

ДИСПЕРСНЫЙ СОСТАВ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ В ДВС

Бразовский В.В. *e-mail*: wtu@agtu.secna.ru

Алтайский государственный технический университет, 656038, г. Барнаул, Россия,

Аннотация. Разработан метод голографической регистрации конденсированной фазы в отработавших газах дизельного двигателя. Особенностью метода является использование для регистрации голограммы скоростной цифровой камеры с прямым вводом в ЭВМ и непосредственной компьютерной обработкой получаемых результатов. Проведены измерения характеристик дисперсного состава отработавших газов дизельного двигателя КамАЗ-740 на различных режимах работы последнего. Получены распределения сажистых частиц по размерам, построены изображения отдельных частиц. Обсуждается механизм формирования сажистых частиц как продукта горения углеводородного топлива в дизельном двигателе.

Введение

Сажеобразование – важный и постоянно изучаемый аспект горения, имеющий существенное практическое значение как положительное,- получение активного наполнителя резины и компонента печатных красок, так и отрицательное,- загрязнение окружающей среды выбросами промышленных энергетических установок и дизельными двигателями автомобилей. С одной стороны, сажа – промышленный продукт, который производится в мировом масштабе в количестве 10^7 т в год. Черная сажа используется в качестве наполнителя для эластомеров (2/3 всей сажи идет на производство шин), широко применяется в копировальных аппаратах и лазерных принтерах. С другой стороны, серьезные проблемы с выбросом сажи возникают в промышленных энергетических установках; дизельные двигатели примерно 10÷20% введенного топлива сначала превращают в сажу [1].

Ежегодный рост техногенного воздействия промышленности и транспорта на окружающую среду приводит к необратимым изменением значений ее параметров от ранее существовавших, что все чаще приводит к экологическим кризисам и катастрофам на локальном уровне (фотохимический смог, кислотные осадки, загрязнения водоемов) и в глобальном масштабе (образование парникового эффекта, разрушение озонового слоя). Эмиссия сажи от дизельных двигателей составляет значительную часть аэрозоля в атмосфере даже при хороших условиях работы и зависит от параметров работы двигателя. Содержание сажи в аэрозолях в некоторых районах Германии достигает 20% [2].

Обеспечение экологического благополучия связано с выполнением конкретных научно-технических программ и решений. Снижение вредных выбросов автотранспорта связано с созданием фильтрующих материалов, оптимизацией процессов сгорания, применением альтернативных топлив и т. д. Для этого необходимо полное представление о выбросах, особенно точная диагностика быстропротекающих процессов, дающая возможность вести целенаправленную работу по созданию высокоэффективных технических решений [3, 4]. Дисперсный состав сажи также неизбежно будет определять свойства эластомеров при их производстве.

Для понимания сложных процессов сажеобразования нужны адекватные модели, для тестирования которых требуются измерения ряда параметров, в частности пространственного распределения образующихся частиц и их распределения по размерам. При этом важно, чтобы данные параметры измерялись невозмущающими методами. Для этих целей лучше всего подходят лазерные диагностические методы, обладающие высокой пространственной и временной разрешающей способностью.

Настоящая работа посвящена разработке метода голографической регистрации конденсированной фазы в отработавших газах дизельного двигателя и исследованию дисперсного состава отработавших газов на различных режимах работы дизеля. Особенностью метода является использование для регистрации голограммы скоростной цифровой камеры с прямым вводом в ЭВМ и непосредственной компьютерной обработкой получаемых результатов.

Исходные положения.

Поскольку спектр выбросов отработанных газов дизельного двигателя очень широк и зависит как от режима работы двигателя, так и от состава топлива и присадок к нему, методы исследования качественного и количественного состава выбросов чрезвычайно разнообразны и существенно различаются не только для разных типов выбросов, но и в пределах одного типа. Наилучшие результаты в настоящее время достигаются одновременным использованием нескольких различных методов, дополняющих друг друга. Например, для измерения распределения аэрозольных частиц по размерам промышленно выпускаются анализаторы размеров частиц серии LS. Приборы изготовлены на базе твердотельного лазера с длиной волны 750 нм и производят анализ образцов в водных и органических средах или в сухом виде. Время анализа: 15 - 90 секунд, область распределения измеряемых размеров частиц от 0,04 мкм до 2000 мкм. Результаты рассчитываются из данных дифракции с использованием теории Фраунгофера и теории Ми и представляются в виде распределения частиц по объему.

Столь высокие показатели прибора достигаются за счет использования стационарной схемы измерения и, соответственно, значительного времени работы с объектом для проведения анализа. Рабочие процессы в двигателях внутреннего сгорания, образование сажевых частиц в рабочей камере и выброс последних с отработанными газами в атмосферу относятся к быстропротекающим процессам. Очевидно, подобные приборы высокой точности не могут быть использованы для этой цели, как из-за высокой скорости протекающих процессов, так и по технологическим причинам, наиболее существенными из которых являются чрезвычайно большие градиенты давления, турбулентные потоки с содержанием твердых частиц и, как результат, выход из строя рабочих поверхностей оптических элементов.

Наиболее трудоемким является сбор и прямое измерение твердых частиц с помощью электронного микроскопа (рис.1 [1]). Заметим, что при этом выделяется не вся конденсированная фаза в отработанных газах двигателя, а специально для данного случая вводится термин «твердые частицы». К тому же нет никакой гарантии того, что все исследуемые частицы попали в поле зрения, т.е. нет гарантии, что все частицы уловлены и доставлены к окуляру микроскопа. Это сразу ставит под сомнение репрезентативность используемой статистической выборки.

Оптические методы обычно строятся на измерении следующих характеристик:

1. Прозрачность.

2. Степень поляризации рассеянного света.

3. Индикатриса рассеяния.

4. Дифракционная картина.

5. Голографическая картина.

В зависимости от диапазона размеров частиц применимы различные методы исследования дисперсности.

При использовании практически любых оптических методов возникает проблема малых частиц. Во-первых, когда размер частицы становится равен или меньше длины волны регистрирующего лазерного излучения, то такой измерительный инструмент теряет смысл, к тому же отсутствует достаточно полное исследование подобной физической задачи. Во вторых, задача рассеяния одним из существенных параметров имеет материал регистрируемой частицы, а автомобильные аэрозоли не подготовлены заранее и не сделаны из одного и того же материала, причем с известными оптическими свойствами. В-третьих, обратная задача

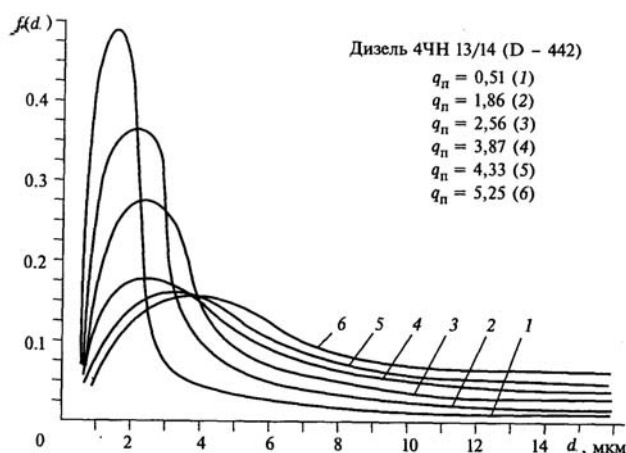


Рис. 1. Распределения твердых частиц в составе отработавших газов дизелей размерности 13/14 с объемно-племночным смесеобразованием по средним диаметрам в зависимости от тепловой напряженности.

рассеяния относится к некорректным задачам, она приводит к отрицательным значениям функции распределения в области малых диаметров частиц.

Кроме того, возникает проблема репрезентативности выборки, которая ставит под сомнение полученный результат – заведомо не имея полного набора частиц нельзя провести начальную статистическую операцию - невозможно нормировать распределение. Значит нельзя получить и всех остальных статистических характеристик, они существенным образом будут зависеть от уровня обрезания, определяемого данным регистрирующим прибором.

Голографический метод регистрации волновых полей позволяет записать и хранить полную информацию об исследуемом объекте, в частности, информацию о размерах и пространственном расположении аэрозольных частиц. Наиболее полную и точную информацию о геометрических и кинематических параметрах аэрозоля, отнесенную к некоторому моменту времени, для грубодисперсного аэрозоля дает импульсная голографическая методика, суть которой заключается в записи волнового фронта зондирующей волны, прошедшей через исследуемый объект (в нашем случае аэрозоль отработанных газов дизеля) или рассеянный этим объектом. Преимущества голографического метода по сравнению с обычными методами фоторегистрации оптического изображения заключается в возможности восстановить записанный волновой фронт и исследовать его различными методами, в том числе выполнить стереометрические измерения в восстановленном трехмерном изображении. Для регистрации голограммы быстро движущихся частиц [5] обычно применяется импульсный рубиновый лазер с длительностью импульса порядка 10^{-8} с. Апостериорное изучение описанного динамического объекта в настоящее время производится путем визуального наблюдения восстановленного с помощью непрерывного газового лазера изображения объекта в микроскоп, обладающий малой глубиной резкости. Это дает возможность наблюдать отдельные слои исследуемого объекта. 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 ЭВМ с применением методов цифровой голографии [6]. Постановка задачи компьютерной голографии известна с прошлого века, но представляется сомнительной реальность данной задачи для регистрации микрочастиц по техническим причинам, ввиду объема вводимых данных и размеров необходимых для этой цели массивов. Действительно, как указано в работе [6], для получения приемлемых результатов с помощью микроскопа должна быть измерена и введена в ЭВМ матрица, описывающая голограмму, размером не менее 1000×1000 значений, что вручную сделать нереально. Размер объектного поля не менее 1×1 см². Если нам необходимо наблюдать частицы с размерами $1 \div 30$ мкм с помощью лазерного излучения с длиной волны 0,6 мкм, то шаг дискретизации должен быть выбран около 0,5 мкм. Таким образом, одно плоское сечение предметного поля описывается матрицей 20000×20000 значений, т.е. необходим массив $4 \cdot 10^8$ чисел. Для вычисления одного значения интеграл Френеля считается по исходному массиву более 10^6 чисел. Простая оценка показывает, что на современных вычислительных машинах расчет только одного сечения в предметной области требует абсолютно нереальных затрат чистого машинного времени.

Выбор схемы записи голограммы определяется исследуемым объектом. В перспективе используемый метод должен быть применим для исследования процессов внутри камеры дизельного двигателя. Это означает, прежде всего, что аппаратура должна работать в условиях сильнейшей вибрации. Данное условие лишает смысла применение разработанных за многие годы исследований в данном направлении сложных оптических схем с точной настройкой.

Минимальным количеством оптических элементов, т.е. вообще не имеющая каких-либо оптических элементов, обладает осевая схема записи голограммы, представленная на рисунке 2. Основной проблемой использования данной схемы для регистрации микрочастиц является следующая. Видность интерференционной картины, которой является голограмма, определяется отношениями интенсивности рассеянного частицами излучения и интенсивности опорного пучка. В рамках осевой схемы регистрации невозможно ослабить опорный пучок относительно предметного,

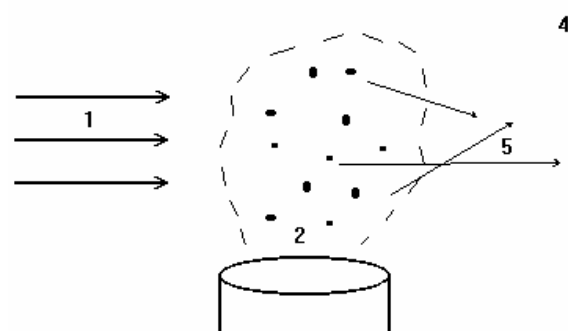


Рис. 2. Осевая схема записи голограммы микрочастиц. Голограмма образуется на регистрирующем материале 4 как результат интерференции опорного пучка 1 и предметного излучения 5 (рассеянного частицами лазерного излучения).

т.к. они принципиально неотделимы друг от друга. В результате видность голографической картины от всех частиц не превышает 0,2 при подборе оптимальных условий регистрации. В результате на восстановленной картине в предметной области основную по яркости картину дает дифракция Френеля на прямоугольном отверстии, роль которого выполняет голограмма. На этом фоне можно заметить отдельные частицы, но проводить какие-либо измерения практически невозможно. Кроме этого, на восстановленном изображении присутствуют шумы, создаваемые частицами объемного ансамбля, находящимися вне плоскости фокусировки микроскопа.

Цифровое восстановление основано на использовании приближения Кирхгофа задачи о дифракции. Интеграл Френеля-Кирхгофа устанавливает связь между распределениями комплексной амплитуды света в плоскости голограммы и в предметной плоскости, удаленной на некоторое расстояние в направлении распространения волн (рис. 3). Подробное исследование возможностей восстановления изображения по подобным структурам, созданным когерентным излучением, проведено в работе [7]. Если размеры голограммы и объекта малы по сравнению с расстоянием между ними, то справедливо парааксиальное приближение Френеля, которое позволяет находить комплексную амплитуду в предметной области:

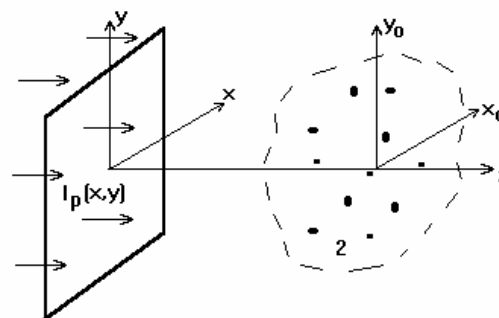


Рис. 3. Схема восстановления действительного изображения ансамбля микрочастиц.

$$P_0(x_0, y_0, z) = \frac{c}{z} \iint \sqrt{I_p(x, y)} \times \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z} \left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2\right]\right\} dx dy. \quad (1)$$

Здесь c – нормировочная константа. Остальные обозначения приведены на рис. 3.

Интенсивность в области изображения пропорциональна квадрату модуля комплексной амплитуды.

Переходя от непрерывных величин к дискретным можно получить 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. При использовании гелий-неонового лазера и шаг дискретизации в предметной области удобно выбрать равным 0,5 мкм.

Восстановленное на ЭВМ изображение сечения ансамбля микрочастиц необходимо обработать с целью классификации аэрозольных частиц по размерам и определения их координат. Полученные данные могут в дальнейшем использоваться для расчета, например, плотностей распределения частиц в различных точках исследуемого объема.

Сказанное вовсе не означает, что все известные результаты исследований ошибочны. Во все нет. Поскольку в ранних исследованиях ставилась техническая задача с практически целями, то соответствующие распределения рассматриваются и определяются только в рамках данного конкретного метода измерения и в рамках конкретной используемой аппаратуры и не претендуют ни на какую физическую общность полученных результатов.

Рассмотрим исследование автомобильного аэрозоля не как частную техническую задачу, а как физическое явление, о котором мы хотим получить полное представление безотносительно к его конкретному применению. Такой подход позволит дать полный анализ физического явления, способов и методов его регистрации, а в дальнейшем развить теорию формирования данного явления и получить методы селективного воздействия, устраняющие нежелательные эффекты, т.е. изменяющие объект исследования.

Физически общий результат можно получить в будущем сопоставлением распределений, полученных различными методами с детальным анализом репрезентативности выборки, даваемой каждым из методов. В настоящее время ни один метод регистрации не может быть принят в качестве универсального. В физике в последнее время есть тенденция получения пар дополняющих друг друга методов, позволяющих получить более полную информацию об исследуемом объекте. Поиск таких пар является самостоятельной задачей и может быть проведен при наличии достаточно большого числа результатов, полученных различными методами регистрации.

В настоящей работе проводится исследование автомобильного аэрозоля голографическим методом, ранее для данных целей не применявшимся и модифицированным нами для данных технических условий. Полученные результаты мы рассматриваем и обсуждаем в совокупности с результатами исследований, проведенных другими авторами.

Особенности использованного метода регистрации

Основной особенностью нашего метода [8] является прямая регистрация голограммы на цифровую матрицу скоростной камеры VS-СТТ-285-2001. Размер пиксела 6,45 мкм и габариты матрицы 8,8x6,6 мм (рис. 4, стекло закрывает матрицу от попадания аэрозоля, белая трубка слева – сопло генератора аэрозоля). Регистрируемые данные вводятся непосредственно в ЭВМ и обрабатывается специальной программой, т.е. нами используется числовая голография в чистом виде, без использования промежуточных носителей, что исключает искажения, вносимые нелинейным характером регистрирующих материалов.

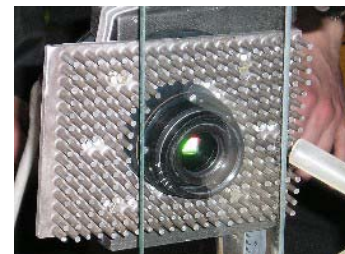


Рис. 4. Скоростная камера VS-СТТ-285-2001.

Простая оценка показывает, что с точки зрения «обычной» голографии в области малых частиц, т.е. частиц с размерами, близкими к длине волны используемого лазерного излучения $\lambda=0,6328$ мкм возникают серьезные проблемы, т.е. имеет место та же самая «проблема малых частиц», общая для практически всех оптических методов. Для расстояния от матрицы до предметной области порядка 5 см критерий Рэлея разделения двух наблюдаемых точек, по сути, не позволяет разрешать частицы, если между ними менее 2 мкм. Тем не менее, заметим, что это именно оценка, а не строгое физическое ограничение, следовательно, в определенных конкретных ситуациях данную проблему можно «обойти».

Нами было предложено и реализовано следующее решение перечисленных проблем [8]. На матрицу сначала регистрируется излучение лазера без исследуемых частиц, затем излучение, прошедшее через аэрозоль. Голограмма выдается в виде BMP-файла размером 1360x1024 точек, т.е. мы получаем две картины в виде BMP-файлов. Вторая картина вычитается из первой, кроме того, из зарегистрированной картины вычитается постоянная засветка матрицы, которой техническими средствами устранить не удавалось. После этого производится нормировка файла таким образом, чтобы минимальное число файла было равно «0», максимальное – «255». В результате этих операций остается чистая нормированная гологра-

фическая картина с единичной видностью, 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., 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.

Численный анализ полученных картин осуществляется поисковыми алгоритмами по выборке отдельных зарегистрированных частиц. Сущность алгоритма заключается в следующем. На основе предварительного расчета с учетом нормировки исходного массива (обработанной голограммы), устанавливается значение интенсивности в предметной области, превышение которого принимается за частицу. Данную операцию в литературе часто называют бинаризацией [6]. С помощью датчика случайных чисел выбирается точка в предметной области и находится значение интенсивности в выбранной точке. Если значение интенсивности удовлетворяет условию «частица», то выполняются смещения от исходной точки в различных направлениях с вычислениями интенсивности в этих точках и проверкой условия «частица». В результате находятся размеры «частицы» по различным направлениям и вычисляется среднее значение, которое выдается в качестве среднего диаметра «частицы». В качестве направлений в расчете выбирались горизонтальное, вертикальное и два направления под углами 45° .

В соответствии с соотношениями, связанными с разрешающей способностью голограммы, измерение диаметров частиц с размерами, превышающими $4\div 5$ мкм, вопросов не вызывает. Во всех без исключения методах, связанных с применением оптического излучения проблематичным является измерение диаметров малых частиц. Остановимся более подробно на решении данной проблемы в нашем случае.

Если плотность частиц будет больше допускаемой критерием Релея, то данным методом пользоваться в принципе невозможно, поскольку соседние частицы не будут разрешены. Более того, при высоких плотностях конденсированных частиц будет нарушено условие однократности рассеяния, и данный метод опять-таки будет неприменим. Но невозможность разрешить близко расположенные частицы не означает невозможности измерения диаметров малых частиц при низкой плотности последних. В нашем случае мы имеем дело с конденсированной фазой в отработанных газах, для которых обнаружение двух частиц с расстоянием между ними менее 5 мкм маловероятно, поэтому такую возможность можно не рассматривать.

При соответствующей практическим условиям низкой плотности конденсированных частиц в предметной области с помощью датчика случайных чисел мы всегда попадаем на отдельную частицу (случай непопадания алгоритмом отбрасывается). Возможные варианты «числовых профилей частиц в предметной области», а нас интересует именно

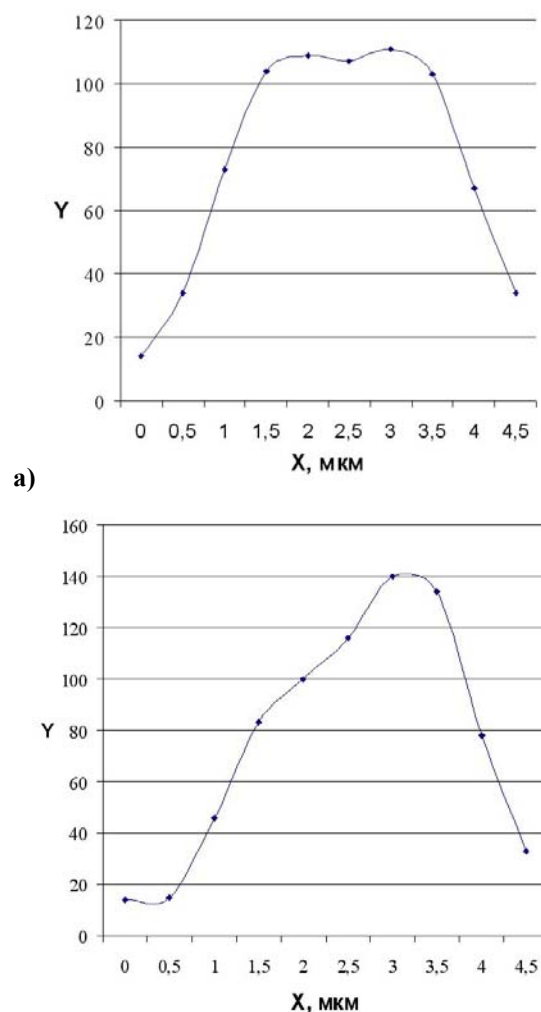


Рис. 5. Примеры числовых профилей частиц по выбранному направлению (иллюстрация к выбору уровня бинаризации).

«проблема малых частиц», по выбранному направлению приведены на рисунках 5 а) и б). Для удобства рассчитанные значения на рисунках соединены сплошной линией и проведены горизонтальные линии, символизирующие возможные уровни бинаризации. Очевидно, в области частиц малых размеров измеренное значение будет существенно определяться уровнем бинаризации. Предварительная нормировка голограммы делает возможным выбора уровня бинаризации одинаковым для разных частиц и разных голограмм.

Наличие в отработанных газах дизельного двигателя большого числа различных веществ с совершенно разными оптическими свойствами лишает нас возможности воспользоваться некоторым набором образцовых микрочастиц с известными диаметрами, поскольку в области малых размеров различие оптических свойств образцовых и исследуемых частиц может привести к неконтролируемым систематическим ошибкам и невозможности гарантировать достоверность полученного результата.

Для гарантии достоверности необходимо иметь в качестве образцового тот же самый аэрозоль. С этой целью возьмем результаты измерений других исследователей, полученные с помощью электронного микроскопа. Мы указывали ранее, что результаты сбора частиц с последующим измерением электронным микроскопом не гарантируют репрезентативность выборки. Но эти измерения вполне могут быть использованы для определения такой величины, как наиболее вероятное значение диаметра частицы. Наиболее вероятные значения диаметра частицы при различных методах измерения должны совпадать.

Результаты измерений диаметров частиц, полученных в работе [1], дают в ненагруженных режимах работы дизельного двигателя наиболее вероятные значения 1,5 – 2 мкм. Подберем такое значение уровня бинаризации, чтобы режимы холостого хода давали такие же значения наиболее вероятного значения диаметра конденсированных частиц. Далее во всех измерениях будем пользоваться полученным значением уровня.

Результаты исследования конденсированной фазы двигателя КамАЗ-740

Замечательной возможностью голографии является возможность получения объемного изображения исследуемого объекта и изучения его пространственной структуры. До наших экспериментов измерения твердых частиц в аэрозоле отработанных газов с учетом формы последних проводились только с помощью электронного микроскопа. Но, во-первых, электронный микроскоп не дает объемного изображения, во-вторых, это не частицы в газе, а собранные на некоторую подложку частицы, в-третьих, есть основания полагать, что это не все первоначально имевшиеся в аэрозоле частицы.

Нами разработана программа, позволяющая по полученной голограмме (предварительно обработанной и нормированной) выбирать отдельную частицу, строить ее объемное изображение и показывать на экране в режиме анимации. Примеры изображения двух частиц в различных ракурсах (произвольных, из удобства наблюдения), полученных с помощью указанной программы, приведены на рисунке 6.

Как нетрудно видеть из приведенного рисунка, частицы аэрозоля отработанных газов дизельного двигателя нельзя даже отдаленно считать шарообразными. Мы используем для характеристики исследуемых частиц традиционно применяемое выражение «диаметр» частицы (средний диаметр, среднемассовый диаметр). В действительности данная величина диаметром, строго говоря, не является, поскольку частицы

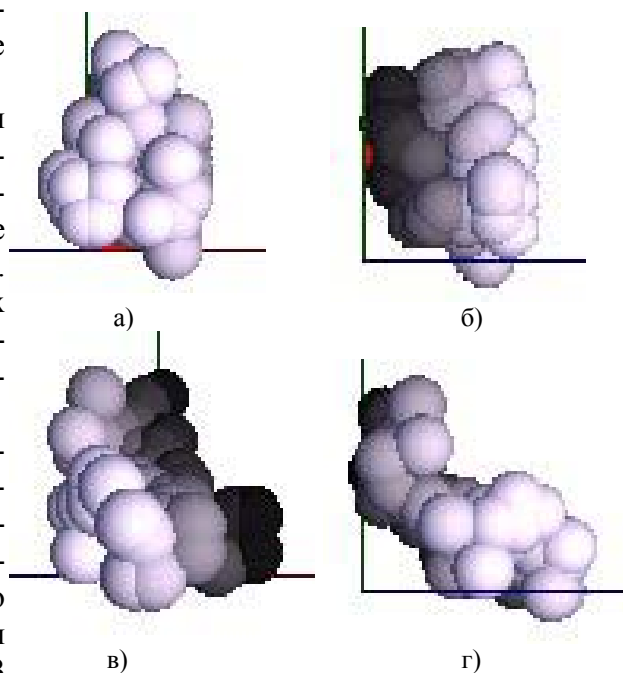


Рис. 6. Структура отдельных частиц. Вид при различных положениях частицы; а) и б) – одна частица, в) и г) – другая частица.

не имеют шарообразной формы. Это некоторый средний размер частицы по нескольким измерениям в различных направлениях.

Форма частиц исследуется не из праздного любопытства. Это не просто красиво вращающийся на экране набор шариков. Шариками удобно показать шаг дискретизации, в данном случае равный 0,5 мкм. Форма частиц несет информацию о процессе формирования частиц, и этот процесс оказывается весьма нетривиальным. Выводы о наблюдаемом процессе будут нами сделаны в процессе сравнения с работами других авторов в совершенно другой области. Действительно, частицы по своей форме оказываются практически одинаковыми в различных процессах горения [9-11], горения порохов сложных составов [12], при горении аэрозвеси частиц алюминия [14], в процессах синтеза ультрадисперсного алмаза [15], формирования углеродных частиц в лазерных процессах [16] и конденсации кристаллов металла из газовой фазы [17].

Измерения проводились при режимах работы двигателя, приведенных в таблице 1.

Таблица 1.

№	Обороты, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт	Температура охлаждающей жидкости, °С
1	800	х.х.	40
2	1500	х.х.	40
3	1500	95	40
4	800	х.х.	80
5	1500	х.х.	80
6	1500	95	80
7	2600	1600	80
8	Режим разгона		80

Гистограммы распределений числа частиц по размерам приведены на рисунках 7-14. Здесь N – число частиц, d – диаметр в мкм.

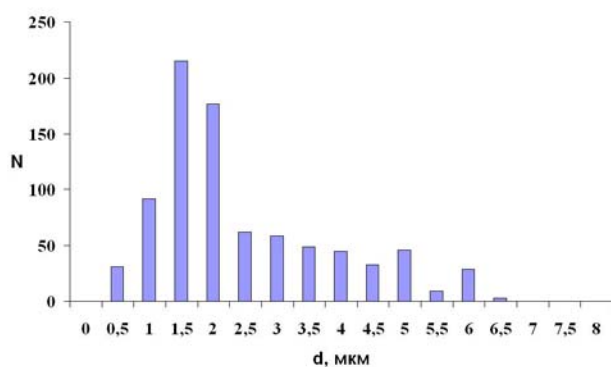


Рис. 7. Распределение N(d), режим 1.

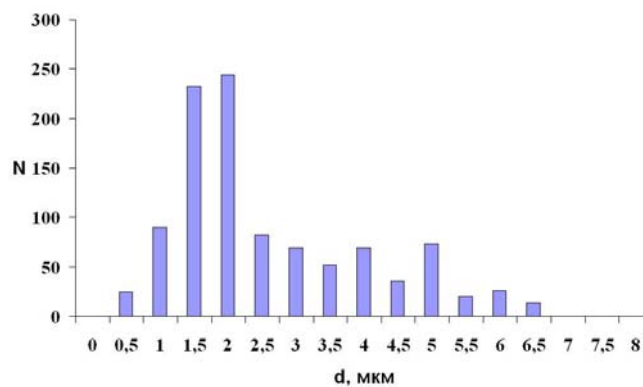


Рис. 8. Распределение N(d), режим 2.

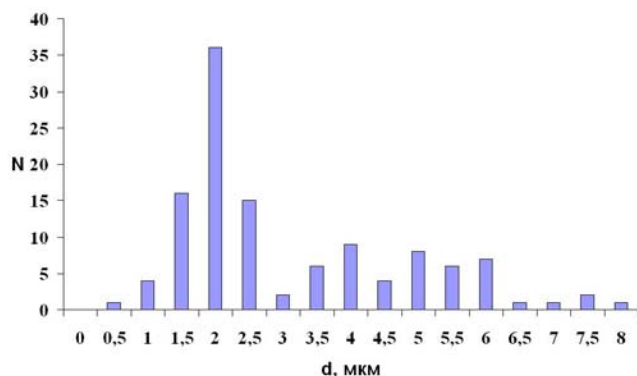


Рис. 9. Распределение N(d), режим 3.

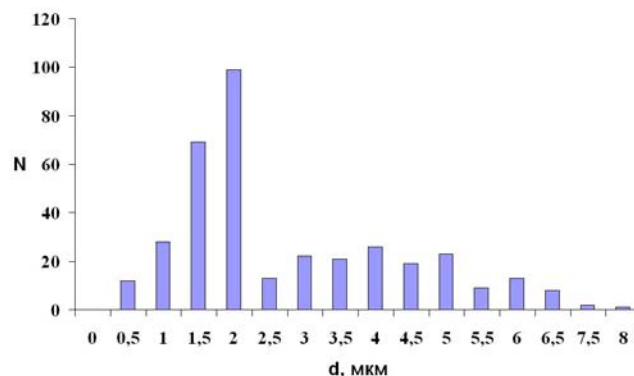


Рис. 10. Распределение N(d), режим 4.

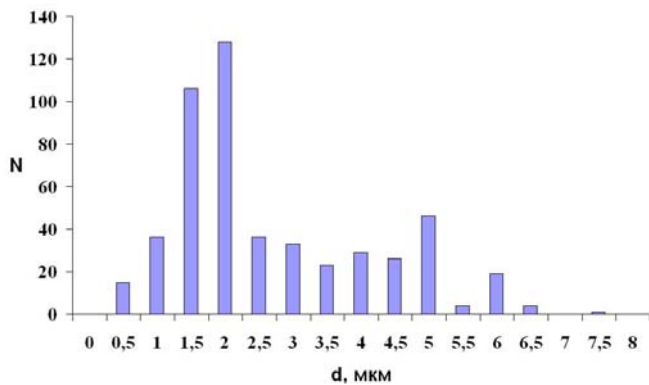


Рис. 11. Распределение $N(d)$, режим 5.

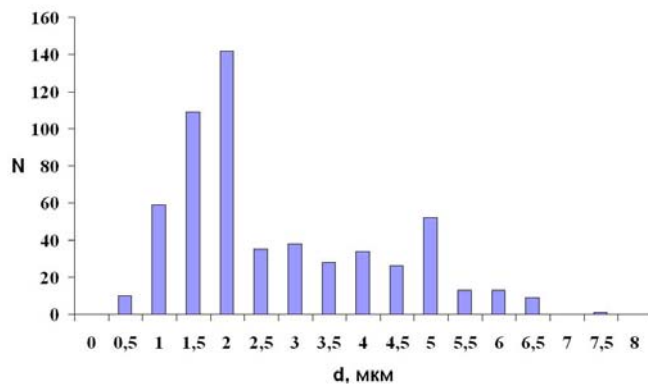


Рис. 12. Распределение $N(d)$, режим 6.

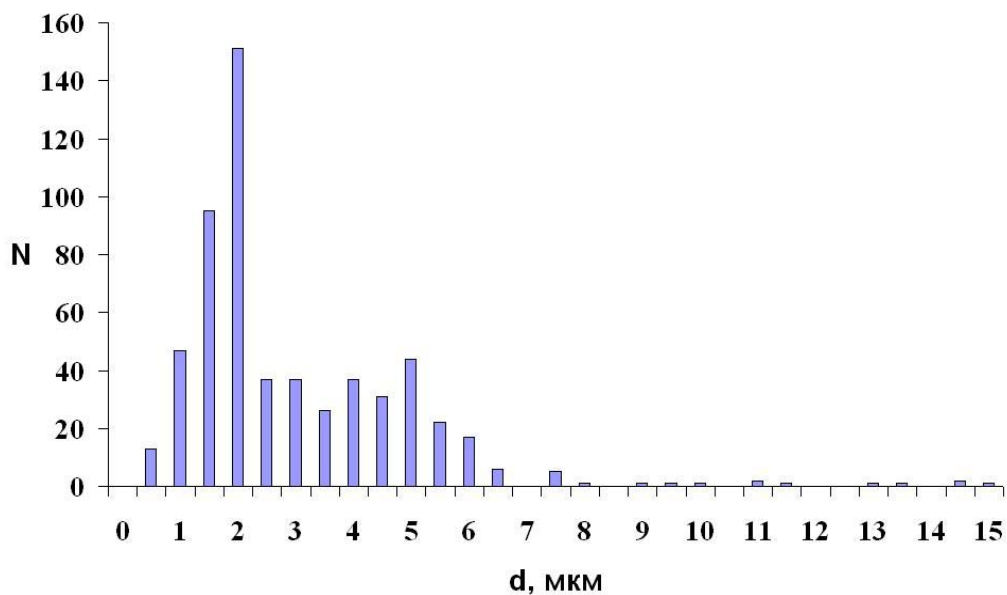


Рис. 13. Распределение $N(d)$, режим 7.

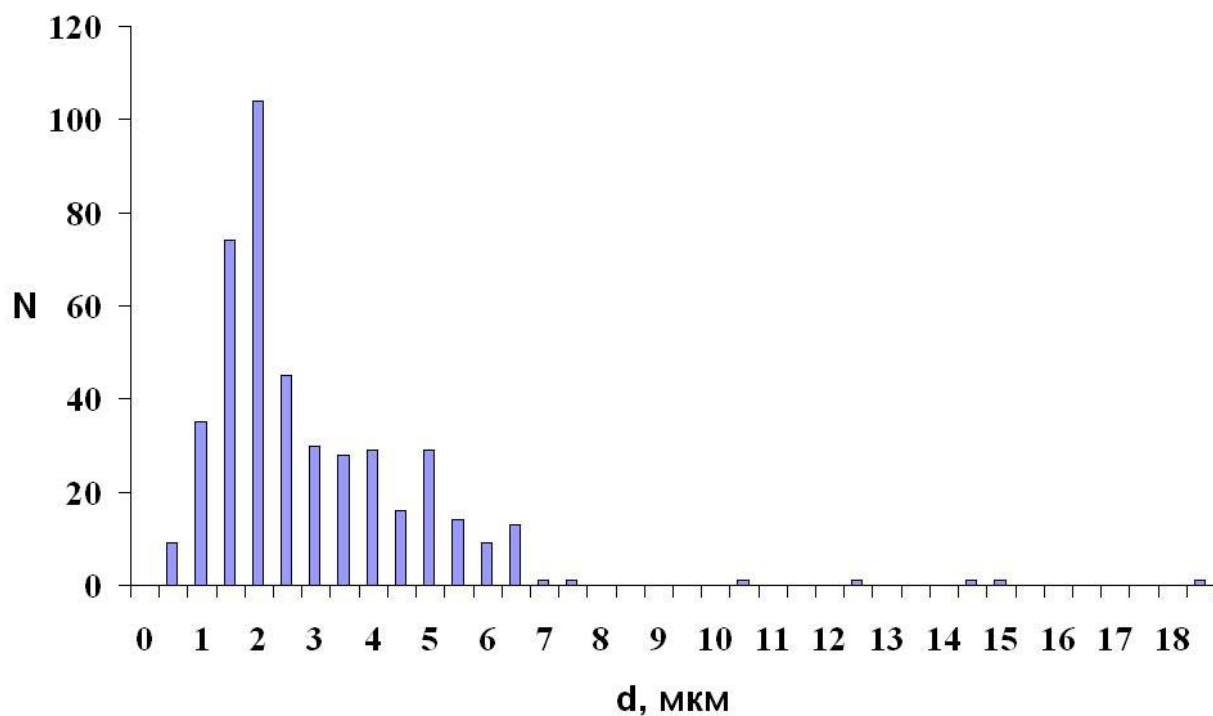


Рис. 14. Распределение $N(d)$, режим 8.

Как мы отмечали выше, приведенные гистограммы не могут быть корректно нормированы в связи с общей для всех оптических методов проблемой малых частиц. Процесс конденсации оставляет возможным существование большого числа частиц наноразмеров, которые не могут быть зарегистрированы оптическими методами и, следовательно, не отражены на получаемых гистограммах.

Более корректным представляется использовать для характеристики конденсированной фазы отработанных газов распределения частиц по массе (объему). В этом случае большое число частиц малых размеров дают несущественный массовый вклад и получаемое распределение может быть корректно обработано статистически. Единственное неудобство – определения закона распределения потребует существенного увеличения объема выборки, поскольку количество частиц больших размеров, дающих наиболее существенный вклад в распределение, чрезвычайно мало.

Гистограммы данных распределений приведены на рисунках 15-23. Здесь V – объем, занимаемый частицами в $\mu\text{м}^3$.

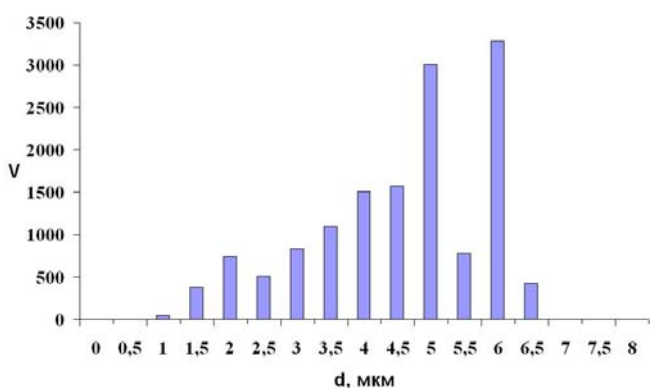


Рис. 15. Распределение $V(d)$, режим 1.

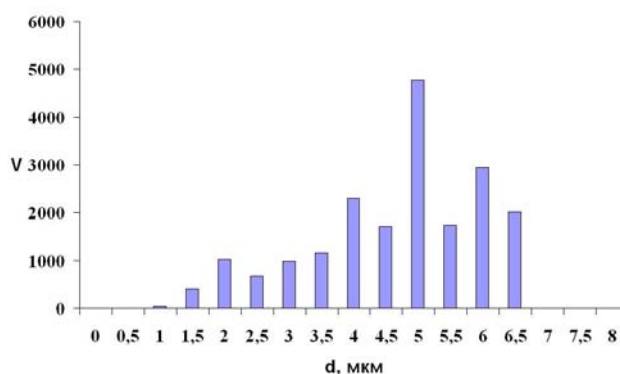


Рис. 16. Распределение $V(d)$, режим 2.

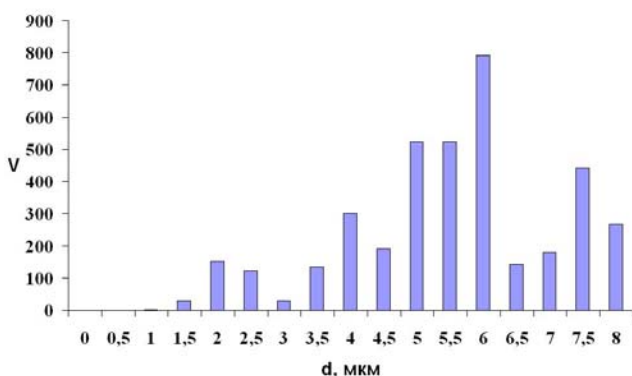


Рис. 17. Распределение $V(d)$, режим 3.

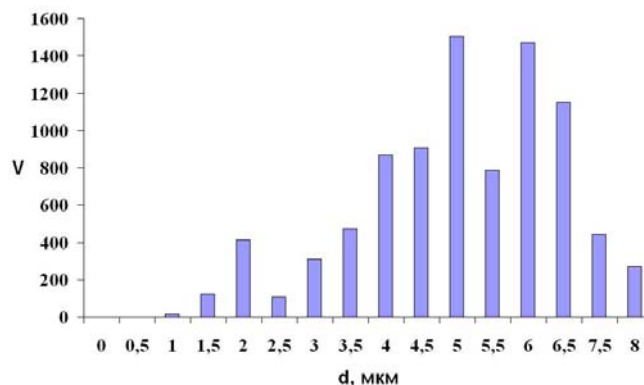


Рис. 18. Распределение $V(d)$, режим 4.

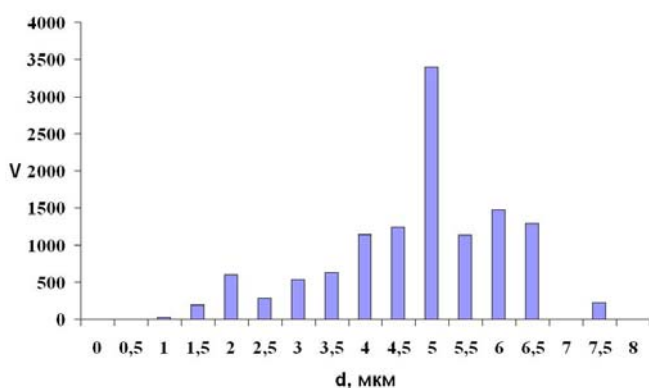


Рис. 19. Распределение $V(d)$, режим 5.

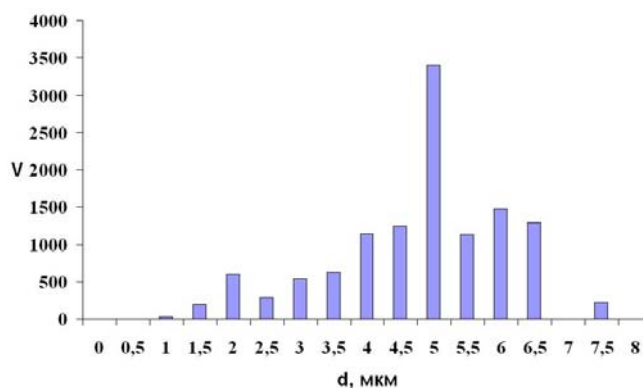


Рис. 20. Распределение $V(d)$, режим 6.

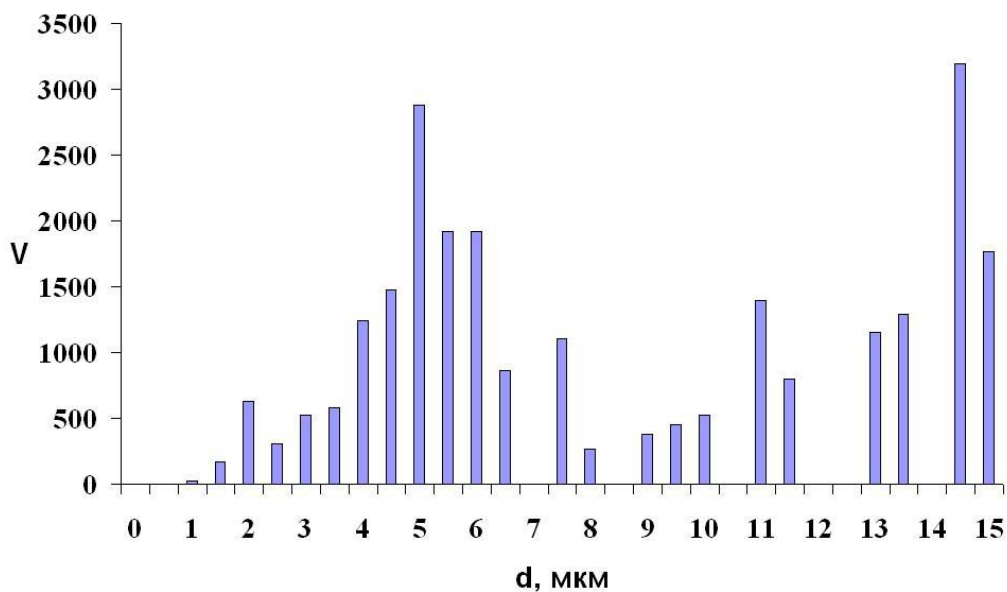


Рис. 21. Распределение V(d), режим 7.

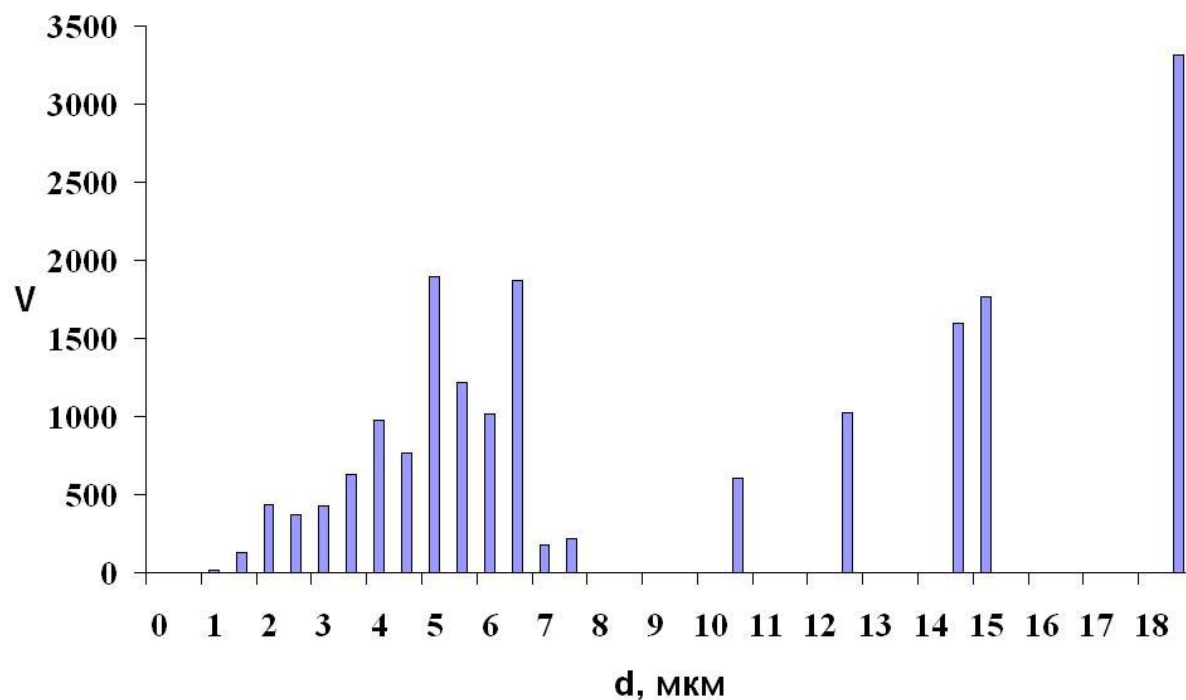


Рис. 22. Распределение V(d), режим 1.

Значения средних и среднемассовых значений, вычисленных по приведенным гистограммам, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Средние диаметры частиц

№	Средний диаметр, мкм	Среднемассовый диаметр, мкм
1	2,5	4,6
2	2,6	4,7
3	3,2	7,6
4	2,8	6,6
5	2,7	4,75
6	2,7	6,1
7	3,0	8,6
8	2,9	9,8

Выводы и обсуждение

К настоящему времени состав продуктов сгорания углеводородных топлив, насчитывающий более 1200 компонентов, изучен достаточно подробно [18, 19]. Дизели выбрасывают в окружающую среду с отработавшими газами значительное количество твердых частиц сажи, являющиеся абсорбентом для полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), часть из которых обладает канцерогенными свойствами. Твердые частицы при сгорании углеводородных топлив имеет различную дисперсность. Последняя 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 отработавших 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 З.А.Мансурова [13] размеры образующихся зародышей лежат в пределах 0,1 – 0,3 мкм.

Далее образовавшиеся зародыши попадают в выпускной канал двигателя и далее в выпускную трубу. Размер образовавшихся частиц будет определяться двумя основными параметрами – начальной концентрацией и скоростью охлаждения газоконденсатной смеси. При этом 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.

Во время агломерации вид первичных частиц претерпевает значительные изменения. Несмотря на различное внутреннее строение первичных частиц, состав продуктов сгорания насчитывает более 1200 веществ, при их агломерации в микрочастицы сравнительно большого размера происходит упорядочение структуры в пределах значительного объема частицы. Такое изменение структуры является, вероятно, возможным из-за высвобождения энергии связи во время столкновений кластеров, из-за чего временно повышается энергия частицы.

Благодарности

Автор приносит искреннюю благодарность докторам наук, профессорам АлтГТУ и ИЛФ СО РАН В.А.Вагнеру, В.В.Евстигнееву, А.И.Карапузикову, Д.Д.Матиевскому, А.Л.Новоселову, С.П.Пронину, А.М.Ражеву, Н.Н.Тубалову без деятельного участия которых была бы невозможна настоящая работа. Автор также искренне благодарит кандидатов наук, доцентов А.В.Еськова и В.Ю.Русакова за помощь при проведении экспериментов и Д.С.Жилина, А.В.Капустина, В.К.Корнилова, И.М.Сметанева, Е.В.Стрюц, С.С.Шляхова, А.В.Шумахера, М.А.Шуроватова за помощь при компьютерной обработке экспериментальных данных.

Литература

1. Новоселов А.Л., Пролубников В.И., Тубалов Н.П. Совершенствование очистки отработавших газов дизелей на основе СВС-материалов.- Новосибирск: Наука, 2002.- 96 с.
2. Беспамятнов Г.П., Кротов Ю.А. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде.- Л.: Химия, ЛО, 1985,- 528 с.
3. Болдырев И.В., Смирнова Т.Н., Голосман Е.З. Нейтрализация отработавших газов ДВС на основе цементосодержащих катализаторов.//Двигателестроение.- 1998, № 2.- С. 40-41.
4. Детри И.П. Атмосфера должна быть чистой.- М.: Прогресс, 1973.- 379 с.
5. Д.И.Стаселько. Особенности голографической регистрации быстропротекающих процессов при использовании импульсного лазера на рубине. В сб. "Оптическая голография", Л.: "Наука", 1975.- С. 4-70.
6. Водзинский А.И., Сойфер В.А., Храмов А.Г. Исследование пространственных ансамблей частиц с применением метода числовой голографии / Материалы 9 Всесоюзной школы по голографии. ЛИЯФ, Л., 1977. <http://bsfp.media-security.ru/school9/13.htm>
7. Бельдюгин И.М., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. Восстановление изображения предмета по спекл-структуре его поля.// Квант. Электроника. 2001. Т 31, в. 6.- С. 539-542.
8. 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. в. 8, с. 1-9. <http://edu.secna.ru/main/review/2006/n8/brava61.pdf>
9. Зарко В.Е., Степанов Б.М., Царфин В.Я. Применение голографии для изучения процессов горения конденсированных веществ./ В сб.: Голографические методы и аппаратура, применяемые в физических исследованиях. – М.: ВНИИФТРИ, 1976. –С. 17-23.
10. Зарко В.Е., Степанов Б.М., Царфин В.Я. Применение голографии для изучения процессов горения конденсированных веществ./ В сб.: Голографические методы и аппаратура, применяемые в физических исследованиях. – М.: ВНИИФТРИ, 1976. – С. 17-23.
11. Гришин В.В., Дьяченко В.А., Карягин Н.В., Румянцев Б.Н., Ивашков В.П. Применение голографии для исследования процесса горения. / В сб. Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных и гетерогенных систем. Черноголовка, 1980. С. 80-81.
12. Аbruков С.А., Аверсон А.Э., Давыдов А.Е., Кочаков В.Д., Максимов Н.Н., Мошев В.В. исследование механизма зажигания и горения порохов методами голографии./ В сб. Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем. – Черноголовка, 1977. С. 9-72.
13. Мансуров З.А. Сажеобразование в процессах горения. // Физика горения и взрыва. 2005. Т.41, № 6. С. 137-156.
14. Д.А.Ягодников, Е.И.Гусаченко. Экспериментальное исследование дисперсности конденсированных продуктов сгорания аэрозвеси частиц алюминия.// Физика горения и взрыва, 2004, № 2, с. 33-41
15. Титов В.М., Анисичкин В.Ф., Мальков И.Ю. Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационной волне. // ФГВ, 1989, Т. 25, №3. С. 117-126.
16. 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. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2005-10-06-003.pdf>
17. Гафнер Ю.Я. Нанокластеры и нанодфекты некоторых ГЦК-металлов: возникновение, структура, свойства. Дис. докт. физ.-мат. наук /АГТУ. - Барнаул, 2006.-320 с.
18. Ахмедов Р.Б., Цирюльников Л.М. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив. - Л.: Недра, 1994. - 238 с.
19. Жегалин О.И., Лупачев П.Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей. - М.: Транспорт, 1985. - 120 с.