

УДК 533.924

UDC 533.924

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
НАНОДИСПЕРСНОГО УГЛЕРОДА ПРИ
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РАЗДЕЛЕНИИ
ИЗОТОПОВ**

**NANODISPERSED CARBON PARAMETERS
DETERMINATION FOR PLASMA CHEMISTRY
ISOTOPE SEPARATION**

Мышкин Вячеслав Федорович
д.ф.-м.н., доцент
*Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Томск, Россия*

Mishkin Viacheslav Fedorovich
Dr.Sci.Phys.-Math., professor
*National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia*

Хан Валерий Алексеевич
д.т.н.
*Институт оптики атмосферы СО РАН,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Томск, Россия*

Khan Valery Alekseevich
Dr.Sci.Tech., professor
*Institute of Atmospheric Optics SB RAS, and National
Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

Ижойкин Дмитрий Александрович
инженер

Izhoykin Dmitry Aleksandrovich
engineer

Гамов Денис Леонидович
инженер
*Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Томск, Россия*

Gamov Denis Leonidovich
engineer
*National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia*

Рассмотрены технологические аппараты и методы улавливания пыли, а также приборы и методы контроля параметров гетерогенных систем. Разработан и апробирован счетчик дисперсных частиц. Показано, что счетчик частиц позволяет регистрировать наличие дисперсной фазы при массовой концентрации более $3 \cdot 10^{-14}$ г/м³ и оценивать размеры пылинок

The dust collection methods and apparatus, as well as heterogeneous system monitoring methods and devices were considered. The disperse particle counter was developed and tested. Shown that particle counter makes it possible to register a disperse phase presence by mass concentration over $3 \cdot 10^{-14}$ g/m³ and to estimate a dust particle dimensions

Ключевые слова: НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА, ОБРАЗОВАНИЕ САЖИ, ОЧИСТКА ОТ ПЫЛИ, ДИСПЕРСНАЯ ЧАСТИЦА, АНАЛИЗ ДИСПЕРСНОСТИ, СЧЕТЧИК ФОТОНОВ, ЛАЗЕР

Keywords: LOW-TEMPERATURE PLASMA, SOOT FORMATION, DUST CLEANING, DISPERSE PARTICLE, DISPERSION ANALYSIS, QUANTOMETER, LASER

В настоящее время большая часть действующих в различных странах атомных реакторов выработала свой ресурс. В связи с этим все более остро возникает потребность в сепарации изотопных смесей облученных на АЭС материалов и исследованиях по разработке методов сепарации изотопных смесей, содержащих радионуклиды.

Природный углерод, в основном, представлен двумя стабильными изотопами. В результате облучения графита нейтронами в ядерном реакторе образуется радиоактивный изотоп ¹⁴C. После выделения радиоактивного углерода графит можно использовать повторно. Следует отметить и то, что изотоп ¹⁴C является продуктом, востребованным в технологии и медицине.

Большинство из известных методов разделения смеси изотопов

пригодны для очистки облученного ядерного графита от радиоактивного изотопа ^{14}C . Перспективными для сепарации углерода на изотопы являются ректификация, изотопный обмен, экстракция, фотохимические процессы [1], а также центробежная технология. Для переработки облученного ядерного графита предпочтение будет отдано технологии разделения изотопов, имеющей наименьшую стоимость получаемых продуктов (энергосберегающая технология).

Изотопные эффекты углерода в гетерогенной плазме. Анализ физико-химических явлений, протекающих в фотохимических процессах, показывает, что радикальные реакции в магнитном поле перспективны для разделения изотопов [2]. Традиционно радикальные реакции проводят в жидкой фазе. При этом смесь изотопов распределяется по продуктам химической реакции между радикалами [3].

Авторы настоящей работы сообщали о возможности использования микроволнового и лазерного излучений для интенсификации плазмохимических реакций, селективных по изотопам, имеющим магнитные и немагнитные ядра [4]. Сепарация изотопов с магнитными и немагнитными ядрами возможна из-за влияния на спиновую эволюцию радикальных пар сверхтонкого (фермиевского) взаимодействия спина валентного электрона со спином парамагнитного ядра изотопа.

Известно, что плазменная система в состоянии термодинамического равновесия описывается тремя распределениями: Максвелла, Больцмана, Саха. Каждая частица (радикал, молекула, ион) может находиться в нескольких энергетических состояниях, отличающихся значениями квантовых чисел.

Энергетический сдвиг в магнитном поле между различными спиновыми состояниями электрона, также определяющий частоту прецессии спина ω

$$\Delta E = \hbar \omega = g g_0 m_e H, \quad (1)$$

где $g = \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{J(J+1)}$ - фактор спектроскопического

расщепления (множитель) Ланде, L, S, J - квантовые числа орбитального, спинового и полного моментов количества движения, ω - частота прецессии спина электрона; $\gamma_0 = -\frac{e}{2 c m_e}$ - единица гиромангнитного

отношения, $\mu_B = \frac{e \hbar}{2 c m_e}$ - электронный магнетон Бора, e - электрический

заряд электрона, m_e - масса электрона, c - скорость света, \hbar - постоянная Планка; H - напряженность магнитного поля.

Из уравнения (1) получаем частоту прецессии спина электрона

$$\omega = - \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{J(J+1)} \left(\frac{e}{2 c m_e} \right)^2 H. \quad (2)$$

Из (2) следует, что частоты прецессии спинов разных возбужденных состояний различны. В качестве примера, в таблице приведены значения g -факторов различных спектроскопических состояний молекулы кислорода.

Таблица - Значения g -факторов электронных состояний молекулы O_2 [5]

уровень	$X^3\Sigma_g^-$	$a^1\Delta_g$	$b^1\Sigma_g^+$	$c^1\Sigma_u^-$	$A'^3\Delta_u$	$A^3\Sigma_u$	$B^3\Sigma_u^-$	$2^3\Pi_g$	$2^1\Pi_g$	$1^1\Pi_u$	$f'^1\Sigma_u^-$
g_e	-0,208	-0,218 ^b	0,269	-0,141	-0,171 ^b	0,176	-5,931	-0,087 ^b	-0,084 ^b	-0,400 ^b	-1,490

b Молекулярный g -фактор для Π - и A -состояний молекулы $^{16}O_2$ включает только вклад электронов, поэтому g -фактор для этих состояний представлен только для молекулы $^{16}O^{17}O$. Для $a^1\Delta_g$ состояния молекулы $^{17}O_2$ $g = -0,227$. Для остальных состояний g -фактор вычислен для молекулы $^{16}O_2$.

Рассмотрим g -факторы различных ионов. Например, величины g -факторов связанного электрона водородоподобных систем (ионов, содержащих один электрон): свободный электрон — 2,002319304; H — 2,002283853; C — 2,001041590; O — 2,000047020; Xe — 1,89464051 [6]. Поэтому спин свободного электрона каждой частицы (каждого возбужденного состояния) будет совершать прецессию со своей частотой.

В плазме, в отличие от жидких сред, не наблюдается клеточного эффекта. Однако, путем варьирования длиной свободного пробега (частотой столкновения) можно создать условия, при котором химическая реакция с частицей в заданном энергетическом состоянии, будет более вероятной. Это возможно, если динамика спина неспаренного электрона во внешнем магнитном поле, за время свободного полета, одного из состояний валентного электрона приводит к более высокой вероятности формирования синглетных пар за меньшее время [4]. Это открывает возможности для разработки плазмохимической технологии очистки облученного ядерного графита от радиоактивного изотопа ^{14}C . При этом, на наш взгляд, энергетически менее затратным является перевод изотопа ^{14}C в газовую фазу.

В [7] показано наличие заметного изотопного эффекта при конверсии углекислого газа в угарный в СВЧ разряде. Установлено, что при вкладе энергии 7 Дж/см³ степень конверсии молекулы $^{12}C^{16}O_3$ в 2,5 раза выше, чем для изотомера $^{13}C^{16}O_3$.

А в [8] экспериментально показано обогащение фуллеренов изотопом ^{13}C в процессе их образования в гетерогенной плазме. Энергия химической связи C-O значительно превышает энергию связи C-C. Поэтому при охлаждении плазменного потока по мере продвижения по плазмотрону происходит преимущественное образование молекул ^{12}CO при более высоких температурах. В дальнейшем из обогащенной по ^{13}C смеси

формируются фуллерены и сажа.

Фракционирование изотопов углерода имеет место также при наращивании алмаза из газа [9]. Наращиваемый алмаз обогащается изотопом ^{13}C , а образующийся неалмазный углерод обогащается изотопом ^{12}C по сравнению с исходным метаном. Установлено, что изотопный сдвиг аморфного углерода одинаков как при формировании на алмазе, так и при наращивании на неалмазной подложке. При этом эффекты фракционирования изотопов противоположны по знаку для алмаза и графита.

В работе [10] показано, что процессы графитизации углерода при температурах 1200–2800°C различны для изотопов ^{12}C и ^{13}C . Установлено, что изотоп ^{13}C является гетерогенно-графитирующимся углеродом. Основная часть ^{13}C находится в составе кристаллитов малых размеров с неупорядоченной структурой. Экспериментально установлено, что при температурах 1800–2100°C (предкристаллизационный период графитации изотопа ^{13}C) происходит разупорядочение структуры конденсированной фазы, содержащей ^{13}C .

Основной задачей, возникающей для сохранения высоких значений кинетических эффектов разделения изотопов, является быстрое и полное разделение из продуктов плазмохимических реакций газовой и дисперсной фаз, имеющих разный изотопный состав. Это позволит получать газ с высоким содержанием изотопа ^{14}C . Физика процессов обогащения продуктов плазмохимических реакций по изотопам, требующая отдельного скрупулезного анализа, в данной работе не рассматривается.

Задачей настоящего исследования является разработка метода и установки для непрерывного лазерного контроля в процессе разделения газовой и дисперсной фаз. Рассмотрим технологии очистки газов от аэрозолей, а также имеющиеся приборы и разработанные методы контроля параметров гетерогенных систем.

1. Методы и приборы контроля пылесодержания

При оптимизации плазмохимического процесса очистки графита от радиоактивного углерода необходимо контролировать различные параметры. Одним из параметров, позволяющих управлять целевым процессом, является гранулометрический состав и количество дисперсных частиц.

Безотборные лазерные методы контроля параметров аэрозолей были разработаны вскоре после создания первого лазера. Рассмотрим серийные приборы для анализа пылесодержания. В различных отраслях (экология, технология) возникают задачи контроля параметров гетерогенных систем. При значительном отличии решаемых задач, используются одни и те же методы.

Наиболее простой способ при контроле запыленности воздуха

заключается в фильтрации заданного объема воздуха и определении массы фильтра до и после запыления [11]. Метод дает наиболее достоверные результаты, однако требует длительного анализа. Используются стеклянные, синтетические или минеральные фильтрующие тонковолокнистые материалы, фильтровальная бумага [12].

Разработаны и используются безотборные измерители запыленности, основанные на косвенных методах: радиоизотопные, акустические (например, пьезоэлектрические). Простыми для оперативного контроля концентрации пыли в газоздушном потоке являются оптические пылемеры. Метрологическое обеспечение оптических пылемеров заключается в калибровке для данного состава выбросов весовым (гравиметрическим) методом. Проводимый в дальнейшем оперативный контроль с помощью пылемера предполагает малую изменчивость характеристик выбросов данного производства. При изменениях в технологических процессах, приводящих к изменению гранулометрического состава дисперсных частиц, необходима дополнительная калибровка.

Контактно-электрические пылемеры основаны на приобретении частицами пыли при трении о внутреннюю поверхность трубки (пластмассовой) трибоэлектрического заряда. Величина заряда пропорциональна площади поверхности частиц. Недостаток – зависимость определяемых параметров пыли от распределения частиц по размерам и от их электрических свойств.

В индукционных пылемерах заряженные дисперсные частицы пропускают через измерительную камеру с электродом, на котором индуцируется заряд. Количество заряда пропорционально площади поверхности дисперсных частиц.

В емкостных пылемерах запыленный газ просасывают через трубку, внутри которой установлены две пластины. Между пластинами помещена сетка, находящаяся под напряжением. Устройство включено в контур генератора, частота резонанса которого зависит от количества частиц на сетке [13].

Пылемеры с отбором проб подразделяются на приборы фильтрующего действия, инерционного действия, седиментаторы, термо- и электропреципитаторы [14].

Методика количественного анализа воздуха рабочей зоны для измерения содержания в нем дисперсной фазы гравиметрическим методом в диапазоне массовых концентраций от 1 до 250 мг/м³ определена в методических указаниях МУК 4.1.2468-09 (дата введения – 29.04.2009) [15].

Портативный прибор для определения запыленности гравиметрическим методом Gravimat SHC500 используется для калибровки промышленных пылемеров в мг/м³ или г/м³.

При контроле атмосферы нашли применение радиоизотопные анализаторы пыли: «ДАСТ», Россия; F-701-20 VEREWA, Германия; Dust Trak 8520 TSI, США [16].

В радиоизотопных пылемерах измеряют поглощение β -излучения пылью, осаждённой на фильтр из заданного объёма газа. Коэффициент ослабления β -излучения, прошедшего через фильтр, пропорциональна массе пыли и не зависит от дисперсности аэрозоля. Погрешность радиоизотопных пылемеров не превышает 15%. Приборы «ИКАР» (РКП-5), ПРИЗ-2, М-101 являются радиоизотопными пылемерами для шахт. Портативный взрывобезопасный ИКАР позволяет производить измерение пыли грубой и тонкодисперсной фракций.

Анализатор пыли F-701-20 предназначен для автоматического контроля содержания дисперсных частиц в атмосферном воздухе и воздухе рабочей зоны. Масса пыли, осажденная на стекловолокнистой фильтровальной ленте, измеряется по ослаблению излучения ^{14}C с помощью счетчика Гейгера-Мюллера. Диапазон измерения — 0,001-10 мг/м³ [16].

Измеритель массовой концентрации пыли «ПРИМА» (ТУ 4215-002-31929965-99) предназначен для контроля превышения предельно-допустимых концентраций пыли в воздухе рабочей зоны, а также при технологическом контроле чистоты воздуха. Для прибора необходимы устройства пробоотбора и пробоподготовки. Порция контролируемого газа прокачивается через фильтр АФА-ДП-3, а масса пыли оценивается по поглощению β -излучения закрытого источника излучения БИП-10 с радионуклидом Прометий-147 активностью до 1200 МБк. Диапазоны измерения ПРИМА-01 — 0...100 мг/м³; ПРИМА-03 – 0...50 мг/м³ [17].

Радиоизотопный анализатор пыли «ДАСТ» предназначен для измерения массовой концентрации аэрозольных частиц различного происхождения и химического состава в атмосфере, воздухе рабочей зоны, при технологическом контроле чистоты воздуха. «ДАСТ» - стационарный прибор с блоком пробоподготовки, осуществляющим нагрев анализируемого потока воздуха для предотвращения конденсации атмосферной влаги. Диапазон измерения массовой концентрации пыли — 0,001–30 мг/м³.

В электрометрических пылемерах (ИКП-3Д, ЭПЦ) происходит зарядка дисперсных частиц в потоке движущегося аэрозоля при трении о воздух, между собой, о стенки газохода или в коронном разряде (ИКП-4М). Частицы, ударяясь об электрод или пролетая через соленоид, формируют в приёмном устройстве импульсы тока. Приборы имеют высокую чувствительность, но уступают по точности радиоизотопным пылемерам и не могут работать во влажной атмосфере.

Электрический заряд может наводиться на изолированном измерительном электроде, располагаемом в гетерогенном потоке.

Величина заряда пропорциональна массовой концентрации аэрозоля в широком диапазоне значений.

Трибоэлектрические приборы измеряют: постоянную [приборы фирм Auburn, FilterSense, Babbit и Bindicator (США), Dr. Foedich и MRU (Германия)] или переменную [приборы серии S300, прибор контроля рукавных фильтров Snifter фирмы Sintrol (Финляндия), приборы DT, DS и DA фирмы PCME (Англия)] составляющие сигнала (электродинамический наведенный заряд) [12].

Измеритель ИКП-4М предназначен для измерения концентрации пыли в атмосфере, бытовых и производственных помещениях, а также для контроля технологической чистоты воздуха в цехах и объектах различного назначения. Скорость отбора пробы 40 дм³/мин. Шкала прибора отградуирована в единицах массовой концентрации для вещества с плотностью 2,3 [18].

Анализатор пыли DT990 предназначен для применения в производственных процессах для детектирования частиц после фильтрующих устройств. Сертифицированный диапазон измерения: 0-15 мг/м³. В приборе реализован метод электродинамической электризации зонда [19].

Датчик выбросов пыли ДВП-02 предназначен для контроля концентрации пыли в воздухе и дымовых газах фильтров, а также в составе автоматизированной системы управления работы электрофильтров. Принцип измерения, используемый в ДВП-02, состоит в передаче электрического заряда между электродом (зондом) датчика и движущимися частицами пыли. Минимальное разрешение – 0,2 мг/м³ [20].

Для измерения концентрации промышленных пылей распространены оптические пылемеры, основанные на поглощении или рассеянии светового пучка, пропущенного через запыленный газопоток. Оптические пылемеры – автоматические приборы, требующие калибровки для каждого вида пыли, т.к. их показания зависят от ее дисперсного состава и оптических свойств. Применение ИК излучения позволяет уменьшить нижний предел измерений пылемеров с поглощением излучения с 30-50 до 10 мг/м³ [13].

Для измерения низких (до единиц мг/м³) концентрации пыли, присутствующей в атмосферном воздухе, применяют фотоэлектрические счетчики (ФЭС), в которых запыленный воздух пропускают через освещенный счетный объем (от 0,03 до нескольких мм³). Свет, рассеянный отдельной частицей, собирается оптической схемой и направляется на ФЭУ, который каждый раз генерирует импульсы напряжения. Эти импульсы сортируются по амплитудам на несколько диапазонов в соответствии с размерами частиц. Одновременно прибор измеряет расход газа через измерительный объем.

Главный недостаток ФЭС – ограниченный верхний предел счетной

концентрации, который при использовании белого света близок к 10^8 частиц/м³ и увеличивается в несколько раз при использовании лазера. При концентрациях пыли более нескольких мг/м³ газ дополнительно разбавляют чистым газом. Обобщённая оптическая схема ФЭС представлена на рис. 1. Опорный диод необходим для контроля интенсивности излучения [21].

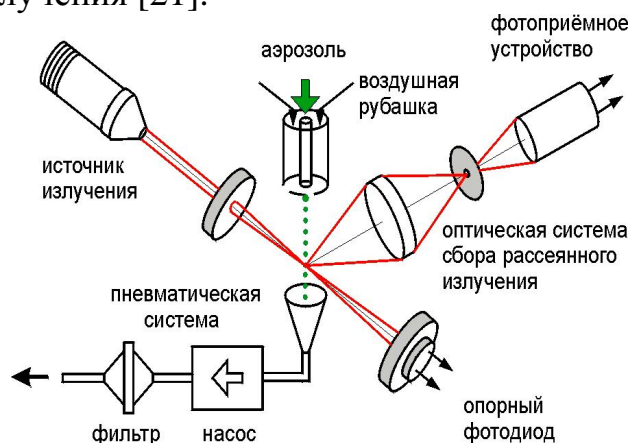


Рис. 1. Оптическая схема оптического счётчика частиц аэрозолей.

Рассмотрим некоторые серийно выпускаемые ФЭС. Лазерный анализатор пыли Dust Trak 8520 (TSI Inc., США) предназначен для измерения концентрации дисперсных частиц в атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны, контроля промышленных выбросов с высоким содержанием взвешенных частиц (стройплощадки, свалки). Диапазон измерения массовой концентрации аэрозоля — 0,001-100 мг/м³ [16].

ФЭС Fluke 983 измеряет концентрацию твердых частиц в воздухе по шести размерам (0,3; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0 мкм), а также температуру и относительную влажность воздуха. Fluke 983 компактный, автономный прибор для работы одной рукой, не требует пространственной ориентации [22].

Оптический датчик контроля запыленности рудничной атмосферы ИКП-2006, предназначен для использования в общешахтных системах мониторинга параметров безопасности. Используется излучение инфракрасного диапазона. Прибор откалиброван для измерений концентрации угольной или породной пыли [23]. Диапазон измерения – 0-200 мг/м³.

ФЭС АЗ-10-0,3 предназначен для контроля запыленности чистых производственных помещений, а также может быть использован для проверки фильтрующих устройств. Прибор предназначен для использования во взрывобезопасных отапливаемых помещениях и по условиям эксплуатации соответствует требованиям группы Р1 по ГОСТ 12997-84. Измерение количества частиц производится в шести интервалах размеров: 0,3; 0,4; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0. Диапазон измерения количества частиц во всех диапазонах размеров - 100...500 000 частиц/л.

ФЭС Монитор-93Б предназначен для высоких технологий, требующих применения современных стандартов ISO 14644-1, ГОСТ Р 50766-95, FED-STD 209 E: микроэлектроника, космонавтика, фарминдустрия, медицина. Монитор-93Б производит анализ размеров частиц в диапазоне от 0,3 мкм и более. Количество и поддиапазоны, выводимых на экран ЖКИ, задаются пользователем (0,5 мкм, 1,0 мкм, 5,0 мкм). Динамический диапазон: 1 – 10⁵ частиц в дм³ [24].

Измеритель Аэрокон предназначен для непрерывного измерения массовой концентрации аэрозольных частиц различного происхождения и химического состава в атмосферном воздухе, в воздухе рабочей зоны в соответствии с ГОСТ 12.1.005-88, МУ 44.36-87 и СНИП 2.23.570-96, а также сигнализации при превышении заданных порогов. Прибор также предназначен для испытаний НЕРА-фильтров в «чистых» помещениях при измерениях концентраций аэрозольных частиц и определении коэффициентов проскока фильтров в соответствии с инструкцией РДИ 42-505-00. Работает по принципу рассеяния света. Диапазон измерения - 0... 100 мг/м³ для частиц размерами - 0,2...10 мкм [25].

Лазерной пылемер DustTrak 8520 предназначен для контроля содержания дисперсных частиц в воздухе рабочей зоны. Возможно раздельное определение фракций 10 мкм, 4 мкм, 2,5 мкм и 1 мкм [26]. Пылемер выполнен в едином блоке. Анализируемая проба поступает в прибор через насадку и специальный патрубок и облучается лазерным излучением с длиной волны 780 нм. Рассеянный поток собирается линзами, расположенными под углом 90° к потоку пробы и направляется на фотоприемник. Диапазон измерения концентраций пыли 0 – 100 мг/м³ с разрешением 0,001 мг/м³. Размер определяемых частиц - более 0,1 мкм.

Диапазон измерения массовой концентрации аэрозоля анализаторами DustTrak 8530, 8533: 0,1–150 мг/м³ [27].

D-R 300-40 - чувствительный пылемер для измерения малых концентраций пыли на заводах по сжиганию отходов. Пылемер работает по принципу измерения рассеянного света. Модулируемый свет от галогеновой лампы освещает частицы пыли в газоходе. Измеряется рассеянный свет, отраженный от дисперсных частиц. Диапазон измерения – 0-1 мг/м³ ... 0-30 мг/м³ с переключением диапазонов [28].

Пылемер FWE 200 предназначен для измерения концентрации пыли во влажных отходящих газах. Назначение: DUSTHUNTER SF100 – экологический контроль, контроль выбросов, фильтров; измерение низких концентраций пыли (до 200 мг/м³), а DUSTHUNTER SP100, SB50, SB100 – контроль выбросов, фильтров; измерение низких концентраций пыли (до 200 мг/м³).

Измеряемая величина прибора DUSTHUNTER SB50 – коэффициент рассеяния лазерного излучения на твердых частицах. Измерение в единицах массовой концентрации возможно после градуировки прибора

гравиметрическим методом [29].

Приборы, использующие принцип измерения коэффициента пропускания света: DUSTHUNTER T50, DUSTHUNTER T100, DUSTHUNTER T200 предназначены для измерения средних и высоких концентраций пыли (до 10 г/м^3). DUSTHUNTER T200 применяется для автоматического и непрерывного измерения концентрации твердых частиц в газах и предназначен для работы в промышленных условиях. Измеряемая физическая величина – коэффициент пропускания [30].

В оптических приборах без выделения пыли из потока выбранный счетный объём освещается световым лучом, а концентрация пыли определяется по величине светового потока прошедшего или рассеянного частицами под определёнными углами. Погрешность измерения концентрации пыли оптическими пылемерами - 30-40%.

Пылемер ИП-01 предназначен для измерения малых концентрации пыли и оценки размеров пылевых частиц в высокотемпературных газовоздушных потоках. Реализован метод измерения величины излучения, рассеянного частицами пыли. Зонд оптического пылемера ИП-01 с элементами для разделения излучения зондирующего потока позволяет осуществить облучение частиц пыли под разными углами. Зонд вставляется в газоход.

Пылемеры ИДИП-01 предназначены для оперативного контроля содержания пыли в отходящих газах технологических процессов. Пылемеры состоят из измерительного зонда и блока индикации. Дисперсные частицы ослабляют световой поток в оптическом канале внутри газохода. Мерой концентрации пыли является величина поглощенного или рассеянного излучения. Диапазон измерений концентрации пыли - $0,1 - 7,0 \text{ г/м}^3$ [31].

Пылемер ИДИП-01ПМ, предназначенный для оперативного определения больших концентраций пыли в высокотемпературных газовых потоках. Зонд с отверстиями для прохода потока и возвращающим зеркалом, защитными стеклами образуют измерительный оптический канал. Измеряется степень ослабления инфракрасного излучения из-за поглощения и рассеяния пылью.

Пылемер ЛПИ-04 предназначен для непрерывного измерения массовой концентрации пыли в отходящих газах технологических процессов. Пылемер применяется при контроле: выбросов промышленных предприятий, за работой очистных фильтров, технологических процессов. Принцип действия пылемера ЛПИ-04 основан на измерении коэффициента ослабления лазерного излучения. С одной стороны газохода размещается блок излучателя, а с противоположной — блок приемника. Диапазон измеряемых концентраций пыли в газоходе $0,01 - 50 \text{ г/м}^3$ в диапазоне скоростей потока $0,1 - 15 \text{ м/с}$ [32].

2. Приборы и методы для газоочистки и улавливания пыли

Рассмотрим методы газоочистки и разделения газовой и дисперсной фаз. Для очистки воздуха от сухих неслипающихся пылей в машиностроении, на стройках, металлургии, приборостроении, химической и пищевой промышленности, предназначены агрегаты для отсоса и улавливания пыли (АОУМ). Стационарные или передвижные АОУМ состоят из блоков: инерционной очистки воздуха; тонкой очистки воздуха с тканевым фильтром, регенерируемым встряхиванием; ультратонкой очистки накопительного типа; вентилятора [33].

Блок предварительной очистки АОУМ выполняется в виде S-образного инерционного осадителя или циклонного завихрителя, где улавливаются и осаждаются в бункере частицы размером более 10 мкм и сыпаются в бункер.

В блоке тонкой очистки АОУМ может использоваться поликлиновой тканевый фильтрующий элемент или рукавные тканевые фильтрующие элементы. Степень очистки (по частицам размером 3 мкм и более) не менее 99,5%.

В блоке ультратонкой очистки размещается кассета накопительного типа с большой фильтрующей поверхностью на основе ультратонких стекловолокон. Степень очистки (по частицам размером 3 мкм и более) - не менее 99,995%.

Для улавливания высокодисперсных аэрозолей в промышленности широко применяются скрубберы Вентури. В таких устройствах используются следующие процессы: инерция, турбулентная диффузия, коагуляция, сорбция. Совершенствование газоочистителей на основе труб Вентури возможно путем использования теплового эффекта, при котором возникают силы термофореза, диффузиофореза и возможно производить конденсацию паров [34].

В работе [35] приведены результаты экспериментальных исследований трубы Вентури с использованием весового метода и ФЭС. Массовая концентрация частиц в потоке определялась отбором пробы дисперсной двухфазной среды аспиратором и пропускания ее через аналитические фильтры АФА, которые взвешивались с погрешностью $\pm 0,1$ мг.

На рабочем участке были установлены гидродинамический коагулятор (труба Вентури), охладитель, переходник с каплеуловителем для окончательной зачистки потока газа. Для создания масляного высокодисперсного аэрозоля и в качестве рабочей жидкости использовали турбинное масло. Охладитель масла выполнялся из оребренных труб с проточной водой при температуре 10-12°C.

Генератор формировал масляный аэрозоль со средним диаметром 0,33 мкм и концентрацией до 100 мг/м³. На рабочем участке масляный аэрозоль, с температурой газа 120°C подавался в конфузорную часть трубы Вентури, где разгонялся до скорости 50-60 м/с. В горловину трубы

Вентури по трубке за счет разрежения, создаваемого потоком, поступало масло при температуре 10°C. За счет впрыска холодных капель масла в горловине в горячий двухфазный поток в гидродинамическом коагуляторе создаются неизотермические условия. На распыленных каплях масла происходил дополнительный эффект осаждения частиц за счет термофореза и диффузиофореза и конденсация. В диффузорной части происходит ускорение потока до скорости 15-20 м/с в выходном сечении, необходимой для осаждения крупных капель на пластине.

Установлено положительное влияние неизотермичности на процесс очистки от высокодисперсного аэрозоля.

В работе [36] представлены результаты исследований гидродинамики, массообмена и эффективности очистки от газообразных и дисперсных примесей гетерогенном потоке для следующих методов очистки: абсорбционные ("мокрый"), адсорбционные, каталитические и термические. Показано, что среди аппаратов "мокрого" типа наибольшей эффективностью обладают высокоскоростные трубы Вентури, пенные аппараты, аппараты с псевдосжиженным слоем и пленочные трубчатые аппараты.

В пленочных аппаратах, работающих в дисперсно-кольцевом режиме, кроме того, возможна одновременная очистка от газообразных и дисперсных включений, достаточно просто обеспечивается оптимальная температура в зоне контакта фаз. Эти аппараты устойчиво работают в широких диапазонах расхода газа и жидкости, имеют малые габариты и простую конструкцию, обеспечивают большое время контакта (в 100 раз больше, чем в трубах Вентури).

В трубчатых насадках пленочного аппарата гетерогенный поток контактирует с жидкостью в виде пленки на поверхности трубы и капель в ядре потока. Винтовая шероховатость обеспечивает вращательно-поступательное движение пленки жидкости и тем самым стабилизирует ее течение за счет центробежной силы, сохраняет устойчивое пленочное течение при отклонении труб от вертикали и отложениях на пленкообразующей поверхности труб.

Для создания дополнительной межфазной поверхности увеличивают концентрацию капель в ядре потока за счет обеспечения дисперсно-кольцевого режима течения или искусственного разбрызгивания жидкости с пленки в поток газа. Улавливание частиц при дисперсно-кольцевом режиме осуществляется за счет их осаждения на капли жидкости в результате турбулентной коагуляции и на поверхность пленки в результате турбулентной диффузии и турбулентной миграции. Эффективность улавливания частиц может быть повышена за счет использования центробежной силы, возникающей при вращательно-поступательном движении двухфазного потока.

В конденсационном центробежном сепараторе газ, содержащий

высокодисперсные аэрозольные частицы поступает в камеру смешения с паром, в результате чего происходит насыщение газа и предварительное укрупнение частиц [37]. Затем парогазовая смесь с дисперсными частицами пройдя закручивающее устройство приобретает вращательное движение. Дальнейшее укрупнение частиц происходит в канале рабочей камеры благодаря охлаждению хладагентом, поступающим в межтрубное пространство. Одновременно происходит сепарация укрупненных частиц под действием центробежной силы. Образовавшаяся пленка конденсата с твердыми частицами движется по стенке рабочей камеры, через кольцевой канал поступает в сепарационную камеру и удаляется из аппарата. Газ поступает на следующую ступень очистки. Число ступеней аппарата зависит от начального размера частиц и требуемой степени очистки [36].

Наиболее существенное влияние на величину уноса дисперсной фазы из аппарата и, соответственно, эффективность разделения оказывает скорость газа. Закрутка потока газа может быть достигнута: тангенциальным подводом газа и применением осевых закручивающих устройств (лопаточных, розеточных, шнековых) или их сочетанием [38].

Процесс конденсационного разделения в центробежных сепараторах происходит в несколько этапов: насыщение аэродисперсного потока паром, конденсационное укрупнение частиц, выделение дисперсной фазы.

Нанодисперсные частицы в парогазовой смеси выполняют роль активных центров конденсации, и при достижении соответствующих условий для начала процесса на их поверхности образуются сначала отдельные ядра конденсации (мелкие капли новой фазы), а затем сплошной слой жидкости, толщина которого в дальнейшем увеличивается (укрупнение и утяжеление частиц). При этом смачиваемость и растворимость исходной частицы не играют существенной роли, так как конденсация фактически происходит на поверхности жидкого слоя.

Скорость конденсации и диаметр капли для стационарного случая (при постоянной температуре и давлении) и идеального пара описывается уравнением Максвелла. При охлаждении парогазовой смеси, движущейся вдоль более холодной поверхности, происходит потеря тепла через прилегающий к ней пограничный слой газа, а затем конденсация. Если в смеси имеются жидкие или твердые аэрозольные частицы, то конденсация происходит и на поверхности канала, и на частицах. Соотношение между массами конденсата, образующегося на частицах и на охлаждаемой поверхности канала, зависит от величины пересыщения и концентрации дисперсной фазы. При большом количестве центров конденсации в потоке на них конденсируется значительно большее количество пара, чем на стенках канала [39].

Конденсационное укрупнение позволяет увеличить размер частиц от 1 до 15 мкм. Конечный размер частиц в значительной степени определяется величиной поверхностной плотности теплового потока и при скорости газа

более 30 м/с и численной концентрации более 10^{12} м^{-3} слабо зависит от скорости и начального размера, так как в этом случае объем конденсата, образовавшегося на каждой пылинке, гораздо больше объема дисперсной частицы. Конденсационное укрупнение частиц в парогазовом потоке целесообразно проводить при сравнительно низких концентрациях дисперсной фазы (до 10^{12} м^{-3}), высоких тепловых нагрузках и малых скоростях потока (до 30 м/с).

При более высоких концентрациях небольшой объем жидкой фазы на каждой частице не может привести к ее осязательному укрупнению. Увеличение скорости потока приводит к росту энергозатрат на проведение процесса при незначительном увеличении конечного размера частиц.

Процессы осаждения частиц на стенку канала в конденсационном центробежном сепараторе и прямоточном центробежном сепараторе аналогичны.

Экспериментально установлено, что в общем случае увеличение осевой составляющей скорости потока снижает общую эффективность сепарации жидкой фазы, а тангенциальной – повышает, однако чрезмерное ее увеличение может привести к срыву жидкой пленки с поверхности осаждения и вторичному уносу.

При оптимальных скоростях потока эффективность сепарации дисперсной фазы достигает до 99,5%. Значение минимального расхода пара на смешение, обеспечивающего улавливание аэрозольных частиц, зависит от их начальной концентрации, а также температуры и влажности очищаемого газа. При концентрации от 10^8 до 10^{12} м^{-3} , температуре газа от 20 до 80°C и влажности от 40 до 80% минимальный расход пара составляет от 20-50 г/кг. Увеличение расхода пара сверх минимального не влияет на эффективность улавливания частиц.

Обнаружено, что при оптимальных режимах дисперсный состав пыли в шламе практически совпадает с дисперсным составом исходного порошка (независимо от его плотности и смачиваемости). Следовательно, эффективность улавливания частиц размером от 0,1 до 10 мкм в конденсационном центробежном сепараторе при концентрации от 10^8 до 10^{12} м^{-3} не зависит от их исходного диаметра. Частицы размером 5-10 мкм в прямоточных центробежных сепараторах улавливаются на 95-100 % даже без конденсационного укрупнения [40]. Следовательно, и частицы меньшего диаметра в конденсационном центробежном сепараторе улавливаются практически полностью, и фракционная эффективность сепарации ограничивается исключительно явлением брызгоуноса.

Выделение агрегатов частиц глобулярного дисперсного углерода из аэрозольного потока. Укрупненные агрегаты частиц дисперсного углерода можно выделять из аэрозольного потока в поле центробежных сил. На эффективность осаждения аэрозольных частиц в большой степени влияет скорость стока газа в циклоне из внешней спирали во внутреннюю

[41].

Особенностью осаждения аэрозоля в циклоне-концентраторе является снижение скорости стока из внешней спирали вращающегося потока во внутреннюю за счет удаления осажденного целевого продукта из полости циклона-концентратора с частью v аэрозольного потока. Чем меньше величина a , тем ниже скорость стока дисперсионной среды и выше эффективность осаждения аэрозольных частиц и агрегатов. Минимальный размер аэрозольных частиц, улавливаемых циклоном на 100% [41].

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{9mRa^{0,25}(1-b)}{pNr_a u}}, \quad R = \sqrt{\frac{V+n}{396u}}, \quad (3)$$

где N - количество витков спирали, описываемых аэрозольным потоком; b - отношение радиусов выходной трубы и цилиндрической части циклона-концентратора; R - радиус цилиндрической части циклона; v - скорость входа аэрозольного потока в циклон, μ - динамическая вязкость среды, ρ_a - кажущаяся плотность дисперсного углерода, V - расход очищенного газа из циклона, n - расход запыленного газа из циклона.

На эффективность осаждения в циклоне пористых агрегатов дисперсного углерода, кажущаяся плотность r_a которых для активных и электропроводных марок дисперсного углерода в 15-30 раз ниже истинной, оказывают влияние турбулентные пульсации дисперсионной среды [42]. Эффективность осаждения частиц из аэрозольного потока в циклоне-концентраторе можно рассчитать из уравнения

$$h = 1 - \exp\left(-4pur_v^2 r_a H (9mbh)^{-1} a^{-1,5}\right), \quad (4)$$

где H - высота циклона, $b \cdot h$ — сечение прямоугольного трубопровода для тангенциальной для подачи газа.

Уравнение (4) позволяет с достаточной точностью рассчитать эффективность осаждения аэрозоля в циклоне-концентраторе с учетом величины α . Эффективность осаждения аэрозоля повышается с возрастанием скорости входящего аэрозольного потока в циклон-концентратор в интервале 12-18 м/с, а также с увеличением размера агрегатов частиц дисперсного углерода и уменьшением α в интервале 0,9-0,7. При $\alpha = 0,8$ и скорости входящего аэрозоля в циклон 15 м/с эффективность осаждения составляет 92-93%, а в системе из двух последовательно установленных циклонов она равна 95-96% [41].

Фильтрацию аэрозоля дисперсного углерода активных марок в мировой практике осуществляют на стеклотканевых фильтрах с предварительным осаждением целевого продукта в циклоне (фильтрация аэрозоля при начальной концентрации частиц $C_n = 3-10 \text{ г/м}^3$) или на фильтре с коагуляторами (фильтрация при $C_n = 70-80 \text{ г/м}^3$) с использованием ворсистых стеклотканей [41].

Известно, что чистая стеклоткань с ворсистой уточной нитью и высокой газопроницаемостью не обладает эффективной фильтрующей

способностью, а служит подложкой для образования и удержания фильтрующего слоя осажденных агрегатов дисперсного углерода [43]. Способность частиц аэрозоля коагулировать с образованием прочных и рыхлых агрегатов позволяет создать на ворсистой поверхности стеклоткани пористый фильтрующий слой и обеспечить фильтрацию аэрозоля за счет осаждения и адгезии частиц и их агрегатов на поверхности ранее осажденных частиц.

Успехи в области высокотемпературной фильтрации аэрозолей при производстве технического углерода не устраняют такие недостатки этих процессов, как низкая скорость фильтрации, 0,004-0,005 м/с; необходимость ручной замены фильтров; высокая стоимость фильтрующих материалов; ненадежность рукавного фильтра, так как повреждение даже одного рукава из сотен в фильтре приводит к резкому снижению эффективности процесса [44].

В новых публикациях об исследованиях процесса осаждения частиц на волокнистых фильтрах расширяются знания в области фильтрации аэрозолей при концентрациях дисперсной твердой фазы в интервале 0,5-10 мг/м³ [45].

3. Разработка и апробация счетчика дисперсных частиц

Переработка облученного ядерного графита осложнена в связи с наличием радиоактивного изотопа ¹⁴C. Этот изотоп, как малую примесь, логичнее переводить в газообразную фазу путем окисления графита. Процесс разделения крупной фракции дисперсного углерода, не содержащего ¹⁴C, от газовой фазы не представляет трудностей. При этом в газовом потоке останутся ультрадисперсные частицы сажи. Разделение оксидов углерода от плазмообразующего газа также не вызывает затруднений.

Для выделения нанодисперсных частиц потребуется значительное время. Длительное соприкосновение нанодисперсного графита с оксидами углерода, обогащенными по ¹⁴C, уменьшает эффективность технологии очистки радиоактивного графита. Поэтому контроль количества и гранулометрического состава графита в отходящих газах продуктов плазмохимических реакций является одной из мер поиска путей увеличения эффективности очистки графита.

Обзор приборов и методов для контроля параметров пыли, приведенный ранее, показывает, что в условиях наших исследований наиболее приемлемыми являются оптические методы контроля.

В статье [46] приводятся результаты разработки фотоэлектронного счетчика дисперсных частиц, позволяющего регистрировать индикатрисы рассеяния с необходимым разрешением по углам. Представлены экспериментальные результаты. Однако такой счетчик на основе нескольких фотоприемников не позволит контролировать наличие

углеродных кластеров (из-за малости потока рассеянного излучения). С целью расширения границы минимально возможного размера, который может быть зарегистрирован с помощью счетчика, необходимо использовать оптическую систему для сбора рассеянного излучения из максимального телесного угла (в направлениях лепестков индикатрисы рассеяния) и использовать чувствительный фотоприемник.

Для расчета сечения рассеяния углеродных кластеров и наночастиц сажи можно использовать формулу Рэлея.

На рис. 2 приведена принципиальная схема разработанного нами плазмохимического стенда с ФЭС для контроля ультрадисперсной пыли.

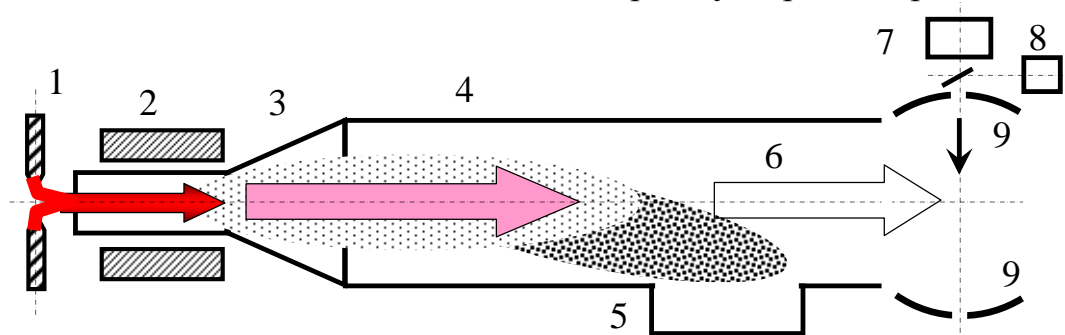
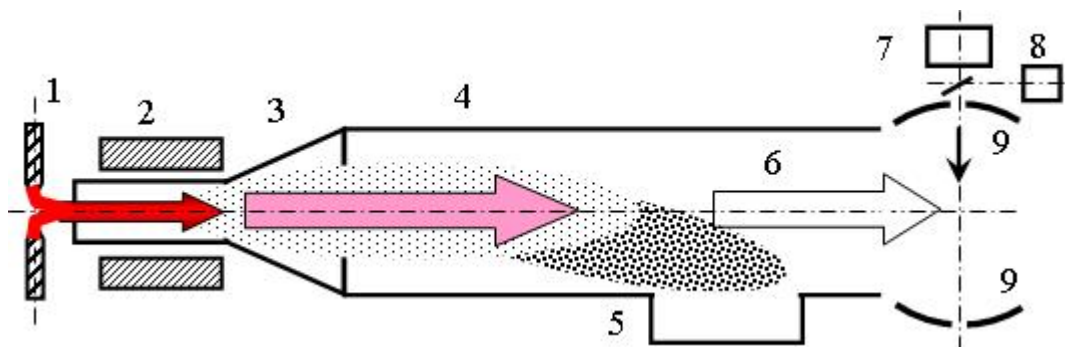


Рис. 2. Принципиальная схема плазмохимического стенда. 1 – электроды, 2 – плазмохимический реактор, 3 – узел мокрой закалки, 4 – сепаратор газовой и дисперсной фаз, 5 - бункер для порошка, 6 – газовый поток, 7 – лазер, 8 – фотоприемник, 9 – зеркала.



Известно, что индикатриса рассеяния нанодисперсных частиц имеет форму симметричную, относительно направления вперед-назад (рэлеевское рассеяние). Поэтому основная часть потока рассеянного излучения концентрируется в двух конусах с углом при вершине менее 90° в направлениях вперед и назад.

Принципиальная оптическая схема лазерного счетчика дисперсных частиц (ФЭС) приведена на рис. 3. В качестве источника монохромного излучения использован азотный лазер АИЛ-0,5 плоскость диафрагмы. Второй объектив переносит изображение диафрагмы в счетный объем. Это позволяет получить счетный объем с резкими краями, размеры которого можно точно рассчитать. Для сбора рассеянного в счетном объеме излучения служат два вогнутых кольцевых зеркала, установленных

коаксиально так, что поток зондирующего излучения беспрепятственно входит в отверстие первого зеркала, проходит счетный объем и поглощается светопоглотителем, установленным за вторым зеркалом. Рассеянное в заднюю полусферу от дисперсных частиц излучение первым зеркалом возвращается в счетный объем с небольшим отклонением от первоначального положения и проходит на второе зеркало.

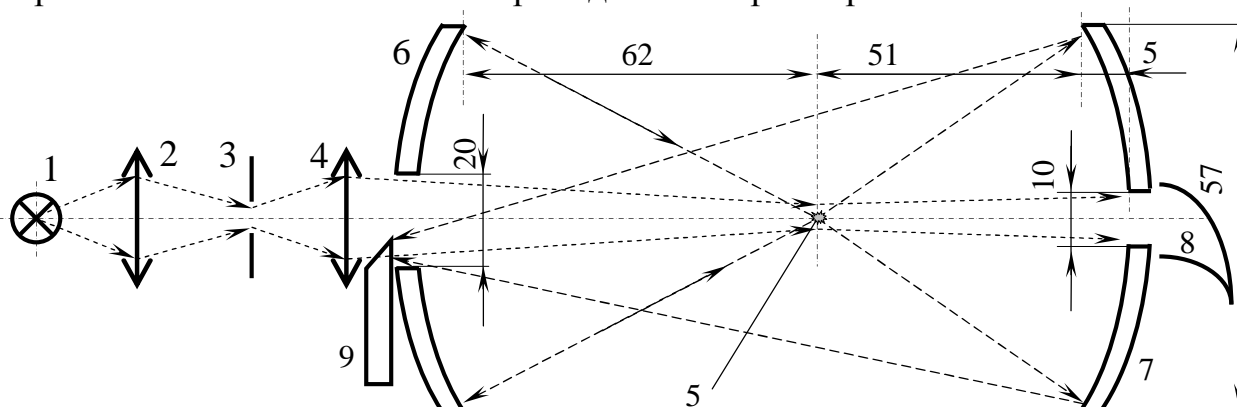


Рис. 3. Оптическая схема ФЭС. 1 - светодиод, 2, 4 - формирующие объективы, 3 - диафрагма, 5 – дисперсная частица, 6, 7 – вогнутые зеркала, 8 - рог Рэля, 9 – призмный световод.

Заднее вогнутое зеркало располагается так, чтобы изображение счетного объема формировалось со смещением вбок менее 50 мкм относительно самого счетного объема. Излучение, рассеянное в переднюю полусферу вторым зеркалом, собирается на входном торце световода, располагаемом в отверстии первого зеркала. Световод служит для передачи светового потока, собираемого зеркалами, на фотоэлектронный умножитель, работающий в режиме счета фотонов. На выходе ФЭУ наблюдаются также темновые импульсы.

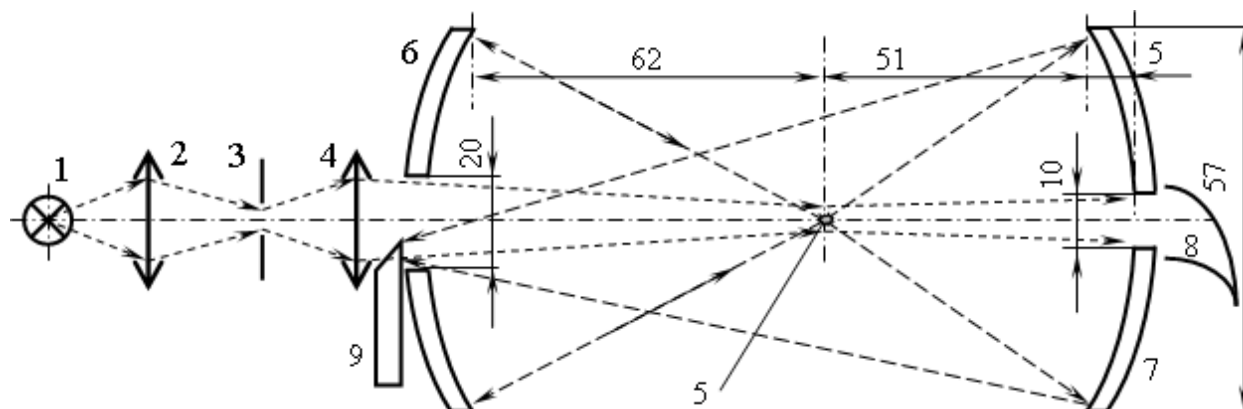
Нанодисперсная частица радиусом r_i рассеивает из зондирующего потока часть, равную $\pi r_i^2 S_p$, где r_i – радиус частицы, S_p - фактор эффективности рассеяния. Эффективность сбора рассеянной энергии равна

$$k_{эф}^i = \frac{Q_{собр}^i}{Q_{собр}^i + Q_{потер}^i} \quad (5)$$

Величина собираемого (теряемого) зеркалами потока излучения

$$Q_{собр}^i = \sum_j S_{кол}^j I^i(b_j), \quad (6)$$

где $S_{кол}^j = 2p \sin b_j L^2 \sin \Delta b_j$ - площадь кольца между двумя углами индикатрисы (L – расстояние между точкой рассеяния и зеркалом), $I^i(b_j)$ – индикатриса рассеяния частицей радиусом r_i на угол b_j .



При пролете частицы r_i величина электрического сигнала ФЭУ равна

$$U(R_i) = Const \times p \cdot r_i^2 \cdot S_p \times k_{эф}, \quad (7)$$

где $Const$ - аппаратная постоянная (чувствительность) ФЭС.

При измерениях вместо уравнения (7) можно использовать градуировочный график $r_i = Const \times f(U_i)$, получаемый экспериментально на частицах известного размеров из того же материала.

Для регистрации рассеянного света от дисперсных частиц необходимо, чтобы количество световых импульсов ФЭУ превышало количество темновых импульсов в 3 раза. Это ограничивает минимальную концентрацию углеродных кластеров, измеряемых с помощью счетчика дисперсных частиц. При этом весовая концентрация пыли, определяемая также и размерами кластеров, может быть достаточно малой и приемлемой как точки зрения экологии, так и с точки зрения степени очистки графита от радионуклида.

Оценим возможности комплектующих приборов, имеющихся в наличии, для их использования в составе счетчика дисперсных наночастиц углерода. Измерения показали, что потери в световоде не превышают 39%. Интегрирование рэлеевской индикатрисы рассеяния в пределах апертур собирающих зеркал ФЭС и учет потерь в световоде, показывает, что передаваемый на ФЭУ поток составляет не менее 17% энергии рассеянного потока зондирующего излучения.

Если предприняты меры к максимальному сбору потока рассеянного зондирующего излучения, то возможности регистрации кластеров углерода (наночастиц сажи) связаны с чувствительностью ФЭУ. Известны два режима использования ФЭУ: аналоговый и счет одиночных фотонов.

Форма и амплитуда импульсов счетчика фотонов Н8259-02 не зависят от размеров кластеров (величины рассеянного каждым кластером потока). Каждый попадающий на вход ФЭУ фотон вызывает генерацию, с вероятностью 40%, импульса тока. Каждый импульс тока, с вероятностью 90%, преобразуется в 1 выходной импульс ТТЛ длительностью 30 нс. Темновой счет имеющегося в наличии ФЭУ не превышает 115 импульсов в секунду, а максимальное количество регистрируемых фотонов – $2,5 \cdot 10^6$ за 1 секунду. При использовании непрерывного излучения ФЭУ Н8259-02

позволяет регистрировать наличие в отходящих газах, проходящих через счетный объем за 1 с, более $3 \times 115 = 345$ кластеров крупнее минимального размера, определяемого эффективностью сбора рассеянного потока и мощностью зондирующего излучения.

С учетом потерь количество фотонов, рассеиваемое кластером минимального размера для его регистрации, должно превышать $1 : (0,17 \times 0,9 \times 0,4) \approx 17$. В разработанном ФЭС при рассеянии на наночастицах 17 фотонов, ФЭУ Н8259-02 с вероятностью, близкой к единице, генерирует один ТТЛ импульс.

Сечение рэлеевского рассеяния для изотропной сферы при $r < 0,05 \lambda$

$$s_p = \frac{128 p^5 r^6}{3 I^4} \left| \frac{n^2 - 1^2}{n^2 + 2} \right|^2, \quad (8)$$

где, r - радиус пылинки, n - показатель преломления.

Оценим необходимую мощность зондирующего лазера длиной волны 0,337 мкм. ФЭУ Н8259-02 выдаст 1 ТТЛ импульс, если за время 35 нс (длительность выходных импульсов ФЭУ) будет рассеяно 17 фотонов, что может быть приравнено к мощности излучения $3,0 \cdot 10^{-10}$ Вт. Отсюда, для регистрации пылинки радиусом 10 нм ($s_p \approx 4,9 \cdot 10^{-16}$ см²) необходимо создавать в счетном объеме интенсивность зондирующего излучения $6,1 \cdot 10^5$ Вт/см², что достижимо при фокусировке излучения лазера АИЛ-0,5 (10^4 Вт, 10 кГц) в пятно площадью 1,6 мм². При фокусировке пучка также уменьшается величина счетного объема, обеспечивая необходимое условие для ФЭС - требование нахождения в счетном объеме одновременно лишь одной единственной пылинки.

В режиме накопления, в предположении равномерного распределения пылинок в потоке, может быть использован синхронный (с лазерными импульсами) прием за время 50 мкс (минимальное время стробирования ФЭУ). Оценки показывают, что при частоте лазерных импульсов 10 кГц темновой счет уменьшится до величины "1", а максимальная скорость прокачки газа, обеспечивающая непрерывный анализ газового потока, составляет 15 м/с. При величине счетного объема $\sim 0,0064$ см³ анализируемый за 1 с объем составляет 64 см³. При минимальном счете на каждый темновой импульс будет регистрироваться 1 счетный импульс от дисперсных частиц радиусом 10 нм при их концентрации в гетерогенном потоке 1 частица на 64 см³ газа. Поэтому чувствительность ФЭС к частицам $r > 10$ нм - 16 част./л. Минимальная весовая концентрация при $S/\Pi = 1$ составляет $3 \cdot 10^{-14}$ г/м³, а максимальная концентрация, обеспечивающая раздельное детектирование частиц (1 импульс лазера – 1 частица) – $3 \cdot 10^{-10}$ г/м³.

При использовании ФЭУ Н8259 информация о размерах кластеров теряется.

Размеры кластеров могут быть оценены с помощью ФЭУ, сигналы

которого пропорциональны величине собираемого оптической системой потока излучения. Наиболее распространенный ФЭУ 1P28, используемый в аналоговом режиме, имеет катодную чувствительность 48 мА/Вт (анодная чувствительность – $4,8 \cdot 10^5$ А/Вт, квантовая эффективность 21%) и темновой ток менее 7 нА. При регистрации темновых импульсов 1P28 при $U_{\text{п}} = 15,0$ В и $U_{\text{см}} = 4,9$ В на осциллографе Tektronix TDS 2024В с нагрузкой 75 Ом количество импульсов длительностью 10 нс и уровне дискриминации 110 мВ не превышает 10, 80 мВ – 70, 30 мВ – 600, 10 мВ – менее 2300. Уменьшение уровня запуска менее 10 мВ не сопровождается увеличением количества импульсов.

Оценим сигнал ФЭУ 1P28 от частиц радиусом 20 нм при зондировании азотным лазером 10^4 Вт: ($U = I \times R_{\text{н}}$) $1,9 \cdot 10^{-8} \times 0,21 \times 4,8 \cdot 10^5 \times 75 \approx 144$ мВ. Частицы сажи размерами более 20 нм могут быть выявлены, если их содержание в объеме 64 см^3 будет превышать $3 \times 10 = 30$. При использовании аналогового ФЭУ ограничения по максимальной концентрации нет, так как при большой концентрации дисперсных частиц ФЭУ переходит в режим регистрации тока. При этом сигнал ФЭУ пропорционален массовой концентрации дисперсных частиц.

Заключение. Рассмотрены технологические аппараты и методы улавливания пыли, а также приборы и методы контроля параметров гетерогенных систем. Разработан и апробирован счетчик дисперсных частиц. Показано, что счетчик частиц позволяет регистрировать наличие дисперсной фазы при массовой концентрации более $3 \cdot 10^{-14} \text{ г/м}^3$ и оценивать размеры пылинок.

Литература

1. Хан В.А., Мышкин В.Ф., Власов В.А. и др. Особенности фотохимических процессов при разделении изотопов в водном растворе // Научный журнал КубГАУ, 2007. - №32(8).
2. Мышкин В.Ф., Хан В.А., Борисов В.А. Кемельбеков Б.Ж. Разработка метода разделения изотопов углерода с магнитными и немагнитными ядрами // Научный журнал КубГАУ, 2010. - №61(07).
3. Бучаченко А.Л. Новая изотопия в химии и биохимии. Ин-т проблем хим. физики РАН. – М.: Наука, 2007. – 189с.
4. Хан В.А., Власов В.А., Мышкин В.Ф. и др. О возможности использования микроволнового и лазерного излучений для интенсификации плазмохимических реакций // Научный журнал КубГАУ, 2008. - №41(07).
5. Minaev V.F., Minaeva V.A. MCSCF response calculations of the excited states properties of the O_2 molecule and a part of its spectrum // Phys. Chem. Chem. Phys., 2001. – 3.- S.720-729.
6. Quint W. The g-factor of the bound electron in highly charged ions and the electron mass // Bothe-Kolloquium MPI-K Heidelberg, Oct. 4, 2006.
7. Керимкулов М.А., Очкин В.Н., Савинов С.Ю. и др. Наблюдение обратного изотопического эффекта при плазмохимическом разложении углекислого газа // Письма в ЖЭТФ. - Том 54. - Вып. 4. - С.212-215.

8. Афанасьев Д.В., Баранов Г.А., Богданов А.А. и др. Обогащение фуллеренов изотопами ^{13}C // Письма в ЖТФ. – 1999. - Т.25. – Вып.18. - С.12-18.
9. Федосеев Д.В., Галимов Э.М., Варнин В.Н. и др. О фракционировании изотопов углерода при синтезе алмаза из газа // Письма в ЖЭТФ, 1971. - Т.11. - С.80-82.
10. Бубненко И.А., Виргильев Ю.С., Губин К.В. и др. Особенности графитации углерода на основе изотопа ^{13}C // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2010. - Т.53. - №.10. - С.64-68.
11. ГОСТ 17.2.4.05-83 Атмосфера. Гравиметрический метод определения взвешенных частиц пыли.
12. Бретшнайдер Б. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль: Пер. с англ. / Б. Бретшнайдер, И. Курфюрст. Под ред. А.Ф. Туболкина. – Л.: Химия, 1989. - 288с.
13. http://www.chemport.ru/chemical_encyclopedia_article_3186.html
14. http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geolog/4204.
15. МУК 4.1.2468-09 Методы контроля. Химические факторы. Измерение массовых концентраций пыли в воздухе рабочей зоны предприятий горнорудной и нерудной промышленности.
16. http://www.ecros.ru/products/stations/prod_stations_analizpily.html.
17. <http://granat-e.ru/prima.html>.
18. http://www.kvazar-ufa.com/?part_id=280,310,373&goods_id=326.
19. http://dustmonitors.ru/analizator_pyli_dt990.
20. <http://www.transformator-prb.ru/descriptions/dvp-02>.
21. Калечиц В.И., Маслаков О.Ю. Контроль аэрозольных микрозагрязнений. Методические указания // Институт информационных технологий РИЦ «Курчатовский институт». – 2009.
22. <http://www.fluke.com/fluke/ruru/HVAC-IAQ-Tools/Air-Testers/Fluke-983.htm?PID=56157>.
23. Романченко С.Б. Оптические пылемеры с инфракрасными измерительными головками.// Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск Аэрология.- 2007.
24. <http://www.ormet.ru/info.php?id=0206502>.
25. <http://www.ormet.ru/info.php?id=0206005>.
26. <http://www.biolight.ru/item.php?id=0000288>.
27. http://www.ecmoptec.ru/device/cat_device_id/93.
28. <http://www.ppm-systems.ru/catalognew/?pid=0741e5ea&id=dee4f72a>.
29. http://www.sick-rus.ru/prod_dust_sb50.html.
30. http://www.sick-maihak.ru/prod_dust_t200.html.
31. <http://www.techob.ru/?act=devices&id1=409>.
32. http://www.eurolab.ru/pylemer_lpi04.
33. http://www.deo-dv.ru/catalog/ventilyatsionnoe-oborudovanie/pyleulavl-ivayushchie-i-filtratsionnye-agregaty-filtry-tsiklony/filters_burst_1.pdf
34. Рыжков С.С., Басок Б.И. Экологические ресурсосберегающие технологии для промышленной теплотехники на основе дисперсных двухфазных сред // Промышленная теплотехника.- 2001.- Т.23. - №4-5. - С.141-145.
35. Рыжков А.С. Исследование улавливания аэрозолей в неизотермических гидродинамических коагуляторах типа трубы Вентури // Промышленная теплотехника, 2004. - Т.26. - №6. - С.65-69.
36. Сугак Е.В., Войнов Н.А., Степень Р.А., Житкова Н.Ю. Очистка промышленных газов от газообразных и дисперсных примесей // Химия растительного сырья. - 1998. - №3. - С.21–34.

37. Исаков В.П., Сугак Е.В. Конденсационный центробежный сепаратор // Промышленная и санитарная очистка газов. 1982. - № 6. - С.2-4.
38. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М., 1987. - 588с.
39. Амелин А.Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. М., 1972. - 303с.
40. Ужов В.Н. и др. Очистка промышленных газов от пыли. М., 1981. - 392с.
41. Шопин В.М. / Тр. VIII межд. науч.-практ. конф. «Химия-XXI век: новые технологии, новые продукты», Кемерово, - 2005. - С.271-274.
42. Шопин В.М., Исаков В.И. / В сб.: Пути развития промышленности технического углерода. М., 1978. - С.136-145.
43. Ужов В.Н., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов фильтрами. М.: Химия, 1970. - 320с.
44. Ерохина В.С., Луговская Е.К. Производство технического углерода и охрана окружающей среды. М., 1987. - С.36-41.
45. Черняков А.Л. // Коллоидный журнал, 2005. - Т. 67. - № 5. - С.709-717.
46. Хан В.А. Разработка фотоэлектронного счетчика для регистрации индикатрисы рассеяния с высоким угловым разрешением // Научный журнал КубГАУ, 2006. – №05(21) - С.230 – 237.