования рабочего процесса ДВС. Особенно важно понимание влияния характеристик распространения пламени на состояние внутреннего теплового баланса и процессов образования токсичных компонентов продуктов сгорания.

Один из распространенных способов экспериментального исследования характеристик сгорания топливно-воздушной смеси ТВС в ДВС основан на аномально высокой электропроводности пламени углеводородного топлива [5; 6]. Этот способ обладает высокой информативностью при недорогом экспериментальном оборудовании.

Экспериментальные исследования ионизации пламени углеводородных топлив [7; 8] показали значительное превышение концентрации заряженных частиц во фронте пламени по сравнению с равновесной концентрацией для температуры горения. Подобное явление определяется механизмами химических реакций горения ТВС.

В соответствии с природой происхождения электропроводности существует два вида ионизации в пламени [9; 10]: химическая (хемионизация), обусловленная особенностями протекания химических реакций горения, и термическая (термоионизация), появляющаяся по достижении достаточно высокого уровня температуры продуктов сгорания (выше 2500 К).

Согласно результатам экспериментальных исследований [7; 8], отмечено мгновенное достижение максимального значения ионного тока при соприкосновении фронта пламени с электродами ионизационного датчика (ИД). После прохождения зоной горения электродов датчика значение тока уменьшается до нуля, хотя происходит последующий рост температуры в зоне электродов ИД и давления в камере сгорания. Данные ионизации пламени обусловлены химической природой процесса горения, то есть высвобождением значительного количества свободных электронов в процессе образования промежуточных продуктов горения углеводородного топлива.

В связи с вышесказанным явление химической ионизации пламени широко используется для определения различных характеристик сгорания ТВС в поршневых ДВС с искровым зажиганием [11; 12]. Такие исследования представляются наиболее актуальными в связи с тем, что альтернативные топлива, в том числе комбинированные с добавкой газообразного водорода, широко востребованы [13; 14].

Цель работы – получение и анализ результатов совместных экспериментальных исследований взаимосвязи максимального давления сгорания с основными характеристиками сгорания ТВС, такими как время распространения пламени и завершения сгорания, объем в момент максимального давления, величина максимального значения ионного тока в зоне, наиболее удаленной от свечи зажигания.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования характеристик распространения пламени и давления в процессе горения проводились на одномоторной исследовательской установке УИТ-85 [15], конструкция которой позволяет изменять степень сжатия, состав смеси, угол опережения зажигания, использовать различные виды топлива с применением ионизационных датчиков. Схема камеры сгорания при установке ионизационного датчика с двумя зондами (ИЗ) показана на рис. 1.

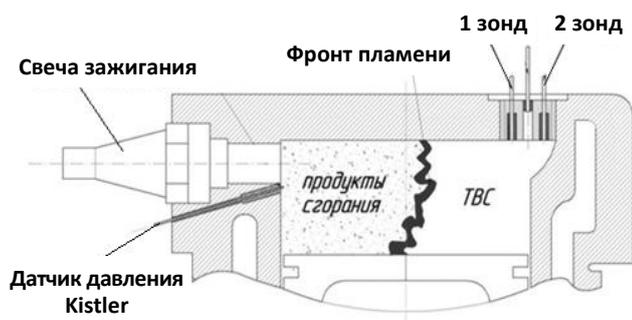


Рис. 1. Схема камеры сгорания с датчиком ионизации

Ионизационный датчик с двумя зондами установлен в удаленной от свечи зажигания зоне камеры сгорания, электроды расположены вдоль направления распространения фронта пламени. Направление распространения пламени было заранее оценено экспериментально с помощью поворота плоскости датчика относительно оси симметрии камеры сгорания.

Регистрация изменения давления в камере сгорания осуществлялась пьезоэлектрическим датчиком давления фирмы “Kistler”.

При проведении экспериментов делались записи осциллограмм ионного тока и индикаторного давления в зависимости от времени при изменении исследуемых параметров. Изменялся состав ТВС ( $\alpha$ ) при различных добавках водорода в ТВС ( $g_{H_2}$ ) и степенях сжатия ( $\varepsilon$ ).

Добавка водорода осуществлялась для изменения времени распространения пламени и сокращения процесса сгорания. Влияние этих параметров определялось для двух частот вращения коленчатого вала ( $n$ ), то есть на двух различных уровнях турбулентности рабочего тела в камере сгорания.

В ходе анализа осциллограмм ионного тока (рис. 2) определялись следующие параметры протекания ионного тока:  $P_z$  – изменение индикаторного давления;  $\tau_{P_z}$  – время появления максимального давления;  $IC_1$ ,  $IC_2$  – ионные токи в первом и втором зондах соответственно;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – время появления тока в цепи ИЗ<sub>1</sub>, ИЗ<sub>2</sub>.

Пример осциллограммы с записью параметров экспериментов приведен на рис. 2.

Продолжительность сигнала устанавливается временем замыкания цепи, то есть временем нахождения пламени в зоне датчика ( $\Delta\tau$ ).

По результатам регистрации ионного тока и времени протекания рабочего процесса определялись основные характеристики сгорания ТВС и их связь с максимальным давлением.

Измерения проводились в следующих режимах: частота вращения коленчатого вала  $n=600$  мин<sup>-1</sup> и 900 мин<sup>-1</sup>; степень сжатия  $\varepsilon=5,9$  и 7,0; угол опережения зажигания – 16° до ВМТ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследования представлены в графическом виде.

Изменение максимального давления  $P_z$  и давления сгорания в момент появления ионного тока  $P_{ion}$  в зависимости от состава смеси, при различных добавках водорода в ТВС,  $g_{H_2}=3$  и 5 % от массы топлива, на частоте вращения коленчатого вала  $n=900$  мин<sup>-1</sup> и при степени сжатия  $\varepsilon=5,9$ , показано на рис. 3.

При добавке водорода происходит рост максимального давления в области состава смеси, обедненной относительно стехиометрии. Причем с обеднением смеси происходит и абсолютное и относительное увеличение максимального давления сгорания. Аналогичные результаты получены и для частоты вращения коленчатого вала  $n=600$  мин<sup>-1</sup> [14].

Появление ионного тока  $P_{ion}$  фиксируется при сгорании ТВС, масса которой составляет приблизительно 50–60 % [16]. Этот параметр достаточно точно отражает изменение максимального давления сгорания по составу смеси.

Увеличение максимального давления  $P_z$  при добавке водорода связано с изменением характеристик сгорания.

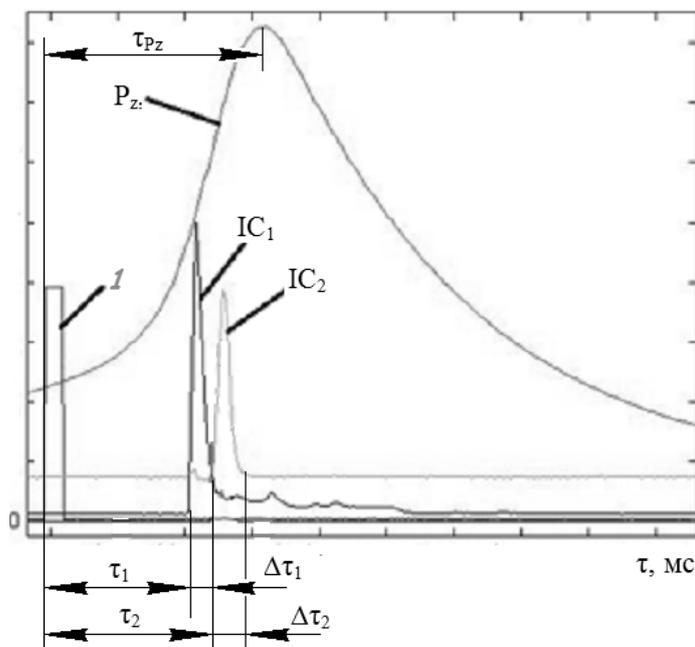


Рис. 2. Пример регистрации исследовательских сигналов:

$I$  – датчик искры;  $P_z$  – изменение индикаторного давления;  $\tau_{Pz}$  – время появления максимального давления;  $IC_1, IC_2$  – ионные токи в первом и втором зондах соответственно;  $\tau_1, \tau_2$  – время появления тока в цепи ИЗ<sub>1</sub>, ИЗ<sub>2</sub>

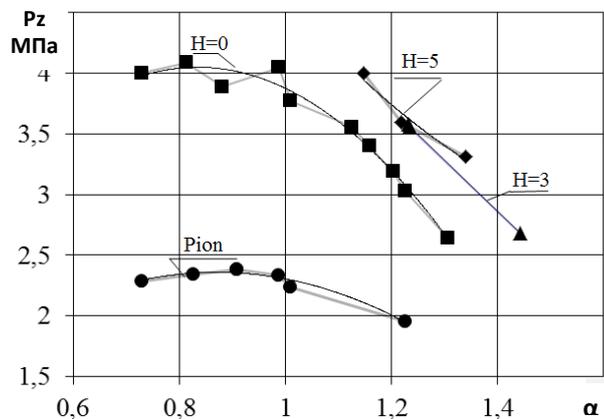


Рис. 3. Зависимость  $P_z$  и  $P_{ion}$  от состава смеси при различных добавках водорода

На рис. 4 показана зависимость продолжительности основной фазы сгорания от состава ТВС при разной доле добавляемого водорода и частоте вращения коленчатого вала.

Полученные результаты показали наличие минимума времени достижения максимального давления сгорания  $\tau_{Pz}$  при составе ТВС, близком к  $\alpha=0,85-0,9$ . С обеднением смеси длительность протекания основной фазы сгорания монотонно возрастает. Изменение характеристик сгорания при добавке водорода в ТВС приводит к уменьшению  $\tau_{Pz}$ .

На частоте вращения коленчатого вала  $n=600 \text{ мин}^{-1}$  при стехиометрическом соотношении  $\alpha=1,0$  добавка водорода  $g_{H2}=3 \%$  приводит к уменьшению промежутка времени  $\tau_{Pz}$  на 10 %, при  $\alpha=1,3$  уменьшение  $\tau_{Pz}$  состав-

ляет 29 %. Добавка водорода  $g_{H2}=5 \%$  вызывает сокращение промежутка времени достижения максимального давления  $P_z$  на 14 и 36 % соответственно.

При увеличении частоты вращения коленчатого вала  $n$  с 600 до 900  $\text{мин}^{-1}$   $\tau_{Pz}$  – длительность промежутка времени достижения максимального давления  $P_z$  уменьшилась, что обусловлено ростом турбулентной скорости распространения пламени из-за увеличения турбулентных пульсаций скоростей рабочего тела [17]. Для плоских камер сгорания изменение турбулентности рабочего тела пропорционально скоростному режиму. Добавка водорода оказывает такое же влияние на  $\tau_{Pz}$  для скоростного режима  $n=900 \text{ мин}^{-1}$ , как и для скоростного режима  $n=600 \text{ мин}^{-1}$ . Для  $\alpha=1,25$  при 3 % уменьшение  $\tau_{Pz}$  составило 17 %, при 5 % – 27 %.

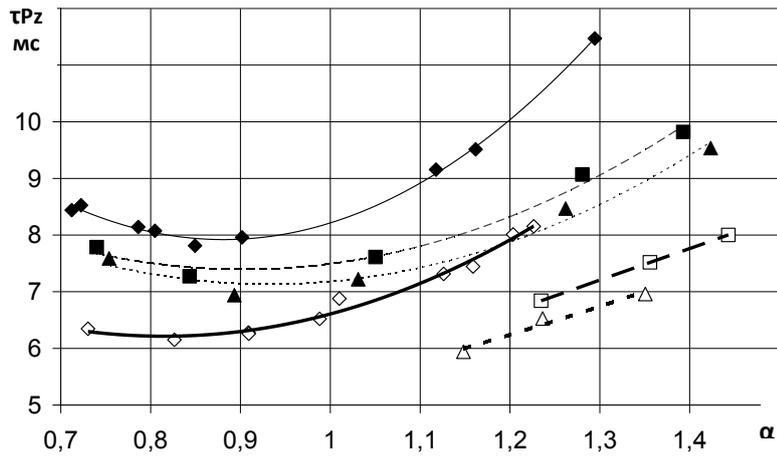


Рис. 4. Зависимость продолжительности основной фазы сгорания (достижения  $P_z$ ) от состава ТВС:  
 $n=600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{H_2}$ :  $\blacklozenge$  – 0 %,  $\blacksquare$  – 3 %,  $\blacktriangle$  – 5 %;  
 $n=900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{H_2}$ :  $\diamond$  – 0 %,  $\square$  – 3 %,  $\triangle$  – 5 %

Следует заметить, что добавка водорода оказывает комплексное влияние на изменение процесса распространения пламени. С одной стороны, происходит рост нормальной составляющей турбулентной скорости распространения пламени за счет увеличения количества водорода в ТВС. С другой стороны, при сокращении времени достижения максимального давления сгорания изменяются условия для турбулентной составляющей скорости распространения пламени.

На рис. 5 представлено изменение турбулентности в плоской камере сгорания по углу поворота коленчатого вала [18]. В основном процесс сгорания протекает после прохождения ВМТ по углу поворота коленчатого вала (ПКВ), где уровень турбулентности с ростом ПКВ уменьшается. Тогда при уменьшении времени достижения максимального давления сгорания процесс сгорания завершится при меньшем угле ПКВ и при более высоком уровне турбулентности, что обусловит увеличение турбулентной скорости распро-

странения пламени.

Максимальное давление сгорания определяется и термодинамическими параметрами процесса, такими как объем завершения сгорания  $V_{pz}$  в соответствии с уравнением состояния  $P=MRT/V_{pz}$ , где  $M$  – масса рабочего тела;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура.

Взаимосвязь ионного тока пламени с температурой описана в [19].

Зависимость максимума давления от объема завершения основной фазы сгорания для двух скоростных режимов и различных добавок водорода представлена на рис. 6.

Полученная зависимость показывает рост давления  $P_z$  при уменьшении объема завершения сгорания. При этом изменение скоростного режима и количество добавляемого газообразного водорода не оказывают влияние на характер этой зависимости. В соответствии

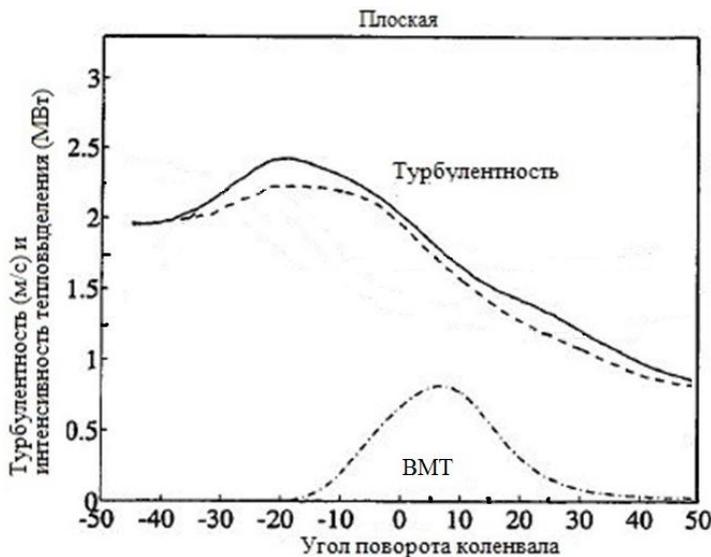
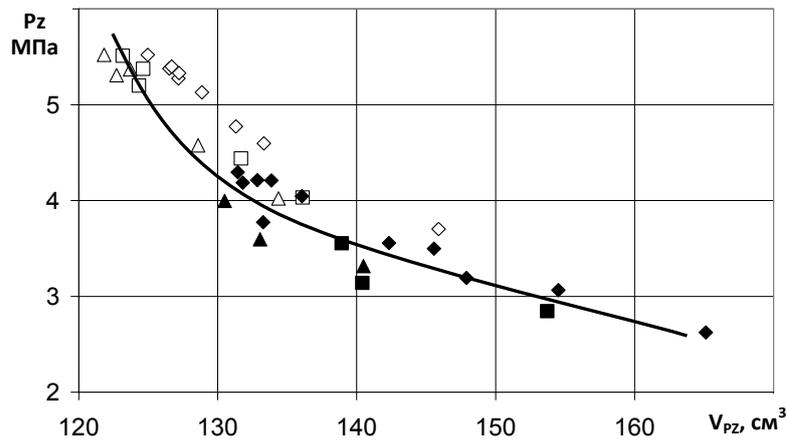


Рис. 5. Турбулентность и скорость тепловыделения в интервале угла поворота коленчатого вала (ПКВ) от  $-50$  до  $50$  градусов относительно верхней мертвой точки (ВМТ): сплошная линия – турбулентность вдоль оси X, пунктирная – вдоль оси Y



**Рис. 6.** График зависимости максимума давления от объема завершения основной фазы:  
 $n=600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{H_2}$ :  $\blacklozenge$  – 0 %,  $\blacksquare$  – 3 %,  $\blacktriangle$  – 5 %;  
 $n=900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{H_2}$ :  $\diamond$  – 0 %,  $\square$  – 3 %,  $\triangle$  – 5 %

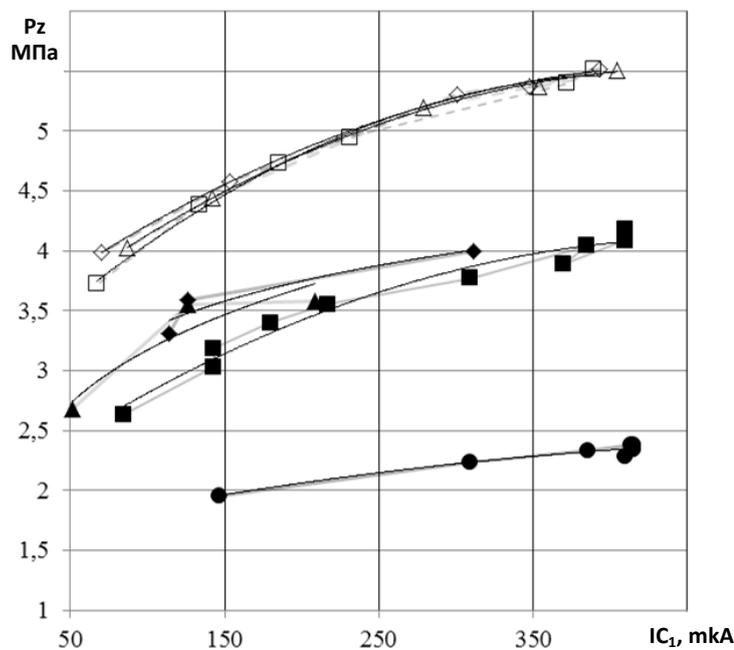
с зависимостями времени достижения максимального давления сгорания  $\tau_{Pz}$ , представленными на рис. 4, объем завершения сгорания определяется скоростью распространения пламени, зависящей от скоростного режима и количества добавляемого газообразного водорода.

Следовательно, для обобщения результатов изменения максимального давления сгорания в зависимости от скоростного режима работы двигателя и физико-химического состава смеси лучше использовать в качестве определяющего параметра ионный ток в пламени,

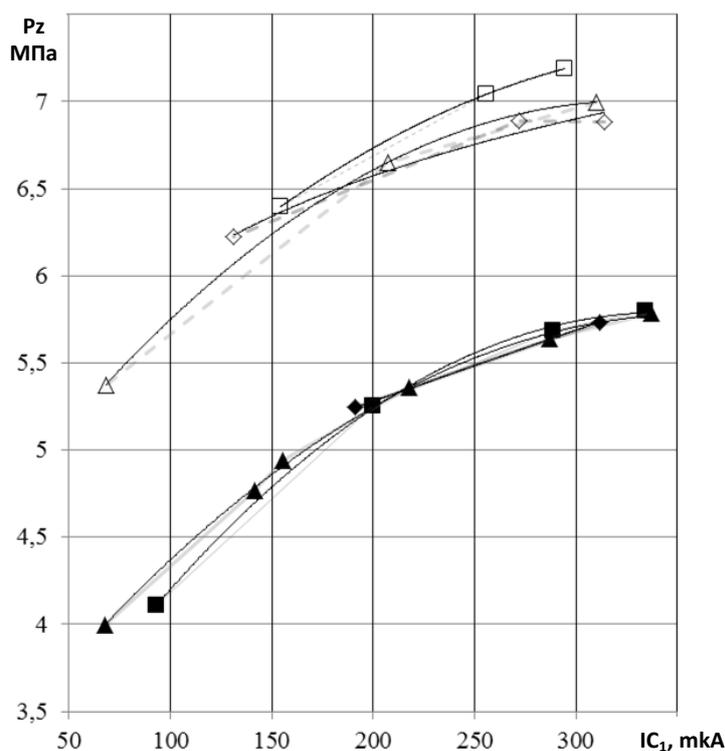
обусловленный протеканием химической ионизации в зоне турбулентного горения.

В [7; 8; 15] показано, что ионный ток, определяемый химической ионизацией в пламени, отражает характеристики распространения пламени, в том числе и интенсивность протекания химических реакций в зоне турбулентного горения. Следовательно, изменение ионного тока отражает и изменение давления в камере сгорания.

На рис. 7 и рис. 8 показано изменение максимального давления сгорания и давления при регистрации ионного тока в зависимости от величины ионного тока.



**Рис. 7.** Изменение максимального давления сгорания и  $P_{ion}$  в зависимости от добавок водорода при работе установки в режиме 900 и 600 об/мин и степени сжатия  $\varepsilon=5,9$  ( $\square$  –  $g_{H_2}=0$  %,  $\Delta$  –  $g_{H_2}=3$  %,  $\diamond$  –  $g_{H_2}=5$  %,  $o$  –  $P_{ion}$ ) для частот вращения коленчатого вала  $n=900$  (темные значки) и  $n=600$  (светлые значки)  $\text{мин}^{-1}$  и степеней сжатия  $\varepsilon=5,9$  и  $\varepsilon=7$



**Рис. 8.** Изменение максимального давления сгорания в зависимости от добавок водорода при работе установки на режимах  $n=900$  и  $600 \text{ мин}^{-1}$  и степени сжатия  $\varepsilon=7$  ( $\square - g_{H_2}=0 \%$ ,  $\Delta - g_{H_2}=3 \%$ ,  $\diamond - g_{H_2}=5 \%$ ) для частот вращения коленчатого вала  $n=900$  (темные значки) и  $n=600$  (светлые значки)  $\text{мин}^{-1}$  и степеней сжатия  $\varepsilon=5,9$  и  $\varepsilon=7$

Изменение  $P_z$  и  $P_{ion}$  в зависимости от величины ионного тока имеет одинаковый характер: при возрастании ионного тока со 150 до 380 мкА  $P_z$  и  $P_{ion}$  увеличиваются на 20–22 % независимо от скоростного режима и добавки водорода.

Расслоение кривых при скоростных режимах  $n=600$  и  $900 \text{ мин}^{-1}$  происходит из-за увеличения объема сгорания при росте угла ПКВ, соответствующего окончанию процесса сгорания при увеличении частоты вращения коленчатого вала.

Полученное расслоение зависимостей для условий проведенных экспериментов обобщается выражением

$$P_{600} = P_{900} + \left( \frac{900}{600} \right)^{0,85} .$$

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проанализированы зависимости максимального давления сгорания ТВС от состава смеси при горении бензовоздушной смеси с добавками водорода в камере сгорания переменного объема.

Рассмотрены основные характеристики сгорания: время, объем, турбулентность, частота вращения коленчатого вала, определяющие изменение величину максимального давления сгорания ТВС.

2. Определена взаимосвязь максимального давления сгорания, определяющего эффективность тепловыделения в цилиндре двигателя, с величиной ионного тока, отражающей интенсивность химических реакций горения.

3. Полученные экспериментальные зависимости могут быть представлены в виде полинома 2-го порядка.

4. Получена эмпирическая математическая зависимость, связывающая максимальное давление сгорания и частоту вращения коленчатого вала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. Изд. 4-е. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 289 с.
- Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателя. М.: Машгиз, 1962. 271 с.
- Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов. Челябинск: ЮУрГУ, 2006. 382 с.
- Li Y., Jia M., Chang Y., Kokjohn S.L., Reitz R.D. Thermodynamic energy and exergy analysis of three different engine combustion regimes // Applied Energy. 2016. Vol. 180. P. 849–858.
- Li H., Gatts H., Liu S., Wayne S., Clark N., Mather D. An Experimental Investigation on the Combustion Process of a Simulated Turbocharged SI Natural Gas Engine Operated on Stoichiometric Mixture // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2017. Vol. 140. № 9. P. 091504.
- Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. М.: Металлургия, 1968. 311 с.

7. Smolenskya N.M., Korneev N.V. Modelling of the Combustion Velocity in UIT-85 on sustainable Alternative Gas Fuel // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 66. № 1. P. 012016.
8. Иноземцев Н.Н. Ионизация в ламинарных пламенах // Известия АН СССР. Отделение технических наук. Энергетика и автоматика. 1960. № 2. С. 59–66.
9. Andersson I. Cylinder Pressure and ionization current modelling for spark ignited engines. Doctoral thesis № 962. Linkoping, 2002. 93 p.
10. Smolenskya N.M. The Electrical Conductivity of the Flame Front, as a Characteristic of the Rate of heat Release and Composition if Gas Fuel in SI Engines // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 115. № 1. P. 012309.
11. Corcione F.E., Vaglieco B.M., Merola S.S. Evaluation of Knocking Combustion by an Ion Current System and Optical Diagnostics of Radical Species // The Proceedings of the International symposium on diagnostics and modeling of combustion in internal combustion engines. 2004. Vol. 2005. P. 487–495.
12. Smolenskaya N.M., Smolenskii V.V. Modelling the average velocity of propagation of the flame front in a gasoline engine with hydrogen additives // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 115. № 1. P. 012016.
13. Smolenskaya N.M., Smolenskii V.V. Increase in the thermodynamic efficiency of the working process of spark-ignited engines on natural gas with the addition of hydrogen // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 121. № 5. P. 052009.
14. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Дерячев А.Д. Исследование взаимосвязи тока ионизации и максимального индикаторного давления при сгорании бензовоздушной смеси, обогащённой водородом // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 1. С. 30–35.
15. 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.
16. Shaikin A.P., Bobrovskij I.N., Deryachev A.D., Ivashin P.V., Galiev I.R., Tverdokhlebov A.Y. Use of Ionization Sensors to Study Combustion Characteristics in Variable Volume Chamber // GloSIC 2018: Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference. 2018. P. 8570082.
17. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 352 с.
18. Johansson B., Olsson K. Combustion Chambers for Natural Gas SI Engines Part I: Fluid Flow and Combustion // SAE Technical Paper Series. 1990. № 950469. P. 1–15.
19. Шайкин А.П., Галиев И.Р. О связи хемиионизации пламени температурой и давлением в камере сгорания переменного объёма // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 4. С. 91–100.
20. 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. 203 с.

#### REFERENCES

1. Orlin A.S., Kruglov M.G. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Ustroystvo i rabota porshnevnykh i kombinirovannykh dvigateley* [Internal combustion Engines. Design and operation of piston and combined engines]. Izd. 4th pererab. i dop. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 289 p.
2. Vibe I.I. *Novoe o rabochem tsikle dvigatelya* [New about the working cycle of the engine]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 271 p.
3. Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klementev V.V. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov* [Internal combustion Engines: theory, modeling and calculation of processes]. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 2006. 382 p.
4. Li Y., Jia M., Chang Y., Kokjohn S.L., Reitz R.D. Thermodynamic energy and exergy analysis of three different engine combustion regimes. *Applied Energy*, 2016, vol. 180, pp. 849–858.
5. Li H., Gatts H., Liu S., Wayne S., Clark N., Mather D. An Experimental Investigation on the Combustion Process of a Simulated Turbocharged SI Natural Gas Engine Operated on Stoichiometric Mixture. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2017, vol. 140, no. 9, p. 091504.
6. 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.
7. Smolenskya N.M., Korneev N.V. Modelling of the Combustion Velocity in UIT-85 on sustainable Alternative Gas Fuel. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 66, no. 1, p. 012016.
8. Inozemtsev N.N. Ionization in laminar flames. *Izvestiya AN SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk. Energetika i avtomatika*, 1960, no. 2, pp. 59–66.
9. Andersson I. *Cylinder Pressure and ionization current modeling for spark ignited engines*. Doctoral thesis № 962. Linkoping, 2002. 93 p.
10. Smolenskya N.M. The Electrical Conductivity of the Flame Front, as a Characteristic of the Rate of heat Release and Composition if Gas Fuel in SI Engines. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 115, no. 1, p. 012309.
11. Corcione F.E., Vaglieco B.M., Merola S.S. Evaluation of Knocking Combustion by an Ion Current System and Optical Diagnostics of Radical Species. *The Proceedings of the International symposium on diagnostics and modeling of combustion in internal combustion engines*, 2004, vol. 2005, pp. 487–495.
12. Smolenskaya N.M., Smolenskii V.V. Modelling the average velocity of propagation of the flame front in a gasoline engine with hydrogen additives. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 115, no. 1, p. 012016.
13. Smolenskaya N.M., Smolenskii V.V. Increase in the thermodynamic efficiency of the working process of spark-ignited engines on natural gas with the addition of

- hydrogen. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 121, no. 5, p. 052009.
14. Shaykin A.P., Ivashin P.V., Deryachev A.D. The study of interrelationship of ionization current and maximum indicated pressure during the combustion of hydrogen rich gasoline-air mixture. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 1, pp. 30–35.
  15. Yasnikov I.S., Ivashin P.V., Shaikin 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.
  16. Shaikin A.P., Bobrovskij I.N., Deryachev A.D., Ivashin P.V., Galiev I.R., Tverdokhlebov A.Y. Use of Ionization Sensors to Study Combustion Characteristics in Variable Volume Chamber. *GloSIC 2018: Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference*, 2018, p. 8570082.
  17. Varnatts Yu., Maas U., Dibbl R. *Gorenie. Fizicheskie i khimicheskie aspekty, modelirovanie, eksperimenty, obrazovanie zagryznyayushchikh veshchestv* [Combustion. Physical and chemical aspects, modeling, experiments, formation of pollutants and]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006. 352 p.
  18. Johansson B., Olsson K. Combustion Chambers for Natural Gas SI Engines Part I: Fluid Flow and Combustion. *SAE Technical Paper Series*, 1990, no. 950469, pp. 1–15.
  19. Shaykin A.P., Galiev I.R. Relation between flame chemiionization and variable-volume combustion chamber temperature and pressure. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2017, vol. 16, no. 4, pp. 91–100.
  20. Shaykin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R., Deryachev A.D. *Kharakteristiki rasprostraneniya plameni i ikh vliyanie na obrazovanie nesgorevshikh uglevodorodov i oksida azota v otrabotavshikh gazakh pri dobavke vodoroda v toplivno-vozdushnyuyu smes energeticheskikh ustanovok s iskrovyim zazhiganiem* [Characteristics of flame propagation and their influence on the formation of unburned hydrocarbons and nitrogen oxide in the exhaust gas, with the addition of hydrogen in the fuel-air mixture in power plants with spark-ignition]. Samara, Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2016. 203 p.

#### MAXIMUM COMBUSTION PRESSURE AND ITS RELATIONSHIP WITH THE CHARACTERISTICS OF COMBUSTION IN SPARK IGNITION ENGINES

© 2019

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

**A.D. Deryachev**, PhD (Engineering),

Engineer of Chair “Power Machines and Control Systems”

**M.V. Sazonov**, postgraduate student of Chair “Power Machines and Control Systems”

**S.S. Khlopotkin**, student of Chair “Power Machines and Control Systems”

*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

**Keywords:** combustion; turbulence; combustion pressure; hydrogen addition; ion current; combustion engine; heat dissipation; combustion characteristics; chemical reaction intensity.

**Abstract:** The paper presents the results of the study of the possible relationship of the maximum combustion pressure characterizing the efficiency of heat dissipation with the main characteristics of combustion in piston internal combustion engines (ICE). During the experiments, to change the flame propagation characteristics, hydrogen in the amount of 3 % and 5 % of the mass fuel consumption was added to the air-fuel mixture, as well as the fluid turbulence was changed when using two crankshaft speed values. The authors determined the dependences of maximum combustion pressure  $P_{zmax}$  of the fuel-air mixture and the ion current flame intensity in the zone the most distant from the ignition plug on the composition of the fuel-air mixture with hydrogen additives during its combustion in a combustion chamber of variable volume. The addition of hydrogen leads to the decrease in the combustion time and the increase in the ion current intensity and the maximum combustion pressure of the fuel-air mixture. The authors considered the main combustion characteristics: time, ion current, volume at the moment of maximum pressure, turbulence, crankshaft speed, and their influence on the maximum combustion pressure. The study identified the relationship of the combustion pressure with the ion current reflecting the intensity of chemical reactions of combustion in the zone the most distant from the ignition plug, as well as with the volume of combustion completion. The experimental points are accurately connected by a single curve line. The obtained experimental dependences can be represented as a polynomial of the 2nd order. The authors identified the influence of turbulence change due to the change of crankshaft speed on maximum combustion pressure  $P_{zmax}$ .

The authors proposed the experimental mathematical relationship between the maximum combustion pressure and the crankshaft speed. Knowing the maximum combustion pressure on one speed range and using the obtained dependence, it is possible to predict the value of its variable for the whole interval of speed ranges of engine work.