

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ПО РАЗМЕРАМ

В.В. Бразовский, В.А. Вагнер, В.В. Евстигнеев, В.И. Пролубников, Н.П. Тубалов

## 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 отработавших 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 (СО), до 64 % окислов азота (NO<sub>x</sub>) и до 30 % твердых частиц (ТЧ), в том числе сажи [1].

Понятие "выбросы твердых частиц" в нормативных документах отдельных стран появилось в 1990 г. До этого выбросы твердых частиц (ТЧ) как таковые не оценивались, и использовалось понятие "дымность отработавших газов". Несмотря на это, принцип измерения содержания твердых частиц в составе отработавших газов был заложен в создание первых дымомеров фирмы "Bosch", действующих по принципу фильтрации частиц газов. По тому же принципу работали дымомеры ИД-1, НАМИ (Россия), RDM-4 (Германия). Однако все показания приборов переводилось в показания прибора "Hartridge" (Великобритания), в проценты дымности отработавших газов.

Ужесточение норм по выбросам ТЧ с отработавшими газами дизелей происходило совместно с ужесточением норм на выбросы других токсичных компонентов. Динамика предъявляемых требований к содержанию ТЧ в составе отработавших газов дизелей такова, что с 1990 г. за 12 лет произошло ужесточение норм на выбросы твердых частиц с 0,816 до 0,10 г/(кВт·ч).

Поскольку спектр выбросов 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.

В настоящей работе наряду с использованием существующих методов регистрации предлагается использовать дополнительно голографический метод с использованием электронной регистрации голограммы и обработкой последней на ЭВМ, позволяющий зарегистрировать и рассчитать распределение конденсированной фазы в отработанных газах с учетом формы и пространственного распределения частиц.

## Методы определения фракционного состава твердых частиц в выхлопных газах

Самым простым и наиболее трудоемким является сбор и прямое измерение твердых частиц с помощью микроскопа (желательно, электронного) (рис.1).

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.

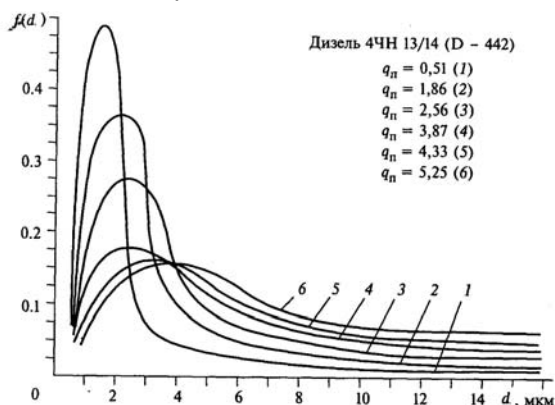


Рис. 1. Распределения твердых частиц в составе отработавших газов дизелей размерности 13/14 с объемно-пленочным смесеобразованием по средним диаметрам в зависимости от тепловой напряженности

Пусть  $f(r)$  – функция распределения частиц по размерам,  $\sigma(\beta, \lambda, r)$  – функция рассеяния излучения с длиной волны  $\lambda$  по углам  $\beta$  для отдельной частицы радиуса  $r$ . Тогда при облучении взвеси частиц параллельным пучком света обратная задача рассеяния сводится к обращению линейного интегрального уравнения первого рода [2, 3]:

$$S(\beta, \lambda) = N \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sigma(\beta, \lambda, r) f(r) dr, \quad (1)$$

где  $S(\beta, \lambda)$  – общий показатель рассеяния,  $N$  – общая концентрация;  $r_{\min}$  и  $r_{\max}$  – граничные радиусы частиц взвеси.

Для рассеяния на малые углы с учетом положений теории рассеяния Ми уравнение (1) принимает вид:

$$I(\beta) = \frac{I_0}{\beta^2} \int_0^{\infty} f(r) r^2 J_1^2(\rho\beta) dr, \quad (2)$$

где  $\rho = \frac{2\pi r}{\lambda}$ ,

$I$  и  $I_0$  – интенсивности рассеянного и исходного излучения.

Для определения функции распределения частиц по размерам, рассчитываемой по измеряемой индикатрисе рассеяния света, необходимо решить обратную задачу рассеяния. Исходя из теории обращенных трансформаций Фурье-Бесселя интегральное уравнение (2) может быть точно обращено:

$$f(\rho) = -\frac{4\pi^2 I_0}{r^2 \lambda} \int_0^{\infty} \varphi(\rho\beta) \frac{d[I(\beta)\beta^3]}{d\beta}, \quad (3)$$

где  $\varphi(x) = x J_1(x) Y_1(x)$ ,

$J_1$  и  $Y_1$  – функции Бесселя 1-го и 2-го рода.

Эта задача относится к классу некорректных и не имеет однозначного решения [1]. Принципиальные трудности восстановления функции распределения связаны с конечной точностью измерения индикатрисы рассеяния. Например, применение метода Шифрина [2, 3] требует предварительного сглаживания индикатрисы рассеяния перед численным дифференцированием. Этот метод принципиально непригоден для описания рассеяния на малых частицах (менее 2 мкм), что связано с использованием асимптотического решения. Метод приводит к появлению в функции распределения участков с отрицательными значениями. Использование метода также требует обрезания экспериментальной индикатрисы рассеяния по углам: сверху – из-за нарастания влияния на результат экспериментальных погрешностей при больших углах рассеяния и снизу – для устранения области аппаратного искажения индикатрисы при малых углах.

Известен ряд разновидностей метода рассеяния света малыми частицами. К ним относятся:

а) Метод спектральной прозрачности.

Физическая сущность этого метода, разработанного Шифриным К.С. с сотрудниками [2], состоит в измерении показателя рассеяния  $S(\beta, \lambda)$  системы частиц в некотором объеме при вариации длины волны падающего излучения за счет изменения параметра.

Реализация этого метода заключается в экспериментальном нахождении коэффициента пропускания прямо прошедшего излучения  $T(\lambda)$  через слой рассеивающих частиц толщиной  $h$  при различных длинах волн  $\lambda_i$  в некотором спектральном интервале.

б) Метод полной индикатрисы [3].

Он пригоден, когда среда содержит оптически мягкие частицы, т.е. выполняется условие  $\rho(n-1) < 1$ .

Этот метод основан на измерении индикатрисы рассеяния по всем направлениям.

в) Метод многоволнового обратного рассеяния [4].

Этот метод разработан применительно к лазерному зондированию атмосферы. Однако он может быть использован для определения  $f(r)$  различных рассеивающих сред. Задача сводится к обращению уравнения:

$$G(\pi, \lambda_i) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q(r, \lambda) f(r) dr. \quad (4)$$

Когда в эксперименте измеряется показатель рассеяния  $G(\pi, \lambda_i)$  при нескольких длинах волн  $\lambda_i$  в направлении, противоположном направлению падающего излучения. Здесь  $Q$  – фактор рассеяния в направлении назад.

г) Статистический метод [4].

В его основе лежит изучение зависимости статистических характеристик светового поля и рассеивающей среды, полученной при решении уравнения распространения электромагнитных волн. Диапазон восстанавливаемого распределения частиц в этом методе составляет 0,02-4 мкм.

д) Метод малых углов [2, 5].

Метод применим для анализа крупных частиц  $\rho \gg 1$ .

Он основан на измерении “ореола” вокруг направления на источник света. Рабочей формулой для определения функции распределения частиц по размерам является (3).

Кроме проблем чисто вычислительного характера имеются и проблемы физического и технического характера [7, 8]. Прежде всего, в данном методе не учитывается интерференция излучения, рассеянного различными частицами. Еще одна проблема при регистрации возникает за счет тепловых градиентов выхлопных газов. Тепловая неоднородность в газовой струе приводит к неконтролируемым отклонениям рассеянного излучения и приводит к дополнительным ошибкам результатов измерений, которые могут оказаться весьма существенными. С технической точки зрения одной из существенных проблем для малоугловых методов с измерением рассеянного света является разделение падающего и рассеянного излучений. Кроме того, при регистрации с использованием лазерного излучения происходит выгорание регистрирующих элементов, на которые попадает сфокусированное падающее лазерное излучение.

Несомненным достоинством методов малоуглового рассеяния является независимость результатов измерения от турбулентности газовой струи. Действительно, угол, на

который происходит рассеяние света на частице, зависит только от ее размера и не зависит от ее положения в струе или скорости ее движения. Перемещение частиц вдоль и поперек пучка не меняют распределения интенсивности в фокальной плоскости. Свет, рассеянный под данным углом, распределен в фокальной плоскости линзы на соответствующее угловое расстояние от центра и образует ореол вокруг фокального пятна от исходного пучка лазера.

#### Голографический метод регистрации

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 [6] 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 [9].

Для целей исследования аэрозольных частиц в выхлопных газах наиболее целесообразно использовать осевую схему записи голограммы (рис. 2). В отличие от случая малоуглового рассеяния для записи голограммы желательно использовать широкоапертурный пространственно когерентный лазерный луч [10, 11].

Пусть лазерное излучение 1 распространяется вдоль оси  $Z$ . Будем считать его плоской монохроматической волной единичной интенсивности. Поле рассеянной аэрозольными частицами волны 5 описывается

функцией  $U(x,y,z)$ . Тогда в плоскости 4 будет зарегистрирована интенсивность:

$$I_p(x,y) = |1 + U(x,y,z)|^2. \quad (5)$$

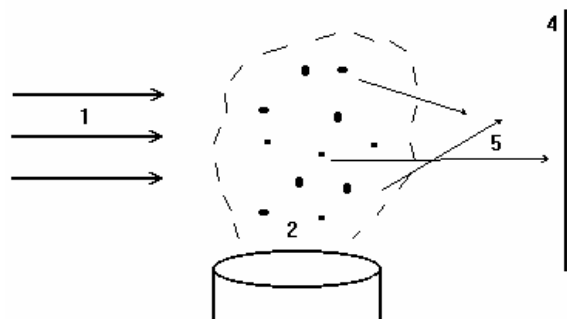


Рис. 2. Осевая схема записи голограммы микрочастиц. Голограмма образуется на регистрирующем материале 4 как результат интерференции опорного пучка 1 и предметного излучения 5 (рассеянного частицами лазерного излучения)

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 найти комплексную амплитуду в предметной области:

$$P_0(x_0, y_0, z) = \frac{g_0}{\lambda z} \iint \sqrt{I(x, y)} g \times \exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda z}(x_0 x + y_0 y)\right] dx dy, \quad (6)$$

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

Основной особенностью использованного нами метода [13] 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. Регистрируемые данные вводятся непосредственно в ЭВМ и обрабатываются специальной программой, т.е. нами используется числовая голография в чистом виде, без использования промежуточных носителей, что исключает искажения, вносимые нелинейным характером регистрирующих материалов.

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, 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 можно заметить отдельные частицы, но автоматизировать процесс обработки невозможно.

Нами было предложено и реализовано следующее решение данной проблемы. На матрицу сначала регистрировалось 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 вычиталась из первой, кроме того, из зарегистрированной картины вычиталась постоянная засветка матрицы, которой техническими средствами устранить не удалось. После этого производится нормировка файла таким образом, чтобы минимальное число файла было равно «0», максимальное – «255». В результате этих операций остается чистая нормированная голографическая 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.

Переходя от непрерывных величин к дискретным, 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 и шаг дискретизации в предметной области был выбран равным 0,5 мкм.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ПО РАЗМЕРАМ

### Исследование конденсированной фазы в выхлопных газах двигателя КамАЗ-740

Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка на базе испытательного стенда с дизелем «КамАЗ-740». Исследуемые газы отбирались зондом в виде металлической трубки, срезанной под углом и вмонтированной в прямой участок выхлопного коллектора, срезом навстречу потоку отработанных газов. Далее отработанные газы по гибкому подводу поступают к предметной области голографической установки, выполненной по осевой схеме регистрации. Излучение лазера через коллиматор, который состоит из 2-х линз и служит для увеличения диаметра лазерного луча, что необходимо для полной засветки матрицы камеры, и диафрагму, обрезаящую луч по размеру матрицы, проходит через область отработанных газов и попадает на матрицу скоростной камеры. Центр предметной

области выбран на расстоянии 5 см от матрицы.

Таблица 1  
Измерения проводились при следующих режимах работы двигателя

N	Обороты, мин <sup>-1</sup>	Нагрузка, кВт	Охлаждающая жидкость, °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

На рисунках приведены примеры гистограмм распределений частиц по диаметрам для режимов 5 (рис.3) и 7 (рис.4).

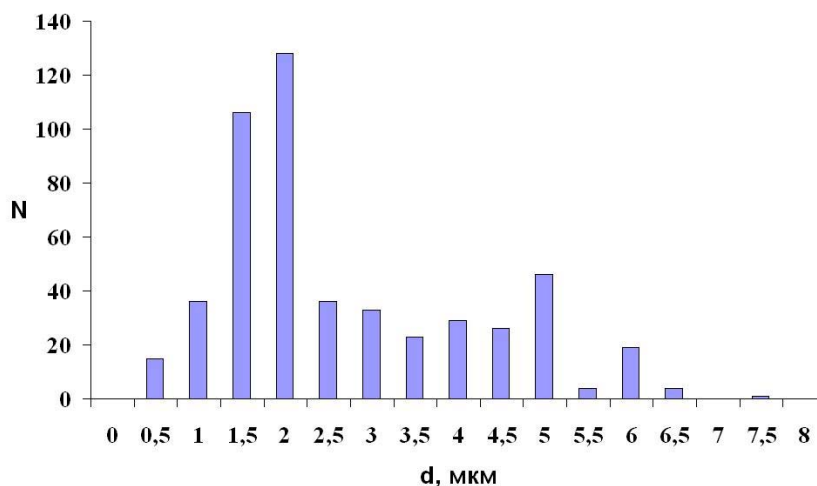


Рис. 3. Распределение частиц в составе отработавших газов дизеля КамАЗ-740, режим 5

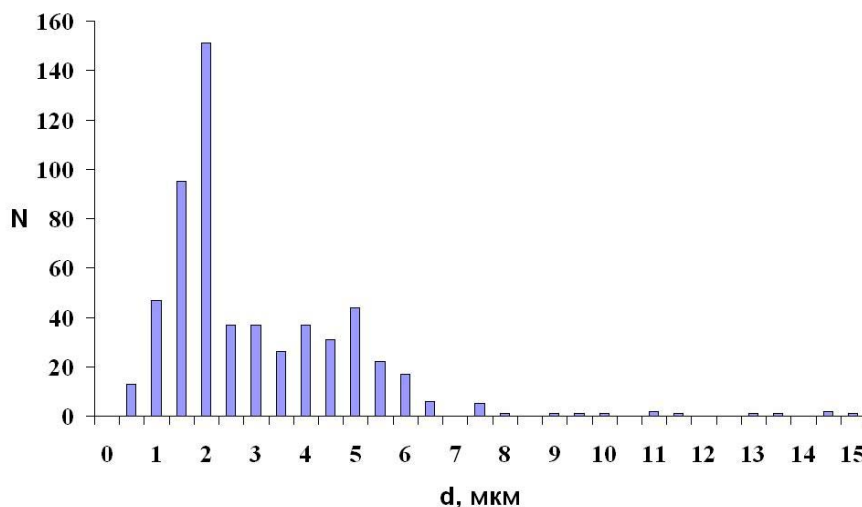


Рис. 4. Распределение частиц в составе отработавших газов дизеля КамАЗ-740, режим 7

Средние значения размеров частиц приведены в следующей таблице.

Таблица 2

Средние диаметры частиц		
N	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

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. На рис. 5 а) и в) приведены изображения двух частиц, полученные с помощью указанной программы.

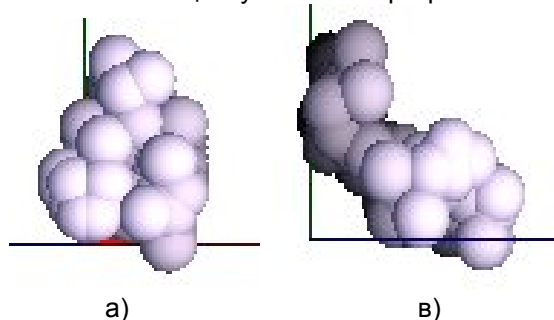


Рис. 5. Изображения двух частиц, рассчитанные по голограмме выхлопных газов. Шарик на рисунке – шаг дискретизации – 0,5 мкм

Как нетрудно видеть из приведенных рисунков, 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 не имеют шарообразной формы. Это некоторый средний размер частицы по нескольким измерениям в различных направлениях.

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<sup>0</sup>С, а температура фазового перехода газ-жидкость для углерода при атмосферном давлении составляет 3500<sup>0</sup>С. В неравновесных условиях переохлажденного газа возникают флуктуации плотности, приводящие к образованию зародышей конденсированной фазы. По данным обзора Мансурова З.А. [14] размеры образующихся зародышей лежат в пределах 0,1 – 0,3 мкм.

Далее образовавшиеся зародыши попадают в выпускной канал двигателя и далее в выхлопную 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.

Таким образом, проведенные исследования существенно дополняют известные литературные данные о формировании конденсированной фазы отработанных газов и позволяют более детально представить физико-химическую кинетику процесса.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ПО РАЗМЕРАМ

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дейч М.Е., Филипов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. - М.: Энергия, 1968.
2. Шифрин К.С. Излучение свойств вещества по однократному рассеянию // Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. – Минск, 1971.
3. Шифрин К.С., Чайнова Э.А. Определение спектра частиц по индикатрисе рассеяния // Изв. АН СССР, 1966. – Т.2. – №2.
4. Иванов А.П., Хайрулина А.Я., Чайковский А.П. Исследование параметров рассеивающих сред методами статистической оптики. - Минск, 1980.
5. Шифрин К.С., Пунина В.А. Об индикатрисе рассеяния света в области малых углов // Изв. АН СССР, 1968. Т.4, №7.
6. Стаселько Д.И. Особенности голографической регистрации быстропротекающих процессов при использовании импульсного лазера на рубине./ В сб. "Оптическая голография", Л.: Наука, 1975. – С. 4.
7. Гуляев П.Ю., Коротких В.М., Еськов А.В., Карпов И.Е. Функция распределения частиц по размерам для определения степени искажения оптического сигнала ТВ-диагностики // Вестник АлтГТУ. – 1999. – № 2 .
8. Гуляев П.Ю., Иордан В. И., Карпов И.Е., Еськов А.В. Ошибка восстановления функции распределения частиц по размерам в методе малых углов // Вестник АлтГТУ. – 1999. – № 2 .
9. 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.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1973. – С. 428.
11. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.: Мир, 1973. – С.126.
12. Шайтан К.В., Лобков А.Ф., Тимофеев И.Б., Чижов А.А., Терешкин Э.В. О восстановлении функций распределения для мелкодисперсных и ультрадисперсных сред по рассеянию лазерного излучения. // Исследовано в России", 115, 1265-1278, 2002. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/115.pdf>.
13. 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. – С. 1-9. <http://edu.secna.ru/main/review/2006/n8/brava61/pdf>.
14. Мансуров З.А. Сажеобразование в процессах горения // Физика горения и взрыва. – 2005. Т.41, № 6. – С. 137-156.