

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ

В.В. Бразовский, В.В. Евстигнеев, Г.М. Кашкаров, Н.П. Тубалов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

E-mail: altaikompozit@mail.ru

Разработан метод голографической регистрации конденсированной фазы в отработанных газах дизельного двигателя. Особенностью метода является использование для регистрации голограммы скоростной цифровой камеры с прямым вводом в ПЭВМ и непосредственной компьютерной обработкой получаемых результатов. Исследованы процессы очистки в трехступенчатом каталитическом нейтрализаторе. Проведены измерения характеристик дисперсного состава отработанных газов дизельного двигателя КамАЗ-740 на различных режимах работы и измерение дисперсного состава в процессе очистки.

Ключевые слова:

Голография, фильтрация отработанных газов, лазерное излучение, гистограмма распределения частиц по диаметрам.

Введение

Снижение вредных выбросов поршневыми двигателями внутреннего сгорания представляет собой многогранную и порой противоречивую проблему, решение которой связано с совершенствованием рабочих процессов, систем технического обслуживания, развитием нейтрализации отработанных газов. В состав атмосферы из общего объема выбросов всеми источниками до 40 % токсичных веществ по массе поступает из выхлопных труб поршневых двигателей внутреннего сгорания, в том числе до 34 % выбросов окиси углерода (CO), до 64 % окислов азота (NO_x) и до 30 % твердых частиц, в том числе сажи [1].

Для исследования процесса нейтрализации необходимо определение параметров дисперсного состава отработанных газов. Образование как углеродных, так и, сложной структуры микрочастиц в пламени, представляет в общем случае процесс конденсации. Как неравновесный термодинамический процесс он определяется большим числом параметров и, по-видимому, различными ветвями развития. Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные по дисперсному составу в различных процессах оказываются противоречивыми, описание кинетики образования углеродных микрочастиц нельзя считать завершенным.

Объектом настоящего исследования является процесс фильтрации отработанных газов в двигателях внутреннего сгорания, поэтому мы выделим некоторые работы, имеющие непосредственное отношение к теме настоящего исследования. Это, прежде всего, обзор [1] и монография [2] и др., где можно найти подробные ссылки на современные исследования в данной области. Сразу обратим внимание на полярно противоположные утверждения авторов данных исследований. В работе [1] указывается, что средний размер частиц в выхлопных газах дизельного двигателя колеблется в пределах 0,2...0,3 мкм и слабо зависит от режима работы и типа исследуемого двигателя. В работе [2] приведены распределения твердых частиц в выхлопных газах в зависимости от режима работы двига-

теля и отмечено, что размеры частиц меняются в пределах 1...14 мкм.

Столь разные результаты не могут быть отнесены к погрешностям измерений и нет причины сомневаться в корректности проведения экспериментов различными исследователями. Дело в том, что классический процесс конденсации начинается с флуктуаций плотности газового объема [3] с последующим ростом образовавшихся микрочастиц. Поэтому, строго говоря, в распределении частиц по размерам должны присутствовать частицы от молекулярных до макроскопических размеров. Размер микрочастиц определяется конкретными экспериментальными условиями, а универсальной причины ограничения роста частиц просто не существует. В то же время универсального метода измерений размеров частиц, который обеспечивал бы статистическую репрезентативность выборки в столь широком диапазоне их размеров, не может существовать в принципе. Существующие методы измерений ориентированы, как правило, на определенные практические задачи и сравнение полученных с их помощью результатов допустимо только в рамках одного метода и при измерении одним и тем же прибором.

Поскольку экспериментальные исследования связаны с неопределенностью условий (температура, давление, концентрация углерода) и влиянием активных примесей, экспериментаторы идут по пути создания конкретных, заранее определенных условий, приводящих к образованию микро- и наночастиц [4]. При этом отмечается, что возможности численного моделирования роста углеродных наночастиц ограничены неопределенностью структуры и термодинамических свойств малых кластеров углерода.

К настоящему времени состав продуктов сгорания углеводородных топлив, насчитывающий более 1200 компонентов, изучен достаточно подробно [5]. Дизельная сажа не является чистым углеродом и содержит водород, кислород, летучие, зольные, коксовые соединения. Удельная поверхность сажи значительна и может достигать 300 м²/г. В

отработанных газах сажа находится в виде образований неправильной формы с линейными размерами, зависящими от режима эксплуатации дизеля. Дизельная сажа склонна к образованию конгломератов, содержащих от сотен до тысяч частиц, отличающихся значительной прочностью.

При исследовании газодинамических характеристик течения газов в объемах и полостях применяется целый ряд оптических методов: лазерная анемометрия, теневые фотографии и скоростная кино- и видеосъемка, диагностирование распределения пламени по объемам, методы лазерного оптического индирования процессов [6–8]. Для исследования качественных характеристик дисперсного состава аэрозоля выхлопных газов используют два основных метода: дифракционный, основанный на теории Ми [9], и сбор частиц с последующим измерением с помощью электронного микроскопа [2]. Большими перспективами обладает голографический метод. Голографический метод регистрации волновых полей позволяет записать и хранить полную информацию об исследуемом объекте, в частности, информацию о размерах и пространственном расположении аэрозольных частиц. Для регистрации голограммы быстро движущихся частиц [9] обычно применяется импульсный рубиновый лазер с длительностью импульса порядка 10^{-8} с. Апостериорное изучение описанного динамического объекта производится путем визуального наблюдения восстановленного, с помощью непрерывно действующего газового лазера, изображения объекта в микроскоп, обладающий малой глубиной резкости. Это дает возможность наблюдать отдельные слои исследуемого объекта.

Метод цифровой голографии

Попытки регистрации микрочастиц с помощью голографии наталкиваются на специфические трудности. Для наблюдения частиц микронных размеров оптический микроскоп становится бесполезным, и такой метод исследования обладает существенными недостатками, главный из которых — отсутствие какой-либо автоматизации обработки данных эксперимента. Кроме этого, на восстановленном изображении присутствуют шумы, создаваемые частицами объемного ансамбля, находящимися вне плоскости фокусировки микроскопа.

Детальный анализ ансамблей частиц, компенсация погрешностей и фильтрация шумов могут быть выполнены при восстановлении изображения объекта по голограмме на ПЭВМ с применением методов цифровой голографии [10], но перенос информации со светочувствительного материала требует ввода в ПЭВМ матрицы размером 1000×1000 чисел, что оказывается нереальным, необходим непосредственный ввод информации в ПЭВМ. Другая проблема — малая интенсивность рассеянного микрочастицами лазерного излучения. В результате интенсивности предметного и опорного пучков различаются на порядки, и визуально или с помощью при-

бора выделить интерференционную картину от исследуемых частиц крайне затруднительно. Восстановление изображения с такой голограммы дает дифракцию Френеля опорного пучка на прямоугольном отверстии, на фоне которой обнаружить исследуемые частицы чрезвычайно сложно.

Для исследования движения аэрозольных частиц в выхлопных газах через элементы каталитического нейтрализатора наиболее целесообразно использовать осевую схему записи голограммы (рис. 1). В отличие от случая малоуглового рассеяния для записи голограммы желательно использовать широкоапертурный пространственно когерентный лазерный луч [10, 11].

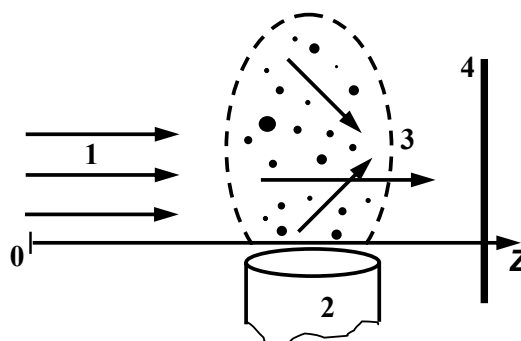


Рис. 1. Осевая схема записи голограммы микрочастиц

Голограмма образуется на регистрирующем материале — 4 как результат интерференции опорного пучка — 1 и предметного излучения — 3, выходящего из трубки-подвода — 2 отработанных газов (рассеянного частицами лазерного излучения).

Пусть лазерное излучение — 1 распространяется вдоль оси OZ . Будем считать его плоской монохроматической волной единичной интенсивности. Поле рассеянной аэрозольными частицами волны — 3 описывается функцией $U(x, y, z)$. Тогда в плоскости — 4 будет зарегистрирована интенсивность:

$$I_p(x, y) = |1 + U(x, y, z)|^2.$$

Цифровое восстановление основано на использовании приближения Кирхгофа — задачи о дифракции. Интеграл Френеля-Кирхгофа устанавливает связь между распределениями комплексной амплитуды света в плоскости объекта (или голограммы) и в плоскости, удаленной на некоторое расстояние в направлении распространения волн.

Если размеры голограммы и объекта малы по сравнению с расстоянием между ними r , то справедливо параксиальное приближение Френеля, которое позволяет находить комплексную амплитуду в предметной области:

$$P_0(x_0, y_0, z) = \frac{g_0}{\lambda z} \iint \sqrt{I(x, y)} g \times \\ \times \exp \left[-\frac{2\pi}{\lambda z} (x_0 x + y_0 y) \right] dx dy.$$

$$\text{Здесь } g \equiv \exp \left[\frac{i\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2) \right].$$

Основной особенностью использованного нами метода [12] является прямая регистрация голограммы на цифровую матрицу скоростной камеры VS-СТТ-285-2001. Размер пикселя 6,45 мкм и габариты матрицы 8,8×6,6 мм. Регистрируемые данные вводятся непосредственно в персональную электронно-вычислительную машину (ПЭВМ) и, обрабатываются специальной программой, т. е. используется числовая голография в чистом виде, без использования промежуточных носителей, что исключает искажения, вносимые нелинейным характером регистрирующих материалов.

Видимость интерференционной картины, которой является голограмма, определяется отношением интенсивности рассеянного частицами излучения и интенсивности опорного пучка. В рамках осевой схемы регистрации голограммы невозможно ослабить опорный пучок относительно предметного, т. к. эти пучки принципиально неотделимы друг от друга. При подборе оптимальных условий регистрации дифракционная эффективность от всех частиц очень мала. В результате на восстановленной картине можно заметить отдельные частицы, но автоматизировать процесс обработки невозможно.

Нами было предложено и реализовано следующее решение данной проблемы. На матрицу сначала записывается излучение лазера без исследуемых частиц, затем излучение, прошедшее через аэрозоль. Голограмма выдается в виде bmp-файла размером 1360×1024 точек, т. е. получают две картины в виде bmp-файлов. Вторая картина вычитается из первой, кроме того, из зарегистрированной картины вычитается постоянная засветка матрицы, которую техническими средствами устранить не удавалось. После этого производится нормировка файла таким образом, чтобы минимальное и максимальное значения уровней сигналов было в пределах «0–255». В результате этих операций остается нормированная голографическая картина с единичной видимостью, которая далее является исходной для восстановления изображения в предметной области.

Описанная разностная процедура позволяет исключить любые технические погрешности, связанные с неравномерностью освещения, неизбежные интерференционные явления и т. п. явления, не связанные с исследуемым объектом, поскольку любые аддитивные погрешности для двух снимков будут одинаковыми и исчезнут в результате вычитания. Мультипликативные погрешности, в силу особенностей восстановления изображения, отделены от искомого изображения пространственно, что позволяет не принимать их во внимание.

Переходя от непрерывных к дискретным величинам, получаем цифровую модель для обработки экспериментальных данных. Интервал дискретизации в плоскости голограммы задается характеристиками регистрирующего материала. Интервал дискретизации в предметной области определяется

размерами микрочастиц и ограничен длиной волны используемого лазерного излучения. В нашем случае использовался гелий-неоновый лазер; шаг дискретизации в предметной области был выбран равным 0,5 мкм.

Экспериментальная установка

Для проведения исследований использована экспериментальная установка на базе дизельного двигателя: «КамАЗ-740». Стенд устроен следующий образом: на фундаменте с помощью пружин установлена подмоторная рама с опорами для крепления двигателя. Двигатель соединен муфтой с балансирной машиной, установленной на подмоторной раме. В выпускной коллектор вмонтирован трехступенчатый каталитический нейтрализатор. Номинальная частота вращения 2600 мин⁻¹, полная мощность 160 кВт, удельный расход топлива 224,4 г/кВт·ч (рис. 2).

На рис. 2 обозначены: 1) выпускной патрубок; 2) кожух; 3) термоизоляция; 4) корпус реактора; 5) восстановительный элемент; 6) перегородка; 7) окислительный элемент; 8) перегородка; 9) выпускной патрубок; 10) сажевый пористый элемент; 11) крышка; 12) свеча накаливания; 13) газовый клапан; 14–17) зонды из полостей нейтрализатора; 18) кран переключения зондов; 19) гибкий подвод отработанных газов к установке; 20) лазер ЛГ-72; 21) коллиматор; 22) диафрагма; 23) трубка-подвод отработанных газов; 24) скоростная видеокамера VS-СТТ-285-2001; 25) крепежная станина.

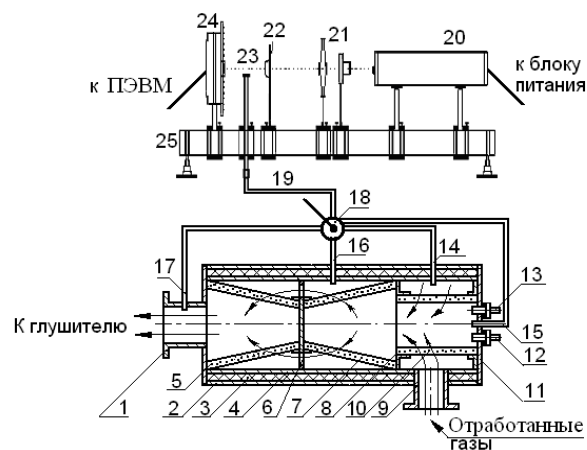


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Излучение лазера проходит через коллиматор – 21, диафрагму – 22, через область отработанных газов – 23 и попадает на матрицу скоростной камеры – 24. Коллиматор состоит из двух линз и служит для увеличения диаметра лазерного луча, что необходимо для полной засветки камеры матрицы. Диафрагма служит для обрезки луча по размеру матрицы.

Через зонды – 14–17, вмонтированные в каждую полость каталитического нейтрализатора, отработанные газы через многопозиционный кран – 18 по гибкому подводу – 19 через трубку-подвод

— 23 поступают к предметной области голографической установки, выполненной по осевой схеме регистрации.

Центр предметной области выбран на расстоянии 5 см от матрицы. Считываемые значения поступают непосредственно в ПЭВМ, которая выдает информацию о размерах твердых частиц в отработанных газах.

Многопозиционный кран — 18 позволяет производить отбор исследуемого газа поочередно до, и после прохождения одного из фильтрующих элементов, для определения изменения дисперсного состава отработанных газов в процессе очистки.

Регистрация голограммы осуществлялась на цифровую матрицу скоростной камеры VS-СТТ-285-2001 без использования, каких-либо дополнительных оптических элементов.

Результаты экспериментов

Исследования были проведены с использованием регистрации голограммы на матрицу скоростной цифровой камеры и специальных программных методов обработки полученных голограмм.

Как мы уже указывали, восстановление картины с хорошим разрешением требует значительных затрат машинного времени на одно сечение в предметной области. Поэтому численный анализ полученных картин осуществляется поисковым алгоритмом по выборке отдельных зарегистрированных частиц. Поиск частицы методом Монте-Карло и дальнейшее определение ее параметров осуществляется гораздо быстрее и обеспечивает необходимую репрезентативность выборки.

Исследованы качественные характеристики аэрозоля выхлопных газов конкретного дизельного двигателя при прохождении через элементы каталитического нейтрализатора и предложена характеристика, по нашему мнению снимающая проблему неучтенных малых частиц, — распределение массы частиц по размерам.

Измерения проводились на различных режимах работы двигателя. На рисунках приведены гистограммы результатов распределений числа частиц по диаметрам для номинального режима работы дизеля (рис. 3) и распределений массы (объема) частиц по диаметрам (рис. 4).

Распределения частиц по диаметрам (рис. 3) показывают, что после прохождения отработанными газами первого и второго элементов трехступенчатого каталитического нейтрализатора в основном отфильтровываются частицы больше 5 мкм. На выходе каталитического нейтрализатора число частиц диаметрами от 2,5 мкм снижается с 80 до 47 %. Масса (объем) частиц после прохождения трехступенчатого каталитического нейтрализатора снижается значительно и среднее значение объема частиц на выходе не превышает 50...80 мкм³ для всего диапазона диаметров частиц (рис. 4).

Обсуждение и выводы

К настоящему времени состав продуктов сгорания углеводородных топлив, насчитывающий более 1200 компонентов, изучен достаточно подробно. Дизели выбрасывают в окружающую среду с отработанными газами значительное количество твердых частиц сажи, являющиеся абсорбентом для полициклических ароматических углеводоро-

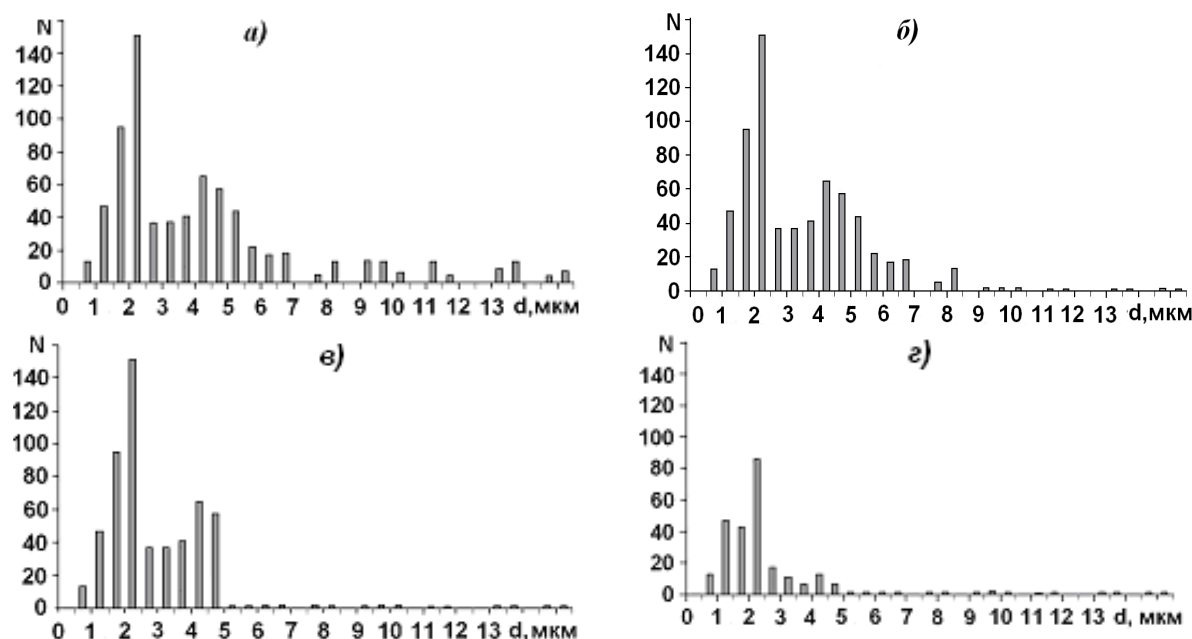


Рис. 3. Гистограмма распределения числа частиц по диаметрам: а) до каталитического нейтрализатора (КН); б) после прохождения первого элемента трехступенчатого КН; в) после прохождения второго элемента трехступенчатого КН; г) после прохождения трехступенчатого КН

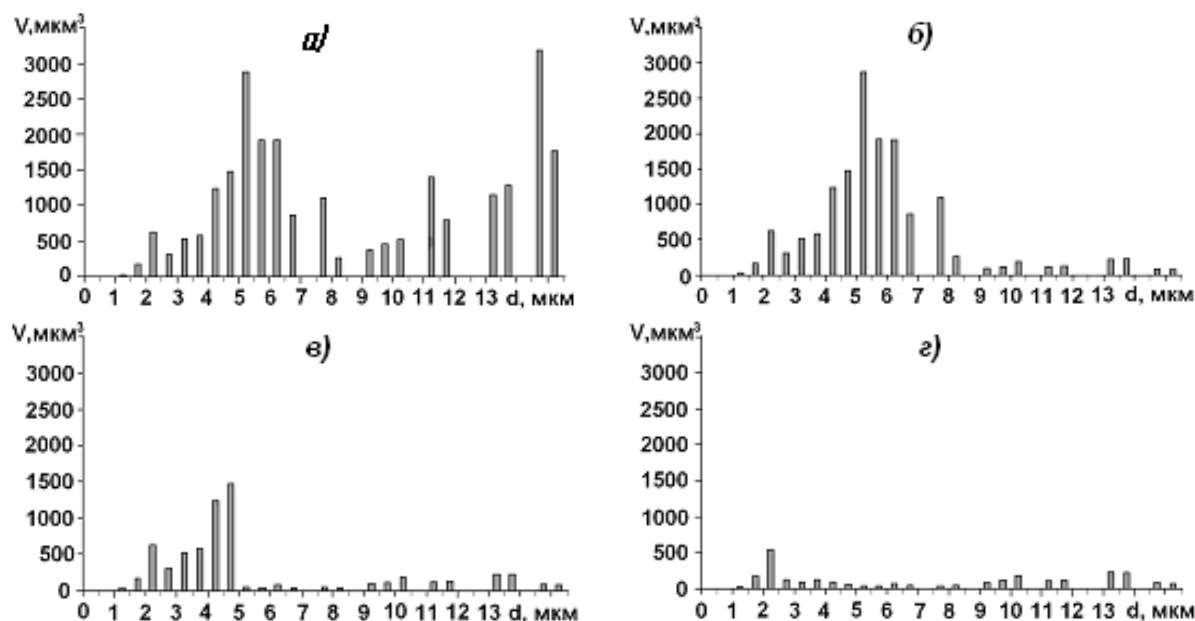


Рис. 4. Гистограмма распределения массы (объема) частиц по диаметрам: а) до КН; б) после прохождения первого элемента трехступенчатого КН; в) после прохождения второго элемента трехступенчатого КН; г) после прохождения трехступенчатого КН

дов, часть из которых обладает канцерогенными свойствами. Твердые частицы при сгорании углеводородных топлив имеют различную дисперсность. Дисперсность частиц существенно зависит от условий и режимов сжигания топлив и скорости охлаждения продуктов сгорания.

Дизельная сажа не является чистым углеродом и содержит водород, кислород, летучие, зольные, коксовые соединения. Удельная поверхность сажи значительна и может достигать $300 \text{ м}^2/\text{г}$. В отработанных газах сажа находится в виде образований неправильной формы с линейными размерами от 0,3 до 100 мкм, зависящими от режима эксплуатации дизеля. Дизельная сажа склонна к образованию конгломератов, содержащих от сотен до тысяч частиц, отличающихся значительной прочностью.

Форма частиц несет информацию о процессе формирования частиц, и этот процесс оказывается весьма нетривиальным. При горении углеводородного топлива в камере сгорания в оптимальном режиме создается избыток углерода. С термодинамической точки зрения газ углерода в буферном газе горячей смеси может рассматриваться как переохлажденный газ, поскольку температура в камере сгорания имеет значение около 3000°C , а температура фазового перехода газ-жидкость для углерода при атмосферном давлении составляет 3500°C . В неравновесных условиях переохлажденного газа возникают флуктуации плотности, приводящие к образованию зародышей конденсированной фазы. По данным обзора [1] размеры образующихся зародышей лежат в пределах 0,1...0,3 мкм.

Далее образовавшиеся зародыши попадают в выпускной канал двигателя и в каталитический нейтрализатор, затем в выхлопную трубу. Размер

частиц в начале процесса очистки определяются двумя основными параметрами — начальной концентрацией и скоростью охлаждения газоконденсатной смеси. Основным сценарием роста частиц является агломерация, в то время как эффект формирования кластеров методом присоединения отдельных атомов является незначительным.

Понижение скорости охлаждения приводит к задержке кристаллизации частиц, что в свою очередь, ведет к формированию частиц большего размера. Снижение начальной плотности газа атомов, с другой стороны, уменьшает частоту столкновений между частицами, а это понижает размер первичных частиц, задерживая агломерацию.

Проходя через фильтрующие элементы каталитического нейтрализатора, дисперсный состав отработанных газов изменяется. Часть твердых частиц задерживается в фильтрующих элементах. Изменение дисперсного состава частиц, прошедших через один элемент, напрямую зависит от извилистости и размера пор фильтрующего материала.

По результатам исследований можно в полной мере судить об эффективности процесса очистки трехступенчатого каталитического нейтрализатора. Действительно, в фильтрующих элементах остается значительное количество твердых частиц, вносящих существенный массовый вклад в отработанные газы, выходящие из выхлопной трубы, но данный каталитический нейтрализатор практически не задерживает частицы, средний диаметр которых менее 2,5 мкм. Хотя существенного массового вклада такие частицы не вносят, но при большом их количестве они обладают значительной суммарной площадью поверхности и представляют собой большую экологическую опасность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мансуров З.А. Сажеобразование в процессах горения // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41. — № 6. — С. 137–156.
2. Новоселов А.Л., Пролубников В.И., Тубалов Н.П. Совершенствование очистки отработавших газов дизелей на основе СВС-материалов. — Новосибирск: Наука, 2002. — 96 с.
3. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика. — М.: Наука, 1982. — 608 с.
4. Гуренцов Е.В., Еремин А.В., Шульц К. Лазерно-индуцированный рост кластеров в газовой среде // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2005. — Т. 3. — С. 1–15.
5. Ахмедов Р.Б., Цирюльников Л.М. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив. — Л.: Недра, 1994. — 238 с.
6. Баранов Н.А., Смайлис В.И. Исследование высокотемпературной сублимации и дисперсного состава дизельной сажи // Экспериментальные и теоретич. исслед. по созданию новых диз. и агрег.: Труды ЦНИДИ. — Л., 1980. — С. 83–89.
7. Вихерт М.И., Кратко А.П., Рафалькес И.С. и др. Влияние типа рабочего процесса и режимов работы быстроходных дизелей на свойства сажи и отработавших газов // Автомобильная промышленность. — 1975. — № 10. — С. 8–11.
8. Арапов В.В., Вагнер В.А., Грехов Л.В. Рабочие процессы дизелей / Под ред. В.А. Вагнера, Н.А. Иващенко, Д.Д. Матиевского. — Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1995. — 183 с.
9. Стаселько Д.И. Особенности голографической регистрации быстротекущих процессов при использовании импульсного лазера на рубине // Оптическая голография / Под ред. Д.И. Стаселько. — Л.: Наука, 1975. — С. 4–70.
10. Стаселько Д.И., Косниковский В.А. Голографическая регистрация пространственных ансамблей быстро движущихся частиц // Оптика и спектроскопия. — 1973. — Т. 34, Вып. 2. — С. 365–374.
11. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. — М.: Мир, 1973. — 126 с.
12. Бразовский В.В., Вагнер В.А., Евстигнеев В.В., Еськов А.В., Пролубников В.И., Тубалов Н.П. Голографический метод исследования дисперсного состава аэрозоля // Горизонты образования. — 2006. — Вып. 8. — С. 1–9.

Поступила после переработки 06.10.2008 г.

УДК 628.93.000.25

ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ТРАДИЦИОННОМ ОПИСАНИИ СВЕТОВОГО ПОЛЯ ДВУХМЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

В.Д. Никитин, К.П. Пашник

Томский политехнический университет
E-mail: ksyshenka@sibmail.com

Оценивается погрешность, если световое поле двухмерного излучателя с косинусно-степенной индикатрисой (элемента) $I_\alpha = I_0 \cos^m \alpha$ описывать формулами Higbie либо их графическими или иными аналогами, предназначенными для косинусных двухмерных излучателей. Рассматриваются параллельное, перпендикулярное и наклонное положения двухмерного излучателя относительно расчетной поверхности. Исследуются составляющие погрешности, возникающей при стандартном подходе к описанию светового поля двухмерного излучателя с $m > 1$.

Ключевые слова:

Двухмерный излучатель, расчетная плоскость, компоненты светового вектора, диффузный (ламбертов) излучатель, косинусно-степенной излучатель, погрешности расчета.

Введение

Традиционно световое поле (СП) двухмерного излучателя (ДИ) описывается с помощью формул Higbie (практически широко используются графические интерпретации), предназначенных для косинусных излучателей. Это обуславливает погрешность в оценке освещенности от неламбертовых ($m \neq 1$) ДИ.

В работе ставятся задачи:

- получить аналитическое описание поля ДИ с косинусно-степенным светораспределением как основу для изучения погрешности;
- оценить компоненты погрешности, возникающей при описании СП ДИ по традиционной методике.

В работе рассматриваются параллельное ($\parallel$), перпендикулярное ($\perp$) и наклонное (ξ) положения ДИ относительно расчетной плоскости (РП).

1. Параллельное положение

1.1. Для расчета освещенности в поле ДИ широко используются номограммы Е.С. Ратнера [1]. Будучи графическими аналогами формул Higbie (—Lewin), эти номограммы и материалы А.А. Гершуна, А.М. Данилюка, Р. Моон'а [2], Л.Я. Шинделя [3] и др. справедливы только при диффузных (синонимы: косинусные $I_\alpha = I_0 \cos \alpha$, равномерные $L_\alpha = \text{const}$, ламбертовы, где I_α — сила света; I_0 — осевое значение силы света; α — угол с осью; L_α — яркость) ДИ. Если индикатриса излучения (элемента) ДИ отличается от косинусной ($I_\alpha = I_0(m) \cos^m \alpha$ при $m \neq 1$), использование