

## ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

## 3.3. Свойства золошлаков

## 3.3.6. Применение приборных комплексов Kamika для исследования фракционного состава угольной пыли и золы, и измерения запыленности уходящих газов ТЭС

*Д. Каминска, С. Камински, KAMIKA Instruments, Варшава, Польша*

## АННОТАЦИЯ

Каждый технолог, ратующий за точность определения фракционного состава угольной пыли, золы, известковой муки и синтетического гипса, должен учитывать количество времени, необходимое для проведения таких измерений и их частоту для контроля проводимого им процесса сжигания угля или обессеривания уходящих газов. Обычно такие измерения по определению фракционного состава материала, применяемого в технологическом процессе, выполняются время от времени, полагая, что угольная пыль либо известковая мука обладает стабильным размером зерен. Однако, это не всегда соответствует действительности. Кроме того, проводимые в данный момент измерения всегда запаздывают по времени. Результаты измерений получают после расходования сырья, и провести какую-либо корректировку фракционного состава уже невозможно.

Представленную выше ситуацию можно изменить, используя современные методы измерения, которые могут в лабораторных условиях контролировать фракционный состав используемого сырья в реальном времени и помогать выработать решения о пригодности сырья для дальнейшего производства или способности угольных мельниц продолжать дальнейший размол.

Таковыми приборами являются оптико-электронные измерительные устройства, которые с помощью применяемого метода „Elsieve” могут симулировать измерения по методу ситового или ареометрического анализа, причём, с более высокой точностью, чем с помощью классических ручных методов, к тому же во много раз быстрее. Почему это возможно? Потому, что эти приборы проводят измерения автоматически, регистрируя и пересчитывая результаты без участия человека. Первичные измерения регистрируются на 4096 виртуальных ситах и в соответствии с данными, полученными на этих ситах, обобщаются на нескольких контрольных ситах. Результаты лабораторных измерений могут быть переданы в форме электронного документа по интернету или по собственной сети компании в любое место.

Нужно подчеркнуть, что каждый отдельный анализатор в соответствии с программным обеспечением может использоваться вместе с классическими методами измерений посредством механических сит, дополняя результаты этих измерений и расширяя измерительный диапазон даже там, где ситовые измерения недоступны.

Некоторые анализаторы построены таким образом, что могут сканировать в двухразмерном или трёхразмерном пространстве каждое зерно и затем определять его форму, которая влияет на реактивность данного порошкообразного вещества в технологическом процессе.

В Польше популярным является производство газобетона на основе золы ТЭС. Для контроля удельной поверхности молотой золы, используемой при производстве газобетона, применяются оптико-электронные измерительные приборы.

## ОБЗОР ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ

Оптические методы измерения размеров твёрдых частиц можно разделить на методы, в которых используется:

- 1) Дифракция Фраунгофера [1];
- 2) Измерение в оптической фокусной точке [2];
- 3) Измерение в параллельном пучке излучения в проходящем свете [3];

1. Принцип измерения, в котором используется дифракция Фраунгофера, состоит в применении преломления лазерного излучения частиц и регистрации угла отклонения этого излучения на экране, оснащённом детекторами. Интенсивность освещения для определённых углов отклонения свидетельствует о распределении размеров частиц. Это довольно примитивный, аналоговый метод измерения с небольшим диапазоном динамики измерения. Этот метод даёт достоверные результаты лишь при измерении частиц сферической формы.

2. Принцип измерения в оптической фокусной точке состоит в измерении степени рассеивания света или измерении интенсивности света отражённого частицами, проходящими через фокусную точку оптических систем: освещающей и получающей излучение. В таком случае измерение происходит на малой поверхности измерительного пространства, ввиду определённых размеров оптического фокуса. Если в эту малую поверхность не попадает вся частица, то результат измерения оказывается ложным. Суммарный результат, относящийся к полному сечению потока массы, есть кратность поверхности оптического фокуса в отношении к сечению измерительного расхода газа и умножается на число от 200 до 500, что может быть источником дополнительных больших ошибок.

3. Принцип измерения в параллельном пучке излучения сводится к созданию больших измерительных плоскостей с одинаковой чувствительностью в каждой их точке, ограниченной лишь расстановкой и диаметром оптических систем. Частица, проходящая через измерительную плоскость, вызывает рассеивание потока излучения пропорционально ее размеру.

Метод измерения в параллельном пучке излучения не имеет недостатков по сравнению с упомянутыми ранее методами и используется в анализаторе IPS.

Для упомянутых выше методов можно применять лазерное и инфракрасное излучение. Длины волн излучения лазерных диодов и диодов, работающих в коротковолновом диапазоне, близки по своим значениям и составляют от 600 до 900 нм. Длина 900 нм близка к максимальной чувствительности фотодиодов.

Для оптических систем, использующих геометрическую оптику, необходима однородность интенсивности потока излучения, так как это обеспечивает однородность чувствительности в данном измерительном пространстве.

Из проведенного просмотра следует, что важной компонентой оборудования для измерения зернистости материалов является источник света. В настоящее время существует много различных лазерных диодов, генерирующих когерентный и сконцентрированный поток излучения, но эти диоды непригодны для применения в геометрической оптике. Очень трудно получить поток лазерного излучения с одинаковой интенсивностью в каждой его точке. Очень трудно создать лазерный свет с одинаковой интенсивностью.



Рис. 1. Неравномерное распределение лазерного света.

Такая интенсивность света проиллюстрирована на рис. 1, где на фоне щели с лазерным светом нарисована частица размером в 40 мкм. Измерение упомянутой частицы в различных местах этой щели методом рассеиваемого света даёт разные результаты измерений. При использовании «лазерной дифракции» результаты также будут разные. Это является следствием геометрии излучения лазерного диода и установки диода относительно щели.

Значительно более удачным источником для геометрической оптики является инфракрасный диод (ИК диод).

Излучение ИК диода более равномерно, чем излучение лазерных диодов.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ ДАТЧИКА IPS

Измерительная система IPS (Infrared Particle Sizer) функционирует на основе датчика частиц, представленного на рис. 2, построенного из источника световой энергии – диода, работающего в коротковолновом ИК диапазоне (1), системы линз и диафрагм (А, В), устанавливающих измерительную поверхность (2), а также фотодиодного детектора (3) с электронным узлом (4) предварительной обработки сигнала.

Измерительное пространство формируется оптическим узлом таким образом, что его площадь значительна в сравнении с размерами измеряемых частиц. Такое формирование и равномерная чувствительность по всей поверхности обеспечивают полное устранение краевых погрешностей и одинаковое обнаружение всех частиц.

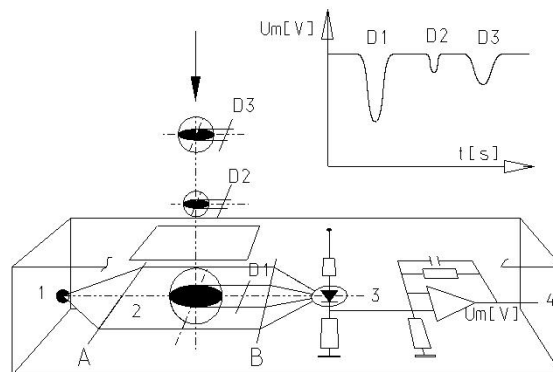


Рис. 2. Метод измерения частиц

Известно уравнение, описывающее зависимость между диаметром частицы и амплитудой электрического импульса. Учитывая характеристику преобразования светового потока на электрический сигнал в электронном узле, получается измерительная характеристика, выраженная в физических единицах (микронах), с нелинейностью в диапазоне малых диаметров анализируемых частиц. Для создания такой системы пригодны произвольные источники излучения с устойчивой и равномерной характеристикой излучения. Оказалось, что лазерный диод для таких точных исследований непригоден.

### СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

#### Измерение в соответствии со сферической калибровкой

Существует строгая зависимость между максимальным размером зерна и амплитудой электрического импульса на выходе из измерительного датчика. Измеренные и подсчитанные импульсы позволяют однозначно, точно и повторяемым образом определить множество зёрен в электрических единицах, то есть в каналах преобразователя, которые можно записать в память компьютера. Размер частицы в электрических единицах является одновременно номером канала. Полученные результаты калибруются с помощью сферических эталонов. После калибровки получают действительные размеры частиц. Чтобы перейти от количественных распределений к объёмным, частицу данного размера вписывают в сферу. Объём сферы всегда больше объёма действительной частицы, в силу чего весовые распределения шарообразных частиц, описанных на действительных размерах частиц, будут все-

гда однозначно больше, чем ситовые распределения тех же самых частиц.

### Метод ELSIEVE [4]

При разработке новых измерительных методов, которые могут обладать более высокими точностью и быстродействием, а также более широким диапазоном измерений, необходимо обратить внимание на преимущество результатов старых и новых методов. Новый метод измерения должен быть всегда сравнимым со старым, если измерение, проводимое старым методом является правильным. Результаты измерений множества частиц, получаемые с помощью оптико-электронных методов, должны симулировать применяемые в настоящее время измерения по методу механических сит.

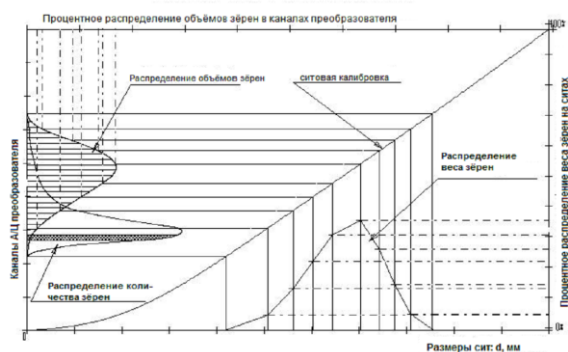


Рис. 3. Ситовая калибровка оптического прибора. Переход от виртуальных электронных сит к механическим ситам.

Во всех оптико-электронных приборах компании Катіка используются такие симуляции в соответствии с методом Elsieve, в котором применяются цифровые методы измерений только одного размера частицы, записанного в памяти компьютера с помощью каналов А/Ц преобразователя.

Каналы преобразователя соответствуют 4096 виртуальным ситам. Множество зёрен, записанное в памяти компьютера в форме статистического распределения количества и размера, после пересчитывания на объёмное распределение можно сравнить с действительными измерениями по методу механических сит.

Как показано на рис. 3 на основе приведенного выше сравнения можно получить характеристику, которая будет ситовой калибровкой оптико-электронного измерительного прибора.

Калибровка относится к определённому материалу, состоящему из типичных по форме зёрен, но отличающихся по размеру.

В случае другого типа формы зёрен необходимо составить другую калибровку и создать библиотеку ситовых калибровок.

Из библиотеки таких калибровок, записанных в компьютере, можно выбрать самую подходящую и пересчитать статистически на действительные размеры распределение частиц, записанное в электри-

ческих единицах и составить подробную симуляцию ситовых измерений.

### Метод 2DiSA определения формы частицы [5]

Продолжая прежние рассуждения и принимая соответственно, что существует строгая зависимость между минимальным размером зерна и шириной электрического импульса, зная при этом два взаимно перпендикулярных размера, рассчитанные в соответствии со сферической калибровкой, можно определить дополнительный коэффициент формы частицы, равный отношению максимального размера к минимальному.

Для получения коэффициента формы необходимо выполнить несколько основных условий:

- 1) Должна быть увеличена с 500 кГц до 12 МГц частота измерений или сканирования частиц. Увеличение частоты в 24 раза предоставило возможность увеличения точности измерения ширины.
- 2) Измерять скорость продвижения частицы в измерительном пространстве для того, чтобы обеспечить независимость измерений в переходном состоянии прибора (разгон или другие регулировки компрессора).
- 3) Учесть при пересчёте удельный вес частиц, используемых при градуировке прибора и во время текущего измерения.
- 4) Учесть влияние калибровки метода Elsieve на изменение действительных размеров частицы. Ширина импульса однозначно определяет наименьший размер частицы, т.е. её толщину (рис. 4).

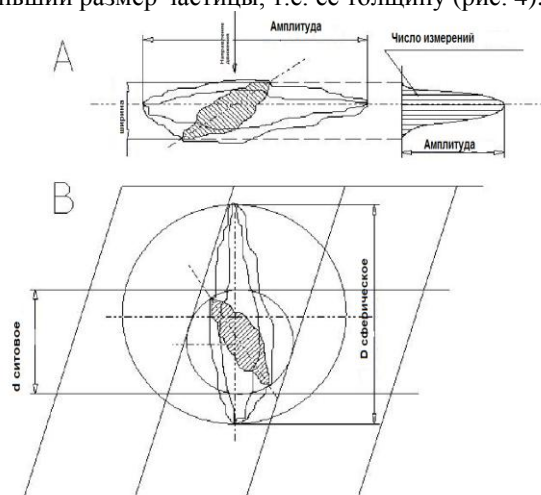


Рис. 4. Сравнение методов измерения

А. оптико-электронное измерение

В. ситовое измерение

Коэффициент формы

$K_f = (\text{Амплитуда} / \text{ширина}) \text{ импульса}$

### АНАЛИЗАТОР IPS UA

Прибор IPS UA служит для измерения в лабораторных условиях содержание твердых частиц в воздухе независимо от их физических и химических свойств.

В анализаторе IPS нет оптических ограничений для измерения одиночных малых и больших частиц.

Каждой частице соответствует электрический импульс, величина которого пропорциональна размеру частицы.

В анализаторе IPS для разделения частиц в процессе дозирования применен ультразвуковой дозатор.

Для точной дозировки необходимо также управление потоком протекающего воздуха, который поднимает разделенные ранее частицы и транспортирует их в измерительную зону.

Для больших частиц от нескольких мкм до 2 мм применяется дозатор с изменяемым потоком воздуха и с изменяемой геометрией дозатора.

В работе очень широко применяются разнообразные программы анализатора IPS. Кроме измерительной программы предлагается программа оптимизации любого параметра, как функции грануляции.

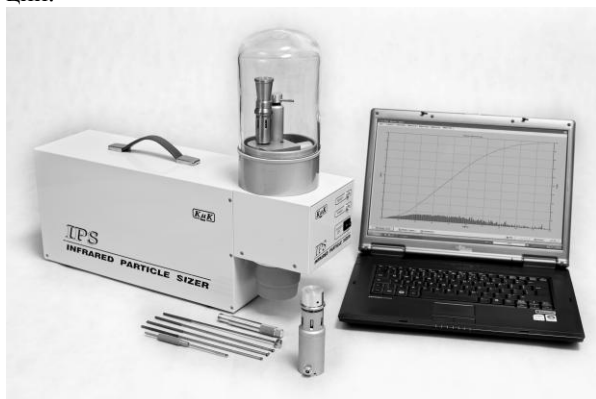


Рис. 5. Анализатор IPS UA

### Дозирование частиц в оборудовании IPS

Дозирование частиц, в частности в воздушной среде, является результатом многих факторов, составляющих сам процесс дозирования, а также физико-химических свойств дозируемого материала. Решение, принятое в системе IPS, основано на предпосылке непрерывного контроля процесса дозирования по ходу измерения, путём сохранения почти постоянной интенсивности частиц в измерительном пространстве.

На рис. 6 схематично показан способ дозирования в системе IPS. Частицы материала, подлежащего анализу, засыпаются с помощью специального пробоотбирателя в ёмкость дозатора (6), который начинает вибрировать в результате стимулирующего действия со стороны взаимозависимой (сопряжённой с ним) ультразвуковой вибрационной системы, работающей с разрешающей способностью 16000000.

Применяются также аэродинамические дозаторы (6), представленные на рис. 7, для дозирования более крупных частиц до 2 мм. В обоих типах доза-

торов используется та же самая управляющая система, представленная на рис. 6.

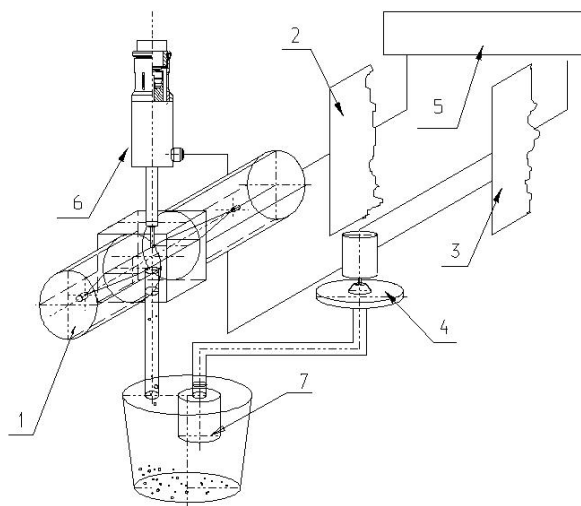


Рис. 6. Измерение и управление в системе IPS

Измерительно-управляющая система состоит из датчика частиц (1), соединённого с компьютером (5) посредством измерительной системы (2). Из компьютера (5) поступают сигналы к дозатору (6) и компрессору (4) посредством управляющей цепи (3). Вся система IPS работает по принципу замкнутого контура с обратной связью. Параметры управления могут меняться до 50 раз в секунду. Ёмкость дозатора также является включённой в контур системы всасывания, у которой высота впускного окошка „h” регулируется автоматически в процессе дозирования. Частицы из ёмкости всасываются во впускное окошко и затем в струе воздуха продвигаются через измерительное пространство прибора, а затем осыпаются на дно танка либо останавливаются на фильтре компрессора (7).

Компрессор управляется с помощью специальной электронной системы с измерительным контуром. Существенным свойством дозирования такого вида является его полная управляемость посредством измерительной системы. В данный момент используется только один из дозаторов.

Число частиц, проходящих через измерительное пространство в единицу времени, определяемое термином «концентрация частиц», поддерживается автоматически на уровне, обеспечивающем эффективное измерение и одновременно минимальные погрешности перекрытия. Решение, реализованное в IPS, характеризуется тем, что существует возможность управления процессом дозирования в очень широких пределах.

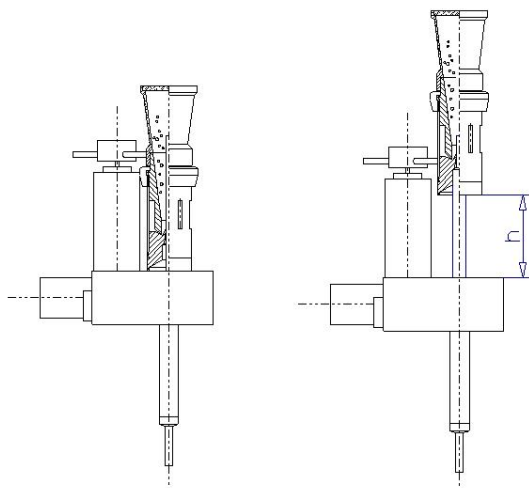


Рис. 7. Принцип работы аэродинамического дозатора

### ПЫЛЕМЕР IPS K

В связи с постоянно уменьшающейся концентрацией пыли в выхлопных газах типичные гравиметрические пылемеры становятся менее пригодными в сравнении с оптико-электронным оборудованием, которое обеспечивает возможность измерения (обнаружения) и подсчёта массы одиночных частиц. С использованием некоторых опробованных компонент используемых до сих пор гравиметрических пылемеров, был разработан анализатор IPS K – электронный пылемер, который полностью симулирует работу гравиметрического пылемера в условиях низкой концентрации.

Анализатор IPS K строго выполняет, в отношении метода получения выборки частиц и сравнительно для расчёта массы, требования стандартов PN-Z04030-7 и ISO 9096 для измерений низких концентраций. Кроме того, анализатор имеет сертификат CE. С помощью анализатора можно в соответствии со стандартом EN 481 определить распределение взвешенной пыли PM 10, PM 2,5.

Исполнение анализатора основывается на стандарте ISO 10012-1, относящемся к обеспечению качества измерительного оборудования.

Анализатор калибруется сферическими частицами в соответствии со стандартами и аттестатами компании Thermo Scientific, США.

Анализатор IPS в исполнении K [7] является оборудованием онлайн, используемом для измерения пыли PM 10 и PM 2,5 в выхлопных газах или воздушных каналах независимо от их физических и химических свойств

Принцип работы анализатора IPS состоит в получении частиц из струи газа и проведении измерения аналогично, как в предыдущем приборе. После завершения измерения данной выборки результаты представляются в форме статистических параметров множества, а также распределений различных свойств частиц.

Анализатор состоит из измерительного датчика, с которым интегрально связана электронная систе-

ма автоматического регулирования получением выборки газа по изокINETическому принципу.

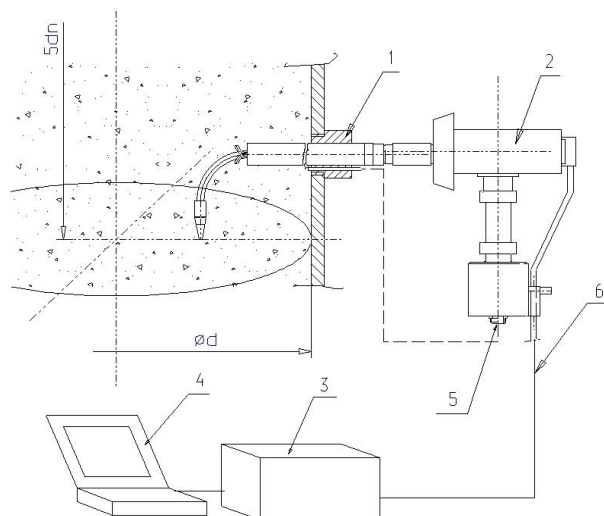


Рис. 8. Исследование концентрации пыли с помощью IPS K

Исполнительным элементом в системе дозирования является миниатюрный компрессор.

Перед измерительным датчиком находится система измерения расхода воздуха, которая обеспечивает определение концентрации частиц во всасываемом воздухе.

Измерение объёма воздуха происходит путём суммирования мгновенных значений расхода с точностью 0,4%. При расчёте значений расхода учитывается влияние температуры.

На рис. 8 представлена измерительная система IPS K. Измерительный зонд (2) оснащён кольцом (1) для крепления его в исследуемом канале. Зонд (2) соединён с электронной схемой управления (3) с помощью 25-жильного кабеля (6) длиной 10 м.

Обработанные цифровыми методами измерительные сигналы передаются по интерфейсу USB в компьютер (4).

Когда давление в канале отличается от атмосферного, тогда рекомендуется соединить выходное отверстие компрессора (5) с входным отверстием канала, который находится в кольце (1).

У входного отверстия частицы находятся противостоящие впускные концы трубок, которые измеряют скорость несущего частицы газа. Вследствие этого, путём соответствующего всасывания обеспечивается изокINETический отбор частиц в анализатор.

### Способ измерения

Схема измерительного зонда представлена на рис. 9.

Для обеспечения изокINETического отбора выхлопных газов через входное отверстие (1) производится измерение скорости газа с помощью трубки Пито (8). ИзокINETическая скорость во впускном отверстии (1) определяется на основе уравнения непрерывности после измерения расхода на

трубке Вентури (2) и сравнении с результатом измерения трубкой Пито (8).

Измеряемые частицы транспортируются через входное отверстие (1) а струе всасываемых выхлопных газов. После перехода через измерительную трубку Вентури (2) и измерительную зону датчика (5) частицы отводятся по каналу (10) через фильтр (11) и компрессор (12) снаружи от измерительной системы.

В кожухе (3) находятся датчики для измерения влажности и температуры, а также фильтр воздуха, всасываемого извне и защищающего оптику. Удли-

нённая часть зонда соединяется с головкой (6) с помощью резьбового соединителя (4). В головке (6) находятся электронные схемы для измерения скорости дымовых газов с помощью трубок (8), а также датчики для измерения расхода газа с помощью трубки Вентури (2). Электропроводы подводятся к головке (6) посредством разъёма (7). Кроме того, анализатор оснащён термопарой (9) для измерения температуры в исследуемом канале. Электронные измерительные сигналы и сигналы управления компрессором (12) передаются посредством разъёма (7).

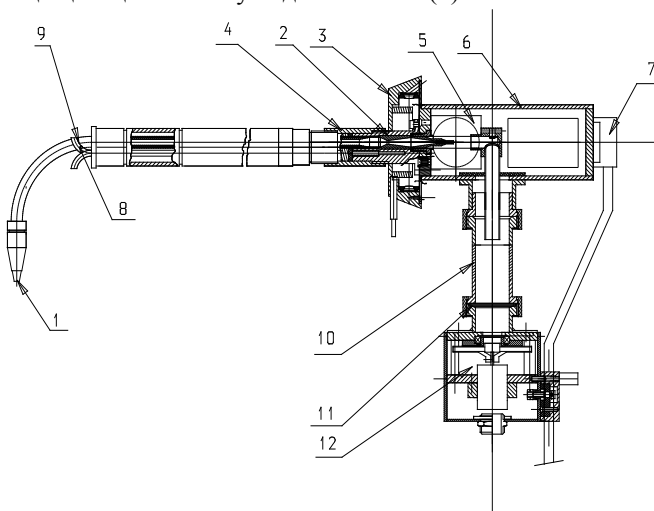


Рис. 9. Конструктивная схема измерительного зонда IPS K

Обрудование анализаторов охватывает: три входных сопла, которые можно произвольным образом заменять после снятия впускного конуса (1), пять дроссельных шайб чистого воздуха, которые можно заменять после снятия кожуха (3) фильтра.

Соответствующим подбором впускных сопел и дроссельных диафрагм можно обеспечить применение пылемера в широких пределах параметров измерения.

Применение стандартного фильтра (11) диаметром 50 мм предоставляет дополнительную возможность гравиметрического измерения согласно стандарту PN EN 13284-1.

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ДИАПАЗОН СИСТЕМЫ IPS K

- Размер измеряемых частиц от 0,5 до 300 мкм.
- Неравномерность чувствительности измерительной поверхности 2,5%.
- Скорость подсчёта до 10000 частиц в секунду.
- Число размерных классов – 256 с автоматическим разделением на PM 10 и PM 2,5.
- Длина зонда 1000 мм.
- Измерение скорости дымовых газов от 1 до 30 м/с.
- Измерение объёма всасываемых дымовых газов.
- Измерение концентрации твёрдых загрязнений в пределах от единиц до 5 мг/м<sup>3</sup>.

- Измерение влажности и температуры выхлопных газов, а также температуры прибора.
- Время измерений управляется при помощи клавиатуры.

Измерение перечисленных выше параметров можно наблюдать в режиме реального времени на экране дисплея.

После проведения единичных измерений и обнаружения средней представительной точки концентрации пыли можно приступить к измерениям в режиме мониторинга.

Измерение в режиме мониторинга проводится в течение заданного времени, например, 15 минут, и результат этого измерения сохраняется в компьютере, а система переходит к следующему измерению, увеличивая на единицу номер измерения. После заданного времени, например, одной недели или месяца, результаты мониторинга можно анализировать в сводной ведомости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ISO 13320** Particle Size Analysis – Laser diffraction method (Анализ размеров частиц – метод лазерной дифракции) . ISO 2009.
2. **Model 3321** Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer (Аэродинамический прибор для измерения размеров частиц – спектрометр), TSI Instruction Manual (пособие по эксплуатации), 2004.
3. **Каминьски С., Каминьска Д.** Сравнение опико-электронных методов измерения зернистости // Изда-

тельство Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, Польша, г. 2007, том 12, № 2, стр. 85

4. **Патент Республики Польша № 205738**, Метод определения содержания зерновых фракций сыпучих материалов, в частности минеральных материалов, 2006 г.
5. **Каминьски С.**, Двухразмерный анализ зернистости пепла // Конференция в г. Закопане, *Popioły z energetyki* (Пепел из электростанций) Польша 2011 г., стр. 19-21.
6. **Патент Республики Польша № 169704**, Дозатор сыпучих материалов, 1996
7. **Райчик Р.**, Эмиссия микрочастиц в процессе сжигания биомассы в циркулирующем кипящем слое // кандидатская диссертация, научный руководитель доктор

т.н. профессор В. Новак / Факультет Инженерии и Защиты Окружающей Среды, Политехника в г. Ченстохова, Польша, 2006.

**Д. Каминска, С. Камински.** Применение приборных комплексов Kamika для исследования фракционного состава угольной пыли и золы, и измерения запыленности уходящих газов ТЭС. Материалы IV научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 19–20 апреля 2012 г. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012. С. 78 – 84.