

А.П. Шайкин, доктор технических наук,
профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления»
П.В. Ивашихин, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Энергетические машины и системы управления»
А.Д. Дерячев, младший научный сотрудник НИГ-17
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: процесс сгорания; скорость пламени; оксиды азота; отработавшие газы; турбулентность; ширина зоны горения; ионный ток; датчик ионизации; продолжительность сгорания; фазы сгорания; добавка водорода.

Аннотация: Приводится эмпирическая модель, позволяющая прогнозировать концентрацию оксидов азота при добавке водорода в топливно-воздушную смесь в поршневых двигателях с искровым зажиганием. Использованы результаты экспериментов, проведенных на одноцилиндровой установке УИТ-85. Для получения информации о процессе горения в цилиндре экспериментальной установки использовалось явление электропроводности углеводородного пламени. На основе моментов возникновения ионного тока у электродов датчика ионизации получены значения скорости распространения фронта пламени и ширины зоны турбулентного горения в удаленной от свечи зажигания зоне камеры сгорания. Приведены графики зависимостей скорости пламени и ширины зоны горения от коэффициента избытка воздуха при различной частоте вращения коленчатого вала и доле добавляемого водорода в топливно-воздушную смесь. При использовании датчика давления, установленного в камеру сгорания экспериментальной установки, получены значения индикаторного давления по углу поворота коленчатого вала. Приведена зависимость продолжительности основной фазы сгорания от скорости распространения пламени и ширины зоны турбулентного горения. Показано, что характеристики пламени в значительной степени определяют время на протекание процесса сгорания. Проведен анализ значимых параметров, влияющих на образование оксидов азота при добавках водорода в топливно-воздушную смесь двигателей с искровым зажиганием. Разработана эмпирическая модель на основе безразмерного комплекса параметров, позволяющая прогнозировать концентрацию оксидов азота при добавках водорода в топливно-воздушную смесь, изменении частоты вращения коленчатого вала и угла опережения зажигания в двигателях с искровым зажиганием. Приведенная модель позволяет оценивать концентрацию оксидов азота при тепловом расчете проектируемого двигателя.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее опасными токсичными компонентами в отработавших газах (ОГ) поршневого двигателя являются окислы азота NO и NO_2 , называемые все вместе NO_x , – основные реагенты в образовании фотохимического смога [1].

Существующие методы снижения концентрации NO_x , такие как рециркуляция и нейтрализация ОГ, ухудшают экономические и мощностные показатели работы двигателя. Одним из перспективных направлений снижения оксидов азота в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) является воздействие на параметры сгорания, то есть непосредственно на причины образования NO_x , а не воздействие на выхлопные газы [2].

Анализ известных работ показал, что основное направление воздействия на рабочий процесс с целью снижения оксидов азота связано с организацией рабочего процесса на бедных смесях. Установлено, что перспективным направлением является использование для этой цели микродобавок водорода в топливно-воздушную смесь (ТВС) [3–5]. Однако до сих пор недостаточно изучены механизмы влияния добавок водорода в ТВС на процесс сгорания и образование токсичных веществ.

В зависимости от происхождения различают три механизма образования оксидов азота: «быстрые», термические и топливные. Многочисленными экспериментами доказано, что в двигателях внутреннего сгорания примерно 95 % оксидов азота образуется по термическому механизму Я.Б. Зельдовича [6]. Анализ термической теории показывает, что определяющими фактора-

ми образования оксидов азота в отработавших газах ДВС с искровым зажиганием являются высокая температура, атомарный кислород и время пребывания азота и кислорода в зоне высоких температур [2; 7–9].

Современные программы, позволяющие производить расчет выбросов оксидов азота в отработавших газах двигателей, работающих на традиционных видах топлива, достаточно точно оценивают концентрацию NO_x , используя сложные многозонные модели и схемы на базе термического механизма Я.Б. Зельдовича [10; 11]. Однако для двигателей, работающих на альтернативных видах топлива, расчеты по таким моделям дают неприемлемые результаты, которые могут отличаться от экспериментальных более чем в 3 раза [12]. Поэтому необходимы дополнительные исследования для разработки моделей расчета концентрации оксидов азота, применимых для двигателей с альтернативным видом топлива, в частности, с добавками водорода в ТВС.

Для углубленного понимания данной проблемы необходимо получать информацию о процессе сгорания в различных зонах камеры сгорания [9]. Основными характеристиками распространения пламени в процессе сгорания являются скорость распространения пламени и ширина зоны турбулентного горения (ЗТГ) [13–15]. Одним из важных параметров является продолжительность основной фазы сгорания, которая может характеризовать и максимальную температуру цикла, и время пребывания азота и кислорода в зоне высокой температуры, следовательно, основные причины образования оксидов азота [2; 15; 16]. Поэтому необходимо исследовать взаимосвязь продолжительности сгорания

с характеристиками распространения пламени при добавках водорода в ТВС. Для решения поставленной задачи проведены экспериментальные исследования.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проведены на одноцилиндровой установке УИТ-85 [17]. Для регистрации индикаторного давления в камеру сгорания (КС) устанавливался датчик Kistler. Для экспериментального определения скорости и ширины зоны турбулентного горения использовалось явление электропроводности углеводородного пламени. В удаленную от свечи зажигания зону КС устанавливался двухэлектродный датчик ионизации (ИД), регистрирующий ионный ток при прохождении пламени через электроды датчика. На рисунке 1 показана схема установки датчиков в камере сгорания УИТ-85.

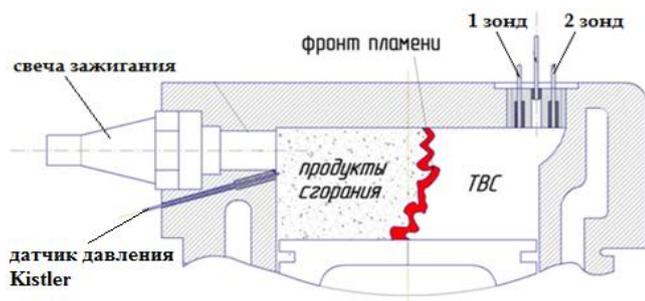


Рис. 1. Камера сгорания УИТ-85 с установленными датчиками

Средняя скорость распространения пламени [18; 19] и ширина зоны турбулентного горения определялись по формулам:

$$U_{cp} = \frac{L_1}{\tau_1};$$

$$\delta_{зтг} = U_{1-2} \cdot \Delta\tau_i - D_{эл},$$

где L_1 – расстояние от свечи зажигания до первого электрода ИД;
 τ_1 – время возникновения ионного тока у первого электрода ИД;
 U_{1-2} – местная скорость распространения пламени у электродов ИД, определяемая по формуле: $U_{1-2} = \frac{L_{1-2}}{\tau_{1-2}}$;
 L_{1-2} – расстояние между электродами ИД, м.;
 τ_{1-2} – разница времени возникновения ионного тока у электродов ИД, с.;
 $\Delta\tau_i$ – разность времени ухода пламени и прихода пламени к i -тому электроду датчика ионизации, то есть продолжительность существования ионного тока на электроде датчика,
 $D_{эл}$ – диаметр электрода ИД.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Зависимости средней скорости распространения фронта пламени и ширины зоны турбулентного горения

в месте установки датчика ионизации от состава смеси представлены на рисунках 2 и 3.

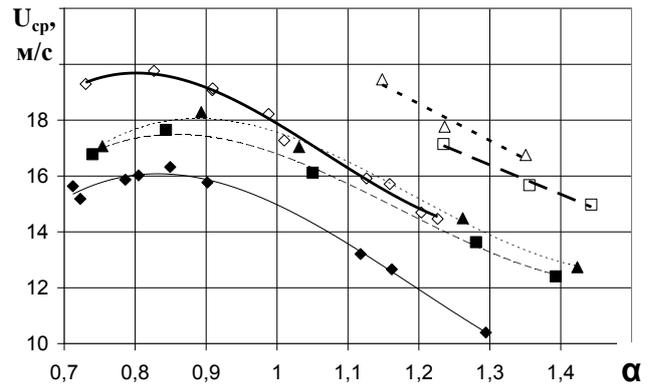


Рис. 2. Зависимость средней скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха: $n=600 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : \blacklozenge – 0 %; \blacksquare – 3 %; \blacktriangle – 5 %; $n=900 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : \diamond – 0 %; \square – 3 %; \triangle – 5 %

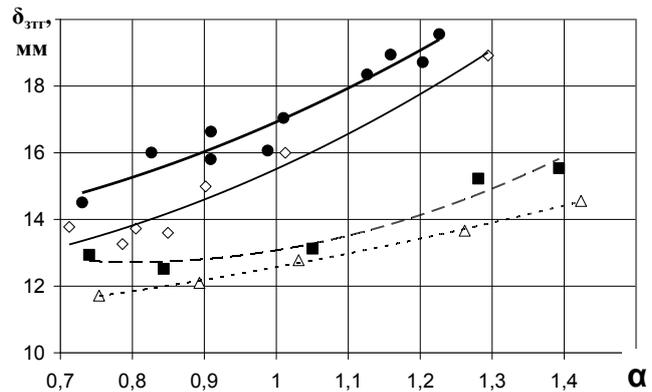


Рис. 3. Зависимость ширины зоны турбулентного горения от коэффициента избытка воздуха [6]: $n=600 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : \diamond – 0 %; \blacksquare – 3 %; \triangle – 5 %; $n=900 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : \bullet – 0 %

С увеличением частоты вращения средняя скорость распространения пламени и ширина зоны турбулентного горения увеличиваются. Это объясняется ростом пульсационной скорости пламени, которая возрастает вследствие увеличения скорости поршня [2; 13; 15; 16; 18]. Рост ширины зоны горения также обусловлен сокращением времени на процесс сгорания [14]. При добавке водорода в ТВС скорость распространения пламени увеличивается, а ширина зоны турбулентного горения сокращается. Это обусловлено увеличением интенсивности химических реакций за счет добавки водорода в ТВС, тем самым увеличением нормальной составляющей скорости распространения пламени [18–20].

На рисунках 4 и 5 представлены графики зависимости продолжительности основной фазы сгорания от средней скорости распространения пламени и ширины зоны турбулентного горения.

Продолжительность основной фазы сгорания линейно зависит от средней скорости распространения

пламени (рисунок 4). Причем при различной добавке водорода и частоте вращения коленчатого вала все экспериментальные точки ложатся на одну прямую.

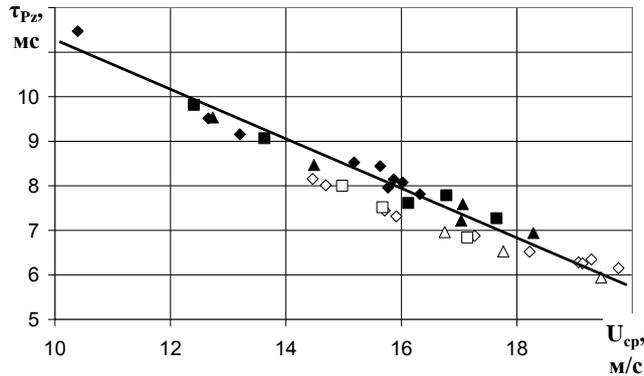


Рис. 4. Зависимость продолжительности основной фазы сгорания от средней скорости распространения пламени:

$n=600 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : \blacklozenge – 0 %; \blacksquare – 3 %; \blacktriangle – 5 %;
 $n=900 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : \diamond – 0 %; \square – 3 %; \triangle – 5 %

Увеличение ширины ЗТГ приводит к увеличению продолжительности основной фазы сгорания (рисунок 5). При этом независимо от добавок водорода в ТВС все экспериментальные точки ложатся на прямую линию для каждого исследуемого скоростного режима.

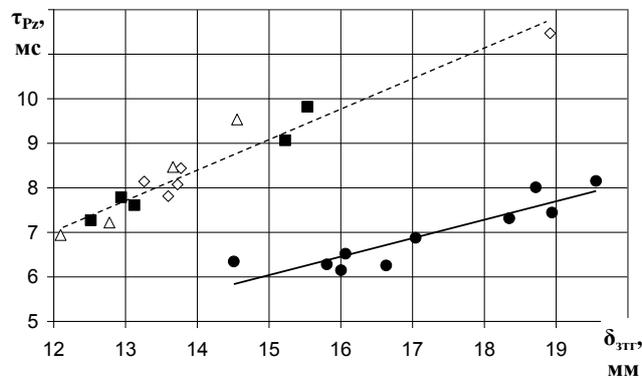


Рис. 5. Зависимость продолжительности основной фазы сгорания от ширины зоны турбулентного горения:

$n=600 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : \diamond – 0 %; \square – 3 %; \triangle – 5 %;
 $n=900 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : \bullet – 0 %

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Итак, экспериментально показано влияние скорости распространения пламени и ширины зоны турбулентного горения на продолжительность основной фазы сгорания.

Согласно термическому механизму Я.Б. Зельдовича [6], концентрация оксидов азота зависит от концентрации кислорода, температуры продуктов сгорания и времени пребывания азота и кислорода в зоне высо-

кой температуры. Температура продуктов сгорания обратно пропорциональна коэффициенту избытка воздуха в степени n , определяемой экспериментально:

$$T_{n.c.} \sim 1/\alpha^n.$$

Положение и величина максимальной температуры также определяется углом опережения зажигания, а также объемом продуктов сгорания в момент окончания основной фазы сгорания:

$$T_{n.c.max} \sim \theta_{o.z.}; T_{n.c.max} \sim V_a - V_{Pz},$$

где V_a – полный объем цилиндра, $\theta_{o.z.}$ – угол опережения зажигания.

Время пребывания в зоне высоких температур определяется временем на процесс сгорания, которое может быть представлено продолжительностью основной фазы сгорания:

$$\tau_{преб.} \sim \tau_{сг.} \sim \tau_{Pz}.$$

Концентрация окислов азота прямо пропорциональна атомарному кислороду в степени 0,5. Концентрация атомарного кислорода определяется коэффициентом избытка воздуха. Следовательно,

$$[NO_x] \sim [O]^{0.5} \sim \alpha^{0.5}.$$

Рассмотрев факторы, влияющие на температуру, количество свободного кислорода и располагаемое время процесса сгорания, получаем:

$$[NO_x] \sim \frac{\alpha^{0.5}}{\alpha^n}; \tau_{Pz}; \theta_{o.z.}; (V_a - V_{Pz}).$$

Введем параметр K как функцию:

$$K = f \left[\frac{\alpha^{0.5}}{\alpha^n}; \tau_{Pz}; \theta_{o.z.}; (V_a - V_{Pz}) \right].$$

По экспериментальным данным была получена эмпирическая зависимость безразмерного комплекса параметров K :

$$K = \frac{1}{\alpha^{2/3}} \cdot \left(\frac{\tau_{180} - \tau_{Pz}}{\tau_{180}} \right) \cdot \left(\frac{180 - \theta_{o.z.}}{180} \right) \cdot \left(\frac{V_a - V_{Pz}}{V_a} \right),$$

где τ_{180} – время, за которое поршень достигает нижнюю мертвую точку (НМТ) от верхней мертвой точки (ВМТ), с;

τ_{Pz} – время окончания сгорания (от ВМТ), с;

$\theta_{o.z.}$ – угол опережения зажигания, гр.;

α – коэффициент избытка воздуха; V_a – полный объем цилиндра, см^3 ;

V_{Pz} – объем смеси при максимуме давления цикла, см^3 .

На рисунке 6 представлен график зависимости концентрации NO_x от безразмерного комплекса параметров K .

Известно, что при добавке водорода в ТВС увеличивается максимальная температура сгорания. Температура, в свою очередь, зависит от продолжительности процесса сгорания, время которого учитывается

в предложенном выражении. Полный объем цилиндра и объем при завершении основной фазы сгорания учитывают степень сжатия, параметры камеры сгорания и температуру цикла. Известно, что продолжительность процесса сгорания в значительной степени определяется частотой вращения коленчатого вала. В данной зависимости она выражена через время достижения НМТ (от ВМТ), где также учтена величина хода поршня. Температура также учитывается моментом зажигания рабочего заряда, который влияет на выбросы NO_x в ОГ. Количество свободного кислорода в ТВС отражается в соотношении коэффициента избытка воздуха.

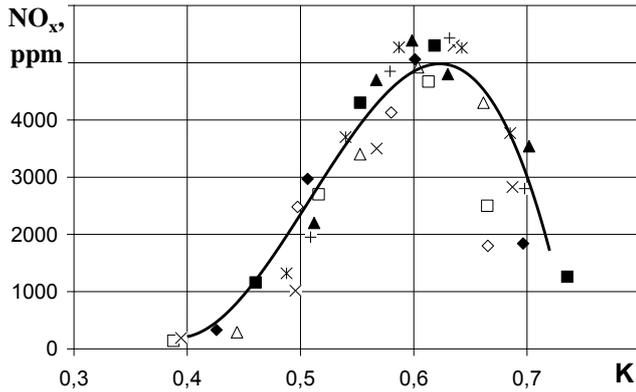


Рис. 6. Зависимость концентрации оксидов азота от параметра K :

$n=900 \text{ мин}^{-1}, \theta_{0.3}=13 \text{ гр.}, g_{H_2}: \diamond - 0\%, \square - 3\%, \Delta - 5\%;$
 $n=900 \text{ мин}^{-1}, \theta_{0.3}=22 \text{ гр.}, g_{H_2}: + - 0\%, * - 3\%, x - 5\%;$
 $n=600 \text{ мин}^{-1}, \theta_{0.3}=13 \text{ гр.}, g_{H_2}: \blacklozenge - 0\%, \blacksquare - 3\%, \blacktriangle - 5\%$

Зависимость концентрации оксидов азота от предложенного безразмерного комплекса параметров K может быть описана полиномом 3-го порядка:

$$[NO_x] = A \cdot K^3 + B \cdot K^2 + C \cdot K + D,$$

где $[NO_x]$ – концентрация оксидов азота, ppm; A, B, C и D – эмпирические коэффициенты.

Для бензиновых и бензоводородных топливных композиций эмпирические коэффициенты равны (коэффициент корреляции 0,85): $A=-783000; B=1191500; C=-573500; D=89100$.

Модель, основанная на безразмерном комплексе параметров K , позволяет оценить концентрацию NO_x в ОГ с учетом конструктивных и режимных параметров двигателя и, что особенно важно, с учетом добавок водорода в ТВС. Использование параметров τ_{Pz} и V_{Pz} в качестве основных позволяет оценивать концентрацию оксидов азота при тепловом расчете по эмпирической модели И.И. Вибе [16], где для анализа эффективности рабочего процесса служит индикаторная диаграмма.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально исследованы характеристики распространения пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха, частоты вращения коленчатого вала, угла опережения зажигания и добавок водорода в топливно-воздушную смесь. Показано, что

в области бедной смеси даже 3 % добавка водорода в ТВС увеличивает среднюю скорость распространения пламени на 20 % и сокращает ширину зоны турбулентного горения на 21 %.

2. Определена взаимосвязь между продолжительностью основной фазы сгорания, скоростью распространения пламени и шириной зоны турбулентного горения. Показано, что время основной фазы сгорания линейно зависит от характеристик распространения пламени.

3. Проведен анализ значимых факторов, влияющих на образование оксидов азота при сгорании топливно-воздушной смеси с добавками водорода, который показал, что продолжительность и объем смеси при завершении основной фазы сгорания являются основными параметрами сгорания, определяющими температуру и время пребывания азота и кислорода в зоне высоких температур.

4. Разработана эмпирическая модель для оценки концентрации NO_x в поршневых двигателях с добавками водорода по предложенному безразмерному комплексу параметров K :

$$K = \frac{1}{\alpha^{2/3}} \cdot \left(\frac{\tau_{180} - \tau_{Pz}}{\tau_{180}} \right) \cdot \left(\frac{180 - \theta_{0.3}}{180} \right) \cdot \left(\frac{V_a - V_{Pz}}{V_a} \right).$$

Полученная эмпирическая модель на основе комплекса параметров K позволяет оценивать концентрацию NO_x в ОГ с учетом конструктивных, регулировочных параметров двигателя, режима его работы и, что особенно важно, с учетом добавок водорода в ТВС. Использование параметров τ_{Pz} и V_{Pz} в качестве основных позволяет рассчитывать концентрацию оксидов азота при тепловом расчете, где для анализа эффективности рабочего процесса служит индикаторная диаграмма.

Основным преимуществом данной модели является значительное сокращение как финансовых, так и временных затрат на доводку существующих двигателей с искровым зажиганием.

Данная работа выполнена в рамках Государственного задания, проект № 394.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малов Р.В., Ерохов В.И., Щетина В.А. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды. М.: Транспорт, 1982. 200 с.
2. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.
3. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей. Киев: Наукова думка, 1984. 141 с.
4. Шатров Е.В., Раменский А.Ю., Кузнецов В.М. Исследование мощностных, экономических и токсических характеристик двигателя, работающего на бензоводородных смесях // Автомобильная промышленность. 1979. № 11. С. 3–5.
5. Бортников Л.Н., Павлов Д.А., Русаков М.М., Шайкин А.П. Состав продуктов сгорания бензоводородовоздушных смесей в сферической камере сгорания постоянного объема // Химическая физика. 2011. Т. 30. № 1. С. 56–65.

6. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 148 с.
7. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1981. 160 с.
8. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л.: Недра, 1988. 312 с.
9. Райзер Ю.П. Образование окислов азота в ударной волне при сильном взрыве в воздухе // Журнал физической химии. 1959. Т. 33. № 3. С. 700–709.
10. Ивашченко Н.А., Кавтарадзе Р.З. Многозонные модели рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 60 с.
11. Чесноков С.А., Демидов М.И. Моделирование теплообмена и химической кинетики образования окиси азота в ДВС с искровым // Известия Тульского Государственного университета. Автомобильный транспорт. 2003. № 7. С. 255–264.
12. Mustafi N.N., Miraglia Y.C., Raine R.R., Bansal P.K., Elder S.T. Spark-Ignition Engine Performance with 'Powergas' Fuel (Mixture of CO/H₂): A Comparison with Gasoline and Natural Gas Fuel // The Science and Technology of Fuel and Energy. 2006. Vol. 85. P. 1605–1612.
13. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977. 277 с.
14. Иноземцев Н.В., Кошкин В.К. Процессы сгорания в двигателях. М.: Машгиз, 1949. 344 с.
15. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. N.Y.: McGraw-Hill, 1988. 930 p.
16. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателя. М.: Машгиз, 1962. 271 с.
17. Шайкин А.П., Дерячев А.Д. Взаимосвязь ширины зоны горения с ионным током и скоростью распространения пламени в условиях двигателя с искровым зажиганием // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2014. № 3. С. 82–86.
18. Ивашин П.В., Рамазанов М.П., Твердохлебов А.Я., Шайкин А.П., Ясников И.С. О взаимосвязи скорости распространения и электропроводности пламени в ДВС // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2013. № 3-1. С. 103–112.
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. Ивашин П.В., Рамазанов М.П., Твердохлебов А.Я., Шайкин А.П., Ясников И.С. Об оценке работы цикла ДВС ионизационным зондом // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2013. № 3-2. С. 122–127.
21. Mishchenko A.I. *Primenenie vodoroda dlya avtomobilnikh dvigateley* [Hydrogen application for automobile engines]. Kiev, Naukova dumka publ., 1984, 141 p.
22. Shatrov E.V., Ramensky A.Yu., Kuznetsov V.M. Study of powered, economical and toxicity characteristics of hydrogen-free mixtures engine. *Avtomobilnaya promishlennost*, 1979, no. 11, pp. 3–5.
23. 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, vol. 5, no. 1, pp. 75–83.
24. Zeldovich Ya.B., Sadovnikov P.Ya., Frank-Kamenetskiy D.A. *Okislenie azota pri gorenii* [Nitrogen oxidation during combustion]. Moscow, AN SSSR publ., 1947, 148 p.
25. Zvonov V.A. *Toksichnost' dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Internal combustion engines toxicity]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981, 160 p.
26. Sigal I.Ya. *Zashchita vozdušnogo basseyna pri szhiganii topliva* [Air basin protection when burning fuel]. Leningrad, Nedra publ., 1988, 312 p.
27. Rayzer Yu.P. Nitrogen oxides origination in the impulse wave during intense explosion in the air. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 1959, vol. 33, no. 3, pp. 700–709.
28. Ivashchenko N.A., Kavtaradze R.Z. *Mnogozonnie modeli rabocheho protsessa dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Multizone models of the operation process of internal combustion engines]. Moscow, MGТУ im. N.E. Bauman publ., 1997, 60 p.
29. Chesnokov S.A., Demidov M.I. Simulation of heat-mass exchange and chemical kinetics of nitrogen oxide origination in the internal combustion spark ignition engine. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Seriya Avtomobilniy Transport*, 2003, no. 7, pp. 255–264.
30. Mustafi N.N., Miraglia Y.C., Raine R.R., Bansal P.K., Elder S.T. Spark-Ignition Engine Performance with 'Powergas' Fuel (Mixture of CO/H₂): A Comparison with Gasoline and Natural Gas Fuel. *The Science and Technology of Fuel and Energy*, 2006, vol. 85, pp. 1605–1612.
31. Voinov A.N. *Sgoranie v bystrokhodnikh porshnevikh dvigatelyakh* [Combustion in high-speed piston engines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1977, 277 p.
32. Inozemtsev N.V., Koshkin V.K. *Protsessi sgoraniya v dvigatelyakh* [Combustion processes in engines]. Moscow, Mashgiz publ., 1949, 344 p.
33. Heywood J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. N.Y., McGraw-Hill, 1988, 930 p.
34. Vibe I.I. *Novoe v rabochem tsikle dvigatelya* [New about engine operating cycle]. Moscow, Mashgiz publ., 1962, 271 p.
35. Shaikin A.P., Deryachev A.D. 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.
36. Ivashin P.V., Ramazanov M.P., Tverdokhlebov A.Ya., Shaikin A.P., Yasnikov I.S. Interconnection of propaga-

REFERENCES

1. Malov R.V., Erokhov V.I., Shchetina V.A. *Avtomobilniy transport i zashchita okruzhayushchey sredi* [Automobile transport and environmental protection]. Moscow, Transport publ., 1982, 200 p.
2. Kavtaradze R.Z. *Teoriya porshnevikh dvigateley. Spetsialnie glavi* [Piston engines theory. Special chap-

- tion velocity and electrical conductivity of flame in ices. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2013, no. 3-1, pp. 103–112.
19. 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.
20. Ivashin P.V., Ramazanov M.P., Tverdokhlebov A.Ya., Shaikin A.P., Yasnikov I.S. Evaluation of internal combustion engine cycle work using an ionic current sensor. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2013, no. 3-2, pp. 122–127.

EMPIRICAL MODEL TO ASSESS NITROGEN OXIDES CONCENTRATION WHEN ADDING HYDROGEN TO THE FUEL-AIR MIXTURE OF SPARK IGNITION ENGINES

© 2015

A.P. Shaikin, Doctor of Engineering,
professor of the Department «Energy Machines and Control Systems»
P.V. Ivashin, candidate of technical sciences,
assistant professor of the Department «Energy Machines and Control Systems»
A.D. Deryachev, junior researcher of NIG-17
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: combustion procedure; flame velocity; nitrogen oxides; exhaust gases; turbulence; combustion zone width; ion current; ionization detector; combustion duration; combustion phase; hydrogen addition.

Abstract: The article presents the empirical model to assess nitrogen oxides concentration when adding hydrogen to the fuel-air mixture of piston spark ignition engines. The authors used the results of experiments carried out on the UIT-85 single-cylinder engine. The phenomenon of hydrocarbon flame electrical conduction was used to get the information on the combustion process in the cylinder of experimental engine. On the basis of the moments of ion current origination at the ionization detector electrodes, the authors got the values of velocity of the flame front propagation and the turbulent combustion zone width in the combustion chamber area remote from the ignition spark plug. The article displays the diagrams of dependencies of flame velocity and combustion zone width on the lambda (equivalence ratio) at various rotation rates of a crankshaft and the tempering air quantity in the fuel-air mixture. Using pressure indicator installed in the combustion chamber of experimental engine, the authors got the values of the crank angle based indicated pressure. The article presents the dependence of the combustion master phase duration on the flame propagation velocity and the turbulent combustion zone width. It was shown that the flame characteristics determine considerably the time for the combustion process scenario. The authors carried out the analysis of significant parameters influencing origination of the nitrogen oxides when adding hydrogen to the fuel-air mixture of the spark ignition engines. On the basis of dimensionless number of parameters, an empirical model was developed allowing the assessment of nitrogen oxides concentration when adding hydrogen to the fuel-air mixture and changing the crankshaft rotation frequency and the spark angle in the spark ignition engines. The proposed model allows assessment of the nitrogen oxides concentration during heat calculation of the designed engine.