

ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА.

Бразовский В.В., Вагнер В.А.

Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова

Аннотация. Приведено детальное описание лазерного метода диагностики процессов сгорания топлива в дизельном двигателе.

Введение

Одной из основных задач борьбы с загрязнением окружающей среды и повышения топливной экономичности ДВС, является оптимизация процессов сгорания в цилиндрах двигателя.

С этой целью в АлтГТУ проводятся исследования влияния различных типов альтернативных топлив для нескольких типов быстроходных дизелей с различными способами смесеобразования, поэтому было необходимо получить как можно более полную информацию о протекании процессов топливоподачи, сгорания, сажеобразования, токсичности и т.д.

Преобладающим направлением исследований сложного (конвективного и радиационного) теплообмена в ДВС был и пока остается путь прямого экспериментирования на натуральных объектах. При изучении радиационного теплообмена определяются тем или иным методом локальные падающие потоки излучения сажегазового объема или излучательные характеристики дизельного пламени - концентрация и температура сажистых частиц. Конвективная составляющая теплообмена определяется, как правило, как разность суммарного и радиационного тепловых потоков, определенных экспериментально.

Анализ существующих методов экспериментального исследования внутрицилиндровых процессов показал, что наибольшей перспективой обладают оптические методы, основные достоинства которых заключаются в малой инерционности и высокой чувствительности применяемой аппаратуры, возможности размещения исследовательской аппаратуры вне объекта исследования, отсутствии непосредственного контакта изучаемой среды с чувствительными элементами измерительной системы. Недостаточность, а в некоторых случаях и полное отсутствие экспериментальных данных об изменении излучательных характеристик дизельного пламени в цилиндре дизеля послужили основанием для проведения специальных опытов на исследуемых установках. В этих опытах экспериментально исследовалось изменение мгновенных значений спектральной степени черноты, концентрации и температуры излучателя в функции угла поворота коленчатого вала по методике, подробно описанной в [1].

Значительный вклад в развитие исследований теплообмена в ДВС вносят представители научной школы АлтГТУ. Так, В.А.Вагнером, С.А.Угрюмовым, А.В.Гладышевым, С.П.Кулманакковым и В.Ю.Русаковым для изучения мгновенных объемных полей температуры и концентрации сажи в процессе диффузионного сгорания топлива на базе тракторного дизеля создана экспериментальная установка, позволяющая провести многоканальное оптическое индцирование объема цилиндра в осевом и радиальном направлениях. Разработан аппаратно-программный комплекс, включающий систему автоматизированной записи информации и пакет прикладных программ регистрации и обработки информации.

Настоящий обзор посвящен детальному описанию используемого лазерного метода диагностики сгорания топлива. Особое внимание обращено на точность измерений и способы учета возникающих в процессе измерения погрешностей.

Описание экспериментальной установки и методика эксперимента

Многоканальное зондирование по объему цилиндра проводилось на установке с тракторным вариантом дизеля Владимирского тракторного завода 4Ч 10.5/12 (Д37Е) и 1Ч 13/14 (УК-2, АО "Алтайдизель"). На этих же установках исследовались образцы альтернативных топлив.

При проведении исследований, монтаже оборудования, приборов, отборе проб отработавших газов, обработке результатов измерений и их анализе учитывались требования ГОСТ 2000-88, ГОСТ 18509-88, ОСТ 23.1.440-76 и ОСТ 23.1.441-76.

Общая схема экспериментальной установки представлена на рис.1.

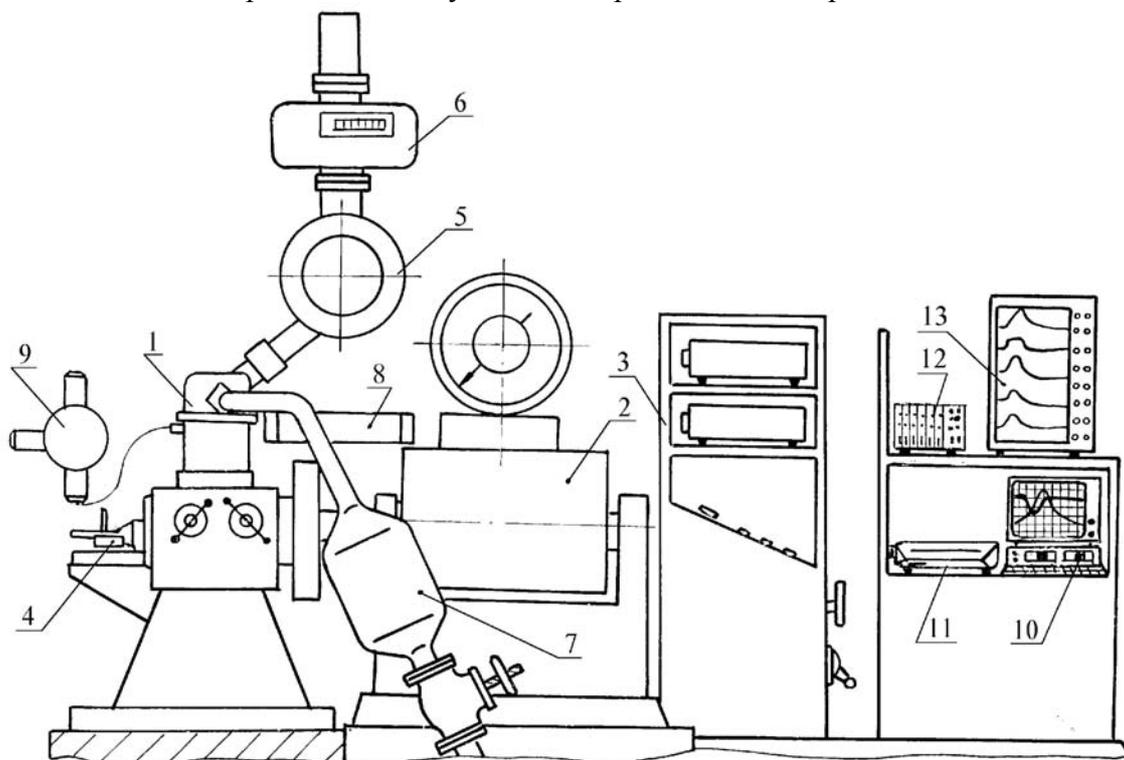


Рис.1 Общая схема экспериментальной установки. Обозначения: 1- двигатель УК-2 (Д37Е); 2- балансирный электродинамометр с весовой головкой; 3- пульт управления с контрольно-измерительными приборами; 4- датчик угловых отметок для комплекса индицирования; 5- ресивер; 6- расходомер воздуха РГ-250; 7- система выпуска с ресивером; 8- ОКГ ЛГ-75; 9- блок приемников излучения; 10- комплекс индицирования на базе микроЭВМ ДВК-3М; 11- печатающее устройство; 12- логический блок и блок усилителей; 13- видеомонитор ИМ-789 для контроля регистрируемых параметров.

Двигатель УК-2 укомплектован масляным, двухплунжерным топливным насосами, поршнями с камерами сгорания различного типа и головкой цилиндра с тангенциальным всасывающим и выхлопным каналами в соответствии с конструкцией поршней и головок дизелей А-01М.

Экспериментальная установка оснащена вспомогательными системами и агрегатами, а также обычной и специальной измерительной аппаратурой.

Для контроля частоты вращения применен электронносчетный тахометр ТЦ-3М, с погрешностью измерения 0.2%.

Автономная система охлаждения двигателя УК-2 вне зависимости от режима работы двигателя обеспечивает возможность регулирования и поддержания постоянной в широких пределах заданных значений температуры охлаждающей воды и масла. Система выхлопа оснащена газоотводящими устройствами с приборными зондами в соответствии с требованиями ОСТ 23.1.441-76 и ОСТ 23.1.440-76 для отбора и анализа ОГ на дымность и содержание токсичных компонентов. Дымность отработавших газов замерялась дымомером ИД-1 (конструкции НАМИ), содержание окислов азота - химическим методом (на реактив Зальцмана) с помощью фотокалориметра ФЭК-56, концентрация углеводородов регистрировалась с помощью хроматографа "Газохром 3101", выбросы окиси углерода - хроматографом "ЛХМ-8".

Для регистрации параметров впрыска топлива установка была оборудована индуктивным датчиком подъема иглы форсунки и тензометрическим датчиком давления топлива. Датчик давления топлива расположен на штуцере топливного насоса высокого давления. В основу методики исследований положен сравнительный метод. Стендовые исследования проводились в несколько этапов. Испытания предусматривали определение оптимальных

регулировок, получения эффективных и индикаторных показателей, данных по токсичности и дымности отработавших газов и специальные измерения параметров топливоподачи и внутрицилиндровых процессов. На первом этапе проводилось исследование дизеля со штатной системой топливоподачи на стандартном дизельном топливе.

Второй этап испытаний предусматривал снятие регулировочных характеристик для нахождения оптимальных по g_i регулировок угла опережения впрыска для различных видов альтернативных топлив. Испытания проводились на режиме номинальной нагрузки при $P_i=0.85$ МПа и $n=1750$ мин⁻¹. На третьем этапе производилась регистрация параметров рабочего цикла при сравнительном исследовании на нагрузочных характеристиках при $n=1750$ мин⁻¹ и изменении нагрузки в диапазоне $P_i=0.4-0.9$ МПа.

На каждом режиме производились замер эффективного крутящего момента, расхода дизельного или альтернативного топлива, частоты вращения, расхода воздуха, температуры выхлопных газов, охлаждающей воды и смазки. Снятие индикаторных диаграмм осуществлялось с помощью пьезодатчиков "Orion", сигнал затем усиливался и регистрировался автоматической системой. Одновременно здесь же производилась запись осциллограмм давления топлива, подъема иглы форсунки и осциллограмм свечения пламени. Для каждого режима производились отборы проб выхлопных газов с целью анализа их на содержание сажи, окислов азота, углеводородов и окиси углерода. После каждого режима производилось измерение момента механических потерь на режиме прокрутки двигателя от электротормоза.

Расход дизельного и альтернативных топлив определялся весовым методом с помощью электрических весов ВЛТК-500 и секундомера.

Оптическое индицирование цилиндра дизеля для каждого установившегося режима выполнялось в соответствии с методикой, описанной в [34].

В выполненных исследованиях индикаторная диаграмма использовалась для определения максимальных значений давления и температуры; скорости нарастания давления; среднего индикаторного давления; угловых отметок характерных точек и участков диаграммы, таких как угол начала сгорания, период задержки воспламенения и др.; характеристик выделения и отвода теплоты; составляющих неиспользования теплоты в цикле.

Для расчета перечисленных параметров была принята методика и программа обработки индикаторных диаграмм на ЭВМ на основе работы [30]. Расчет коэффициента выделения теплоты X основывался на использовании уравнения первого закона термодинамики, записанного в дифференциальной форме [25].

Для исследования распределения концентрации сажи и температуры пламени в цилиндре был применен метод оптического индицирования с применением оптического квантового генератора (ОКГ) в качестве источника стороннего излучения при измерении концентрации сажи, детально разработанный в С-ПбГТУ [9, 17, 27].

Для проведения объемного зондирования был выбран двигатель воздушного охлаждения ДЗ7Е, позволяющий более легкий доступ для выполнения необходимых конструктивных изменений, и двигатель водяного охлаждения УК-2.

Для измерения концентрационно-температурной неоднородности по объему были доработаны два цилиндра (см. рис.3.). У цилиндра N 1 были выполнены 4 парных диаметральных отверстия, расположенных по продольной оси цилиндра. Относительное расстояние от плоскости головки цилиндра до оси измерительного канала составляло (в долях полного хода поршня) $L/S = 0.06; 0.4; 0.67; 0.9$. Цилиндр N 2 имел 12 пар измерительных каналов. Измерительные каналы были выполнены рядами вдоль образующей, как с пересечением продольной оси с относительным расстоянием в долях радиуса цилиндра $r/R = 0$, так и отстоящих от оси в радиальном направлении $r/R = 0.3; 0.5$. Расстояние между плоскостью головки и осями измерительных каналов в ряду вдоль образующей цилиндра на относительном расстоянии $L/S = 0.13; 0.3; 0.53; 0.82$. Для зондирования непосредственно камеры сгорания в ВМТ в поршне был выполнен узкий паз на глубину камеры сгорания, ось которого совпадала с осью измерительных каналов.

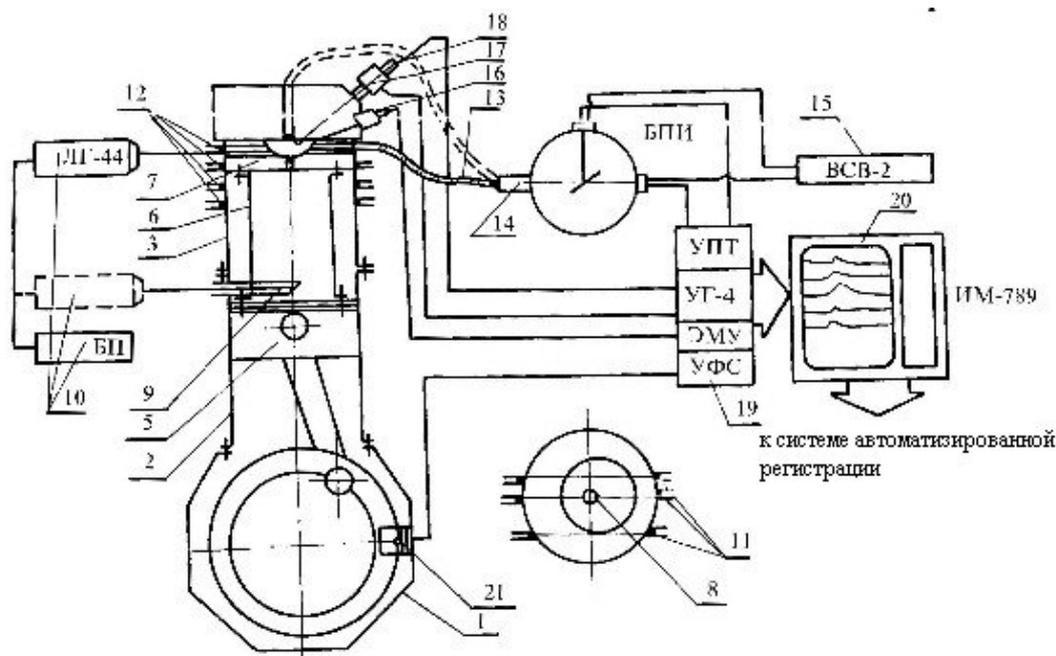


Рис. 2. Общая схема системы для исследования процесса сгорания. На рисунке представлены следующие узлы и приборы: 1 - блок-картер двигателя; 2 - цилиндр-вставка; 3 - цилиндр двигателя; 4 - 5 - направляющая часть поршня; 6 - вставка с продольным пазом; 7 - головка поршня; 8 - вертикальные окна индицирования цилиндра; 9 - поворотное зеркало; 10 - лазер ЛГ-44 с блоком питания; 11 - горизонтальные окна индицирования цилиндра; 12 - разобширительные устройства; 13 - волоконный световод; 14 - блок приемников излучения с ФЭУ; 15 - высоковольтный блок питания для ФЭУ; 16 - пьезокварцевый датчик давления "Ogion"; 17 - датчик давления топлива; 18 - датчик подъема иглы форсунки; 19 - блок усилителей и преобразователей; 20 - восьмиканальный многолучевой индикатор ИМ-789; 21 - отметчик угла поворота коленвала.

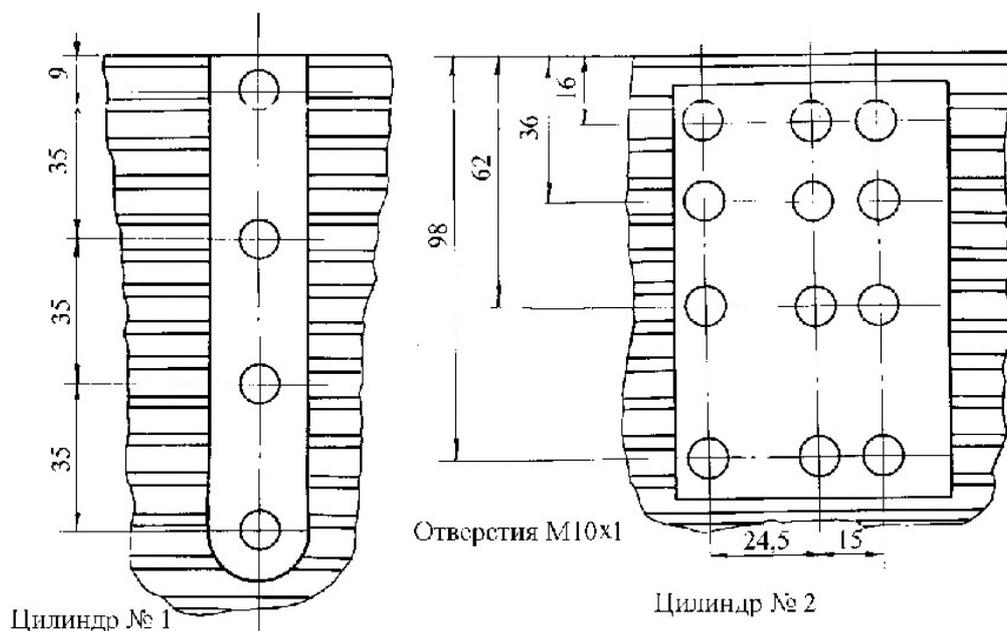


Рис.3.

Для обеспечения зондирования в вертикальном направлении камеры сгорания (рис.1) между картером двигателя и цилиндром вставлялась специальная направляющая цилиндрическая вставка 2. Специальный поршень состоял из направляющей части 5, вставки с продольным пазом 6 и головки 7. В головках поршня и цилиндра были выполнены окна 8, образующие измерительный канал. Данные конструктивные изменения были внесены для обеспечения непрерывности измерения при перемещении поршня. Подвод луча лазера осуществлялся через поворотное зеркало 9. Экспериментальные исследования распределения концентрацион-

но-температурной неоднородности по объему цилиндра проводились последовательно для каждого из измерительных каналов. Физические основы, методика и расчетные выражения для определения концентрации сажи и температуры пламени по методу оптического индирования подробно рассмотрены в работах [5, 8, 17, 27, 28, 31, 32].

Измерение концентрации сажи в цилиндре дизеля

В исследовательской практике для определения массовой концентрации сажи в цилиндре дизеля используют оптические методы, основанные на законах ослабления проходящего света. Такие методы использованы Белинкиным Л.М., Маховым В.З., Батуриным С.А., Смайлисом В.И. и другими [9, 10, 5, 6, 38].

Проведенный в АлтГТУ комплекс исследований по определению концентрационных и температурных неоднородностей в цилиндрах дизелей. Экспериментальные работы проведены Гладышевым А.В., Кулманаковым С.П., Русаковым В.Ю. под руководством Матиевского Д.Д. и Вагнера В.А. Схема экспериментальной установки на базе двигателя Д-37Е и УК-2 представлена на рис. 1, 2.

Результаты исследований были обработаны по описанной в [13] методике, позволяющей безразмерные единицы оптической плотности C переводить в единицы объемной или массовой концентрации сажи в $г/м^3$.

В основу данной методики положены следующие положения. Закон Ламберта-Бееера для луча монохроматического света, проходящего через группу частиц с плотностью распределения по размерам :

$$\frac{I_{(+)} - I_c}{I_c} = \exp \left[-\frac{\pi}{4} C \cdot L \int_0^{\infty} N(D) K_{\lambda}(D) D^2 dD \right] \quad (1)$$

где I_c , I , $I_{(+)}$ – интенсивность излучения лазера (или иного источника света), пламени и совместного излучения системы "лазер плюс пламя" с учетом ослабления луча света при прохождении через газосажевый объем цилиндра;

$C_{п}$ – штучная концентрация частиц сажи;

L – длина оптического канала;

D – диаметр частиц сажи;

K_{λ} – спектральный фактор ослабления спектра на длине волны λ источника света, которым производится просвечивание цилиндра двигателя.

Массовая концентрация сажи считается по формуле

$$C_m = \frac{\pi}{6} C \cdot \gamma_- \int_0^{\infty} N(D) D^3 dD \quad (2)$$

Объединяя формулы (1) и (2) получим

$$C_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma_c \cdot D_{32}}{L \cdot K_m} \ln \frac{I_c}{I_{(+)} - I_c} \quad (3)$$

после преобразования

$$C_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma_c \cdot D_{32}}{\pi \cdot \Phi_m L} \ln \frac{I_c}{I_{(+)} - I_c} \quad (4)$$

$$\text{где } K_m = \frac{\int_0^{\infty} N(D) K_{\lambda}(D) D^2 dD}{\int_0^{\infty} N(D) D^2 dD} ; \quad (5)$$

$$D_{32} = \frac{\int_0^{\infty} N(D) D^3 dD}{\int_0^{\infty} N(D) D^2 dD} = \frac{m_3}{m_2}; \quad (6)$$

$$\Phi_m = \frac{K_m}{\rho_{32}}; \quad (7)$$

$$\rho_{32} = \frac{\pi D_{32}}{\lambda}; \quad (8)$$

здесь K_m - средний фактор ослабления полидисперсной среды;

D_{32} - средний диаметр частиц сажи по Заутеру: мкм ;

m_2 и m_3 - моменты второй и третьей функции распределения частиц сажи по диаметрам;

Φ_m - средняя величина дисперсии комплексного показателя преломления полидисперсной среды;

ρ_{32} - параметр дифракции;

γ_C - плотность частиц сажи, $\gamma_C = 1.8...2.1$ г/см³;

λ - длина волны, мкм.

По работам Батурина С.А. [9] относительная концентрация сажи, приведенная к диаметру цилиндра:

$$\bar{C} = \frac{D_{\text{ц}}}{L} \ln \frac{I_0}{I_{(\text{+})} - I_0} \quad (9)$$

Выражение [9] можно записать в виде:

$$C_m = \mu_C \cdot \bar{C}, \quad \text{г/м}^3; \quad (10)$$

где множитель μ_C определяет величину масштаба массовой концентрации сажи:

$$\mu_C = \frac{2.3026 \cdot \gamma_C \cdot \lambda}{1.5 \cdot \Phi_m \cdot D_{\text{ц}}}, \quad \text{г/м}^3; \quad (11)$$

где γ_C - необходимо выразить в г/см³;

λ_C - в микрометрах;

$D_{\text{ц}}$ - в метрах.

Следовательно, для определения величины масштаба μ_C необходимо знать величину дисперсии комплексного показателя преломления Φ_m полидисперсной среды.

К моменту открытия выпускного клапана величина ослабления проходящего света в цилиндре дизеля, как правило, невелика, из-за чего возникают значительные погрешности при определении концентрации сажи оптическими методами. Поэтому массовую концентрацию сажи в цилиндре дизеля на момент открытия выпускного клапана необходимо сопоставлять с результатами измерения уровня дымности отработавших газов на выхлопе.

Массовая концентрация сажи на выхлопе может быть вычислена по выражению

$$C_{\text{mb}} = C_D (G_T + G_B) \tau / (120 \cdot \gamma_0 \cdot V_B \cdot n \cdot i) \quad (12)$$

где C_D - массовая концентрация сажи в ОГ, г/м³;

G_T и G_B - часовой расход топлива и воздуха, кг/ч;

τ - тактность двигателя;

i - число цилиндров двигателя;

γ_0 - плотность отработавших газов, приведенная к н.у., кг/м³;

V_B - объем цилиндра в момент открытия клапанов, м³;

n - частота вращения коленвала, мин⁻¹.

Слабая зависимость оптических констант углеродных материалов в видимой области спектра подтверждается непосредственно и опытными данными. Например, для ацетиленовой и пропановой сажи, для интервала длин волн $\lambda = 0.44...0.81$ мкм, как следует из результатов измерений В.Далзелла и А.Сарофима [41], показатель преломления изменяется в пределах $n=1.56...1.57$, а показатель поглощения - $x=1.46...1.52$.

При практической реализации метода оптического индицирования цилиндра дизеля рекомендуется использовать источники света с длиной волны, находящейся в "красной" области спектра ($\lambda=0.6$ мкм), так как данные С.Ли не учитывают дисперсию оптических свойств сажи $m=n-ix$ при изменении длины волны падающего излучения. Однако, как показывают работы В.Стелла и оценка СпГТУ [13], в диапазоне длин волн $0.5...0.7$ мкм и малых значениях параметра дифракции дисперсия комплексного показателя преломления аморфного углерода примерно постоянна.

Погрешности измерений концентрации сажи оптическим методом

Выражение для относительной концентрации сажи можно представить в виде:

$$\bar{C} = \ln \left(\frac{I_c}{I_{+} - I_c} \right) \quad (13)$$

Если в выражение (13) величину аргумента логарифма обозначить через A , в результате можно записать

$$\ln A = \ln A_c - \ln(I_{+} - I_c) \quad (14)$$

Продифференцировав последнее выражение, получаем

$$dA/A = \left(\frac{dI_c}{I_c} \right) - \frac{I_{+}}{I_{+} - I_c} \cdot \frac{dI_{+}}{I_{+}} - \frac{I_c}{I_{+} - I_c} \cdot \frac{dI_c}{I_c} \quad (15)$$

Переходя к конечным разностям и относительным погрешностям

$$\delta A = \Delta A/A ; \quad \delta I_{\text{л}} = \frac{\Delta I_{\text{л}}}{I_{\text{л}}} , \quad (16)$$

и имея в виду, что

$$d\bar{C} = dA/A ; \quad \delta \bar{C} = \frac{1}{\bar{C}} \cdot \delta A , \quad (17)$$

получим расчетную формулу для определения погрешности измерения относительной концентрации сажи \bar{C}

$$\delta \bar{C} = \pm \frac{1}{\bar{C}} \left[\delta I_c + \frac{I_{+}}{I_{+} - I_c} \delta I_{+} + \frac{I_c}{I_{+} - I_c} \delta I_c \right] , \quad (18)$$

Как видно из данных табл.16 [13], среднее арифметическое значение погрешности $\delta \bar{C}$ при "ручной" обработке осциллограмм составляет 17.8%, максимальное значение погрешности достигает 27.5%. Эти значения погрешностей нужно рассматривать как предельные погрешности измерения среднего арифметического значения \bar{C}_a могут быть в значительной степени снижены за счет дублирования опытов

$$\delta \bar{C}_a = \pm \frac{t_{\gamma, n_0} \cdot \delta \bar{C}_n}{3\sqrt{n_0}} \quad (19)$$

где t_{γ, n_0} - коэффициент Стьюдента ;

γ - доверительная вероятность ;

n_0 - количество дублированных опытов.

Повысить точность измерений можно путем использования автоматизированных систем регистрации и обработки информации. Так, по данным [15] применение аналого-цифрового преобразователя с погрешностью 0.2% позволяет определить относительную концентрацию сажи с точностью 2-4%.

Таким образом можно утверждать, что использование автоматизированной системы научных исследований позволяет повысить точность измерений относительной концентрации сажи на один порядок.

Имеется еще один путь повышения точности измерений \bar{C} - методического характера. Используя данные табл.16 [13] при $\varphi=30^\circ$ п.к.в.

$$\frac{h_{л+п}}{h_{л+п} - h_{п}} + \frac{h_{п}}{h_{л+п} - h_{п}} \approx 6 \quad (20)$$

$$\text{и полагая } \delta I_{л} \cong \delta I_{л+п} \cong \delta I_{п} = \delta I_{\lambda}, \quad (21)$$

выражение (18) можно записать приближенно в виде

$$\delta \bar{C} = \pm \frac{1}{\bar{C}} \cdot 7 \cdot \delta I_{\lambda} \quad (22)$$

При проведении измерений можно подобрать интенсивность излучения стороннего источника света $I_{л}$ таким образом, чтобы величина $I_{л}$ значительно превышала интенсивность излучения пламени $I_{п}$: $I_{л} \gg I_{п}$. Тогда выражение (20) примет вид

$$\delta \bar{C} = \pm 2 \cdot \frac{\delta I_{л}}{\bar{C}} \quad (23)$$

Сравнивая два последних выражения, можно увидеть, что за счет выбора интенсивности излучения стороннего источника света, например, путем диафрагмирования, можно уменьшить погрешность измерений относительной концентрации сажи в 3..4 раза.

Подводя итоги, отметим, что при надлежащем выборе методики измерений погрешность определения относительной концентрации сажи \bar{C} может быть доведена до 5..10%.

При определении погрешности необходимо рассмотреть вопрос о влиянии концентрации капель несгоревшего топлива на результаты измерений концентрации частиц сажи. Рассмотрим основные решения К.Контани и С.Гото [14]. Определение несгоревших капель топлива можно провести, используя результаты измерений коэффициента пропускания пламени на двух длинах волн. Уравнение закона Ламберта-Беера для двух монодисперсных систем частиц сажи и топлива на длинах волн λ_1 и λ_2 :

$$-\ln \left(\frac{I}{I_0} \right)_{\lambda_i} = K_{\lambda_i}^c \cdot C_n^c \cdot \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \cdot L + K_{\lambda_i}^{\square} \cdot C^{\square} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\square}^2}{4} \cdot L \quad (24)$$

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{\lambda_2} = K_{\lambda_2}^c \cdot C_n \cdot \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \cdot L + K_{\lambda_2}^{\square} \cdot C_{\square} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\square}^2}{4} \cdot L \quad (25)$$

где индекс "с" относится к частицам сажи, индекс "т" - к частицам топлива; I и I₀ - интенсивность падающего и проходящего света.

Вычтем из (24) выражение (25), в результате получим

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{\lambda_1} + \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{\lambda_2} = (K_{\lambda_1}^c - K_{\lambda_2}^c) \cdot C_n \cdot \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \cdot L + (K_{\lambda_1}^{\square} - K_{\lambda_2}^{\square}) \cdot C_{\square} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\square}^2}{4} \cdot L \quad (26)$$

Средний диаметр капель топлива D_T=20 мкм в несколько сотен раз превышает размеры частиц сажи, при этом в видимой области спектра параметр дифракции для капель топлива находится в пределах ρ_T=100..160. Поэтому, независимо от оптических свойств капель топлива, можно положить K_{λ₁}^T = K_{λ₂}^T = 2 и исключить из рассмотрения последний член в уравнении (26). Для полидисперсной среды частиц сажи по аналогии с (26) выражение для расчета массовой концентрации сажи, позволяющее определить несгоревшие капли топлива, можно представить в виде

$$C_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma_c}{L} \cdot \frac{D_{32}}{K_{m\lambda_1} - K_{m\lambda_2}} \left(\ln\left(\frac{I_c}{I_{+c} - I_c}\right) - \ln\left(\frac{I_c}{I_{+c} - I_c}\right) \right) \quad (27)$$

В выражении (27) сохранены условные обозначения, использованные ранее при выводе выражений для C_m типа (15) и (16).

Как показывают расчеты, методологию, заложенную в выражение (27) не следует распространять на весь период сгорания - расширения во избежание искажения информации о действительной величине массовой концентрации сажи.

Изменение величины ослабления проходящего света происходит и за счет увеличения плотности газовой среды в процессе сжатия в цилиндре из-за наличия остаточных газов, частиц нагара, масел и прочих примесей. Для определения влияния "остаточных примесей" на

результаты измерений относительно концентрации сажи С С.А.Батури и В.Н.Ложкин [9,28] рекомендует проводить еще одно измерение интенсивности ослабления света на ре-

жиме "чистого" сжатия без подачи топлива и корректировать расчеты \bar{C} по формуле

$$\bar{C} = \lg \left(\frac{I_c \cdot \left(\frac{I_c}{I_{c''}} \right)_{-c}}{I_{+c} - I_c} \right) \quad (28)$$

где $\left(\frac{I_c}{I_{c''}} \right)_{-c}$ - относительное изменение интенсивности ослабления света на режиме "чистого" сжатия;

I_{ЛП} - интенсивность падающего света (лазера).

Величина I_{ЛП} пропорциональна ординате на осциллограмме свечения лазера в период перекрытия клапанов : I_{ЛП} = I_{Лmax} = const.

Величина $\left(\frac{I_c}{I_{c0}}\right)_{-c}$ на основании закона Бугера - Беера может быть вычислена по формуле

$$\left(\frac{I_c}{I_{c0}}\right)_{-c} = \exp(-K_p \cdot P \cdot L) \quad (29)$$

где P - давление газов на режиме "чистого" сжатия, МПа;

L - длина оптического канала, м;

K_p - коэффициент ослабления, для каждого типа двигателей определяется экспериментально.

Измерение температуры пламени в цилиндре двигателя

При исследовании процессов сгорания, образования сажи и окислов азота, радиационного и конвективного теплообмена большую роль имеет температура пламени, наряду с давлением и составом газов в цилиндре. Поскольку температура пламени в дизеле высока и подвержена быстрым изменениям, наиболее эффективными для ее измерения являются оптические методы.

Теоретические основы оптических методов измерения температуры пламени разработаны в известных работах А.Е.Кадышевича, Д.Я.Света, А.Г.Гейдона, Х.Г.Вольфгарда, М.В.Тринга и др. [16,24,21, 26,37,47]. Приложения оптических методов к исследованиям излучательных характеристик дизельных пламен даны в работах Л.М.Белинского, В.З.Махова. С.А.Батурина, В.И.Смайлиса, В.Н.Ложкина, Н.А.Баранова и др. [9,10,5,6,15,17,27, 28,36].

Рассмотрим основные зависимости определения температуры пламени по методу спектрального отношения плотности лучистой энергии на двух длинах волн [24,21,26]. Выделим из потока лучистой энергии пламени две монохроматические компоненты с интенсивностью излучения $I(\lambda_i, T)$:

$$I(\lambda_1, T_c) = \varepsilon(\lambda_1, T) \cdot I_0(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_1, T) \cdot C_1 \cdot \lambda_1^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1 T_c}\right) \quad (30)$$

$$I(\lambda_2, T_c) = \varepsilon(\lambda_2, T) \cdot I_0(\lambda_2, T) = \varepsilon(\lambda_2, T) \cdot C_1 \cdot \lambda_2^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2 T_c}\right) \quad (31)$$

и, используя приближение Вина для интенсивности излучения "абсолютно черного" тела $I_0(\lambda_i, T)$ составим отношение:

$$\begin{aligned} \Pi(\lambda_1, \lambda_2, T_c) &= \frac{I(\lambda_2, T_c)}{I(\lambda_1, T_c)} = \frac{\varepsilon(\lambda_2, T)}{\varepsilon(\lambda_1, T)} \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{-5} \cdot \exp\left(\frac{C_2}{T_c} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)\right) = \\ &= \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{-5} \cdot \exp\left(\frac{C_2}{T_c} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)\right) \end{aligned} \quad (32)$$

где λ_1 и λ_2 - длины волн монохроматического излучения, мкм;

C_1 и C_2 - постоянные Планка, $C_1=3.7413 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²; $C_2=1.4388$ мкм/град.;

T - истинная температура пламени;

T_c - температура спектрального отношения /"цветовая" температура/, К;

$\varepsilon(\lambda_1, T)$ и $\varepsilon(\lambda_2, T)$ - излучательная способность пламени на длинах волн λ_1 и λ_2 .

В выражении (2.32) величина

$$\lambda_3 = \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)^{-1} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (33)$$

имеет размерность длины волны. Эту размерность называют эквивалентной длиной волны пиromетра спектрального отношения.

Логарифмируем выражение (2.32)

$$\ln \pi(\lambda_1, \lambda_2, T_c) = \ln \frac{\varepsilon(\lambda_2, T)}{\varepsilon(\lambda_1, T)} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \frac{C_2}{T \cdot \lambda_3} = -5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \frac{C_2}{T_c \cdot \lambda_3} \quad (34)$$

Нетрудно получить выражения для расчета температуры спектрального отношения T_c , истинной температуры пламени и соотношения между ними

$$T_c = \frac{C_2}{\left(\lambda_3 \cdot \ln \left(\pi(\lambda_1, \lambda_2, T_c) \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \right) \right)} \quad (35)$$

$$T = \frac{C_2}{\left(\lambda_3 \cdot \ln \left(\pi(\lambda_1, \lambda_2, T_c) \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \cdot \left(\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \right) \right) \right)} \quad (36)$$

$$\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T} = -\frac{\lambda_3}{C_2} \ln \left(\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \right) \quad (37)$$

Как видно из (35) для определения температуры спектрального отношения T_c достаточно провести два измерения интенсивности излучения пламени на двух длинах волн $I(\lambda_1, T)$ и $I(\lambda_2, T)$. Для определения действительной температуры пламени T , необходимо провести еще два измерения поглощательной способности пламени в двух областях спектра $\varepsilon(\lambda_1, T)$ и $\varepsilon(\lambda_2, T)$. Однако, по данным в работе [28], для определения T можно ограничиться одним

дополнительным измерением оптической плотности сажистого пламени \bar{C} на длине волны λ_2 , если использовать статистические данные зависимости коэффициента ослабления от длины волны λ в видимой области спектра

$$K_\lambda = \frac{a}{\lambda^b} \quad (38)$$

Используя результаты измерения интенсивности ослабления проходящего света через объем пламени на длине волны λ_1 , можно вычислить $\varepsilon(\lambda_2, T) = \varepsilon_2$

$$\varepsilon_2 = 1 - \exp(-K_\lambda L) = 1 - \exp\left(-\frac{aL}{\lambda_2^b}\right) = 1 - \exp(-\bar{C}) \quad (39)$$

а также, полагая известным из статистических данных значение коэффициента b , определить величину параметра a .

$$a = \bar{C} \cdot \frac{\lambda_2^b}{L} \quad (40)$$

Далее, используя полученное значение параметра a , найдем $\varepsilon(\lambda_1, T) = \varepsilon_1$:

$$\varepsilon_1 = 1 - \exp\left(-\frac{aL}{\lambda_1^b}\right) \quad (41)$$

Если представить соотношение $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$, то получаем

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\left(1 - (1 - \varepsilon_2)^{(\lambda_2/\lambda_1)^b}\right)}{\varepsilon_2} \quad (42)$$

По опытным данным, обобщенным в работе [16], величина показателя b для диффузионных пламен ацетилена, бензола, светильного газа и ацетона равна $b = 0.66 \dots 1.43$. Милликен Р.К. [35] исследовав оптические характеристики образцов сажи пламен ацетилена и этилена, дает более широкие пределы изменения показателя степени рассеяния $b = 0.9 \dots 1.9$. Для дизельной сажи Матсуи Д. с соавторами нашел следующие значение $b = 1.38$. Считается, что изменение численных значений показателя b связаны с различиями химического состава и размеров частиц сажи.

Как отмечалось выше, величина показателя b в выражении для коэффициента ослабления (38) зависит от состава и размеров частиц сажи и может быть вычислена с использованием теории Г.Ми и экспериментальных данных об оптических свойствах сажи Х.Далзелла, С.Ли и А.Сарофима [41,45]. Для частиц сажи больших размеров при вычислении поглощательных способностей $\varepsilon(\lambda_1, T)$ и $\varepsilon(\lambda_2, T)$ необходимо учитывать рассеяние на частицах.

При разработке оптического метода измерения температуры дизельного пламени, с целью повышения его точности, С.А.Батуриным [9] было оценено влияние хемилюценции, отклонений от термодинамического равновесия, селективности излучения трехатомных газов на результаты измерений. Было установлено, что в видимой области спектра $0.4 \dots 0.7$ мкм для дизельного пламени сажа является единственным источником излучения, дающим непрерывный спектр. Поэтому указанный диапазон длин волн можно рекомендовать для реализации оптического метода измерения температуры пламени. Влияние хемилюценции и отклонений от термодинамического равновесия на результаты измерений температуры пламени в [23] признано несущественным.

Погрешности измерений температуры пламени в цилиндре.

С изложением общей методики определения погрешностей результатов инженерного эксперимента можно познакомиться, например, в [19,20]. Наиболее полное обсуждение вопросов, связанных с определением погрешностей измерения температур оптическими методами, приводится в работе Д.Я.Света [37].

Рассмотрим основные положения методики определения погрешностей измерения температуры пламени методом спектрального отношения. Расчетные формулы для определения указанных погрешностей можно получить следующим образом. Продифференцируем выражение (34)

$$\frac{d\pi(\lambda_1, \lambda_2, T_c)}{\pi(\lambda_1, \lambda_2, T_c)} = -\frac{C_2}{\lambda_3 T} \cdot \left(\frac{dT}{T} + \frac{d\lambda_3}{\lambda_3} \right) - 5 \frac{dS}{S} + \frac{d(\varepsilon_2/\varepsilon_1)}{\varepsilon_2/\varepsilon_1} \quad (43)$$

где $S = \lambda_2 / \lambda_1$. Переходя к конечным разностям $\Delta T/T$ и относительным погрешностям δT и т.д., получим:

$$\delta_T = \pm \left(\frac{\lambda_3 \cdot T}{C_2} (\delta\pi + 5 \cdot \delta S + K_\varepsilon \cdot \delta_\varepsilon) + \delta\lambda_3 \right); \quad (44)$$

$$\delta_S = \pm (\delta\lambda_1 + \delta\lambda_2); \quad (45)$$

$$\delta\lambda_3 = \pm \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1} \cdot \delta \cdot \lambda_1 + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \cdot \delta \cdot \lambda_2 \right). \quad (46)$$

В выражении (44) погрешности излучательной способности пламени учитываются следующим образом

$$\delta_{\varepsilon} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_{\text{ср}}} ; \quad \varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} ; \quad K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_1^2 - \varepsilon_2^2}{2} ; \quad (47)$$

где $\Delta\varepsilon$ - абсолютная погрешность измерения ε .

При оценке погрешности измерения параметра $\Pi(\lambda_1, \lambda_2, T_c)$ его величину можно представить в виде :

$$\Pi(\lambda_1, \lambda_2, T_c) = \frac{h \cdot \lambda_2}{h \cdot \lambda_1} \cdot K_{\text{тм}} \cdot K_{\text{н}} \cdot K_{\text{ф}} \cdot K_{\text{о}} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{с}} \quad (48)$$

где $h\lambda_1$ и $h\lambda_2$ - ординаты осциллограмм свечения пламени;

$$\begin{aligned} K_{\text{ф}} &= \frac{K_{\lambda_1}^{\text{ф}}}{K_{\lambda_2}^{\text{ф}}} ; & K_{\text{о}} &= \frac{K_{\lambda_1}^{\text{о}}}{K_{\lambda_2}^{\text{о}}} ; \\ K_{\text{п}} &= \frac{K_{\lambda_1}^{\text{п}}}{K_{\lambda_2}^{\text{п}}} ; & K_{\text{ус}} &= \frac{m_{\lambda_1}}{m_{\lambda_2}} ; \\ K_{\text{с}} &= \frac{K_{\lambda_1}^{\text{с}}}{K_{\lambda_2}^{\text{с}}} ; \end{aligned} \quad (49)$$

где $K_{\lambda_1}^{\text{ф}}, K_{\lambda_2}^{\text{ф}}, K_{\lambda_1}^{\text{о}}, K_{\lambda_2}^{\text{о}}, K_{\lambda_1}^{\text{с}}, K_{\lambda_2}^{\text{с}}$ - спектральные коэффициенты пропускания светофильтров, кварцевых окон и световодов;

$K_{\lambda_1}^{\text{п}}, K_{\lambda_2}^{\text{п}}, m_{\lambda_1}, m_{\lambda_2}$ - коэффициенты спектральной чувствительности приемника излучения и масштабы усиления при измерении интенсивности свечения пламени на двух длинах волн I_{λ_1} и I_{λ_2} .

Спектральные характеристики светофильтров, световодов, кварцевых окон и других элементов оптической системы могут быть получены специальной тарировкой на спектрофотометрах.

Для определения коэффициентов пропускания оптических элементов системы для них были сняты спектральные характеристики на спектрофотометре "Hitachi 202".

По результатам спектроскопического анализа лако-сажевых отложений на стеклах разобщительного устройства оптической системы для K_0 получено выражение

$$K_0 = \left(K_{\lambda_2}^{\text{о}} \right)^{[(\lambda_2/\lambda_1)^{b_1} - 1]} ; \quad (50)$$

где $b_1 = 0.2185$.

Для оценки суммарной погрешности определения параметра $\Pi(\lambda_1, \lambda_2, T_c)$ воспользуемся выражением (48). Берем логарифмические производные и переходя к конечным разностям получаем

$$\delta_{\Pi} = \frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \pm(\delta h + \delta K_{\text{тм}} + \delta K_{\text{н}} + \delta K_{\text{ф}} + \delta K_{\text{о}} + \delta K_{\text{п}} + \delta K_{\text{с}}) \quad (51)$$

Средняя величина ординат осциллограмм свечения пламени h_1 и h_2 составляет 30...60 мм, абсолютная погрешность при их измерении не превышает 1 мм, следовательно, максимальная погрешность при их обработке составляет 1...2%. Использование автоматизированной системы сбора, регистрации и обработки информации позволяет снизить амплитудные

погрешности сигнала до 0.2%. Погрешность снятия основных спектральных характеристик суммарно составляет 5...12%.

Ошибки, вызванные не полным заполнением поля зрения приемника невелики. Ошибки, вызванные отражением стенок, также малы и составляют не более 10 град.

Таким образом, можно заключить, что предельные погрешности измерения температуры пламени методом спектрального отношения при использовании описанной аппаратуры не превышают 3...5 процентов и метод можно рекомендовать при проведении научных исследований.

Методика расчета мгновенных полей температур пламени и массовой концентрации частиц сажи в цилиндре дизеля

Для расчета полей температур пламени T и массовой концентрации частиц сажи C_m можно успешно использовать результаты многоканального оптического индирования дизеля. В основу методики положен метод концентрических зон О.Н.Дубровской. Для дизельных и других пламен указанный метод использовался в [9,15,28]. В отличие от упомянутых работ, излагаемая методика учитывает влияние на результаты расчетов полей температур и концентрации сажи дисперсного состава и оптических характеристик частиц сажи дизельного пламени.

Определение нестационарных полей температур пламени и концентрации сажи начинается с разбивки надпоршневого объема цилиндра m плоскими сечениями, перпендикулярными оси цилиндра и в каждом сечении выделяется n концентрических зон [рис.4.]

Для определения плоского температурного и концентрационного поля необходимо провести n_i измерений оптической плотности среды τ и интенсивности излучения пламени на двух длинах волн $I_n(\lambda_1)$ и $I_n(\lambda_2)$ в направлении каждой из n хорд. Для получения объемного поля концентрации сажи и температуры пламени описанные измерения необходимо повторить m_i раз по каждому слою. Схема расчета полей концентраций сажи и температуры пламени приведена на рис.5.

Принимаются следующие допущения :

1. Сажистое пламя целиком заполняет плоское сечение;
2. В каждой из n выбранных кольцевых зон в определенный момент времени температура T_i и массовая концентрация сажи C_{mi} постоянны. Температура пламени и концентрация сажи от одной концентрической зоны к другой имеют скачкообразные изменения, образуя ступенчатый профиль температур и концентраций;

3. Оптическая плотность среды τ_i и цветовая температура T_i^* для каждой хорды определены экспериментально;

4. Дисперсный состав частиц сажи во всех зонах одинаков и описывается известной функцией плотности распределения частиц сажи по диаметрам $N(D)$;

5. Частицы сажи имеют сферическую форму;

6. Оптические свойства углерода частиц сажи не зависят от температуры;

7. Факторы ослабления $K_{\lambda_{осл}}$ и $K_{\lambda_{погл}}$ для определенных частиц сажи не зависят от концентрации частиц сажи и рассчитываются в рамках теории мутных сред [262];

8. Оптические свойства полидисперсной поглощающей среды подчиняются объединенному закону Ламберта-Бугера-Беера :

$$\tau_i = 3 \cdot K_m \cdot C_{mi} \cdot \frac{\Delta l_i}{(2 \cdot \gamma_c \cdot D_{32})} \quad (52)$$

и выполняется правило аддитивности для оптической плотности среды при прохождении луча монохроматического света через слой длиной l , состоящий из нескольких участков Δl_i (рис.4.) с различной плотностью поглощающих частиц :

$$\tau_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \tau_i \quad (53)$$

Выражение (52) является следствием закона Ламберта-Бугера-Беера, обычная форма записи которого для монодисперсной поглощающей системы частиц имеет вид :

$$I / I_0 = \exp\left(-K_{\lambda} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot C_n \cdot l\right) / 4 \quad (54)$$

где I_0 и I - интенсивность падающего и прошедшего через поглощающий слой монохроматического света;

K_{λ} и K_m - факторы ослабления моно- и полидисперсной систем частиц сажи;

D и D_{32} - средний и средний поверхностный диаметры частиц моно- и полидисперсной систем;

C_n и C_{mi} - штучная и массовая концентрации частиц сажи;

γ_c - плотность сажистой частицы;

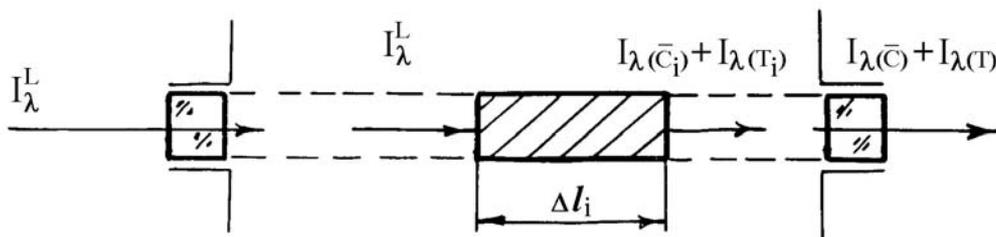


Рис.4. Перенос энергии излучения в среде дизельного пламени.

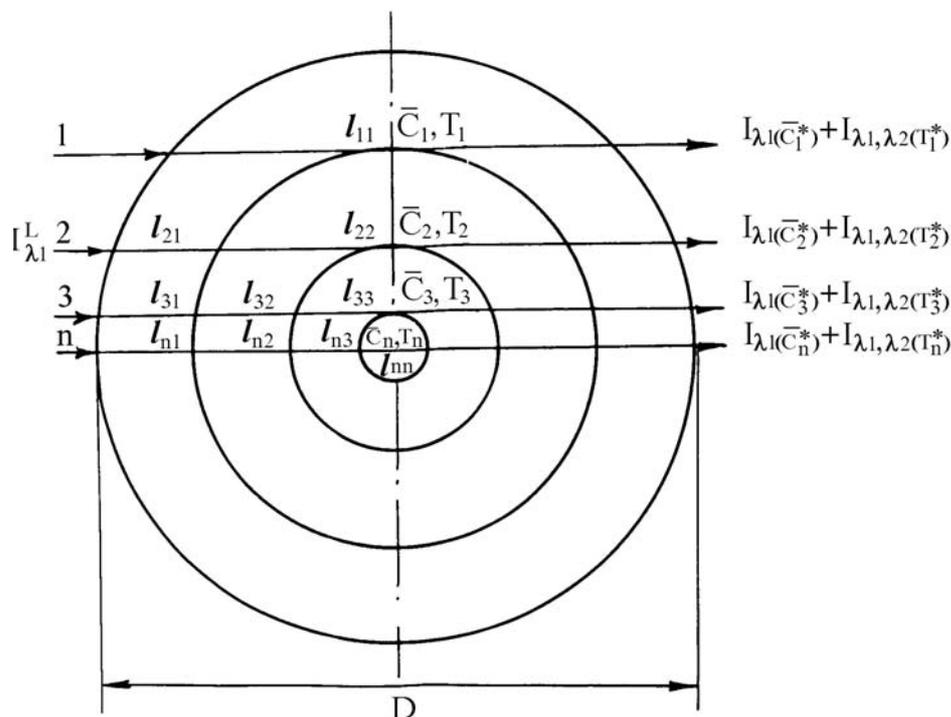


Рис. 5. Схема расчета полей концентрации и температуры.

9. Интенсивность излучения пламени подчиняется закону Кирхгофа и может быть определена через интенсивность излучения абсолютно черного тела $I_0(\lambda, T)$:

$$I(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot I_0(\lambda, T) = I_0(\lambda, T) \cdot (1 - \exp(-\beta_N \cdot l)) \quad (55)$$

Из перечисленных выше ряд допущений очевиден, по остальным можно дать комментарии и численные оценки.

Оценка точности метода концентрических зон от их числа выполнена О.Н.Дубровской. Точность приближения реального профиля температур увеличивается с ростом числа зон. Максимальные погрешности в определении температуры при $n=8..10$ лежит в интервале 10..30К. Это соизмеримо с погрешностью оптических методов определения температуры пламени.

Предположение об идентичности дисперсионного состава частиц сажи по зонам введено для упрощения модели и из-за отсутствия в литературе информации об опытных данных. Возможно, стохастический характер процесса сгорания явится определенным оправданием применения принципа равной вероятности для появления подобных частиц в различных зонах. Следует отметить, что в работах [11, 12, 48] экспериментально показано наличие сохраняющегося подобного распределения частиц сажи по размерам в различных типах диффузионных пламен. Таким образом, вопрос об идентичности функций $N(D)$ сводится к равенству определяющих размеров D_{32} в различных зонах.

Допущение о сферичности частиц сажи подтверждается данными электронномикроскопических исследований [11]. Образование цепочечных и хлопьевидных структур частиц сажи в результате процессов коагуляции и агломерации происходит вне цилиндра в выпускной системе дизеля, так как для этих процессов требуется большее время, чем время процесса сгорания.

Дискуссия о влиянии температуры на оптические константы различных углеводородов имеется в работах [41,46]. В.Стэлл и Г.Плэсс для экстраполяции опытных данных от комнатной температуры до уровня температур пламени использовали дисперсионное уравнение [46]. Однако, Х.Далзелл и А.Сарофим [41] считают, что оптические свойства углеродосодержащих веществ с изменением температуры изменяются незначительно и предсказания [46] могут привести к серьезным ошибкам. В дальнейшем автором настоящей работы использовались данные С.Ли [44] из соображений того, что комплексный показатель преломления не зависит от температуры.

В теории мутных сред факторы экстинкции $K_{\lambda,осл}$ и $K_{\lambda,погл}$ считаются зависящими от концентрации частиц сажи, если расстояние между ними l_c превышает 2..3 диаметра частицы D_c . Выполнимость этого условия легко проверить на примере, приняв $C_m=10$ г/м³ при $D_c=40$ нм, $C_n=15.7 \cdot 10^{10}$ г/см³ :

$$l_c = 3 \sqrt{\frac{1}{C_n}} = 3 \sqrt{\frac{1}{15.7 \cdot 10^{10}}} = 1850 \text{ нм} \quad (56)$$

$$\frac{l_c}{D_c} = 1850 / 40 = 46.2$$

Как видно из (2.56), расстояние между частицами сажи на 1..2 порядка превосходит их размеры, что доказывает справедливость принятия допущения 7.

Основные расчетные выражения методики определения полей концентрации частиц сажи представлены ниже. При этом использованы ранее введенные понятия относительной концентрации сажи C , приведенной к диаметру цилиндра и масштаба массовой концентрации сажи:

$$C_m = \mu_c \cdot \bar{C} = \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{2.3026 \cdot \gamma_c \cdot D_{32}}{K_m \cdot D_{\lambda}} \right] \cdot \left[\frac{D_{\lambda}}{l_{\Sigma}} \lg \left(\frac{I}{I_+ - I} \right) \right] \quad (57)$$

на основании (52) и (53) можно записать :

$$\tau_i = C_{mi} \cdot \frac{\Delta I_i}{(\mu_c \cdot D_{\lambda})}$$

$$\tau_{\Sigma} = \bar{C}_i^* \cdot \Delta l_{\Sigma} / D_{\Sigma} \quad \text{или} \quad (58)$$

$$\bar{C}^* \cdot l_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \bar{C}_i \cdot \Delta l_i \quad (59)$$

где \bar{C}^* - относительная концентрация сажи, приведенная к размеру D_{Σ} и измеренная экспериментально по величине ослабления интенсивности проходящего света I_{Σ} ;

\bar{C}_i - искомые относительные концентрации частиц сажи на участках Δl_i суммарной длины пути луча.

Применяя соотношение (59) к схеме концентрических зон [рис.5.] получаем систему алгебраических уравнений :

$$\begin{aligned} \bar{C}_1^* \cdot l_1 &= \bar{C}_1 \cdot l_{11} \\ \bar{C}_2^* \cdot l_2 &= \bar{C}_2 \cdot l_{22} + 2 \cdot \bar{C}_1 \cdot l_{21} \\ \bar{C}_3^* \cdot l_3 &= \bar{C}_3 \cdot l_{33} + 2 \cdot \bar{C}_2 \cdot l_{32} + 2 \cdot \bar{C}_1 \cdot l_{31} \\ &\dots\dots\dots \\ \bar{C}_n^* \cdot l_n &= \bar{C}_n \cdot l_{nn} + 2 \cdot \bar{C}_{n-1} \cdot l_{n(n-1)} + \dots\dots + 2 \cdot \bar{C}_1 \cdot l_{n1} \end{aligned} \quad (60)$$

из решения которой по рекуррентным соотношениям найдутся искомые концентрации \bar{C}_i :

$$\begin{aligned} \bar{C}_1 &= \bar{C}_1^* \\ \bar{C}_2 &= \left(\bar{C}_2^* \cdot l_2 - 2 \cdot \bar{C}_1 \cdot l_{21} \right) / l_{22} \\ \bar{C}_3 &= \left(\bar{C}_3^* \cdot l_3 - 2 \cdot \bar{C}_2 \cdot l_{32} - 2 \cdot \bar{C}_1 \cdot l_{31} \right) / l_{33} \end{aligned} \quad (61)$$

Для перехода от относительных концентраций сажи \bar{C}_i к массовым C_{mi} используем выражение (57).

Определенный интерес представляет разработанная методика определения температурных полей. На основании закона Кирхгофа интенсивность излучения пламени по направлению первой хорды на длине волны равна :

$$I_1(\lambda_1, T_1^*) = I_0(\lambda_1, T_1) \cdot \varepsilon(\lambda_1) = I_0(\lambda_1, T_1) \cdot (1 - \exp(-\beta_1(\lambda_1)l_{11})) \quad (62)$$

Излучение по направлению второй хорды складывается из излучения трех участков пламени, два из которых имеют температуру T_1 , а один - температуру T_2 . При этом излучение первого и второго участков пламени частично поглощается в зонах пламени, находящееся между рассматриваемым участком пламени и приемником излучения :

$$\begin{aligned} I_2(\lambda_1, T_2^*) &= I_0(\lambda_1, T_1) \cdot (1 - \exp(-\beta_1(\lambda_1)l_{21})) \cdot \exp(-\alpha_2(\lambda_1)l_{22}) \cdot \exp(-\alpha_1(\lambda_1)l_{21}) + \\ &+ I_0(\lambda_1, T_2) \cdot (1 - \exp(-\beta_2(\lambda_1)l_{22})) \cdot \exp(-\alpha_1(\lambda_1)l_{11}) + \\ &+ I_0(\lambda_1, T_1) \cdot (1 - \exp(-\beta_1(\lambda_1)l_{21})) \end{aligned} \quad (63)$$

где α_i - коэффициент ослабления света в i -ой зоне.

Аналогичным образом можно записать выражения для интенсивностей свечения пламени, принятой приемником излучения, на длинах волн λ_1 и λ_2 по направлению любой i -ой хорды $I_i(\lambda_1, T_i^*)$ и $I_i(\lambda_2, T_i^*)$. В выражениях типа (62) и (63) группируем члены, стоящие при интенсивностях излучения абсолютно черного тела $I_0(\lambda, T_i)$ и обозначим их через $A_{ij}^{(1)}$ и $A_{ij}^{(2)}$. Обозначим индексом i - номер хорды; j - номер кольцевой зоны; надстрочным индексом указывать на спектральную принадлежность интенсивности излучения, заменим интенсивности излучения абсолютно черного тела их значениями по закону Вина и применяя метод отношений спектральных интенсивностей излучения, получим для i -ой хорды :

$$\begin{aligned} \Pi_i(\lambda_1, \lambda_2, T_i^*) &= I_i(\lambda_2, T_i^*) / I_i(\lambda_1, T_i^*) = \delta_{2i}^* / \delta_{1i}^* \\ &= \left(\sum_{k=1}^{i-1} \delta_{2k} \cdot A_{ik}^{(2)} + \delta_{2i} \cdot A_{ii}^{(2)} \right) / \left(\sum_{k=1}^{i-1} \delta_{1k} \cdot A_{ik}^{(1)} + \delta_{1i} \cdot A_{ii}^{(1)} \right) \end{aligned} \quad (64)$$

где принято

$$\begin{aligned} \delta_{1i} &= \exp(-C_2 / (\lambda_1 \cdot T_i^*)); & \delta_{2i} &= \exp(-C_2 / (\lambda_2 \cdot T_i^*)); \\ \delta_{1i}^* &= \exp(-C_2 / (\lambda_1 \cdot T_i^*)); & \delta_{2i}^* &= \exp(-C_2 / (\lambda_2 \cdot T_i^*)); \end{aligned} \quad (65)$$

если положить, что

$$\Delta_i = \left(\delta_{1i}^* \sum_{k=1}^{i-1} \delta_{2k} \cdot A_{ik}^{(2)} - \delta_{2i}^* \sum_{k=1}^{i-1} \delta_{1k} \cdot A_{ik}^{(1)} \right) \cdot \delta_{1i}^* \quad (66)$$

то из (2.64) получим систему уравнений :

$$A_{ii}^{(1)} \cdot \delta_{2i}^* \cdot \delta_{1i} - A_{ii}^{(2)} \cdot \delta_{1i}^* \cdot \delta_{2i} = \Delta_i, \quad i=2 \dots n, \quad (67)$$

Искомые температуры T_j , которые входят в состав параметров δ_{1j} и δ_{2j} , находим последовательным решением уравнений системы (67), причем, очевидно, для первой хорды $T_1 = T_1^*$.

Значения спектральных коэффициентов ослабления $\alpha_i(\lambda)$ и поглощения $\beta_i(\lambda)$ лучей монохроматического света полидисперсной системой частиц сажи вычисляются по выражениям:

$$\begin{aligned} \alpha_i(\lambda) &= (3 \cdot K_m^{'''}(\lambda) \cdot C_{mi}) / (D_{32} \cdot \gamma_c \cdot 2) \\ \beta_i(\lambda) &= (3 \cdot K_m^{'''}(\lambda) \cdot C_{mi}) / (D_{32} \cdot \gamma_c \cdot 2) \end{aligned} \quad (68)$$

где C_{mi} - массовая концентрация сажи в кольцевых зонах, вычисленная по выражениям (2.57) и (2.61).

Для расчета факторов ослабления $K_m^{'''}(\lambda)$ и поглощения $K_m^{'''}(\lambda)$ полидисперсной среды рекомендуется использовать следующие аппроксимационные зависимости :

$$K_m^{'''}(\rho) = \sum_{i=1}^3 b_i \cdot a_i \cdot \rho^i; \quad K_m^{'''}(\rho) = \sum_{i=1}^3 b_i \cdot -_i \cdot \rho^i \quad (69)$$

где $\rho = \pi \cdot D_{32} / \lambda$ - параметр дифракции;

a_i, c_i - коэффициенты аппроксимации спектральных факторов ослабления и поглощения света.

По данным, приведенным в табл.18 [13] видно, что оптические характеристики полидисперсных систем частиц сажи существенно зависят от спектральной области измерений и размера частиц сажи. Для частиц большого размера становится заметным влияние рассеяния света на величину поглощательной способности газосажевого объема пламени.

Указанные особенности оптических свойств полидисперсных систем частиц сажи вносят существенную поправку на "серость" излучения при расчете полей температур пламен.

Таким образом, на основе вышеизложенного материала представляется возможным произвести расчет мгновенных полей температур пламени и массовой концентрации частиц сажи в цилиндре дизеля по результатам многоканального оптического зондирования. Данный метод позволяет производить целенаправленный поиск мероприятий, как направленных на снижение дымности и токсичности отработавших газов, так и для оценки моторных свойств различных альтернативных топлив.

Реализация данной методики было сделано в виде программы обработки результатов оптического индицирования для расчета текущих температур пламени и концентрации сажи. Данная программа предусматривала следующие функции :

- считывание с гибкой дискеты экспериментальных массивов следующих данных : ординаты излучения пламени, суммарного значения лазер+пламя и лазер в режиме прокрутки;
- задание необходимых постоянных коэффициентов и их определение;
- расчет текущих значений по углу поворота коленчатого вала значений температуры и концентрации сажи;
- вывод на дисплей результатов расчета в табличной и графической формах;
- печать на принтере таблиц и графиков с результатами расчета;
- сглаживание полученных значений результатов расчета.

Оценка погрешностей измерения мощностных и экономических параметров производилась по методике, изложенной в работе [14]. Погрешности измерений параметров режима двигателя складывались из систематической и случайной составляющих. Систематическая составляющая погрешности измерений определялась на основе методик [18, 22, 23, 24, 29, 39, 40], паспортных данных и результатов поверки используемых приборов приведены в таблице 1.

Измерения, фиксируемые прямыми измерениями с помощью приборов (частота вращения, эффективный крутящий момент, время расхода порции топлива и др.), с целью уменьшения случайной ошибки неоднократно дублировались для каждого режима.

Таблица 1. Погрешности экспериментальных данных

№	Измеряемый параметр	Относит. погрешность%
1.	Удельный индикаторный расход дизельного или альтернативного топлива	0.92
2.	Часовой расход топлива	0.25
3.	Удельный эффективный расход топлива	0.7
4.	Расход воздуха	1.2
5.	Частота вращения	0.2
6.	Крутящий момент по весовой головке	0.25
7.	Эффективная мощность	0.45
8.	Мощность механических потерь	0.67
9.	Индикаторная мощность	0.56
10.	Температура отработавших газов	1.0
11.	Температура охлаждающей воды	1.0
12.	Температура масла	1.0
13.	Дымность отработавших газов	1.0
14.	Содержание NO _x в ОГ	8.0
15.	Содержание СН в ОГ	5.0
16.	Содержание СО в ОГ	5.0

Необходимое число измерений на каждом режиме для достижения заданной точности определялось из основных сведений по теории вероятности и случайных ошибок.

Теоретическое исследование и численные оценки основных составляющих методической погрешности оптического индицирования показали следующее [7, 27]:

- относительная погрешность, вызванная отклонением от "серого" характера излучения, составляет 2-5%;
- относительная погрешность вследствие немонохроматичности системы не превышает 0,5%.

Выводы и обсуждение

Данная экспериментальная установка и использованная методика обработки данных, позволили произвести многоканальное оптическое зондирование внутрицилиндрового объема с целью уточнения особенностей сгорания при использовании альтернативных топлив.

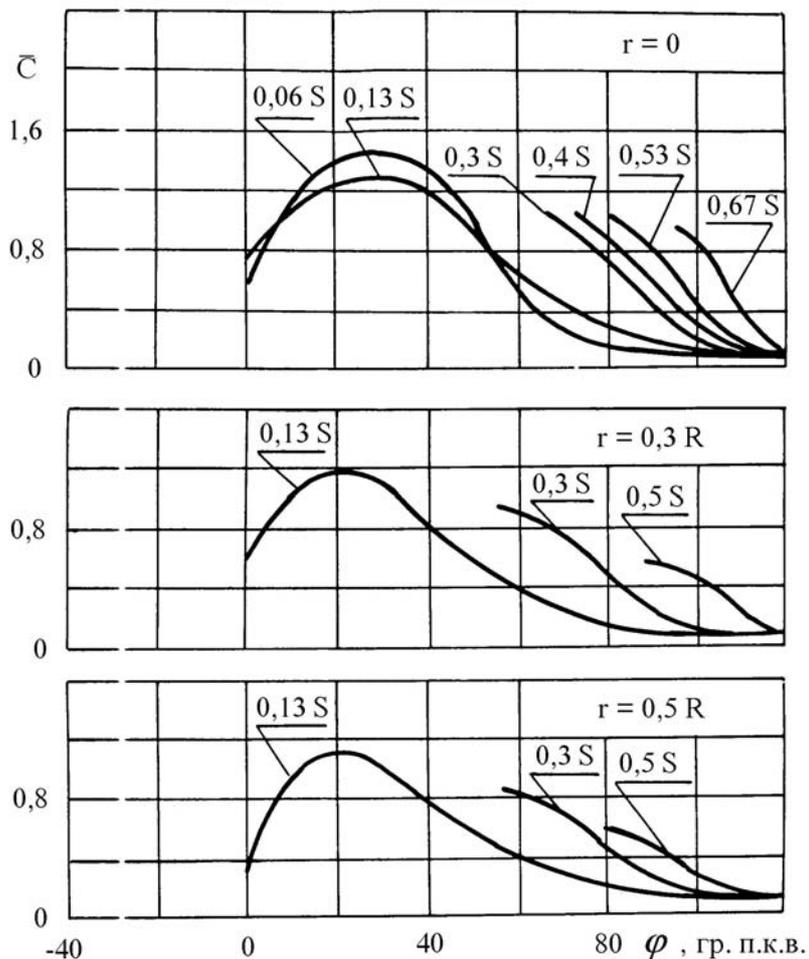


Рис.6. Концентрация сажи в цилиндре дизеля.

Результаты исследования распределения концентрации сажи \bar{C} в объеме сгорания при $n=1750 \text{ мин}^{-1}$ и $P_1=0.74 \text{ МПа}$ в дизеле ВТЗ на стандартном дизельном топливе представлены на рис.6.

Кривые изменения указанных оптических характеристик пламени для зондирующих каналов, расположенных по образующей цилиндра начинаются с момента начала регистрации, зависящего от положения поршня.

Для температуры пламени изменение по углу поворота коленчатого вала φ незначительно. Оно заключается в снижении уровня температуры относительно максимального в момент начала регистрации. Для концентрации сажи (рис.6) типичны кривые с максимальной концентрацией \bar{C} в момент начала регистрации и с последующим интенсивным снижением и выравниванием к моменту начала открытия выпускного клапана.

По условиям эксперимента начальные точки кривых изменения концентраций показывают их значение непосредственно в камере сгорания.

Результаты обработки эксперимента, подтвердили предположения о значительной неравномерности распределения характеристик сажистого пламени в объеме цилиндра: по

температуре пламени - 600-700 К, по концентрации сажи - в 10-15 раз, по концентрации окислов азота в 80-120 раз, по тепловому потоку в 1,2-1,5 раза. Установлено, что основная масса окиси азота образуется в зонах, прилегающих к продольной оси цилиндра в период от начала сгорания до 50-60° п.к.в. Зона наиболее интенсивной радиационной теплоотдачи первоначально локализуется на периферии цилиндра, а затем перемещается в камеру сгорания и прилегающие зоны и фиксируется вплоть до момента выхлопа в соответствии с наблюдаемыми двумя локализованными зонами горения. Одна связана со сгоранием топлива в объеме верхнего пояса цилиндра, вторая - со сгоранием топлива в камере и близлежащих объемах, перемещающихся с поршнем. Конечно, еще рано делать глобальные теоретические обобщения. Необходимо накопление статистического материала, и для этих целей можно использовать предложенный апробированный расчетно-экспериментальный метод.

Применение автоматизированной системы регистрации информации при проведении эксперимента, оснащенной пакетом программ, позволило существенно снизить трудоемкость обработки экспериментальных данных при одновременном повышении точности.

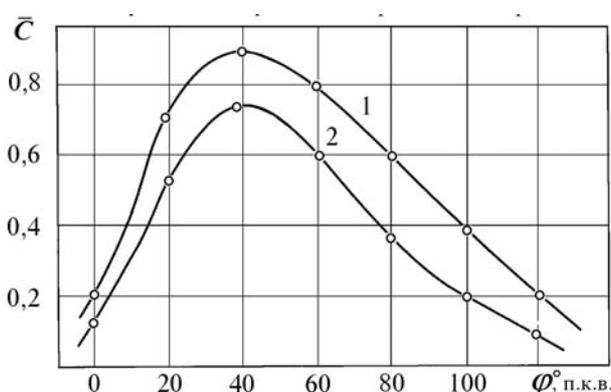


Рис. 7. Изменение относительной концентрации сажи в цилиндре дизеля: 1 – без присадки H_2 ; 2 – с присадкой H_2 , $m_{H_2}=0,1\%$.

Преимущества лазерного метода диагностики процесса сгорания особенно хорошо видны при измерении относительных концентраций сажи при сравнении работы двигателя на различных видах топлива или при исследовании влияния различных присадок. Например, на рис. 7 показано изменение относительной концентрации сажи в цилиндре дизеля при исследовании влияния добавки водорода к дизельному топливу. С помощью данного метода было обнаружено, что при использовании аммиака в качестве добавки показатели рабочего процесса улучшаются, значительно снижаются выбросы NO_x и сажи в составе отработавших газов. Насыщение топлива аммиаком можно рекомендовать как одно из эффективных мероприятий по снижению вредных выбросов дизелями. Следует, однако, иметь в виду, что вместе с насыщением топлива аммиаком, необходимо изменять и регулировки топливоподачи, так как продолжительность впрыска уменьшается при уменьшении количества растворенного аммиака, а $\theta_{оп.впр.}$ - угол опережения начала подачи при увеличении количества растворенного NH_3 уменьшается.

Еще одна уникальная характеристика, получаемая с помощью лазерного метода - поля концентрации сажи в камере сгорания (рис. 8). Результаты измерений показывают, что наиболее высокий уровень концентрации сажи в этом типе камеры сгорания наблюдается в центре камеры сгорания при положении поршня, близком к ВМТ. Для верхнего пояса цилиндра, в котором по условию эксперимента измерительные каналы не перекрываются кромкой поршня с момента начала видимого сгорания имеет место появление высокотемпературной излучающей зоны, последующий рост температуры до максимального значения, а затем некоторое снижение до исчезновения излучающего пламени. Кривые концентрации сажистых частиц характеризуются первоначальным ростом концентрации \bar{C} с момента начала регистрации (несколько позже момента начала видимого сгорания), достижением максимума и по-

следующим интенсивным снижением, вследствие выгорания сажи. Характер кривых, а также значения температур T и концентраций \bar{C} типичны для процесса сгорания в дизелях.

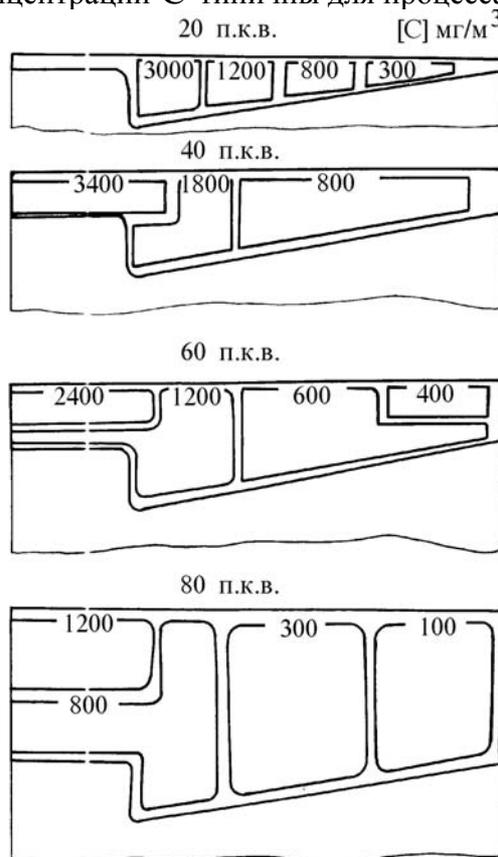


Рис. 8. Поля концентрации сажи в призматической камере сгорания.

Создание автоматизированной системы лазерного индицирования двигателя с пакетом прикладных программ по обработке индикаторной диаграммы и характеристик топливоподачи позволило решить задачи исследования при сокращении затрат времени на обработку экспериментальных данных и повышении точности. Уникальная установка по измерению пространственных полей распределения температур и концентрации сажи позволила - эффективный инструмент по изучению внутрицилиндровых процессов с целью поиска наиболее действенных путей по улучшению экономических и экологических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагнер В.А., Гладышев А.В., Матиевский Д.Д. Экспериментальные исследования температурно-концентрационных полей в цилиндре дизеля // Двигателестроение.- 1990.- №7.- С. 31-33.
2. Рабочие процессы ДВС: Учебное пособие /Под ред. В.А. Вагнера, Н.А. Иващенко, Д.Д. Матиевского.- АлтГТУ им. И.И. Ползунова.- Барнаул, 1995.-185с.
3. Абросимов А.А., Попов С.А., Голубев Ю.А. Создание экологически чистых автомобильных топлив - важный фактор оздоровления больших городов // Химия и технология топлив и масел.-1990.- №4.-с.2.
4. Бакиров Ф.Г., Катанов Р.С., Полещук И.З. О механизме сажеобразования и нагарообразования при горении углеводородных топлив в камерах сгорания двигателей.- В кн.: Элементы теории рабочих процессов ДВС.-Уфа,1976,вып.1,с.31-36.
5. Баранов Н.А. Разработка методов и проведения экспериментальных исследований на двигателе условий образования и физических свойств дизельной сажи.- Дис. канд. техн. наук / ЦНИДИ.-Л., 1981.- 142с.
6. Баранов Н.А., Смайлис В.И. Исследование высокотемпературной сублимации и дисперсного состава дизельной сажи.- Труды ЦНИДИ. Экспериментальное и теоретическое исследование по созданию новых дизелей и агрегатов.- Л.: 1980, с.82-89.

7. Батурин С.А. Исследование тепловыделения, сажеобразования и излучения в цилиндре дизеля с использованием оптического квантового генератора.: Дисс. канд. техн. наук.- Л., 1972,- 243с.
8. Батурин С.А., Лебедев О.Н. Исследование процессов сажевыделения и тепловыделения в судовом дизеле при работе на эмульсированном топливе// Тр.Новосиб. ин-та водного транспорта, Новосибирск.-1975.-Вып.100.-с.38-40.
9. Батурин С.А. Физические основы и математическое моделирование процессов результирующего сажевыделения и теплового излучения в дизелях. Дисс.докт.техн.наук.-Л. - 1982.
- 10.Белинский Л.М. Теплоизлучение в камерах сгорания быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия// Труды НИЛД.-М.: Машгиз, 1956.- №1.- С. 83-113.
- 11.Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках.- М.: Энергия, 1967.- 326с.
- 12.Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов.- Л.: Энергоиздат, 1984.- 240с.
- 13.Вагнер В.А., Новоселов А.Л., Лоскутов А.С. Снижение дымности дизелей. / Алт.краевое правление Союза НИО СССР.-Барнаул: Б.И., 1991.- 140с.
- 14.Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных.- М.: Колос, 1967.- 156 с.
- 15.Гладышев А.В. Разработка экспериментального метода исследования мгновенных полей температуры и концентрации сажи в цилиндре дизеля: Дисс.канд. техн. наук / АлтПИ им. И.И.Ползунова.- Барнаул, 1990.- 180 с.
- 16.Гейдон А.Г., Вольфгарт Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура.-М.: Metallurgizdat, 1959.- 333 с.
- 17.Дьяченко Н.Х., Батурин С.А., Ложкин В.Н. Метод высокотемпературной пирометрии пламени в дизеле.- Л., НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 4-77-14,1977.
- 18.Ефремов И.Ф. Исследование механических потерь тракторного дизеля.- Дисс. канд. техн. наук.- Барнаул, 1977.- 199 с.
- 19.Зейдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений.- Л.: Наука, 1968.- 118 с.
- 20.Зейдель А.Н. Погрешности измерений физических величин.- Л.: Наука, 1985.- 112 с.
- 21.Кадышев А.Е. Измерение температуры пламени: Физические основы и методы.-М.: Metallurgizdat, 1961.- 218 с.
- 22.Кац С.М. Электрические динамометры для измерения вращающегося момента.-М.: Госэнергоиздат, 1962.- 140 с.
- 23.Костин А.К., Матиевский Д.Д., Толстов В.Т. Связь индикаторного КПД с интегральными и дифференциальными характеристиками подвода тепла.- Энергомашиностроение, 1978, №6.
- 24.Кузнецов Д.С. Специальные функции / Изд.2-е,перераб.и доп. - М.: Высшая школа, 1965.- 424 с.
- 25.Лазурко В.П., Кудрявцев В.А. Программа обработки индикаторной диаграммы на алгоритмическом языке Базисный Фортран.// Труды ЦНИДИ.-1975, вып. 68, с. 46-54.
- 26.Лерман Е.А. Снижение токсичности и вредных выбросов легких быстроходных дизелей: Автореф. канд. дисс./ ЦНИДИ- Л., 1985.- 22 с.
- 27.Ложкин В.Н. Исследование динамики и термических условий сажеобразования при сгорании распыленного топлива в цилиндре дизелей: Дисс. канд. техн. наук.- Л., 1978.- 228 с.
- 28.Лоскутов А.С. Исследование механизмов образования топливных окислов азота и сажи в цилиндре дизеля: Дисс. канд. техн. наук.- Л., 1982.- 298 с.
- 29.Матиевский Д.Д., Гладышев А.В. Уточненный метод расчета индикаторной диаграммы. Методич. указания для студентов специальности 15.01 ЦИПС/ Алт. политехн. ин-т.-Барнаул, 1990, 23 с.
- 30.Матиевский Д.Д. Разработка и использование методологии анализа индикаторного КПД для снижения расхода традиционного топлива, дымности и токсичности тракторных дизелей.- Дисс. докт. техн. наук.- Барнаул, 1987, 449 с.
- 31.Махов В.З. К вопросу о методике определения содержания сажи в цилиндре дизеля// Изв. ВУЗов.-Машиностроение.-1969.- № 8.-с. 8-10.
- 32.Матиевский Д.Д., Дудкин В.И., Батурин С.А. Участие сажи в рабочем цикле дизеля и индикаторный КПД // Двигателестроение, 1983, №3, с. 54-56.
- 33.Махов В.З., Терентьев В.А. Оптический метод определения локального сажесодержания в камере сгорания дизеля// Токсичность двигателей внутреннего сгорания.- М., ВЗМИ, 1977.- с. 66-77.
- 34.Методика оптического индицирования.- Л.: ЛПИ, 1980, 46 с.
- 35.Милликен Р.К. Размеры, оптические свойства и температура сажи// Измерение температур в объектах новой техники.- М.: Мир, 1965.- 280 с.

- 36.Новоселов А.Л. Эксплуатационные свойства дизельных топлив с антидымными присадками. // Повышение эффект. работы с.-х. машин и тракторов.- Новосибирск, 1982.- с. 94-118.
- 37.Свет Д.Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения.- М.: Наука, 1982.- 296 с.
- 38.Смайлис В.И. Теоретические и экспериментальные основы создания малотоксичных дизелей: Автореф. дисс. докт. техн. наук.- Л.: ЛНИ.- 1988.- 46 с.
- 39.Фомичев Б.Е. Исследование динамики тепловыделения транспортных дизелей, форсированных средним наддувом.- Дисс. канд. техн. наук, Барнаул,- 1974.
- 40.Хроматограф лабораторный ЛХМ-8МД (1-5 модели) Техническое описание и инструкция по эксплуатации.- Нальчик, завод "Севкавэлектроприбор", 1973.- 27 с.
- 41.Dalzell H.W., Sarofim A.F. Optical constants of soot and their applications to head flux calculations // Trans. ASME/ Ser.C./ Journ.of Heat Transfer, 1969, vol. 91, №1, p. 100-104.
- 42.Fujiwara J.at al.Formation of Soot Particulates in the Combustion Chamber of a Precombustion Chamber Type Diesel Engine// SAE Paa. 840417, 1984. pp. 1-10.
- 43.Kontani K., Gotoh S. Measurement of soot in a diesel combustion highspeed shadowgraphy/ SAE Techn. Pap. Ser.- 1983.-№ 831291.- p. 31-43.
- 44.Lee S.C., Tien C.L. Proc. 18th Int. Symposion. Combustion Inst., 1981, № 1159, p. 22-28.
- 45.Mie G. Beitrage zur Optik Truber Medien speziell Kolloideler Metallosungen. Ann.Phys., 25, 377-445. 1908.
- 46.Stull V.R., Plass G.N. Emmisivity of dispesed carbon particies.-Journ.of the Optical Society of America, 1960, vol. 50, №2, p. 65-71.
- 47.Untersuchungen zur Stickoxidmindderung an schnellau-fenden Grossdieselmotoren/ Kruggel Otto// MTZ: Motor-techn. Z.- 1988.- 9, №1, -22-29.
- 48.Varma A.K. Fishburne C. dup.Dongedson. Aspects of turbulrnt combustion, In: Turbul. Combust. Techn. pop.- New-York, 1978. p.p. 117-140.
- 49.Vodik pro benzinove motory. Automobil. CSSR, 1977, t. 6.
- 50.Wiesener K. Wasserstoff als Energietrager fur Fahrzeuge.-Dis.Technik, 1977, v. 32, Nr. 2, p. 74-78.