

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРИЦИЛИНДРОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДВИГАТЕЛЯХ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ ПЛАМЕН

С.А. Чесноков, д.т.н., проф., Н.Н. Фролов, к.т.н., проф., В.А. Березин, магистр  
Тульский государственный университет

Моделирование горения и образования токсичных веществ в поршневых двигателях методом химического турбулентного теплообмена нуждается в проверочных экспериментах и измерениях ряда исходных параметров. Для этих целей выполнено исследование спектра пламени в цилиндре ДВС в ультрафиолетовом диапазоне, где излучение сажи практически отсутствует. Применение двухканального спектрометра позволило, помимо общего сканирования спектра, регистрировать яркость характерных полос радикалов  $\text{OH}$  и  $\text{CN}$ , играющих ведущую роль в процессе горения. При анализе полученных данных подтверждена достаточная полнота выбранной схемы реакций для расчета образования вредных веществ, а также определены важнейшие характеристики процесса горения.

Химический турбулентный теплообмен (ХТТ) является инструментом моделирования химической кинетики реакций, происходящих в объеме камеры сгорания двигателя за фронтом пламени при наличии турбулентного конвективно-диффузионного перемешивания горючих и окисляющих компонентов смеси. Этот метод [1–3] объединяет химическую кинетику и теплообмен в процессе турбулентного горения.

Процессы ХТТ, начинаются при воспламенении топлива и продолжаются в течение такта расширения продуктов сгорания вплоть до выпуска их из цилиндра и определяют уровень токсичности отработавших газов, а также термодинамические параметры рабочего процесса двигателя.

Метод ХТТ, при достаточно корректных допущениях, включает в себя постановку и решение следующих задач:

- турбулентной газодинамики для расчета полей скоростей и коэффициента турбулентного обмена химически не реагирующей смеси в камере сгорания до зажигания и за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания;

- впрыска топлива в цилиндр, его испарения и турбулентного перемешивания для расчета полей коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  в камере сгорания перед зажиганием;

- движения турбулентного фронта горения при известной из эксперимента скорости горения в зависимости от  $\alpha$ , поскольку при движении фронт проходит зоны горючей смеси с различным  $\alpha$ ;

- химической кинетики горения в микроламинарном фронте на основе, например, кинетического механизма Басевича В.Я., при котором на участках фронта горения с местным значением  $\alpha$  рассчитываются температуры, скорости оттока и состав продуктов сгорания за фронтом пламени;

- расчета полей скорости и коэффициента турбулентного обмена в зоне догорания за фронтом пламени на основе сокращенного механизма реакций легких частиц;

При использовании метода ХТТ для расчетов горения в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) возникает необходимость экспериментального получения ряда исходных параметров и промежуточных проверочных данных. В условиях ДВС спектроскопия пламени позволяет, в первую очередь, измерять яркость излучения спектральных полос радикалов как химически активных частиц. Обширный обзор литературных данных по результатам спектроскопии пламен, сделанный А. Гейдоном [4], показал, что интенсивность излучения зависит как от концентрации радикалов, так и температуры возбужденного состояния этих частиц. Это, в свою очередь определяет активность радикалов, т. е. степень и эффективность их участия в сложной цепи реакций горения. Уровень активности радикалов является следствием подготовительных физических процессов и предпламенных реакций, поэтому яркость спектральных полос гидроксила  $\text{OH}$ , метина  $\text{CN}$  и радикала  $\text{C}_2$  характеризует быстроту и полноту горения в целом.

В работе Хидео Судзи и др. [5] обнаружено ранее и одновременное появление всех трех радикалов при воспламенении топлива искрой зажигания и их последующее накапливание в процессе предпламенных реакций. Начало видимого горения совпадает с новым увеличением концентрации радикалов. При детонационном горении образование радикала  $\text{OH}$  носит прежний характер, а радикалы  $\text{CN}$  и  $\text{C}_2$  образуются только с началом видимого горения. Это свидетельствует

в пользу изменения механизма предпламенных процессов. Детальное обсуждение этих интересных результатов, к сожалению, в работе отсутствует.

В работе М. Гетгера [6] особо подчеркивается, что чувствительность излучения полосы ОН к конструктивным особенностям камеры сгорания и форсунки, то есть к организации процесса сгорания в целом, намного сильнее влияния других измеряемых параметров — давления и температуры. Усиление закрутки потока, увеличение числа отверстий в форсунке и высоты ее расположения способствуют интенсификации массообмена и испарения топлива, обеспечивая тонкий распыл и большую длину факела распыла. Это ускоряет подготовку горючей смеси, стимулируя более быстрое и полное сгорание, что проявляется в усилении яркости излучения полосы ОН.

### Методика измерений

В работе использован модернизированный спектрограф ИСП-30, представляющий собой двухканальный спектрометр с датчиками яркости спектра — фотоумножителями ФЭУ-18А. Прибор имеет кварцевую оптику, позволяющую работать в ультрафиолетовой области, где влияние излучения сажистых частиц очень мало. Световой поток из цилиндра ДВС (рис. 1) поступает через индикатор качества смеси типа ИКС-1, выполняющий функции как свечи зажигания, так и световода. Стеклопаяная пробка (световод) заменена кварцевой, а разборная конструкция индикатора позволяет производить периодическое восстановление огневой поверхности кварцевой пробки полированием.

Следует отметить, что в отличие от дизелей, для двигателей с искровым зажиганием не характерно образование значительного количества сажи. При этом поверхность кварцевой пробки остается незагрязненной в течение десятков минут работы двигателя. Слабый коричневый налет, возникающий иногда при горении масла в цилиндрах легко смывается органическими растворителями.

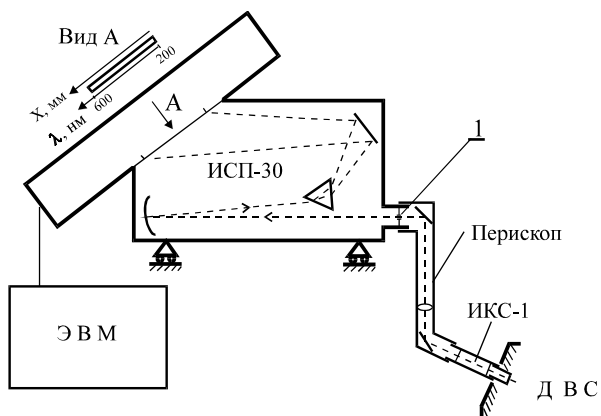


Рис. 1. Схема спектральных измерений

К объективу на входе спектрометра подсоединен световой канал, называемый в дальнейшем перископом.

Перископ создает резкое и достаточно яркое изображение светового пятна в плоскости входной щели 1. Щель вырезает из этого пятна плоский луч, который внутри спектрографа преломляется и образует в плоскости выходного окна (вид А) полосу спектра в диапазоне длин волн  $\lambda = 200\text{--}600$  нм. Две выходные щели вырезают из спектра световые потоки, поступающие на фотоумножители, которые могут перемещаться относительно друг друга или вдоль оси  $x$  под действием вращающегося микрометрического винта. Спектрометр работает в двух режимах:

- сканирование спектра — при движении фотоумножителя с малой скоростью (1 мм/с) вдоль выходного окна в направлении оси  $x$ ;

- регистрация во времени импульсов излучения спектра при вспышках в цилиндре — для этого оба фотоумножителя устанавливаются неподвижно на определенных участках спектра (где высвечиваются радикалы ОН и СН).

Конструкция спектрометра и методика измерений подробно изложены в монографии [7].

Для получения базовых (эталонных) результатов удобно использовать пламя ацетилена в кислороде. На рис. 2 изображена спектральная кривая этого пламени, полученная на спектрометре ИСП-30. Интенсивность излучения  $I$  дана в условных единицах. В спектре выделяются мощные полосы излучения: радикала ОН с кантами (границами) 306 и 343 нм, а также радикала СН с максимумом в зоне  $\sim 430$  нм.

Полученные результаты полностью соответствуют имеющимся литературным данным [4]. Это позволило перейти к исследованию пламен в цилиндрах ДВС.

Эксперименты проводились на двигателях F3R фирмы RENAULT с непосредственным впрыском топлива как эталонном (пробег 15 000 км), и ВАЗ-21011 (пробег 50 000 км). Первоначально был исследован горячий режим холостого хода ( $n = 800$  об/мин).

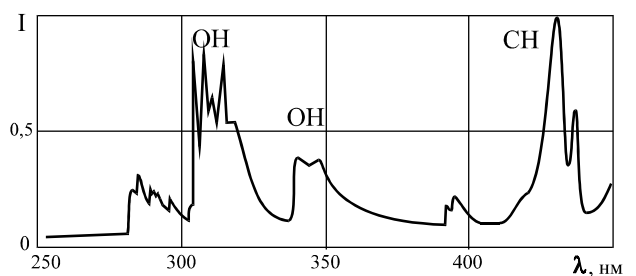


Рис. 2. Спектр пламени ацетилена в кислороде в ультрафиолетовой области

### Сканирование спектра

Типичная осциллограмма для двигателя ВАЗ-21011 приведена на рис. 3. Быстрые импульсы сигнала фотоумножителя от коротких вспышек пламени в цилиндре не развернуты во времени и изображаются отдельными вертикальными линиями. Несмотря на разброс амплитуды импульсов вырисовывается общая картина спектра в диапазоне длин волн  $\lambda = 550\text{--}250$  нм. В ней обнаруживаются зеленая и голубая полосы излучения радикала  $C_2$  с максимумами  $\sim 530$  и  $480$  нм, сильно выраженная полоса радикала СН с максимумом излучения при  $\sim 430$  нм в синей области и полоса излучения ОН в ультрафиолетовой зоне при длинах волн  $\sim 310$  нм. Остальные молекулярные полосы не просматриваются из-за вполне естественной при низких давлениях холостого хода хаотичности процесса горения. Полученные данные полностью соответствуют механизму горения ацетилена (см. рис. 2).

### Регистрация яркости спектральных полос ОН и СН

Используя градуировку спектрометра, оба фотоумножителя можно установить на участки спектра, где обнаружены полосы излучения, соответственно, радикалов ОН и СН. Скоростная регистрации сигналов на ЭВМ позволяет получить развертку импульсов излучения во времени при работе двигателя.

Важно отметить, что отсутствие в настоящее время какой-либо законченной теории неравновесных процессов горения не позволяет определить по яркости излучения молекулярных полос спектра концентрацию частиц в зоне горения и другие характеристики. Поэтому общепринятым является лишь сравнительный метод оценки яркости излучения, который и будет использоваться ниже.

### Диагностика и регулирование ДВС

Высокий пик излучения радикала в импульсе 1 (рис. 4) является наиболее оптимальным для двигателя и отражает быстрое протекание цепных реакций и в какой-то мере предпламенных процессов в целом. С повторяемостью 90 % он наблюдается для всех цилиндров двигателя F3R RE-

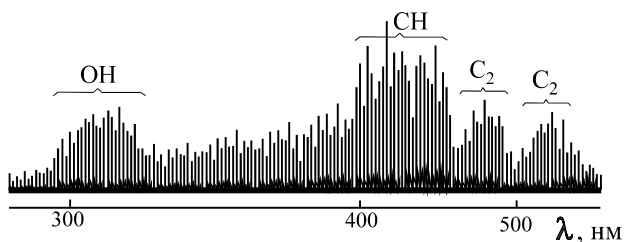


Рис. 3. Вид осциллограммы сканирования спектра ДВС

NAULT. Основание пика соответствует продолжительности горения; в режиме горячего холостого хода оно составляет 6–8 мс. Для всех цилиндров цвет пламени по индикатору качества смеси ИКС-1 синий.

В двигателе ВАЗ-21011 импульсы 2, преобладающие (с повторяемостью 80 %) во втором и третьем цилиндрах, имеют выраженный пик горения и в нижней части излучение фона — сплошной спектр сажи. Это излучение исчезает лишь при открытии выпускного клапана, когда резко падают давление и температура. В этих цилиндрах время горения  $\tau_{гор} \sim 10$  мс ( $n = 800$  об/мин), наблюдаемый цвет пламени в индикаторе ИКС-1 — синий.

В первом и четвертом цилиндрах преобладают (90 %) импульсы 3 и 4, горение затянuto во времени и сопровождается образованием значительного количества сажи; цвета пламени в индикаторе — желтый для цилиндра 1 и желто-фиолетовый для цилиндра 4.

Особо следует остановиться на структуре пика горения импульсов 1 и 2. Величина пика определяется не только излучением радикала и сажи. На рис. 3 видно, что сигнал фотоумножителя, движущегося вне полосы излучения радикала, по-прежнему имеет пик горения. Он может определяться молекулярными реакциями окисления, создающими свой «фоновый», сплошной спектр, а также частью излучения СН, ОН и других возбужденных молекул, «размытой» по всему спектру из-за рассеяния на мелких частицах сажи [4].

Ранее уже отмечалась высокая чувствительность интенсивности излучения радикалов в зависимости от характера и качества горения топлива в цилиндрах. Уменьшение опережения зажигания на  $2^\circ$  поворота коленчатого вала от оптимального практически устраняет пики горения с осциллограмм всех цилиндров ВАЗ-21011.

На рис. 5 представлены импульсы излучения спектральных полос в цилиндре 3 двигателя ВАЗ-21011 при регулировке качества горючей смеси; здесь  $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха, вычисленный по измеренным расходам бензина и воздуха. Анализ спектра излучения показывает,

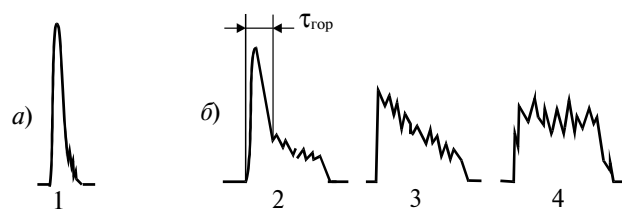
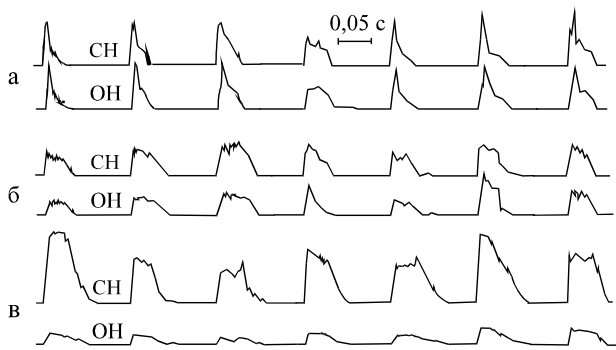


Рис. 4. Импульсы излучения полос радикалов в спектре двигателей:  
а — F3R RENAULT; б — ВАЗ-21011



**Рис. 5. Импульсы излучения полос СН и ОН в цилиндре ВАЗ-21011 при регулировке качества смеси в режиме горячего холостого хода:**

а)  $\alpha = 1$ ; б)  $\alpha = 1,3$ ; в)  $\alpha = 0,5$

что если обеднение смеси уменьшает амплитуду импульсов обоих радикалов, то обогащение уменьшает амплитуду импульса гидроксила ОН и увеличивает амплитуду импульсов СН при затягивании горения во времени.

Рост излучения в видимой области спектра, где находится полоса СН, связан, в первую очередь, с усилением излучения сажи в этой зоне. Активное образование сажи стимулируется избытком горючего и подтверждается желтым цветом пламени в индикаторе ИКС-1. Полоса гидроксила ОН находится в ультрафиолетовой зоне, где фоновое излучение сажи мало (в соответствии с законом Планка) и яркость полосы ОН на этом фоне в большей степени характеризует активность радикалов и, тем самым, скорость реакций горения.

Таким образом, визуальную настройку избытка воздуха по цвету пламени в индикаторе ИКС-1 можно заменить более точной приборной настройкой на максимальную яркость полосы излучения радикала ОН [8].

Определим время горения  $\tau_{гор}$  как продолжительность импульса излучения радикалов в цилиндре 2 двигателя ВАЗ-21011 (см. рис. 4) — по кривой температуры или давления в цилиндре

Таблица 1

**Продолжительность горения и скорость движения фронта пламени в двигателе ВАЗ-21011**

	Режимы работы двигателя:		
	холодный ход $n \sim 1200$ об/мин	горячий ход $n = 800$ об/мин	номинальный режим $n = 3000$ об/мин; $M = 50$ Нм
$\tau_{гор}$ , мс	11–25	$8 \pm 2$	$2,0 \pm 0,3$
$\Phi_{гор}$ , град ПКВ	80–180	$38 \pm 9,5$	$36 \pm 5,5$
$w_{тур}$ , м/с	5,1–2,3	$7 \pm 2$	$28 \pm 4$

это время определить невозможно. В табл. 1 приведены также угол поворота коленвала  $\Phi_{гор}$ , соответствующий  $\tau_{гор}$ , и вычисленная средняя скорость движения турбулентного фронта пламени  $w_{тур}$  как отношение пути фронта ко времени горения. Значения  $w_{тур}$  при различных коэффициентах избытка воздуха необходимы для решения задач ХТТ.

#### Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Принятый в задачах ХТТ кинетический механизм горения включает в себя реакции распада октана (заменяющего бензин), кинетический механизм горения легких углеводородов В.Я. Басевича и механизм Я.Б. Зельдовича для образования оксида азота — всего 264 реакции для 34-х компонентов. Процесс изменения состава продуктов горения во времени  $\tau$ , происходящий в элементе массы, пересекающем ламинарный фронт пламени, назовем нульмерной химической кинетикой. Расчет нульмерной кинетики является базовым, в нем для выбранной схемы реакций горения впервые определяются температура, тепловыделение и состав смеси в функции времени.

В зависимости от избытка воздуха процесс горения при пересечении фронта продолжается от 20 до 60 мкс. За это время температура  $T$  достигает максимального значения (рис. 6, а), содержание конечных продуктов сгорания  $CO_2$  и  $H_2O$  стабилизируется. Концентрация радикалов  $CH_n$  (б) возрастает, а затем снижается к 10-й мкс процесса. Радикал СН (излучающий в спектре) является типичным углеводородным радикалом. Содержание второго излучающего радикала ОН (в) достигает  $\sim 1\%$ , что способствует «выгоранию» токсичного оксида углерода СО (а) и превращению его в диоксид  $CO_2$ . Увеличение мольных долей радикалов О (з) и ОН определяет превращение части азота  $N_2$  в токсичный оксид NO (з). Полное описание кинетики горения см. в [1].

Таким образом, рассмотренные радикалы можно разделить на горючие: СО, СН, NO и окисляющие: ОН и О. Из табл. 2 видно, что максимальные во времени доли радикалов сильно зависят от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . Для горячих и окисляющих радикалов эта зависимость различна (наибольшие значения подчеркнуты). Если содержание СО и СН определяется избытком горючего, то доля ОН, О и NO — преобладающим влиянием температуры горения  $T_G$ . В целом поведение горючих и окисляющих радикалов характеризуют, соответственно, метин СН и гидроксил ОН.

На рис. 7 для режима холостого хода двигателя ВАЗ-21011, приведено сравнение расчетных

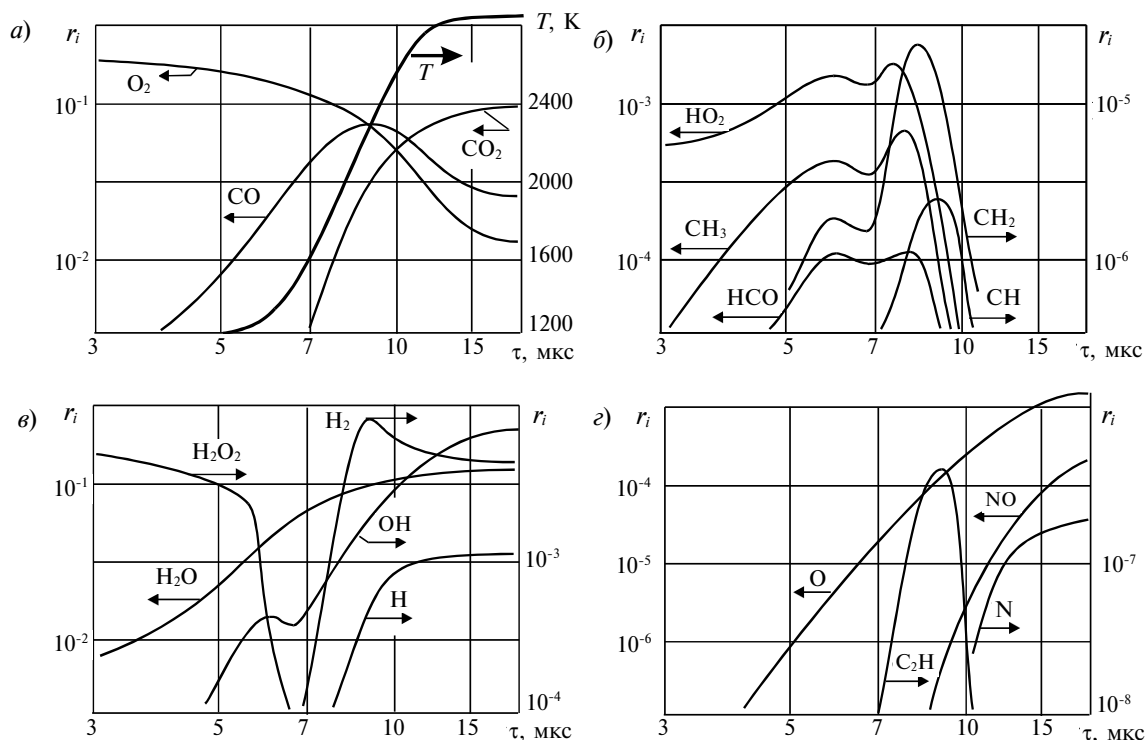


Рис. 6. Температура (а), а также молярные доли легких радикалов и конечных компонентов (а-г) в нульмерной кинетике горения ( $p = 6$  МПа,  $\alpha = 1$ )

Таблица 2

Температура горения и максимальные молярные доли основных радикалов при различном избытке воздуха по данным нульмерной кинетики ( $p = 6$  МПа)

$\alpha$	$T_G, K$	CO	CH	OH	O	NO
0,6	2676	0,138	0,360E-05	0,664E-03	0,695E-4	0,174E-5
0,8	2882	0,102	0,293E-05	0,377E-02	0,235E-3	0,473E-4
0,9	2915	0,0915	0,268E-05	0,639E-02	0,674E-3	0,192E-3
1,0	2883	0,0841	0,242E-05	0,770E-02	0,107E-2	0,231E-3
1,2	2677	0,0633	0,125E-05	0,562E-02	0,795E-3	0,127E-3
1,5	2442	0,0527	0,537E-06	0,300E-02	0,362E-3	0,366E-4

максимальных долей радикалов и экспериментальных данных по интенсивности излучения их полос. Каждая точка эксперимента определена, как средняя по 7 пикам излучения радикала (см. рис. 5). Результаты представлены в относительном виде — максимальные молярные доли  $r$  и яркости излучения  $I$  приняты за единицу. Несмотря на то, что излучают лишь «возбужденные» радикалы и доля их от концентрации радикала неизвестна, качественное соответствие расчетных и экспериментальных данных представляется удовлетворительным. Это свидетельствует в пользу достоверности использованного кинетического механизма горения.

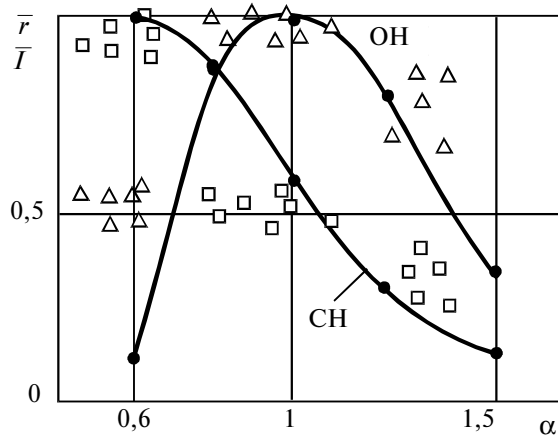


Рис. 7. Расчетные графики относительной максимальной молярной доли радикалов и экспериментальные точки относительной интенсивности их спектрального излучения:  $\Delta$  — OH;  $\square$  — CH ( $p = 0,7$  МПа)

тического механизма горения.

### Неравномерность процессов горения в цилиндрах

К принципиальным недостаткам многоцилиндровых ДВС необходимо отнести неодинаковость (неидентичность) рабочих процессов в разных цилиндрах. Причиной являются конструктивные особенности блока цилиндров, впускного и выпускного коллекторов, различия в условиях те-

Таблица 3

**Корреляция данных спектрометрии  
и индикаторной мощности цилиндров**

Цилиндры		1	2	3	4	Доверительные интервалы
F3R	$I_{cp}$	0,55	0,84	0,70	0,76	$\pm 0,12$
	$N_i$ , Вт	467	490	474	477	$\pm 10$ Вт
BA3	$I_{cp}$	0,45	0,80	0,71	0,42	$\pm 0,17$
	$N_i$ , Вт	565	522	488	530	$\pm 30$ Вт

плообмена, наполнения цилиндров и т. п. Это затрудняет настройку каждого из цилиндров на оптимальный режим работы.

В табл. 3 для обоих двигателей приведены средние амплитуды интенсивности излучения  $I_{cp}$  радикала ОН по каждому цилиндру. Там же приведена индикаторная мощность по цилиндрам  $N_i$ , рассчитанная по экспериментально полученным индикаторным диаграммам.

Для цилиндров F3R RENAULT характерна взаимосвязь этих величин — максимальные (в рамке) и минимальные (подчеркнуты) значения  $I_{cp}$  и  $N_i$  соответствуют друг другу.

Отсутствие такой зависимости для BA3-21011 с пробегом 50 000 км связано, видимо, с износом двигателя, горением масла с образованием сажи. Примером является первый цилиндр двигателя BA3-21011, в котором повышенный расход масла на угар можно объяснить высокими температурами головки блока цилиндров вблизи выхода горячего охладителя. Повышение температуры снижает вязкость масла и способствует его просачиванию по штокам клапанов в течение такта всасывания. Образующаяся при горении сажа снижает интенсивность излучения пика горения из-за падения температуры. Большие значения индикаторной мощности в цилиндрах 1 и 4 связаны, по-видимому, с лучшими условиями наполнения этих цилиндров именно в режимах глубокого дросселирования, когда из-за большого гидравлического сопротивления карбюратора среднее давление на всасывании падает до  $0,4 \cdot 10^5$  Па. При обработке осциллограмм удается экспериментально выявить различие продолжительности горения  $\tau_{гор}$  по цилиндрам 1–4, равным соответственно 13, 8, 6 и 11 мс ( $\pm 2$  мс).

Для режима холостого хода двигателя BA3-21011 проведены расчеты рабочего процесса многоцилиндрового ДВС по математической модели и алгоритму Елагина М.Ю. [9]. В расчетах варьировался коэффициент неполноты сгорания топлива  $\chi_n$  в каждом цилиндре. Значения  $\chi_n$ ,

Таблица 4

**Значения коэффициента неполноты сгорания  
и расчетного времени горения  
в цилиндрах двигателя BA3-21011**

Цилиндры	1	2	3	4
$\tau_{гор}$ , мс	14,7	7,6	7,6	11,9
$\chi_n$	0,5	0,8	0,8	0,6

обеспечивающие расчетное время горения  $\tau_{гор}$ , близкое к экспериментальному (указанному выше), приведены в табл. 4.

Таким образом, приведенные в статье результаты исследования показывают, что данные спектрометрии пламени можно эффективно использовать для качественного подтверждения полноты механизма реакций горения, а также оценки значений таких трудноопределяемых параметров, как турбулентная скорость горения и коэффициент неполноты сгорания топлива в цилиндрах ДВС.

#### Литература

1. Чесноков С.А., Потапов С.А. Химический турбулентный тепломассообмен в двигателях внутреннего сгорания. — 2-е изд., пересмотр. и дополн. — Тула : Изд-во Тульского гос. ун-та, 2009. — 500 с.
2. Чесноков С.А., Фролов Н.Н., Дунаев В.А., Кузьмина И.В. Моделирование горения и образования токсичных веществ в ДВС с непосредственным впрыском топлива // Двигателестроение. — 2005. — № 2. — С. 18–22.
3. Чесноков С.А., Фролов Н.Н., Потапов С.А., Тишин С.А. Турбулентность при горении в ДВС // Двигателестроение. — 2008. — № 1. — С. 13–16.
4. Гейдон А. Спектроскопия пламен. — М. : Иностр. лит, 1959. — 382 с.
5. Shoji H., Saima A., Sasao T. and al. The Behavior of Radical Luminescence Intensity in a Spark Ignition Engine // ISAE Rev. — 1992. — 13. — № 1.
6. Hotger M. Einsatzgebiete der Integralen Lichtleit — Meßtechnik // Motortechn. Z. — 1995. — № 5.
7. Чесноков, С.А. Спектрометрия двигателей внутреннего сгорания. — Тула : ТулГУ, 2007. — 146 с.
8. Патент 2182251 РФ, МПК F 02 M 65 / 00, Н 01 Т 13 / 48. Устройство для диагностики качества горючей смеси двигателя внутреннего сгорания / С.А. Чесноков, Н.Н. Фролов, К.А. Авдеев и др. Опубл. 10.05.02, Бюл. № 13.
9. Елагин М.Ю., Кузьмина И.В. Математическая модель и теоретические исследования рабочих процессов многоцилиндровых двигателей внутреннего сгорания. Известия ТулГУ, сер. Автомобильный транспорт, вып. 3 — Тула : ТулГУ. — 1999. — С. 104–110.