

А. П. КЛИМЕНКО
В. И. КОРОЛЕВ
В. И. ШЕВЦОВ

Б. 02.5
БС9.4
К492

НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ



M17644

КНЕВ
«ТЕХНИКА»
1980

ББК 38.762.2
6С9.4
К49

Шахтинская ЦЭС
Ростовской области

К 30102-092 63-80 2203000000
М202(04)-80

© Издательство «Техника», 1980

ПРЕДИСЛОВИЕ

Коммунистическая партия и Советское правительство уделяют исключительно большое внимание защите окружающей среды от загрязнения вредными веществами. В Постановлении Центрального Комитета КПСС и Совета Министров СССР «О дополнительных мерах по усилению охраны природы и улучшению использования природных ресурсов» от 1 декабря 1978 г. сказано, что охрана природы в условиях быстрого развития промышленности, транспорта, сельского хозяйства и вовлечения в эксплуатацию все большего количества естественных ресурсов является одной из важнейших экономических и социальных задач Советского государства. В решениях XXV съезда КПСС и в Конституции СССР указано на необходимость дальнейшей разработки и осуществления мероприятий по охране окружающей природной среды и рациональному использованию ее богатств. В настоящее время существует*

* Сборник постановлений СССР, 1979, № 2.

достаточно технических средств, позволяющих значительно снизить содержание пыли в выбросах промышленных предприятий. Важное место в борьбе за чистоту воздушного бассейна занимает непрерывный контроль выбросов, осуществляемый на промышленных предприятиях. Такой контроль позволяет проанализировать ситуацию на промышленных предприятиях и наиболее рационально решить задачи, связанные с необходимостью выполнения требований по борьбе с загрязнениями воздушного бассейна. Промышленный пылевой контроль выбросов дает возможность вскрывать основные закономерности выделения пыли предприятием, находить оптимальные режимы работы пылеочистного оборудования, изучать влияние различных факторов на эффективность пылеочистки; выработать рекомендации по применению наиболее эффективных средств очистки; оперативно предупреждать о неполадках в работе пылеочистного оборудования систематизировать и критично проверить допустимых норм по выбросам; прогнозировать значения выбросов в зависимости от состояния очистного оборудования. В книге рассматриваются вопросы, связанные с решением задачи осуществления непрерывного пылевого контроля на промышленных предприятиях. Отзывы о книге просим направлять по адресу: 252601, Киев, 1, ГСП, Крещатик, издательство «Техніка».

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ

ПЫЛЕВЫЕ ВЫБРОСЫ ПРЕДПРИЯТИЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Быстрый рост химической промышленности привел к резкому увеличению количества выбрасываемых в атмосферу веществ, загрязняющих атмосферный воздух и наиболее опасных для здоровья человека. Преобладают органические вещества, которые по своим физико-химическим свойствам являются летучими и легко распространяются в окружающей среде. Среди них есть и такие, с которыми человек контактирует впервые. Кроме того, довольно часто образуются вторичные химические вещества, более вредные, чем первичные [61].

Развитие работ в химической промышленности по охране воздушного бассейна осуществляется путем разработки и внедрения на вновь вводимых объектах более совершенных технологических процессов, создания новых методов очистки вредных выбросов и утилизации отходов, уменьшения вредных выбросов действующих производств в результате их реконструкции и закрытия устаревших объектов.

В системе Минхимпрома введены в действие около 200 крупных сооружений по охране природы общей мощностью 610 млн. м³ [26]. На строительство очистных сооружений и других природоохранных объектов затрачено 730 млн. руб. только централизованных капитальных вложений. Успешно эксплуатируются крупные комплексы очистных сооружений, суточная производительность которых составляет, например, в Могилевском производственном объединении

«Химволокно» 150 тыс. м³, Волгоградском производственном объединении «Каустик» — 130 тыс. м³, Черкасском производственном объединении «Азот» — 80 тыс. м³.

Для предотвращения загрязнения окружающей среды вредными выбросами химической промышленности требуются значительные затраты. Так, в США компанией «Чиврон Кэмикл» на заводе по производству удобрений затраты на очистку и усовершенствование основных технологических производственных процессов с целью уменьшения выбросов достигли 1,5 млн. долл., т. е. около 50% от общей стоимости завода. В ФРГ ежегодные капитальные вложения на охрану окружающей среды в химической промышленности составляют приблизительно 1,5 млрд. марок, а эксплуатационные затраты — 2 млрд. марок [56].

Пылевые выбросы предприятий по производству минеральных удобрений. Промышленность минеральных удобрений является одной из крупнейших отраслей народного хозяйства. Производство минеральных удобрений непрерывно растет. Так, ожидается увеличение выработки минеральных удобрений и фосфорного сырья к 1990 г. в два-три раза [25].

Химической промышленностью вырабатываются фосфатные, азотные, калийные, сложные и микроудобрения. Большое количество пыли выделяется при транспортировании сырья, при механической и термической обработке готового продукта, при его расфасовке и отгрузке. На современных суперфосфатных заводах концентрация пыли изменяется от 3 до 79 мг/м³, однако у грохотов и дробилок она значительно выше (от 380 до 640 мг/м³). При производстве азотных удобрений концентрация пыли в рабочих помещениях колеблется от 4 до 10 мг/м³. При

производстве сложных удобрений наибольшая запыленность наблюдается в отделениях готовой продукции, где происходит окончательная механическая и термическая обработка продукции (2,5—51 мг/м³). При производстве микроудобрений концентрация пыли у грохотов расфасовочных отделений колеблется от 3,3 до 54,6 мг/м³.

В связи со спецификой производства пылевые выбросы в атмосферу отличаются многокомпонентностью и содержат пыль суперфосфата, фосфорита, аммофоса и мочевины (при производстве азотных удобрений) и др. В Польской Народной Республике, например, коэффициент эмиссии для заводов фосфорных удобрений составляет 1,1 кг пыли на 1 т перерабатываемого сырья, причем примерно 50% общего количества пыли составляет фосфорная пыль [82].

Пыль, выбрасываемая предприятиями по производству минеральных удобрений, является мелкодисперсной. Так, 96,5% частиц суперфосфатной пыли имеют размер до 1,4 мкм. Частицы фосфорной пыли имеют средний диаметр 17 мкм. Авторами исследован дисперсный состав пыли фтористого алюминия, выбрасываемой в атмосферу цехом фтористых солей Гомельского химического завода, с помощью прибора для измерения дисперсного состава типа ЭИП-11. Прибор полностью автоматизирован и позволяет определять размер частиц в диапазоне от 1 до 100 мкм с погрешностью $\pm 12\%$. На рис. 1 приведена полученная гистограмма. Пыль полидисперсная, но имеет четко выраженный максимум. Форма частиц выпуклая, а отношение максимального диаметра к минимальному близко к единице.

Пылевые выбросы предприятий по производству минеральных удобрений отличаются высокой токсичностью. Пыль поражает слизистую оболочку носа, глотки и гортани, а также вызывает

заболевания периферийной нервной и костно-мышечной системы, печени, бронхиты, катары.

Пылевые выбросы предприятий бытовой химии. Предприятия бытовой химии расположены с минимальными зонами санитарного разрыва от жилых застроек. Выбросы поступают в атмосферу на сравнительно небольшой высоте, венти-ляционные выбросы преобладают над технологическими.

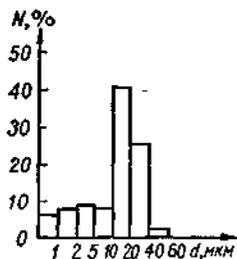


Рис. 1. Гистограмма частоты пыли фтористого алюминия.

Предприятия по производству порошковых синтетических моющих средств (СМС) являются самыми неблагоприятными с точки зрения загрязнения воздушной среды поверхностно-активными веществами. Общий выброс пыли колеблется от 5 до 167 кг в сут-

ки [10]. Вместе с тем производство порошковых СМС с каждым годом непрерывно возрастает [46]. Технологический процесс изготовления СМС сопровождается значительным образованием далеко не безвредной для организма человека пыли, загрязняющей производственные помещения и атмосферный воздух. Эта пыль имеет сложный состав и включает в себя поверхностно-активные вещества (алкилорилсульфанаты, алкилсульфанаты, сульфат и силикат натрия, кальцинированная сода и др.) и органические (карбоксилэтилцеллюлоза, красители) соединения. Пылеобразование сопровождается по существу все этапы производства СМС. Максимальное количество пыли выбрасывается в атмосферу вместе с сушильным агентом, который, несмотря на его предварительную очистку посредством последовательно включенных пыле-

осадительных камер, циклонов, мультициклонов и скрубберов, уносит в атмосферу до 1,4% готового продукта. При производительности башни 100 т порошка в сутки расчетное суточное количество пыли, выбрасываемой после очистки сушильного агента, может достигать от 120 до 1380 кг.

При вдыхании воздуха, содержащего большие концентрации пыли, независимо от состава последней, появляются раздражение дыхательных путей, конъюнктивит, а иногда и желудочно-кишечные заболевания. Поверхностно-активные вещества мало токсичны, однако нередко оказывают раздражающее и аллергическое действие на кожу. При загрузке и выгрузке соды у рабочих наблюдаются омертвление участков кожи на руках и изъязвление слизистой оболочки носа.

Были проведены токсикологические исследования пыли, выбрасываемой предприятиями по производству порошковых СМС [14]. Исследования проводились на животных; использовалась пыль порошка «Луч». Пыль относится к мелкодисперсной — 72% частиц имеет размер до 2 мкм. Эксперименты показали, что концентрация пыли 17–75 мг/м³ приводит к некоторым функциональным изменениям сердечно-сосудистой и нервной систем, костного мозга, печени и почек. В результате установлено: пороговая концентрация порошка «Луч» в воздухе равна 17 мг/м³; порог раздражающего действия на верхние дыхательные пути — 10 мг/м³; предельная допустимая концентрация пыли в воздухе производственных помещений — 3 мг/м³.

Для порошка «Лотос», содержащего 22% сульфанола, предельно допустимые концентрации пыли равны: в воздухе производственных помещений 2 мг/м³, в приземном слое воздуха населенных мест 0,1 мг/м³ [43]. Для соблюдения

этих норм суммарный эффект пылеулавливания очистных установок должен быть не ниже 98,2%.

С помощью прибора ЭИП-11 исследован дисперсный состав пыли в выбросах для предприятий, производящих порошковые СМС типа «Лотос», «Чайка», «Планета». Полученные гистограммы приведены на рис. 2. Перед измерением

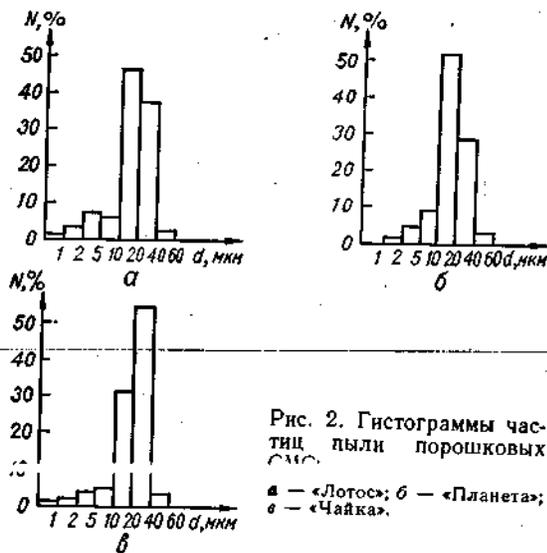


Рис. 2. Гистограммы частиц пыли порошковых СМС:
а — «Лотос»; б — «Планета»; в — «Чайка».

пыль протирали через сетку с размером ячеек 50—60 мкм. Расхождение между полученными результатами и данными седиментационного анализа составляет 10—20%.

Кроме того, исследованы форма и дисперсный состав порошка «Лотос» микроскопическим методом [6; 17]. Результаты исследований подвергались статистической обработке на ЭВМ «Минск-22». Установлено, что частицы пыли имеют выпуклую форму, средний статистический

коэффициент формы

$$\bar{k}_\phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d_{i\max}}{d_{i\min}}, \quad (1)$$

где $d_{i\max}$, $d_{i\min}$ максимальный и минимальный размер i -й частицы; $n = 600$ — количество исследованных частиц; $\bar{k}_\phi = 1,2$, т. е. большинство частиц имеют практически сферическую форму. Размеры частиц находятся в пределах от 5 до 200 мкм. Средний статистический диаметр частиц равен 50 мкм.

По результатам дисперсионного анализа, проведенного методом микроскопии, построена гистограмма плотности распределения числа частиц $N(d)$ по диаметрам d (рис. 3). Для этого криво-

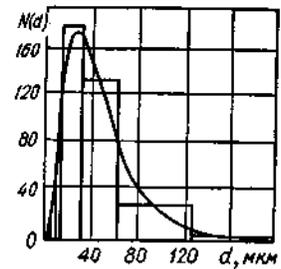


Рис. 3. Гистограмма частиц пыли порошкового СМС «Лотос», полученная методом микроскопии, и аналитическая кривая распределения плотности частиц по размерам.

го экспериментального распределения найдено аналитическое выражение функции плотности распределения частиц по размерам:

$$N(d) = 7,93 \cdot 10^{-5} d^4 \exp(-1,5d^{0,5}). \quad (2)$$

Как видно из рисунка, кривая распределения частиц по размерам смещена вправо, показатель асимметрии равен 1,865. Размеры частиц, лежащих в диапазоне от 5 до 105 мкм, составляют 95%, а среднее арифметическое значение диаметра частиц пыли в исследованной совокупности равно 49 мкм, т. е. отличие от среднего статистического диаметра составляет 2%.

**ПЫЛЕВЫЕ ВЫБРОСЫ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Пылевые выбросы предприятий строительных материалов составляют 27,4% выбросов всех отраслей промышленности СССР. Наибольшее загрязнение атмосферного воздуха твердыми частицами связано с производством неорганических вяжущих веществ: цемента, извести, гипса и др.

Пылевые выбросы предприятий по производству цемента. Процесс производства цемента осуществляется в карьере, сырьевом цехе, цехе обжига и мельничном. Основными источниками загрязнения являются пылевые выбросы цехов обжига и мельничного цеха, в меньшей мере сырьевого (при мокром способе производства) и транспортного цехов.

В сырьевом цехе пыль выделяется при работе дробилок, подъемников, сушильных барабанов, глины и известняка. Концентрация пыли в отходящих газах от сушильных барабанов этого цеха равна 15—40 г/м³. При сухом производстве пыль выделяют и сырьевые мельницы (концентрация пыли в загрязненном воздухе от сухих мельниц равна 40—50 г/м³). При мокром способе производства пыль на данном участке не образуется. Газы, отходящие от вращающихся цементных печей, содержат 10—20 г/м³ пыли. В мельничном цехе пыль выделяется при работе цементных мельниц. Концентрация пыли в аспирационном воздухе мельниц достигает 120 г/м³. Общий унос цемента составляет 240 кг/т, т. е. примерно 6%. По данным работы [38], пылеунос колеблется в пределах от 5 до 25% к массе подаваемого в печь сырья.

Цементная пыль является тонкодисперсной. В ней преобладают частицы размером менее

10 мкм. По данным работы [45], частицы пыли размером менее 10 мкм составляют, % по массе: 30 — пыли, выбрасываемой угольными мельницами; 42 — вращающимися печами и 28 — цементными мельницами. Дисперсность пыли в выбросах вращающихся печей крайне непостоянна, зависит от технологического режима и, как следствие, от скорости газового потока. Ниже приведено процентное содержание частиц пыли размером менее 10 мкм в выбросах вращающихся печей, работающих в разных технологических режимах:

Вращающиеся печи	Содержание частиц менее 10 мкм, %
С циклонным теплообменником	63—87
Мокрого способа производства, работающие на меловом сырье	40—68
Мокрого способа производства, работающие на известняках и мергелях	20—50

Обследование 101 цементного завода США показало, что 85% пыли, выбрасываемой заводами, имело частицы размером менее 30 мкм [54].

Химический состав пыли в выбросах зависит от химического состава цемента и сильно колеблется. Он отличается от сырьевой смеси повышенным содержанием щелочей и серного ангидрида. В пыли присутствуют клинкерные минералы, зерна неразложившегося сырья и окислы кальция. Согласно данным работы [45], в состав пыли входят: кремнезем — 14,7% глинозем — 8,56%, окись кальция — 36,7%, окись магния — 22,2%, окись железа — 2,7%. Соотношения между основными образующими окислами в сырьевой смеси и пыли отличаются друг от друга, но общих закономерностей в изменении коэффициента насыщения силикатного и глиноземного модулей

не установлено. Химический состав пыли существенно изменяется даже в одной и той же печи в зависимости от режимов ее работы.

Плотность цементной пыли может изменяться в пределах 2540—3300 кг/м³. Пыль является сильно слипаемой, что сказывается на эксплуатационной надежности работы пылеочистного оборудования. Электрические свойства цементной пыли зависят от многих факторов: температуры, влагосодержания газовой среды, химического и дисперсного состава пыли. Удельное электрическое сопротивление пыли изменяется от $2,5 \cdot 10^{11}$ до $1,4 \cdot 10^8$ Ом · м.

Цементная пыль является причиной некоторых профессиональных заболеваний органов дыхания. Снижается возбудимость обонятельного анализатора и вегетативного отдела нервной системы, а также появляются некоторые другие физиологические изменения у детей, живущих длительное время в условиях загрязненного цементными заводами атмосферного воздуха. Вредное действие цементной пыли в значительной степени связано с резко выраженной щелочной реакцией и гигроскопичностью, непосредственно действующими на слизистые оболочки дыхательных органов и кожных покровов. Раздражающее действие оказывает, главным образом, окись кальция.

Цементные заводы при плохой аспирации и недостаточно эффективной пылеочистке могут быть значительными источниками загрязнения атмосферного воздуха. Так, цементный завод производительностью 400 тыс. т в год в радиусе 2 км создает запыленность атмосферного воздуха до 20 мг/м³.

Эффективность процессов пылеулавливания во многом обуславливается выбором типа пылеочистного оборудования с учетом физико-химиче-

ских свойств пыли (концентрации, температуры, электрического сопротивления и др.).

В СССР для улавливания пыли используют циклоны, мультициклоны и рукавные фильтры. Так, на Очаковском заводе железобетонных конструкций (ЖБК) для улавливания пыли используют рукавные фильтры МФУ-24, ФВ-30. На Черкизовском заводе ЖБК, где основными источниками загрязнения атмосферы являются бетономесительные установки (БСУ), арматурный, деревообрабатывающий цехи и формовочно-заготовительные отделы, для улавливания пыли используют на БСУ циклоны, на силосах цемента рукавные фильтры ФВК-30. Деревообрабатывающие станки снабжены циклонами типа НИИОгаз * ЦН-15.

В промышленности строительных материалов ГДР для пылеочистки отходящих газов цементных заводов используют электрофильтры, тканевые фильтры и циклоны. Остаточное содержание пыли после циклонов меньше 500 мг/м³, после тканевых фильтров колеблется в широких пределах (20—500 мг/м³) и значительно меньше после электрофильтров — 20—35 мг/м³ [79]. При этом ежегодно в окружающую среду выбрасывается 180—190 тыс. т пыли.

В США, Канаде, Швеции и Индии для пылеочистки используют электрофильтры, циклоны, тканевые фильтры и их сочетание. Применение этого оборудования позволило снизить потери готовой продукции до 0,3% (Швеция), 1,2% (Канада), 2% (США), 9,75 (Индия).

Ниже приведена эффективность пылеочистки применяемого в США очистного оборудования [55].

* Научно-исследовательский институт очистки газа (Москва).

Очистное оборудование	Эффективность пылеочистки, %
Циклон	70—80
Циклон + электрофильтр (старый)	95
Электрофильтр (старый)	90
Электрофильтр (новый)	99—99,9
Тканевый фильтр	99—99,9

Пылевые выбросы предприятий известкового производства. Суммарные потери известкового производства в результате пылеуноса достигают 4—5%, что составляет 9—10 млн. руб. в год. Пыль в основном мелкодисперсная, размеры частиц менее 0,28 мкм, 40% химического состава составляет окись кальция и магния. Концентрация пыли в выбросах довольно высокая и может достигать 1,210—3,700 г/м³.

ПЫЛЕВЫЕ ВЫБРОСЫ ПРЕДПРИЯТИЙ ДРУГИХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Пылевые выбросы предприятий мукомольной промышленности. Мучная пыль относится к классу органических пылей и является типичным диэлектриком. Размеры частиц мучной пыли изменяются в довольно широких пределах: от 0 до 100 мкм, причем в муке высшего сорта преобладают в основном частицы размером до 30 мкм, в муке 1-го сорта — 30—70 мкм, а в муке 2-го сорта — частицы более 100 мкм. Средний размер частиц мучной пыли на мельницах составляет 15—20 мкм. Ниже приведено процентное содержание фракций в муке [27].

Пределы размеров частиц во фракции, мкм	Содержание фракции в муке, %
80—54	7,4
54—44	15,7
44—35	11,1
35—28	14,8
28—23	14,4
23—6,1	36,6

Авторами работы [16] проведен дисперсионный анализ мучной пыли методом микроскопии. Исследовалась мука высшего сорта (при увеличении в 280 раз), в качестве дисперсионной жидкости использовался бензин. Результаты исследований (рис. 4) показали, что мучная пыль представляет собой смесь трех монодисперсных пылей

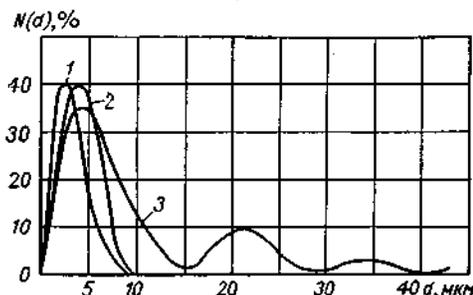


Рис. 4. Кривые дисперсного состава пыли: 1 — угольной (тонкая фракция); 2 — кварцесодержащей; 3 — мучной.

с частицами размером 5, 21 и 34 мкм, причем преобладают частицы размером 5 мкм (35,1%), тогда как частицы размером 21 мкм составляют 10%, а размером 34 мкм — 2,6%, т. е. относительное содержание частиц равно 14 : 4 : 1.

В работе [34] описаны результаты исследований изменений дисперсного состава мучной пыли во времени. Исследовалась пыль в воздушном потоке двойного аспиратора. Изменения дисперсного состава пыли через 5 ч работы двойного аспиратора незначительны, что говорит об устойчивости режима работы пылеочистных сооружений.

В мукомольной промышленности в качестве пылеочистных установок широко используются циклоны. Наибольший эффект получают при

М 17644

Шахтинская ЦЭС
Ростовской области

двойной очистке воздуха в циклонах. В табл. приведены получаемые при этом коэффициенты очистки и концентрации пыли в воздухе, выбрасываемом в атмосферу, на различных участках производства [37].

Пылевые выбросы теплоэлектростанций (ТЭС)
При сжигании различных видов топлива в стационарных установках (котлах, промышленных

Таблица

Коэффициенты очистки $K_{об}$ и концентрации пылевой пыли C в воздухе, выбрасываемом в атмосферу, при двухступенчатой очистке воздуха в циклонах

Оборудование	$K_{об}$, %	C , мг/м ³
Ковшовые весы	91,6	117,8
Ленточные транспортеры	87,9	157,0
Сепараторы	97,8	43,5
Рассеиватели	99,96	4,0
Вальцевые станки	99,97	2,8

печах) в атмосферу поступает значительно большее количество твердых частиц (пыли, золы, сажи). Современная электростанция мощностью 2,4 млн. кВт выбрасывает в атмосферу 120—240 мг/м³ твердых частиц (при эффективности пылеулавливания 94—98%).

В СССР на долю тепловых электростанций приходится 42,5% всех промышленных выбросов твердых частиц в атмосферу. На крупных электростанциях дымовые газы очищаются от твердых частиц в электрофильтрах. При использовании современных электрофильтров в принципе может быть обеспечена степень очистки 99—99,5%. Этот уровень очистки соответствует требованиям, предъявляемым к пылеуловителям

Количество пыли, выбрасываемой в атмосферу, может быть значительным, особенно при нарушении режимов горения, и в основном определяется типом используемого топлива. Расстояние распространения выбросов вокруг ТЭС мощностью 1 млн. кВт достигает 13—15 км.

Пыль, выбрасываемая ТЭС, относится к тонкодисперсной: 95% всей пыли составляют частицы размером менее 2 мкм. Существующие способы пылеулавливания недостаточно эффективны для столь мелких частиц. Так, эффективность современных электрофильтров при улавливании пыли с размером частиц 0,15—0,3 мкм снижается до 77%, а при улавливании частиц 0,02—0,15 мкм — до 63% [76]. Поэтому пылеулавливание для ТЭС связано с огромными энергетическими затратами. Так, в США расход энергии при очистке в электрофильтрах отходящих газов ТЭС составляет при 95%-ной эффективности очистки 0,1% мощности ТЭС [69].

В ФРГ в 1970 г. суммарное пылевыделение ТЭС, работающих на каменном угле, составило 112 млн. т, на буром угле — 68 млн. т. Концентрация пыли в отходящих газах ТЭС, работающих на каменном угле, равна 304 мг/м³, на буром угле — 200 мг/м³ [72].

Пылевые выбросы предприятий цветной металлургии. Почти все стадии технологических процессов производства цветных и редких металлов сопровождаются образованием пыли, уносимой технологическими и вентиляционными газами. Количество образующейся пыли зависит от металлургического процесса, его интенсивности, физико-химической характеристики компонентов шихты (крупность, прочность, содержание легко воспламеняемых металлов, их соединений и др.). Особенно интенсивно пыль образуется при обжиге и плавке концентратов в псевдоожиженном

слое и взвешенном состоянии, возгоночных процессах. При вальцевании и шлаковозгонке недостаточно эффективное улавливание пыли приводит к большим экономическим потерям.

Пыли, содержащиеся в технологических и вентиляционных газах заводов цветной металлургии, по способу образования и физико-химическим характеристикам, могут быть разделены на механическую пыль и возгоны. Частицы механической пыли сравнительно крупные: от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров. По химическому и фазовому составу механическая пыль близка к исходным материалам (шихте). Частицы возгонов высокодисперсны, и в ряде случаев размеры их составляют десятые и сотые доли микрометра. Пыль может существенно отличаться по химическому и фазовому составу от исходных материалов. Подобная пыль богата летучими металлами.

Токсичность свинцовой пыли требует тщательной очистки отходящих газов при производстве свинца. Пыль выделяется при работе агломерационных машин, шахтных и купеляционных печей, шлаковозгоночных установок и др.

Пыль агломерационных машин мелкая, преимущественно возгоночного происхождения, средний размер частиц 0,5—1 мкм. Химический состав пыли (окислы свинца, окислы цинка и сернистого свинца) предопределяет ее высокое электрическое сопротивление ($\rho > 10^{11}$ Ом · см). Применяют два способа очистки: в электрофильтрах и рукавных фильтрах. Запыленность газов после электрофильтра находится в пределах 30—100 мг/м³, после рукавного фильтра 25—50 мг/м³.

В пыли шахтных печей содержится 55—65% свинца и 12—20% цинка, средний размер частиц 0,6—0,8 мкм. Высокая дисперсность пыли и значительная запыленность газов требуют примене-

я ступенчатой очистки и пылеуловителей наиболее совершенных типов. Наибольшее распространение получили рукавные фильтры, при использовании которых остаточная запыленность не превышает 20—40 мг/м³. Пыль в отходящих газах купеляционных печей содержит 60—% свинца и до 20% цинка, средний размер частиц пыли 1,75 мкм. Очистку газов осуществляют обычно в рукавных фильтрах, при этом остаточная запыленность газов составляет 20—мг/м³. В пыли шлаковозгоночных установок держится 20% свинца и 50% цинка при среднем диаметре частиц пыли 1,5 мкм. Газы характеризуются высокой запыленностью, для очистки которых используют рукавные фильтры, на выходе которых запыленность не превышает 20—мг/м³.

На цинковых заводах основными видами технологических газов, очищаемых от пыли, являются газы обжиговых печей с псевдооживленным долом и газы трубчатых печей. Для очистки газов обжиговых печей КС используют электрофильтры, на выходе которых запыленность составляет 150—250 мг/м³. Газы трубчатых печей очищают с помощью рукавных фильтров с использованием фильтровальной ткани из 100% шерсти или из синтетического волокна нитрон. Запыленность газов после рукавных фильтров составляет 15—100 мг/м³ (эффективность пылеочистки достигает 99,6%).

Пыль предприятий медной промышленности в большинстве случаев мелкодисперсная, поэтому для пылеочистки отходящих газов наиболее целесообразно применение электрофильтров. При этом остаточная запыленность газов составляет 100—200 мг/м³.

Пыли технологических газов никелевых заводов практически не содержат возгонов, и,

следовательно, их частицы относительно крупные. Хотя в некоторых случаях можно довольно полно уловить пыль из технологических газов никелевых заводов и без применения высокоэффективных пылеуловителей (электрофильтров, рукавных фильтров и др.), вследствие повышенных требований к защите воздушного бассейна и высокой стоимости никелевых пылей эти пылеуловители широко внедряют на никелевых заводах. Применение электрофильтров обязательно при очистке газов обжига никелевого концентрата, которые содержат богатую никелем пыль (60—70%).

В производстве твердых сплавов и в порошковой металлургии в тех случаях, когда пыль является очень ценным продуктом, весьма эффективным оказалось применение спеченных металлических пористых фильтрующих материалов. Они обеспечивают высокую степень очистки, обладают большой проницаемостью, прочностью и коррозионной стойкостью, хорошо регенерируются обратной продувкой. При использовании указанных материалов на Кировоградском заводе твердых сплавов для улавливания высокодисперсных частиц кобальта и пылеобразного порошка WO_3 эффективность очистки воздуха равна 99,90—99,95%.

Пылевые выбросы предприятий стекольной промышленности. Общие валовые выбросы пыли для стекольного производства составляют 1134 т в год [41]. Исследования пыли в отходящих газах пламенных печей для варки флюсов, стеклокрошки и светотехнического стекла показали, что наибольшая запыленность газа на выходе печи флюсов составляет 310—1900 мг/м³. Концентрация пыли в газе от печей для варки стеклокрошки равна 620 мг/м³, а от печей для варки технического стекла лишь 90 мг/м³. В табл. 2

приведен дисперсный состав пыли указанных печей. Согласно табл. 2, среднегеометрический размер частиц пыли равен для печей варки флюсов 1,5 мкм; стеклокрошки — 1,8 мкм; светотехнического стекла — 1,1 мкм.

В виде твердых частиц в атмосферу попадают SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO и др. Плотность пыли лежит в пределах 2200—2800 кг/м³.

Таблица 2

Дисперсный состав пыли, выбрасываемой печами стекольного производства, %

Назначение печи	Состав пыли при размерах частиц, мкм				
	<0,5	0,5—1,0	1,0—2,0	2,0—3,0	>3,0
Для варки:					
флюсов	5	20	36	21	18
стеклокрошки	20	17	23	12	28
светотехнического стекла	11	35	40	11	3

Много пыли выбрасывается при работе сушильных барабанов флюсов, плавильного шпата песка, угля. Содержание флюсов, мела и песка в газах на выходе барабанов составляет 12,5—14,5; 2,1 и 1,27 г/м³ соответственно. Для пылеочистки газов от сушильных барабанов применяют батарейные циклоны НИИОгаз со средней эффективностью пылеулавливания 96—97%. Остаточная запыленность при входной запыленности 15 г/м³ составляет 230 мг/м³. Общие потери шихтовых материалов, например, для Запорожского стекольного завода составляют более 1%.

Пылевые выбросы предприятий целлюлозно-бумажной промышленности. Основными источниками загрязнения атмосферы пылью являются содорегенерационные котлоагрегаты, с отходящими

газами которых за час уносится от 1,5 до 3 т пыли, состоящей в основном из сульфата натрия, и известерегенерационные печи, из которых вместе с газами уносится 0,5—1 т пыли в час.

Пылевые выбросы, оседающие на земле, увеличивают кислотность почвы и обедняют микробиологическую флору. В результате биохимическая активность почвы снижается.

Для очистки отходящих газов в целлюлозно-бумажной промышленности применяются электрофильтры, скрубберы Вентури, сухие и мокрые одиночные и батарейные циклоны, тканевые и канальные фильтры, пылевые камеры. Для улавливания пылевого уноса из содорегенерационных котлоагрегатов используются электрофильтры. При оптимальных условиях работы эффективность электрофильтра составляет 96—98%.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К АППАРАТУРЕ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ

ТРЕБОВАНИЯ К ПЫЛЕМЕРАМ

В настоящее время недостаточно иметь общестатистические данные о пылевых выбросах предприятий различных отраслей промышленности, знать их состав и свойства пыли, ее воздействие на окружающую среду, вред для здоровья человека и приносимый экономический ущерб. Необходим непрерывный автоматический контроль выбросов на всех промышленных предприятиях при эксплуатации пылеулавливающего об-

орудования и оценке эффективности его работы; в исследовании технологических режимов и выборе оптимальных вариантов; при оценке влияния различных факторов на степень улавливания пыли.

Непрерывный контроль позволяет судить о работе пылеочистного оборудования, обнаруживать поломки основных его узлов (например, разрыв рукавного фильтра) и принимать меры по их устранению. Появляется возможность оценить потери сырья с пылью, выбрасываемой вместе с отходящими газами в атмосферу.

К приборам непрерывного автоматического пылевого контроля предъявляются довольно высокие и разнообразные требования, удовлетворить которые нередко бывает трудно: непрерывность измерения; автоматизация процесса измерения; достоверность показаний; повышение точности измерения; регистрация результатов измерения; автоматическая периодическая поверка нуля и одной точки шкалы прибора; нечувствительность к сопутствующим факторам и воздействию окружающей среды; простота, дешевизна, высокая эксплуатационная надежность; дистанционная передача показаний; малая инерционность, линейность градуировочной характеристики; наличие интегрирующего блока с различным временем интегрирования; наличие предупредительной и аварийной сигнализации; наличие обратной связи для воздействия на источник загрязнения; соответствие условиям эксплуатации (вибростойкость, стойкость к высоким температурам, влажности и агрессивным средам, длительное время непрерывной работы (до 750 ч), ежемесячный осмотр). Конструкция прибора должна обеспечивать возможность быстрого демонтажа и удобства его транспортировки; присутствие прибора и его работа не должны вносить искажений

в концентрацию и дисперсный состав пыли; полезность получаемых данных и экономическая эффективность контроля.

С развитием автоматизированных систем контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) и автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) к приборам предъявляется дополнительное требование — возможность использования их в этих системах.

У пылемеров с предварительным пробоотбором должны быть обеспечены: объемная представительность пробы, необходимая частота взятия пробы и длительность пробоотбора, точность количественной оценки пробы и минимальное транспортное запаздывание.

Для оценки объемной представительности пробы введен показатель

$$P = V_n / V_r,$$

где V_n — объем отбираемого газа; V_r — объем газа, прошедшего через контролируемое сечение газохода за время пробоотбора. При $P \rightarrow 0$ уменьшаются масса и габаритные размеры, а с увеличением P увеличивается достоверность измерения. Поэтому необходимо выбирать оптимальное значение P , исходя из необходимой достоверности пылевого контроля.

Частота пробоотбора

$$f = t_n^2 W_c / \gamma^2, \quad (3)$$

где t_n — показатель надежности; W_c — коэффициент вариации концентрации пыли в газоходе; γ — допустимая погрешность измерения концентрации пыли.

Из выражения (3) следует, что частоту пробоотбора следует увеличивать при высокоточных измерениях в газоходе, где наблюдается большая нестабильность концентрации пыли во времени

большими колебаниями мгновенных значений концентрации относительно среднего значения.

Длительность пробоотбора должна быть такой, чтобы масса пылевого осадка была соизмерима с массой фильтра.

В настоящее время наибольший эффект может дать использование методов контроля, которые не требуют априорных знаний или каких-либо предложений о свойствах пыли и выдают результаты оперативно и однозначно.

УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЫЛЕМЕРОВ

Условия эксплуатации пылемеров, предназначенных для непрерывного контроля выбросов промышленных предприятий, характеризуются параметрами отходящих газов (состав газа и его вариации, скорость, температура, давление и их колебания); физико-химическими характеристиками пыли (химический и дисперсный состав и их вариации, структура, плотность, цвет, проводимость, диэлектрическая проницаемость, форма частиц и их поверхностные свойства); диапазоном измерения концентрации пыли; требуемой точностью, длительностью, инерционностью измерений; местом установки прибора (размеры газохода, наличие вибраций газохода и механических ударов, условия окружающей среды в месте установки прибора).

Исходя из условий эксплуатации выбирают метод измерения концентрации пыли и место установки прибора. При выборе метода измерения учитывают, прежде всего, свойства пыли и требуемую точность измерений. В большинстве случаев пылемеры помещают вне помещений, на газоходе, через который выбросы поступают в атмосферу. Это тяжелые условия эксплуатации, поскольку прибор должен работать при резких

перепадах температур, интенсивных вибрациях без обслуживания в течение длительного времени, так как доступ к прибору затруднен. Кроме того, в газоходе присутствует паразитный световой фон, который изменяется как в течение суток, так и на протяжении года и вызывает определенные трудности при использовании оптических методов измерения.

Возможны случаи, когда пылемер устанавливается внутри помещения. Однако обычно это производственные помещения, менее защищенные от воздействий окружающей среды, мало обслуживаемые. Такие условия эксплуатации относятся к средним, так как здесь более плавные колебания температуры и в более узком диапазоне (обычно от $+15$ до $+30^{\circ}\text{C}$). Кроме того, прибор защищен от влияния атмосферных осадков. Однако в газоходах, расположенных внутри помещений, уровень паразитного светового фона значительно уменьшен.

Несмотря на жесткие условия эксплуатации и широкий диапазон измерения, требования точности промышленного пылевого контроля весьма высокие (точность должна быть сравнима с точностью стандартного весового метода). Проблема повышения точности измерения концентрации пыли до сравнительно недавнего времени решалась применительно, главным образом к лабораторным статистическим измерениям, к измерениям мало изменяющихся во времени концентраций пыли, проводимых в постоянно мало изменяющихся внешних условиях. В этом наибольшую долю общей погрешности результатов измерений составляет собственная погрешность пылемера. При измерении концентрации пыли в промышленных газоходах условия измерения намного сложнее в результате влияния внешних условий (влажности, температу-

вибрации, паразитного светового фона и др.). Дополнительные погрешности, обусловленные этими факторами, часто превышают основную погрешность измерения прибора. Поскольку в промышленности широко используются мокрые способы пылеочистки, отходящие промышленные газы характеризуются повышенным влагосодержанием, наличием капельной влаги, а также растворением пыли в воде. Наличие капельной влаги и растворенной в воде пыли может существенно исказить результат измерений. Поэтому при осуществлении промышленного пылевого контроля возможны три пути. Первый сводится к выбору такого метода измерения концентрации пыли, который мало чувствителен к влиянию внешних условий. Этот путь наиболее простой, но трудно реализуемый. Второй путь состоит в стабилизации условий измерений. Для этого взятую пробу отходящих газов предварительно подготавливают (высушивают, нагревают или охлаждают до определенной температуры) и лишь потом проводят измерения. Этот путь надежен, но довольно сложен. Он получил наибольшее практическое применение при осуществлении точных измерений. Третий путь характеризуется использованием высокочувствительных и точных методов измерения концентрации пыли с применением автоматической коррекции результатов измерений при изменении внешних условий, а также свойств самой пыли. Он отличается полной автоматизацией всего измерительного процесса и является наиболее совершенным. Для осуществления его требуется всестороннее изучение, прежде всего, свойств пыли и возможных изменений их в данном производстве, а также метода измерения концентрации пыли и влияния на его результаты изменений внешних условий и свойств пыли. Кроме того, необходимо знать основные сопутствующие

щие факторы, которые могут исказить результаты измерения, и диапазон их изменения для определения способов автоматической коррекции. При автоматической коррекции не всегда можно использовать метод, применяемый для измерения концентрации пыли. Возникает необходимость ввести дополнительный метод оценки величины влияющего фактора, которая необходима для получения корректирующего сигнала.

Важным условием промышленного пылевого контроля является необходимость выдачи окончательных результатов практически одновременно с проведением самого измерения. Это необходимо для своевременной сигнализации о возникновении аварийных ситуаций и автоматического управления режимом работы пылеочистного оборудования. При включении аварийной сигнализации производство должно быть остановлено. Здесь очень важна достоверность результатов измерения, поскольку могут возникнуть критические ситуации в случае сигналов ложной тревоги, которые подаются с выхода пылемера. Чтобы избежать непредвиденной остановки производства, в особо важных случаях целесообразно ввести дублирующее устройство, при этом окончательное решение принимает оператор.

СООТВЕТСТВИЕ ПЫЛЕМЕРОВ СОВРЕМЕННЫМ ТРЕБОВАНИЯМ ПРОИЗВОДСТВА

Соответствие пылемеров современным требованиям производства проверяется путем расчета экономической эффективности внедрения пылевого контроля в одной точке контроля, которая равна алгебраической сумме затрат на реализацию пылевого контроля и экономии затрат при изготовлении и эксплуатации аппаратуры пылевого контроля в результате уменьшения концент-

ации пыли в отходящих газах производства. Это условие можно записать следующим образом:

$$(Z_p + Y_s) \rightarrow \min,$$

где Z_p — затраты на реализацию пылевого контроля; Y_s — экономия затрат в результате уменьшения концентрации пыли в отходящих газах вентиляционных выбросах производства.

Для определения экономии затрат необходимо выявить типичные ситуации, обуславливающие связь между промышленным пылевым контролем и затратами в производстве; характер связи между промышленным пылевым контролем и затратами в производстве; количественную связь между промышленным пылевым контролем и затратами в производстве.

Можно считать, что основной типичной ситуацией, когда промышленный пылевой контроль выбросов производства влияет на экономию затрат, является улучшение использования сырья и материалов в результате оптимизации режимов, регламентирующих эффективность работы пылеочистного оборудования, когда более строгое поддержание оптимального значения концентрации пыли в выбросах производства приводит к уменьшению расходов сырья и материалов; использования оборудования с более высоким КПД.

Если принять, что затраты в производстве Y связаны функцией $Y = f(C)$ со случайной величиной, измеряемой концентрацией C пыли в выбросах то эта функция будет также случайной величиной и, следовательно, может характеризоваться соответствующими числовыми характеристиками случайной величины. Математическое ожидание дополнительных затрат Y_s , возникающих в результате потери сырья с пылевыми выбросами производства, определяем по

формуле

$$y_s = \int_{C_{\min}}^{C_{\max}} f(C) dC, \quad (4)$$

где C_{\min} , C_{\max} — заданный интервал изменения концентрации пыли в выбросах производства.

Для оценки соответствия промышленного пылевого контроля современным требованиям производства необходимо общие затраты на реализацию пылевого контроля привести к виду, соизмеримому с затратами, вызванными потерей сырья и готового продукта с пылевыми выбросами производства.

**ДОСТОВЕРНОСТЬ КОНТРОЛЯ,
ВЫБОР ЗОНЫ ИЗМЕРЕНИЯ
И МЕСТА УСТАНОВКИ
ПРОБООТБОРНОГО УСТРОЙСТВА**

Повышение достоверности результатов контроля может обеспечиваться аппаратурными способами: улучшением метрологических характеристик измерительного прибора, введением автоматической поверки показаний прибора непосредственно в процессе его эксплуатации, применением дублирующей аппаратуры. Возможно использование комбинированных способов контроля. Первый вариант комбинированного способа состоит в том, что концентрация пыли измеряется двумя или несколькими различными методами и проводится непрерывное сопоставление получаемых результатов. Второй вариант состоит в том, что одновременно с измерением концентрации пыли измеряются основные сопутствующие величины (влажность или температура измеряемой среды, дисперсный или химический состав пыли и др.), оказывающие существенное влияние на результат измерения, с целью автоматического

введения поправки. Комбинированный способ контроля позволяет обеспечить заданную точность измерения при незначительном усложнении аппаратуры.

Следует особо остановиться на надежности пылевого контроля. Отказ измерительного прибора принято рассматривать как выход погрешности за пределы, обусловленные их классом точности. Однако отказ может быть зафиксирован по дополнительным погрешностям от воздействия влияющих величин. Поэтому фактически надежность более правильно рассматривать как комплексную характеристику, учитывающую безотказность, долговечность, восстанавливаемость и сохраняемость показаний прибора.

При контроле запыленности пылегазовых потоков достоверность получаемой информации зависит от места установки пылемера и выбора представительной зоны в контролируемом сечении. Для того чтобы по результатам измерения запыленности газа в выбранной небольшой зоне газохода можно было достоверно судить о запыленности во всем газоходе, необходимо иметь в месте установки прибора сформированный турбулентный пылегазовый поток и знать распределение запыленности газа в контролируемом сечении.

Движение отходящих газов в газоходах характеризуется развитой турбулентностью (обычно число Рейнольдса $Re > 10^4$). В этих условиях распределение частиц по сечению, перпендикулярному к направлению движения потока, зависит от гравитации, турбулентности, вращения потока и частиц, отскока частиц от упругих стенок канала, термо- и фотофореза, электрического и молекулярного притяжения — для горизонтальных потоков (для вертикального движения можно исключить гравитацию).

При движении пылегазового потока по газоходу круглого сечения небольшого диаметра большую роль в распределении частиц по сечению играет их отскок от стенок. Даже если отсутствует видимый осадок, происходит выпадение частиц, которые затем вновь переходят во взвешенное состояние. Особенно это явление сказывается на распределении концентраций по сечению горизонтальных газоходов: наиболее тяжелые частицы движутся скачкообразно в нижней части газохода, где концентрация, естественно, возрастает. Создается состояние динамического равновесия, определяющееся равенством потоков оседающих и переводимых вновь во взвешенное состояние частиц. С увеличением скорости потока высота скачков и эффект от вращения частиц также увеличиваются — частицы могут преодолевать вдоль поперечного сечения газохода расстояния, равные его диаметру. В результате с увеличением скорости движения происходит выравнивание концентрации пыли по сечению потока.

При движении пылегазового потока в газоходах при температурах, превышающих 100°C , и повышенном влагосодержании отходящих газов частицы пыли размягчаются, а часть из них может быть растворена. Выпадающие из потока частицы прилипают к стенкам и не могут быть переведены вновь во взвешенное состояние, это обстоятельство исключает и интенсивное вращение частиц. В указанных условиях при невозможности создания динамического равновесия, так как оседающие частицы прилипают к стенкам, распределение концентраций будет равномерным даже в горизонтальном газоходу по высоте его поперечного сечения. Поэтому можно сделать вывод, что в таких условиях основным фактором, влияющим на движение частиц поперек потока и на их распределение по сечению, является турбулентность.

Частицы пыли, полностью увлекаемые средне-масштабными турбулентными пульсациями, характерными для всего сечения потока, распределяются по сечению равномерно.

Согласно работе [86], возможны три характерных вида пылевых профилей в зависимости от размера частиц (рис. 5). Для крупных частиц

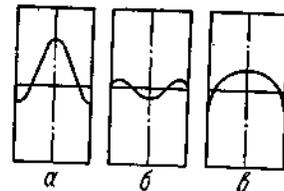


Рис. 5. Характерные пылевые профили:

а — крупная пыль; б — переходный профиль; в — мелкая пыль.

концентрация пыли достигает максимального значения в центре газохода и почти линейно падает по направлению к стенкам (рис. 5, а). Инерция частиц столь велика, что турбулентность потока лишь в незначительной степени влияет на радиальное движение частиц. Формирование профиля определяется в основном процессами соударения частиц пыли со стенками газохода и друг с другом. Указанный пылевой профиль характерен для частиц размерами более $180\ \mu\text{m}$. Для мелких частиц (менее $5\ \mu\text{m}$) отношение сил инерции к силе трения незначительно и частицы следуют движению газового потока. Поэтому пылевой профиль соответствует профилю скоростей (рис. 5, в). Для переходной области размеров частиц (рис. 5, б) концентрация пыли в центре газохода минимальна, на участках, граничащих со стенками, — максимальна. Чем мельче пыль и меньше скорость потока, тем ближе к стенкам располагаются максимумы. Это можно объяснить уменьшением по мере возрастания размера частиц длины пролета их после столкновения со стенкой газохода.

Экспериментальное исследование пылевого профиля крупных частиц (85% частиц имеют

размеры от 10 до 40 мкм) пылевидной фракции по
 рошковых СМС в вертикальном газоходе диамет
 ром 1450 мм выполнено в работе [19]. Измерени
 проводились в поперечном сечении газохода н
 расстоянии $L = 10,5 \text{ м} = 7D$ (D — диаметр га
 зохода) от последнего изгиба газохода. Концент
 рация пыли определялась весовым методом. Для
 выполнения условия изокINETичности предвари
 тельно измерялась эпюра скоростей. При это
 сечение газохода разбивалось на пять равнове
 ких по площади концентрических участков
 Контроль параметров проводился в центре газ
 хода и в нескольких равноудаленных от центр
 точках, расположенных в каждом из указанн
 участков. Распределение скоростей несущег
 газа по сечению газохода исследовалось с по
 мощью пневмометрической трубки конструкци
 НИИОгаза, предназначенной для измерения ско
 ростей движения запыленных газов. Трубка уста
 навливалась в газоходе таким образом, чтобы
 центральное отверстие, предназначенное для за
 мера полного напора газа, было направлено стр
 го навстречу газовому потоку. Центральное от
 верстие при этом служит для измерения дина
 мического и статического давления, а прорез
 второй трубки — статического с учетом разре
 жения, возникающего при обтекании потоком
 газа цилиндра. Поэтому каждая трубка предва
 рительно калибровалась и имела свой поправоч
 ный коэффициент. Динамический напор измерялс
 дифференциальным микроманометром типа ММН

Абсолютные значения скорости пылегазового
 потока

$$v = \sqrt{2gh_{\text{дин}}/\rho_r} \quad (5)$$

где g — ускорение свободного падения; $h_{\text{дин}}$ —
 $= \alpha k \Delta p$ — динамический напор в данной точке
 Δp — показания манометра; k — поправочны

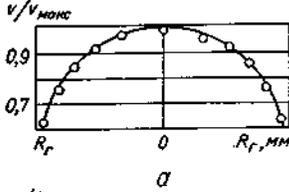
коэффициент пневмометрической трубки (в дан
 ном случае $k = 0,5$); α — коэффициент, завися
 щий от угла наклона измерительной трубки ма
 нометра и плотности заполняющей жидкости (в
 данном случае $\alpha = 0,3$); ρ_r — плотность газа в
 рабочих условиях.

Скорость газа в турбулентном потоке можно
 определить лишь как среднюю во времени вели
 чину, так как накладывающиеся на основной по
 ток колебания достигают величины от 4 до 13%
 по отношению к максимальной. При этом ак
 симальная составляющая этих колебаний имеет
 минимальное значение в центре газохода и воз
 растает по мере приближения к стенкам. Указан
 ные обстоятельства, а также наличие инструмен
 тальных и методических погрешностей опреде
 ления скорости газа приводят к необходимости
 статистического обобщения результатов изме
 рений.

Для оценки результатов серий измерений
 с различными уровнями абсолютных значений
 скорости газового потока использовались отно
 шения скорости v , наблюдаемой в данной точке,
 к максимальной скорости $v_{\text{макс}}$ в этой серии из
 мерений. Каждая серия включала результаты
 измерений скорости в выбранных контрольных
 точках вдоль одного из диаметров контролируе
 мого сечения газохода.

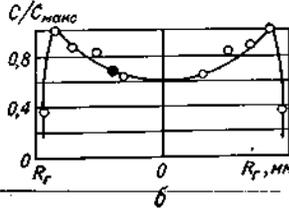
В центре газохода имеет место абсолютный
 максимум скорости газового потока, распреде
 ление скоростей вдоль диаметра газохода сим
 метрично относительно его центра. Кроме того,
 эпюра распределения скоростей вдоль диаметра
 обладает симметрией вращения вокруг оси газо
 хода. Таким образом, скорость газа в любой
 точке контролируемого сечения определяется
 расстоянием r_r от центра газохода и максимал
 ной скоростью $v_{\text{макс}}$ в центре газохода.

Полученная усредненная эпюра относительных скоростей газа v/v_{\max} представляет собой одномодальную кривую (рис. 6) с максимумом в центре газохода. Найдено аналитическое выражение зависимости v/v_{\max} от r_r , с достаточной степенью точности аппроксимирующей кривую, полученную экспериментально:



$$v/v_{\max} = [1 - (r_r/R_r)^2]^{1/a} \quad (6)$$

где R_r — радиус газохода.



Исследования [86] показали, что если распределение скоростей в сечении газохода описывается уравнением вида

$$v/v_{\max} = [1 - (r_r/R_r)^a]^{1/b}$$

Рис. 6. Эпюры:

а — скоростей пылегазового потока в вертикальном газоходу; б — пылевого профиля пылевых частиц порошковых СМС.

то по мере формирования турбулентного потока (и увеличения расстояния L) происходит уменьшение значений коэффициентов a и b . При значениях $a = 2$, $b = 7$ поток считается сформированным, так как с дальнейшим увеличением L профиль распределения скоростей изменяется незначительно. Тот факт, что распределение относительных скоростей описывается уравнением (6), где $a = 2$, $b = 4$, свидетельствует о наличии в контролируемом сечении вполне сформированного турбулентного потока. Таким образом, выбранное предварительное расстояние $L = 10,5$ м является достаточным для формирования турбулентного пылегазового потока.

В полностью сформированном турбулентном пылегазовом потоке с симметричным распределением скоростей несущего газа имеет место симметричное поле концентраций пыли. Определение действительной картины распределения концентрации пыли по сечению газохода в промышленных условиях сопряжено с большими трудностями. Однако после статистического обобщения результатов нескольких серий измерений можно выявить общие закономерности в распределении концентрации пыли по сечению газохода.

Концентрация пыли измерялась в тех же контрольных точках, что и скорость потока. Запыленный газ отбирали из газохода пробоотборной трубкой с закрепленным на ее конце фильтровальным патроном. Продолжительность пробоотбора зависела от запыленности газа. Для сравнения результатов серий измерений с различными средними уровнями запыленности использовались отношения концентраций в каждой контролируемой точке к максимальной концентрации, зафиксированной в данной серии измерений. Полученное усредненное распределение концентраций пыли по диаметру газохода в контролируемом сечении может быть аппроксимировано двухмодальной кривой, имеющей промежуточный минимум в центре газохода и два максимума на расстоянии $r_r = 1/8 R_r$ от центра (рис. 6, б). По мере дальнейшего приближения к стенкам газохода концентрация резко уменьшается. Пограничную область непосредственно у стенок ($r_r > 0,94 R_r$) по техническим причинам исследовать не удалось. Такой вид распределения концентрации пыли по сечению газохода характерен для установившихся турбулентных пылегазовых потоков с размерами частиц от 5 до 180 мкм.

Для полученного распределения концентраций показательным является тот факт, что в

средней части газохода (до $r = 0,4R_r$) концентрация с изменением расстояния r_r изменяется незначительно и находится на уровне средних по сечению значений. Средняя запыленность по сечению газохода рассчитывается как средневзвешенная по скорости из всех проведенных замеров запыленности:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i v_i}{\sum_{i=1}^n v_i},$$

где C_i — запыленность в точках контроля; v_i — скорость газа в тех же точках.

На основании полученных экспериментальных данных следуют важные для практики пылевого контроля выводы: в вертикальных газоходах больших диаметров при измерении концентрации пыли (крупные частицы) зону измерения следует выбирать на расстоянии $r_r = 0,3R_r$ от центра газохода, поскольку в этой зоне концентрация пыли практически равна средней по сечению газохода; поле концентрации и поле скоростей для пылегазовых потоков, в которых содержатся крупные частицы, неоднородны. Несоответствие их тем больше, чем больше увеличение частиц турбулентными пульсациями.

Влияние турбулентности на распределение концентрации в поперечном сечении вертикального газохода исследовалось в работе [62]. Эксперимент проводился с частицами диаметром 29 мкм в газоходу диаметром 70 мм при различных значениях Рейнольдса. При $Re = 65$ концентрация пыли убывала на расстоянии $r_r = 0,4R_r$ от центра газохода к стенке. При $Re = 7600$ концентрация практически постоянна по всему сечению.

Однородность концентрации пыли в газоходу сильно нарушается после изгибов. Вблизи на-

ружной вертикальной стенки концентрация намного выше среднего значения, причем такое нарушение можно наблюдать на расстоянии до $16D$. Подобный эффект имеет место при резких изменениях диаметра газохода, а также возле заслонок, лопастей и т. д., где генерируется сильная турбулентность. На рис. 7 приведены диаграммы Фаренбаха распределения скорости

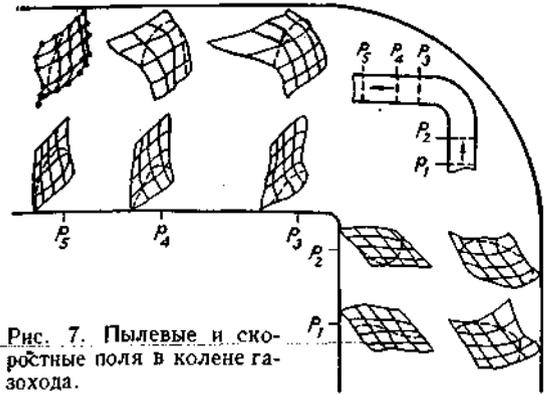


Рис. 7. Пылевые и скоростные поля в колене газохода.

(пунктирные линии) и концентрации пыли (сплошные линии) в колене газохода круглого сечения. В вертикальной части газохода между сечениями p_1 и p_2 изменения концентрации пыли по сечению газохода незначительны. Существенные изменения происходят после прохождения пылегазового потока через колено, что показано диаграммой сечения p_3 . В горизонтальной части газохода за коленом начинается процесс оседания пыли (диаграммы сечений p_4 и p_5). Поэтому рекомендуется отбирать пробы на прямолинейном вертикальном участке газохода на расстоянии не менее $5D$ от изгиба газохода.

Если при промышленном пылевом контроле используют пылемеры с пробоотборными

устройствами, то главная задача состоит в получении представительной пробы. Под представительностью пробы понимают идентичность ее тому пылегазовому потоку, из которого она была взята, в отношении концентрации, дисперсного и химического состава и т. д. Вопрос об оптимальных методах отбора проб из потоков еще далеко не решен, поэтому основные требования пробоотбора далеко не всегда выполнимы при пылевом анализе.

При отборе пыли из потока необходимо выполнять условия изоосности и изокинетичности. Первое требует, чтобы ось пробоотборной трубки строго совпадала с направлением потока в газоходе. Оно выполнимо при соответствующем конструктивном выполнении пробоотборной трубки и наличии надежных элементов для устойчивого крепления пробоотборной трубки в газоходе. Второе условие требует, чтобы скорость пробоотбора была равна скорости потока в газоходе. Из-за непостоянства скорости пылегазового потока возникает необходимость непрерывного измерения скорости потока во время пробоотбора и непрерывного регулирования по полученным результатам скорости пробоотбора.

Чтобы проба была представительной, к месту установки пробоотборного зонда в газоходе предъявляются следующие требования: поток газа в месте установки зонда должен быть представительным и ламинарным; место отбора пробы должно находиться на прямом участке газохода с минимальной длиной $5D$ до пробоотборного зонда и $2D$ после него; поток в газоходе не должен возмущаться близко расположенными вентиляторами, заслонками и т. п.; пробоотбор лучше осуществлять в вертикальном участке газохода, чтобы исключить влияние наслоений и седиментации; в газовом потоке должно быть ми-

нимальное количество других загрязнителей, которые могут повлиять на результат измерений; пробоотборный зонд должен быть помещен в сечение, где имеет место равномерное распределение концентрации.

Отбор пробы пыли очень осложняется при неравномерности пылевого поля по сечению газохода. Чтобы исключить погрешности из-за этого, пробоотборный зонд делают подвижным в радиальном направлении. Можно также использовать комбинированный зонд, состоящий из зонда большего диаметра, который устанавливается внутри газохода и отбирает значительную часть основного потока, и зонда малого диаметра, который устанавливается вне газохода и отбирает часть потока, отобранного зондом большего диаметра. При этом происходит усреднение пробы.

Если по конструктивным или другим соображениям нельзя использовать подвижные или комбинированные пробоотборные зонды, то зонд жестко укрепляют в центре газохода (при небольших диаметрах) или в любой точке поперечного сечения. При этом неравномерность пылевого поля учитывается коэффициентом поля концентрации

$$k_c = \bar{C}/C,$$

где \bar{C} — средняя концентрация пыли по сечению; C — концентрация пыли в точке пробоотбора.

Для определения k_c в контролируемом сечении газохода экспериментальным методом определяют распределение концентрации пыли.

Пробоотборный зонд должен быть тонкостенным и устойчивым против коррозии. Его внутренний диаметр должен быть не менее 6 мм. Зонд соединяется с измерительной аппаратурой пробоотборной трубкой. Длина ее должна быть

минимальной, так как сама трубка является источником погрешности, особенно при измерении малых концентраций. Погрешности возникают в результате изменения давления и осаждения частиц в трубке. С помощью ЭВМ рассчитано [78] количество пыли, осаждающейся в пробоотборной трубке, для частиц диаметром от 1 до 200 мкм и установлено, что примерно 25% частиц размерами более 20 мкм осаждаются на стенках, а затем срываются под действием потока в виде укрупненных агрегатов. Частицы размерами ≤ 5 мкм практически не осаждаются. Экспериментальные исследования [80] показали, что трубка длиной 30 м и диаметром 8 мм, широко используемая в настоящее время, дает малые погрешности, а трубка той же длины, но меньшего диаметра (6 мм) существенно искажает результат измерения. Материал трубки и ее конфигурация не влияют на точность измерения, однако необходимо избегать резких перегибов. Стандарт США рекомендует ограничить длину пробоотборной трубки до 15 м при внутреннем диаметре ее 7,2 мм.

Пробу пыли в газохолоте отбирают, используя методы внешней и внутренней фильтрации. При внутренней фильтрации фильтрующее устройство устанавливают непосредственно за зондом, при этом сокращается до минимума расстояние между зондом и фильтром и исключается пробоотборная трубка. При внешней фильтрации фильтрующее устройство располагают за газоходом на любом удобном расстоянии и соединяют с зондом пробоотборной трубкой. На рис. 8 приведены три образца зонда для внутренней фильтрации.

Метод внешней фильтрации более удобен в работе, но менее точен из-за дополнительных погрешностей при использовании пробоотборной

трубки. Метод внутренней фильтрации более точен, но значительно более трудоемок из-за необходимости при замене фильтра извлекать зонд из газохода. Он используется при проведении точных измерений, а также при большой слипаемости пыли и высоком влагосодержании.

Не менее важным является вопрос температуры пробоотбора. Концентрацию пыли можно

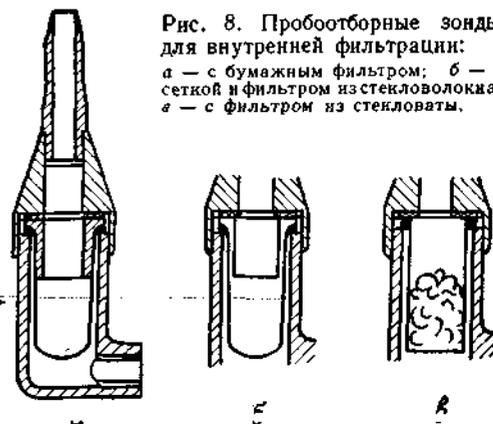


Рис. 8. Пробоотборные зонды для внутренней фильтрации: а — с бумажным фильтром; б — с сеткой и фильтром из стекловолокна; в — с фильтром из стекловаты.

измерять при температуре, равной температуре газа в газохолоте, и при температуре окружающей среды. Поскольку в основном используется метод внешней фильтрации, то предпочтительно измерения проводить при температуре окружающей среды, хотя более достоверными следует считать измерения в условиях, аналогичных условиям в газохолоте, поскольку при отборе горячей пыли к инерционному осаждению частиц на внутренних стенках пробоотборной трубки добавляется и термофоретическое. Нагрев пробоотборной трубки устраняет термофорез и пре-

пятствует прилипанию частиц к стенкам. При соприкосновении частиц с горячей стенкой в зоне контакта выделяются десорбирующиеся из частицы газы и пары и препятствуют образованию прочного адгезионного контакта.

ВЫБОР МЕТОДА И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ

Методы измерения концентрации пыли делятся на две группы: методы, основанные на предварительном осаждении частиц пыли и исследовании осадка; методы без предварительного осаждения. Основным преимуществом методов первой группы является возможность измерения массовой концентрации пыли. К недостаткам следует отнести циклический характер измерения, большую трудоемкость, низкую чувствительность, обуславливающую длительность пробоотбора при измерении малых концентраций.

Преимуществами методов второй группы является возможность непосредственных измерений в самом пылегазовом потоке без использования пробоотборного устройства, непрерывность измерений, высокая чувствительность, практическая безынерционность, возможность полной автоматизации процесса измерений. Во время измерений в поток не вносятся аэродинамические искажения. Существенным недостатком методов второй группы является влияние на результат измерения изменений дисперсного состава и других свойств пыли.

Выбор оптимального метода измерения для конкретного случая промышленного пылевого контроля возможен только при знании свойств

пыли в выбросах, основных закономерностей их изменения, сопутствующих факторов, отрицательно влияющих на процесс измерения, при учете всех положительных и отрицательных характеристик метода.

Для промышленного пылевого контроля характерны широкий диапазон измеряемых концентраций (от нескольких миллиграммов до нескольких граммов на кубический метр); широкий спектр размеров частиц пыли (от 0,05 до 100 мкм); высокие скорости (до 40 м/с) и температуры (до 1200°С) контролируемых пылегазовых потоков. Кроме того, сама концентрация пыли непрерывно изменяется как во времени, так и в пространстве в довольно широких пределах в зависимости от устойчивости работы пылеочистного оборудования.

Применительно к непрерывному промышленному пылевому контролю наиболее приемлемыми являются методы второй группы. Они дают непрерывную информацию о мгновенных значениях концентрации пыли и закономерностях ее изменения, что позволяет ввести, во-первых, автоматическую регулировку работы пылеочистных сооружений; во-вторых, сигнализацию о высоких концентрациях пыли в выбросах, превышающих предельные допустимые нормы, с целью принятия экстренных радикальных мер по уменьшению концентрации пыли, в-третьих, останавливать производство в аварийных ситуациях, когда пылеочистные сооружения вышли из строя и в атмосферу с пылевыми выбросами выбрасывается огромное количество ценного сырья или готового продукта.

Однако методы второй группы не всегда можно использовать на практике из-за высокой чувствительности к нестационарным флуктуациям, связанным с внешними факторами (температурой

и влажностью окружающей среды, параметрами источника питания прибора), и к нестационарным, связанным с внутренними факторами (температурой, влажностью, скоростью пылегазового потока, давлением, дисперсным и химическим составом пыли). Критерием для оценки чувствительности метода к нестационарным флуктуациям может служить обобщенная разрешающая способность метода измерения и измерительного преобразователя [47]:

$$\psi = \eta M^{1/2}, \quad (7)$$

где η — отношение сигнал/помеха; $M = \frac{1}{u_{cp}} \times \left(\frac{u_2 - u_1}{2} - u_{\phi} \right)$ — глубина модуляции измеряемой физической характеристики контролируемого вещества; $u_1 = u_i$ при $g_i = g_1$; $u_2 = u_i$ при $g_i = g_2$; g_i — значение контролируемого параметра; $g_2 - g_1 = \Delta g_{доп}$ — заданное допустимое значение абсолютной погрешности измерения; u_i — значение физической характеристики контролируемого вещества; u_{ϕ} — ста-

ционарные флуктуации; $u_{cp} = \frac{1}{g_2 - g_1} \int_{g_1}^{g_2} u_i dg_i$ — среднее значение физической характеристики контролируемого вещества; $\eta = \left(\frac{u_2 - u_1}{2} - u_{\phi} \right) / (u_2 - u_1 / 2) = 1 - \frac{2u_{\phi}}{u_2 - u_1}$.

Подставив значения M^2 и η в уравнение (7), получим

$$\psi = \left(1 - \frac{2u_{\phi}}{u_2 - u_1} \right) \left(\frac{u_2 - u_1 - 2u_{\phi}}{2u_{cp}} \right)^{1/2}.$$

Критерий ψ имеет следующие особенности: значение $g_2 - g_1$, при котором $(u_2 - u_1)/2 = u_{\phi}$ и, следовательно, $\psi = 0$, определяется как

разрешающая способность измерительного преобразователя;

если флуктуации больше сигнала полезной информации $\left(u_{\phi} > \frac{u_2 - u_1}{2} \right)$, то критерий ψ становится мнимой величиной.

Использование критерия ψ позволяет путем анализа выбрать метод измерения, оптимальный с точки зрения его разрешающей способности и чувствительности к нестационарным флуктуациям. В тех случаях, когда величина флуктуаций значительно превышает величину сигнала, несущего полезную информацию $\left(u_{\phi} > \frac{u_2 - u_1}{2} \right)$, необходимо, прежде всего, принять меры по стабилизации флуктуаций. Если все меры по стабилизации приняты, но флуктуации превышают полезную информацию, то следует в ущерб объему необходимой полезной информации отказаться от методов второй группы и перейти к тем методам первой группы, для которых выполняется неравенство $u_{\phi} < \frac{u_2 - u_1}{2}$.

Методы измерения концентрации пыли, основанные на предварительном осаждении частиц пыли. Весовой метод. В основу его положено выделение из пылегазового потока частиц пыли и определение массы пылевого осадка путем взвешивания. Концентрация пыли

$$C = m/V, \quad (8)$$

где m — масса пыли на фильтре; V — объем воздуха, прошедшего через фильтр за время пробоотбора.

Измерение концентрации пыли весовым методом включает следующие операции: улавливание на фильтр частиц пыли из отобранной пробы, взвешивание осадка пыли, измерение объема

пробы. При определении концентрации пыли лишь часть ее задерживается на фильтре. Коэффициент задержки пыли зависит от свойств фильтрующего материала, скорости фильтрации и дисперсного состава пыли. В СССР широко применяются волокнистые фильтрующие материалы типа ФП, разработанные академиком И. В. Поряновым. Для механизма фильтрации пыли в волокнах существенными являются следующие эффекты:

осаждение вследствие инерции при больших скоростях фильтрации для крупных частиц. Вероятность задержки частиц пыли на волокнах пропорциональна произведению r^2v , где r — радиус частицы, v — скорость фильтрации;

осаждение вследствие касания. Вероятность этого процесса зависит в основном от размера частиц и пропорциональна r ;

осаждение вследствие диффузии. Вероятность процесса пропорциональна $(1/rv)^{1/2}$, т. е. возрастает с уменьшением размера частиц и скорости фильтрации;

осаждение вследствие наличия электростатического заряда фильтрующего материала. Вероятность процесса пропорциональна $1/v$;

фильтрация в лобовом слое материала в результате отсеивания.

Фильтр, используемый при измерениях, характеризуется следующими основными параметрами: толщиной, аэродинамическим сопротивлением, коэффициентом проскока Π_ϕ , который равен отношению концентраций пыли на выходе и входе фильтра и может быть определен из формулы

$$\lg \Pi_\phi = -\alpha \Delta p,$$

где Δp — аэродинамическое сопротивление фильтра; α — коэффициент фильтрующего де-

вия, зависящий от диаметра волокон фильтра, пористости материала, дисперсности пыли.

Расчет Π_ϕ очень сложен, поэтому его определяют экспериментально. Коэффициент Π_ϕ возрастает с увеличением скорости фильтрации и достигает максимального значения при скоростях 120—200 м/с.

К достоинствам весового метода следует отнести, прежде всего, то, что он измеряет массовую концентрацию пыли и на его показания не влияют изменения химического и дисперсного состава пыли, формы частиц, их оптических, электрических и других свойств. Метод позволяет измерять большие концентрации пыли. Техника измерения сравнительно проста, но сам процесс измерения довольно длителен и трудоемок.

С точки зрения непрерывного промышленного пылевого контроля, весовой метод не удовлетворяет основному требованию — непрерывности измерения. Однако в последнее время найден способ получения непрерывной информации о мгновенном значении концентрации пыли в выбросах [3], который состоит в следующем. Поскольку

накопление пыли на фильтре является процессом интегрирования, то, имея непрерывный сигнал $u_{\text{вх}}(t)$ о нарастании массы осевшей пыли, можно автоматически дифференцировать его, чтобы

получить выходной сигнал $u_{\text{вых}} = du_{\text{вх}}(t)/dt$, соответствующий мгновенному значению концентрации пыли.

Осуществление метода требует полной автоматизации всех измерительных операций, что делает аппаратуру сложной и дорогой.

Несмотря на указанные выше недостатки, весовой метод нашел самое широкое применение при осуществлении пылевого контроля в выбросах промышленных предприятий. Он оказался первым методом, нашедшим применение на

практике, и в настоящее время является общепри-
нятым методом измерения концентрации пыли.
Все существующие и вновь разрабатываемые
пылемеры, основанные на других методах изме-
рения, градуируют, используя весовой метод
качестве контрольного. Однако это не всегда ме-
трологически правильно, поскольку разрабаты-
ваемые методы, как правило, превосходят весо-
вой метод по точности.

Проведем метрологическую оценку весового
метода. Суммарная погрешность измерения ко-
нцентрации пыли весовым методом включает по-
грешность отбора пробы из пылегазового потока
из-за нарушения условий изотопности и изотер-
мичности, осаждения частиц пыли на стенках про-
боотборной трубки; погрешность фильтрации;
погрешность измерения объема отобранной про-
бы; погрешность измерения массы уловленной
пыли.

Погрешность отбора пробы для частиц разме-
ром порядка 1 мкм составляет 0,5—1%, для час-
тиц в 10 мкм — 5—15%. Однако при использо-
вании способа внешней фильтрации погрешность
возрастает за счет осаждения частиц пыли в про-
боотборной трубке. Погрешность фильтрации
возникает из-за неполноты улавливания, при
использовании тканевых и бумажных фильтров
она составляет 1—2%. Погрешность при изме-
рении объема отобранной пробы комбинирован-
ными диафрагмами равна $\pm 2\%$. Погрешность
при взвешивании осадка пыли существенна лишь
при измерении малых концентраций.

Следует отметить также, что при отборе про-
бы пыли изменяется не только концентрация,
но и дисперсный состав пыли, поскольку более
крупные частицы осаждаются на стенках про-
боотборной трубки, а очень мелкие частицы про-
скакивают через фильтр. Максимальная точность

полученная при измерении концентрации пыли
выбросах промышленных предприятий весовым
методом, составила 3—4% [42]. При измерениях
для улавливания пыли использовался циклон и
фильтр из стеклоткани, что обеспечило почти
100%-ное улавливание.

Радиоизотопный метод измерения concentra-
ции пыли основан на поглощении радиоактивного
излучения веществом. Непосредственное измере-
ние поглощения радиоактивного излучения пы-
тью в пылегазовом потоке осуществить практиче-
ски невозможно из-за малой концентрации пыли.
Поэтому используют предварительную филь-
трацию запыленного воздуха с последующим оп-
ределением массы осевшей пыли по ослаблению
радиоактивного излучения при прохождении его
через пылевой осадок. Концентрация пыли рас-
считывается по формуле (8).

При измерении массы m осевшей на фильтре
пыли радиоизотопным методом исходят с неко-
торыми допущениями из того, что поглощение
радиоактивного излучения описывается уравне-
нием

$$I_{pa} = I_{o.pa} \exp(-\mu_m m) \quad (8)$$

где I_{pa} — интенсивность радиоактивного излу-
чения после прохождения чистого фильтра;
 $I_{o.pa}$ — интенсивность радиоактивного излуче-
ния после прохождения через пылевой осадок
на фильтре; $\mu_m = aE_{\max}^{-b}$ — массовый коэффи-
циент поглощения радиоактивного излучения;
 E_{\max} — максимальная энергия частиц радио-
активного излучения; $a = 0,017 \dots 0,22$, $b =$
 $= 1,14 \dots 1,50$ — константы.

Неоднозначность величин констант связана
с энергетическим распределением частиц излуче-
ния. Массовый коэффициент поглощения μ_m за-
висит от вида и энергии излучения, свойств

поглотителя и условий измерения (толщины осадка, расстояния от источника и детектора, расстояния от источника до детектора).

При определении концентрации пыли наиболее широко используется β -излучение, так оно обладает достаточной проникающей способностью и довольно хорошо подчиняется экспоненциальному закону (9).

Результаты измерения концентрации пыли радиоизотопным методом зависят в некоторой степени от ее химического и дисперсионного состава. Зависимость от химического состава обусловлена особенностями взаимодействия радиоактивного излучения с веществом и характеризуется тормозной способностью, которая для β -излучения $T_{\beta} = Z/A$ и для α -излучения $T_{\alpha} = 1/A^{1/2}$, где Z и A — порядковый номер элемента и его относительная атомная масса. Зависимость T_{β} от химического состава незначительна, так как отношение Z/A постоянно равно приблизительно 0,5 для всех элементов первой половины периодической системы элементов, кроме водорода, лишь к концу ее уменьшается до 0,38. Для химических соединений, из которых состоит пыль, T_{β} вследствие усреднения близка к 0,5. Влияние дисперсного состава обусловлено нелинейностью зависимости ослабления излучения от толщины слоя поглотителя. Для большинства изотопов β -излучение обладает достаточной проникающей способностью, чтобы в пределах размеров частиц указанная зависимость была линейной. Исследования показали, что погрешность в результате изменений химического и дисперсного состава пыли не превышает 15%.

Радиоизотопный метод измерения концентрации пыли обладает многими преимуществами. Его показания соответствуют показаниям весового метода. По данным специалистов ФРГ, при

концентрации пыли 150 мг/м^3 результаты измерений, полученные радиоизотопным методом, отличаются от результатов, полученных весовым, на 11% [70]. Поскольку измерения концентрации пыли радиоизотопным методом проще измерений весовым методом и не уступают ему по точности и чувствительности, то он вполне может заменить весовой метод при создании пылевых измерений промышленного значения. Все недостатки, присущие весовому методу, как методу с предварительным осаждением пыли, относятся и к радиоизотопному методу. Из них основной — цикличность измерения.

Денситометрический метод основан на предварительном осаждении частиц пыли на фильтре и определении оптической плотности пылевого осадка. Он включает все операции, аналогичные операциям весового метода, исключая взвешивание пылевого осадка, которое заменено фотометрированием. Оптическую плотность осадка можно определить путем измерения поглощения или рассеяния им света. Коэффициент корреляции, полученный в результате сравнения результатов измерений концентраций пыли, определенных весовым методом и методом денситометрии, равен 0,93 при измерении поглощения света пылевым осадком и 0,89 при измерении света, рассеянного пылевым осадком. Первый метод является более точным, второй обладает большей чувствительностью. Основной недостаток метода связан с тем, что результаты измерения существенно зависят от оптических свойств пыли.

Пьезоэлектрический метод основан на измерении собственной частоты пьезокристалла во время осаждения на его поверхность частиц пыли. При малых амплитудах колебаний кристалла уменьшение частоты колебаний Δf последнего прямо пропорционально массе m осевшей на нем

пыли:

$$\Delta f = Am,$$

где A — коэффициент пропорциональности.

Чтобы исключить влияние изменений температуры, влажности, скорости пылегазового потока, давления в газоходе и других неинформативных параметров, наряду с измерительным пьезокристаллом используют компенсационный пьезоэлектрический метод является весьма перспективным. Существенным преимуществом является то, что он позволяет измерять массовую концентрацию пыли. Однако при практическом использовании метода возникают две существенные проблемы: увеличение силы захвата частиц кристаллом и периодическая очистка его поверхности от осевшей пыли. Первая проблема фактически уже решена: для увеличения силы захвата применяют липкие покрытия, наносимые на рабочую поверхность кристалла, а также используют принудительное осаждение частиц пыли под действием внешней силы, например, электроосаждение. Вторая проблема еще требует решения.

Метод измерения частоты колебаний. В основу положено измерение изменений частоты вибрирующего элемента при осаждении на нем пыли. Метод относят к перспективным, поскольку результаты измерения однозначно связаны с массой пыли. Возможно использование колеблющегося фильтра, укрепленного в пружинном держателе. Специальное устройство возбуждает колебания фильтра. С помощью насоса через фильтр прокачивают пылегазовый поток и измеряют частоту колебаний фильтра до и после фильтрации. Устройство сравнения частот выдает сигнал пропорциональный массе осевшей пыли. Экспериментальные исследования показали, что более

эффективно использовать вибратор в виде колеблющейся ленты с введением электростатического осаждения на ней частиц пыли. Изменение частоты колебаний вибратора за счет осаждения на нем частиц пыли

$$\Delta f = -\frac{1}{2} \frac{m}{m_0} f_0, \quad (10)$$

где m — масса осевшей пыли; m_0 — масса вибратора; f_0 — начальная частота колебаний вибратора, если на нем отсутствуют частицы пыли.

Частоту и амплитуду колебаний вибратора выбирают такими, чтобы обеспечить линейную зависимость между изменением массы осевшей пыли и частоты вибратора, нужную чувствительность и эффективное улавливание пыли.

Метод, основанный на измерении перепада давления на фильтре. Он включает прокачивание пылегазового потока через фильтр и измерение разности давлений на входе и выходе фильтра. Результаты измерения пропорциональны массовой концентрации пыли. Достоинством метода является сравнительная простота осуществления. Однако он требует строгой стабилизации основных параметров пылегазового потока (скорости, температуры и др.).

Методы измерения концентрации пыли без предварительного ее осаждения. Электрические методы. К этой группе относится контактоэлектрический. Он основан на способности пылевых частиц электризоваться при контактировании с преградой, выполненной из контактоактивного материала, и отдавать приобретенный поверхностный заряд токопроводящим элементам преграды. Основными элементами контактоэлектрического измерительного преобразователя являются электризатор, в котором происходит зарядка частиц, и токосъемный электрод, которому частицы передают свой заряд. Зависимость между

массовой концентрацией частиц пыли и зна- нием силы зарядного тока в цепи токо- электрод имеет линейный характер при кон- центрациях до 2 г/м³, когда основная масса ч- тиц пыли контактирует с внутренней поверх- тью электратора и токо- суммарная величина регистрируемого зар- пропорциональна количеству частиц. Даль- шее увеличение концентрации приводит к с- щению зарядного тока.

На электризацию частиц пыли при взаи- ствии их с электратором оказывают суще- ственное влияние электрические свойства пыли, д- перный состав ее, влажность, температура, скорость. Установлено, что для получения ма- симальной чувствительности скорость частиц в электраторе должна быть равна 105—115 м/с, так как при этой скорости заряд, приобретае- мый частицей, имеет максимальную величину.

Практическое применение метода ограниче- его недостатками — большим влиянием на ре- зультат измерения электрических свойств пыли влажности (наличие влаги ведет к образованию на поверхности частиц пленки, которая наруша- ет контакт частицы с поверхностью электратора) и быстрым залипанием проходного отверстия электратора.

К электрическим относится емкостный метод в основу которого положено измерение измене- ний емкости конденсатора при прохождении че- рез него частиц пыли. Включив конденсатор в колебательный контур, частота собственных ко- лебаний которого сравнивается с эталонной, оп- ределяют концентрацию пыли по разности частот. При этом следует учитывать электрические свой- ства пыли. Так, проводящая пыль не только из- меняет емкость конденсатора, но вносит допол- нительные изменения в параметры колебатель-

ного контура, изменяя его добротность. Непро- водящая пыль изменяет только частоту коле- баний.

Электрические методы измерения концент- рации пыли не находят широкого применения в промышленном пылевом контроле выбросов. Объясняется это тем, что частицы пыли либо приобретают низкие заряды при электризации, либо являются взрывоопасными, либо имеют рыхлую структуру, что разрушаются при контактировании с преградой, либо обладают высокой слипаемостью, что приводит к быстрой забивке электратора. К таким пылям относят- ся пылевые выбросы предприятий химической, целлюлозно-бумажной промышленности, производств строительных материалов и др. Поэтому электрические методы измерения кон- центрации пыли используют преимущественно в металлургической промышленности.

Акустический метод основан на измерении параметров акустического поля при наличии частиц пыли в пространстве между источником и приемником звука. Величина потерь звуковой энергии, обусловленных наличием взвешенных твердых частиц, пропорциональна объемной кон- центрации пыли. При этом коэффициент допол- нительного поглощения звуковой энергии

$$\alpha = \frac{1}{l_n} \left(\ln \frac{p_0}{p_n} - \ln \frac{p_0}{p_n} \right),$$

где l_n — длина акустического пути от излучателя до приемника звука; p_0 , p_n — амплитуды аку- стического давления, регистрируемого приемни- ком для чистого и запыленного воздуха; p_0 — амплитуда акустического давления, возбуж- даемая излучателем.

На результат измерения концентрации пыли акустическим методом влияют изменения скорос-

ти, температуры и влажности пылевоздушного потока; давления в газоходе; дисперсного состава пыли. К недостаткам метода следует отнести сложность измерительной аппаратуры, использование которой при осуществлении промышленного пылевого контроля выбросов предприятия нецелесообразно.

Оптические методы занимают ведущее место среди других при осуществлении непрерывного промышленного пылевого контроля выбросов. Они являются наиболее простыми и надежными. На основе оптических методов созданы пылемеры промышленного назначения, используемые во всех странах мира. Так, например, более 100 пылемеров серии RM установлено в США и других странах на электростанциях, цементных заводах и других промышленных предприятиях.

Точность и достоверность результатов пылевого контроля при использовании оптических методов измерения определяются, главным образом, стабильностью свойств частиц пыли. Для конкретных источников пылевых выбросов точность измерений может быть достаточно хорошей для практических целей при следующих ограничениях: дисперсный состав пыли не изменяется с изменением концентрации пыли в газоход; содержание мелкой пыли (менее 0,5 мкм) настолько мало, что средний коэффициент поглощения можно принять постоянным; градуировка пылемера проводится на пыли, дисперсный и химический состав которой аналогичен составу контролируемой пыли.

В основу действия оптических пылемеров промышленного назначения положены явления поглощения света движущимся пылегазовым потоком и рассеяния света движущимися частицами пыли.

На основе явления поглощения созданы оптические абсорбционные пылемеры, на основе явления рассеяния — оптические пылемеры светорассеяния. Из них первые нашли применение при измерении концентраций до нескольких граммов на кубический метр, вторые могут быть использованы при измерении низких концентраций (от нескольких единиц до 500 мг/м³). Таким образом, оптические пылемеры позволяют измерять концентрации пыли в выбросах промышленных предприятий в широком диапазоне.

ОПТИЧЕСКИЕ АБСОРБЦИОННЫЕ ПЫЛЕМЕРЫ

ОПТИЧЕСКИЙ АБСОРБЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ

В основу оптического абсорбционного метода измерения концентрации пыли в промышленных пылегазовых потоках положен закон поглощения света веществами Бугера — Ламберта — Бера

$$I = I_0 \exp(-\kappa Cl), \quad (11)$$

где I_0 — начальная интенсивность; κ — удельный показатель поглощения света на единицу концентрации C вещества; l — толщина слоя вещества.

При этом вводится допущение, что удельный показатель поглощения является постоянной величиной и оптическая плотность

$$D = \ln \frac{I_0}{I} = \kappa Cl \quad (12)$$

зависит исключительно от концентрации частиц и толщины слоя.

Однако опыт показывает, что концентрация вещества и интенсивность света I , прошедшего через поглощающий слой. Поскольку удельный показатель поглощения большинства промышленных пылегазовых потоков мал, для увеличения чувствительности метода следует существенно увеличивать значение толщины l , которая для конкретного прибора равна расстоянию между источником света и фотоприемником (батарея прибора). Повысить чувствительность метода можно также за счет увеличения значения l , что, в свою очередь, требует увеличения начальной интенсивности I_0 .

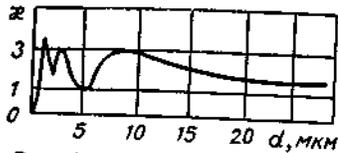


Рис. 9. Зависимость удельного показателя поглощения k от диаметра частиц d .

Концентрационная чувствительность оптического абсорбционного пылемера в значительной степени зависит от конструктивных параметров прибора. Прежде всего, от оптической схемы. При этом погрешность преобразования измеряемой оптической плотности D пылегазовой среды в электрическую форму $W(D)$, где $W(D)$ — характеристика измерительного преобразователя прибора, будет в основном определяться структурой оптической схемы прибора и характеристиками отдельных ее звеньев.

В оптических абсорбционных пылемерах находят применение одно- и двухлучевые схемы. Структурная схема однолучевого оптического абсорбционного пылемера приведена на рис. 10, а. Световой поток от источника 1 проходит через заход 2 с измеряемой пылегазовой средой и воспринимается фотоприемником 3 . Выходной сигнал последнего подается на усилитель 4 , формирующий преобразователь 5 и фиксируется измерительным прибором 6 . Существенным недостатком однолучевых оптических абсорбционных пылемеров является наличие нескомпенсированного сигнала, когда пыли в газозоде нет ($D=0$). Погрешность преобразования измеряемой оптической плотности пылегазовой среды в

Указанные факторы в значительной степени сужают диапазон применения оптических абсорбционных методов, поскольку закон Бугера — Ламберта — Бера строго применим только к монодисперсным системам. Тем не менее с некоторой погрешностью он используется для поглощения света дисперсными системами, состоящими из малоокрашенных, а также непрозрачных и непрозрачных частиц. Для металлических частиц показатель поглощения является значительно более сложной функцией длины волны и размера частиц, поэтому оптический абсорбционный метод следует считать малопригодным для измерения концентрации металлической пыли.

Как следует из формулы (11), концентрационная чувствительность метода

$$S_0 = \frac{\Delta I}{\Delta c} = -k l I_0 \exp(-k l c) = -k l I, \quad (13)$$

т. е. она тем больше, чем больше удельный показатель поглощения k , толщина l поглощающей

о вещества и интенсивность света I , прошедшего через поглощающий слой. Поскольку удельный показатель поглощения большинства промышленных пылегазовых потоков мал, для увеличения чувствительности метода следует существенно увеличивать значение толщины l , которая для конкретного прибора равна расстоянию между источником света и фотоприемником (батарея прибора). Повысить чувствительность метода можно также за счет увеличения значения l , что, в свою очередь, требует увеличения начальной интенсивности I_0 .

Концентрационная чувствительность оптического абсорбционного пылемера в значительной степени зависит от конструктивных параметров прибора. Прежде всего, от оптической схемы. При этом погрешность преобразования измеряемой оптической плотности D пылегазовой среды в электрическую форму $W(D)$, где $W(D)$ — характеристика измерительного преобразователя прибора, будет в основном определяться структурой оптической схемы прибора и характеристиками отдельных ее звеньев.

Концентрационная чувствительность оптического абсорбционного пылемера в значительной степени зависит от конструктивных параметров прибора. Прежде всего, от оптической схемы. При этом погрешность преобразования измеряемой оптической плотности D пылегазовой среды в электрическую форму $W(D)$, где $W(D)$ — характеристика измерительного преобразователя прибора, будет в основном определяться структурой оптической схемы прибора и характеристиками отдельных ее звеньев.

В оптических абсорбционных пылемерах находят применение одно- и двухлучевые схемы. Структурная схема однолучевого оптического абсорбционного пылемера приведена на рис. 10, а. Световой поток от источника 1 проходит через заход 2 с измеряемой пылегазовой средой и воспринимается фотоприемником 3 . Выходной сигнал последнего подается на усилитель 4 , формирующий преобразователь 5 и фиксируется измерительным прибором 6 . Существенным недостатком однолучевых оптических абсорбционных пылемеров является наличие нескомпенсированного сигнала, когда пыли в газозоде нет ($D=0$). Погрешность преобразования измеряемой оптической плотности пылегазовой среды в

выходной сигнал $y(D)$ [39] определяется формуле

$$\Delta D = 0,43 \left(\frac{\Delta S_n}{S_n} + \frac{\Delta_0}{S_n} 10^{-D} \right),$$

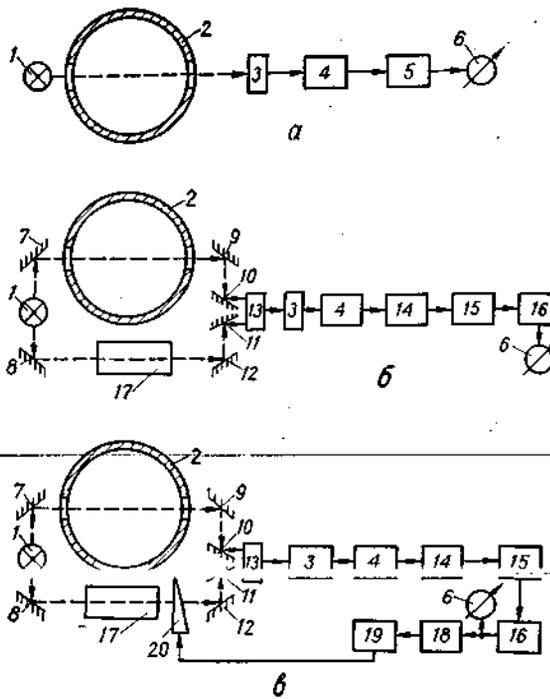


Рис. 10. Структурные схемы оптических абсорбционных пылемеров.

где S_n , ΔS_n — коэффициент преобразования измерительной системы и величина его суммарной нестабильности; Δ_0 — смещение нуля прибора.

Точность преобразования по критерию Бриллюэна

$$A_1 = D/\Delta D = 3,03 S_n D / (\Delta S_n + \Delta_0 10^{-D}).$$

При $\Delta S_n = 0$ максимум A_1 совпадает со значением оптической плотности $D = 0,43$. При $\Delta S_n \neq 0$ максимум смещается в сторону больших значений D .

Однолучевые оптические пылемеры, характеризующиеся более простой оптической схемой, конструкцией первичного измерительного преобразователя и электрической схемой, имеют ряд погрешностей, обусловленных нестабильностью напряжения питания, а также старением источника света и фотоприемника. Эти недостатки резко ограничивают область применения однолучевых оптических пылемеров, так как устранение источников погрешностей требует значительного усложнения прибора за счет включения в его схему стабилизирующих устройств. Зачастую затраты на системы стабилизации значительно превышают стоимость самого первичного измерительного преобразователя.

В двухлучевых оптических пылемерах погрешности измерения, вызванные нестабильностью напряжения питания и старением фотоприемника, значительно меньше. Эти пылемеры характеризуются более высокой стабильностью нулевой точки. На рис. 10 б приведена структурная схема оптического абсорбционного пылемера некомпенсационного типа. Свет от источника 1 формируется в два потока. Один из них с помощью зеркала 7 направляется через газозод 2 с измеряемой пылегазовой средой и, отразившись от зеркал 9, 10, проходит через коммутатор каналов 13 и воспринимается фотоприемником 3. Второй световой поток зеркалом 8 направляется через канал сравнения 17, который заполнен очищенной от пыли газовой смесью, по своему составу аналогичной отходящим газам конкретного промышленного предприятия. Световой поток, прошедший канал сравнения, отразившись от

зеркал 12, 11, проходит коммутатор каналов воспринимается тем же фотоприемником 3. Сигнал с выхода фотоприемника поступает на усилитель 4, блок разделения измерительного сигнала и сигнала сравнения 14, блок измерения отношения сигналов 15, логарифмирующее устройство 16. Выходной сигнал последнего равен оптической плотности D измеряемой пылегазовой среды и является мерой концентрации пыли в газоход. Результаты измерения регистрируются измерительным прибором 6.

Точность рассмотренного пылемера определяется выражением

$$A_2 = \frac{2,303S_n D}{(\Delta_0 + \Delta S_n) 10^{-D}},$$

при этом максимум A_2 смещается в сторону меньших D .

Наилучшие условия уменьшения погрешностей обеспечиваются в оптических двухлучевых приборах с оптической компенсацией (рис. 10, в которых выходной сигнал логарифмирующего устройства 16 применяется как сигнал рассогласования для регулирующего блока 18 (обычно реверсивный двигатель). Последний посредством обратного преобразователя 19 и исполнительного органа 20 (оптический клин) приводит схему к равновесному состоянию. Мерой измеряемой оптической плотности D служит угол поворота вала двигателя или положение клина.

Погрешность измерения ΔD двухлучевых приборов с оптической компенсацией имеет чисто аддитивный характер, а характеристика точности

$$A_3 = D/\Delta_n,$$

где Δ_n — погрешность, не зависящая от величины измеряемой оптической плотности D .

Двухлучевые оптические приборы компенсационного типа характеризуются довольно слож-

ной схемой по сравнению с приборами некомпенсационного типа. При измерении малых концентраций применение двухлучевых оптических схем компенсационного типа вместо двухлучевых схем некомпенсационного типа не дает увеличения точности измерений и поэтому нецелесообразно [23; 24]. В связи с этим при создании оптических абсорбционных пылемеров наиболее широкое применение нашли двухлучевые оптические схемы некомпенсационного типа.

Используя оптический абсорбционный метод при создании пылемеров промышленных пылевых выбросов, следует учитывать условия их эксплуатации. Обычно такие пылемеры эксплуатируются в довольно тяжелых условиях. Первичный измерительный преобразователь прибора устанавливается в выхлопном газоходе, через который отходящие газы выбрасываются в атмосферу. При этом на показания прибора могут оказывать влияние посторонние факторы, искажающие результаты измерения: паразитный световой фон; сезонные (от -35°C зимой до $+35^\circ\text{C}$ летом) и суточные колебания температуры атмосферного воздуха; наличие влаги в отходящих газах; загрязненность оптических деталей (смотровых стекол), находящихся в контакте с пылегазовой средой; изменение дисперсного состава пыли.

Паразитный световой фон. Во многих случаях внутрь газохода проникает внешний свет, который, многократно отразившись от внутренних стенок газохода, создает внутри него посторонний световой фон, величина которого меняется как в течение суток (день, ночь), так и в течение года (зима, лето). Поскольку заранее невозможно указать закон изменения паразитного светового фона, следует исключить его влияние на результат измерения. В указанных условиях эксплуатации практически невозможно осуществить

тщательную защиту фотоприемника от паразитного светового фона. Поэтому при создании пылемеров, предназначенных для эксплуатации в газозондах, внутрь которых проникает свет от посторонних источников света, создающий паразитный световой фон, применяют модуляцию светового потока. Обычно используют амплитудную модуляцию, отличающуюся простотой осуществления, а частоту модуляции выбирают, исходя из частотных характеристик фотоприемников. Частота модуляции должна быть возможно более высокой, но такой, при которой еще не сказывается инерционность фотоприемника, т. е. уменьшение чувствительности незначительно по сравнению с чувствительностью при статическом режиме работы фотоприемника. Для фоторезисторов такой частотой является 3—6 кГц, для фотодиодов 10 кГц.

Для регистрации модулированного светового потока наиболее эффективно синхронное детектирование, которое позволяет повысить помехоустойчивость за счет того, что выходной сигнал постоянного тока формируется в результате сравнения измерительного сигнала с опорным сигналом той же частоты.

Изменение температуры атмосферного воздуха. Колебания температуры от -35 до $+35^\circ\text{C}$ отрицательно сказываются на результатах измерения. В основном эти изменения влияют на величину выходного сигнала фотоприемника, в качестве которого в пылемерах промышленного применения чаще всего используют полупроводниковые приборы (фоторезисторы, фотодиоды, фототриоды), обладающие высокими температурными коэффициентами. Возникающие в результате этого температурные погрешности измерения могут быть исключены путем термостатирования фотоприемника или автоматической кор-

рекции результатов измерения введением соответствующих поправок.

При автоматической коррекции необходима дополнительная информация о температуре фотоприемника, для чего в пылемере (рис. 11) рядом с фотоприемником 3, регистрирующим световой поток от источника 1, прошедший газоход 2, устанавливают датчик температуры 9, выходной сигнал которого после усиления (блок 8)

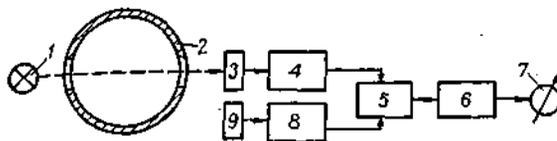


Рис. 11. Структурная схема оптического абсорбционного пылемера с автоматической температурной компенсацией.

подают на блок сравнения 5. Одновременно на блок сравнения подают измерительный сигнал с выхода фотоприемника, усиленный услителем 4. В блоке сравнения происходит умножение сигналов:

$$U_1 = K_1 K_2 K_3 T; \quad U_2 = K_3 T, \quad (15)$$

где U_1 — выходной сигнал фотоприемника; C — измеряемая концентрация пыли; T — температура воздуха в месте расположения фотоприемника; U_2 — выходной сигнал датчика температуры; K_1 , K_2 , K_3 — коэффициенты пропорциональности.

Из формулы (15) следует, что выходной сигнал фотоприемника прямо пропорционален концентрации пыли C в газоходе 2 и обратно пропорционален температуре. Такая зависимость от температуры (отрицательный коэффициент) характерна для фоторезисторов. Выходной сигнал

блока сравнения $U_2 = U_1 U_2 = K_1 K_2 K_3 C$ уже не зависит от температуры окружающей среды и является только функцией измеряемой концентрации пыли C . Сигнал U_2 подают на нормирующий преобразователь δ и измерительный прибор γ . Для градуировки пылемера с автоматической температурной коррекцией необходимо знать величины K_1, K_2, K_3 , которые могут быть определены как теоретически, так и экспериментально.

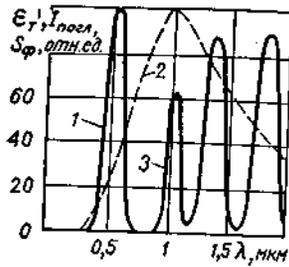


Рис. 12. Зависимость между спектральной чувствительностью $S_{\text{ф}}$ фоторезистора из CdS (1), спектром излучения ϵ_T лампы накаливания с вольфрамовой нитью при температуре 250°K (2) и спектром поглощения $I_{\text{погл}}$ воды в ближней инфракрасной области спектра (3).

влагоу, освещается от обычной лампы накаливания, спектр излучения которой представлен на рис. 12. На этом же рисунке даны спектральные полосы поглощения воды в диапазоне длин волн, соответствующих спектру излучения лампы накаливания. Как видно из рисунка, лампа накаливания излучает свет в ближней инфракрасной области, в которой имеется серия полос поглощения. Поэтому световой поток лампы накаливания будет поглощаться как частицами пыли, так и каплями воды, находящимися в пылегазовом потоке.

Исключить часть света, поглощенного влагой, можно путем выбора фотоприемника, чувствительного к видимой области спектра и нечувствительного к инфракрасному излучению. В качестве такого фотоприемника можно использовать, например, фоторезистор из CdS, максимум спектральной характеристики которого соответствует длине волны 0,55 $\mu\text{км}$, а сама спектральная характеристика находится вне области поглощения воды.

Второй путь исключения влияния влаги на результат измерения состоит в использовании светофильтра, отсекающего ближнюю инфракрасную часть светового потока, прошедшего через измеряемую среду. Светофильтр устанавливается перед фотоприемником, при этом спектральная характеристика последнего может быть не столь узкой, как, например, у фоторезистора из CdS, а более широкой и охватывать как видимую, так и инфракрасную область спектра. Этот путь используют, когда требуется повысить чувствительность измерения, поскольку, как видно из рис. 12, в области спектральной чувствительности фоторезистора из CdS интенсивность излучения лампы накаливания довольно низкая (приблизительно 30%), что ведет к уменьшению чувствительности пылемера при измерении низких концентраций пыли.

Наличие влаги. Исключить вредное влияние влаги, которое может существенно исказить результат измерения концентрации пыли, можно путем использования для измерения концентрации пыли излучения в диапазоне, где поглощение воды отсутствует. Осуществляется это следующим образом. Пылегазовый поток, содержащий влагу, освещается от обычной лампы накаливания, спектр излучения которой представлен на рис. 12. На этом же рисунке даны спектральные полосы поглощения воды в диапазоне длин волн, соответствующих спектру излучения лампы накаливания. Как видно из рисунка, лампа накаливания излучает свет в ближней инфракрасной области, в которой имеется серия полос поглощения. Поэтому световой поток лампы накаливания будет поглощаться как частицами пыли, так и каплями воды, находящимися в пылегазовом потоке.

Зачищенность смотровых стекол. Смотровые стекла устанавливаются в блоке осветителя и блоке фотоприемника и защищают детали пылемера от пыли. В процессе эксплуатации они должны быть чистыми, чтобы не искажались результаты измерений.

Возможны два пути защиты смотровых стекол: не допускать осаждения частиц пыли на смотровые стекла или ввести автоматическую коррекцию в результат измерения для

исключения влияния запыления смотровых стекол.

Чтобы не допустить попадания частиц пыли на смотровые стекла, широко используют обдув их чистым воздухом (рис. 13, а). Чистый воздух подается через трубки 1 таким образом, что

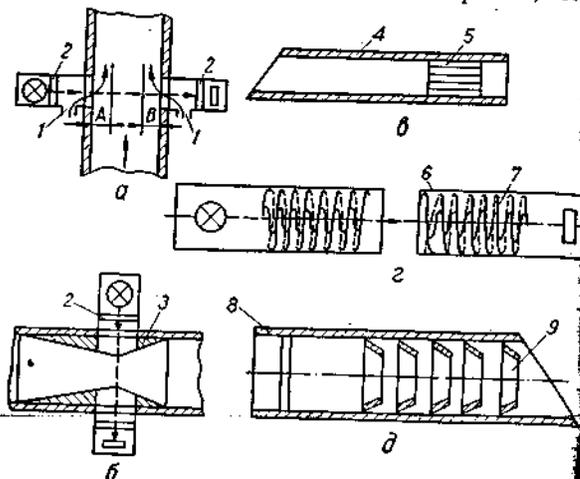


Рис. 13. Способы защиты стекол от запыления

поток его проходил перед наружными поверхностями стекол и выходил в газоход, соединяясь с основным пылегазовым потоком. Такой метод, несмотря на его широкое применение, имеет недостатки. Во-первых, воздух нарушает структуру пылегазового потока в газоходе в зоне измерения, так как он частично вытесняет пыль в зонах А и В. В результате измеряемая концентрация пыли оказывается меньше ее концентрации в газоходе. Ширина зон А и В искажения пылегазового потока зависит от соотношения скоростей обоих потоков и конструктивных параметров

прибора. Искажения, вносимые обдувом, могут оказать существенное влияние при измерении низких концентраций пыли в газоходах малых диаметров, когда зоны искажения составляют значительную часть диаметра газохода. Во-вторых, применение обдува предполагает наличие компрессорных установок с очищенным воздухом, далеко не всегда имеющихся на производстве в местах контроля пылевых выбросов. Кроме того, такой метод требует определенных энергетических затрат, что ведет к удорожанию контроля и уменьшению его технико-экономической эффективности.

Одним из способов защиты стекол от пыли является тепловой. Он основан на том, что вокруг нагретого тела, помещенного в пылегазовую среду, образуется конвекционный слой воздуха, лишенный частиц пыли. Смотровые стекла с внутренней стороны покрывают тонким прозрачным теплопроводящим слоем, к которому подводят электрический ток. Экспериментально установлено [4], что при разности температур между поверхностью стекла и пылегазовой средой в 200°С обеспечивается надежная защита от осаж-

дения пыли. Для защиты стекол от пыли можно использовать трубку Вентури 3 (рис. 13, б), установленную так, чтобы создать разрежение в отсеках перед смотровыми стеклами 2. Данный метод целесообразно использовать при измерении низких концентраций пыли в газоходах малых диаметров. Более эффективным является использование пылезащитных перегородок и насадок, препятствующих осаждению частиц пыли на стеклах. Конструкции их могут быть самыми разнообразными. Пылезащитная насадка 4 может включать перегородки в виде пчелиного сота 5 (рис. 13, в), изготовленного из металла, например, алюминия,

который разделяет ее внутреннее пространство на множество гексагональных трубочек. Насадка плотно прилегает к смотровому стеклу. Вместо перегородок в виде пчелиного сота можно использовать множество тонких трубочек, тесно прилегающих друг к другу, которые располагаются внутри пылезащитной насадки параллельно направлению светового потока. Обычно длина трубочек в 16 раз больше их диаметра. Открытый конец пылезащитной насадки помещается внутри газохода. Он имеет срез под углом 45° по движению пылегазового потока и может быть выполнен в виде загнутой губы. Пылезащитные насадки рассмотренных конструкций довольно сложны в изготовлении и поэтому не нашли широкого практического применения.

Пылезащитная насадка может быть выполнена в виде трубки 6 (рис. 13, г), внутри которой помещена спираль 7 [28]. Внешние края спирали соприкасаются с внутренней поверхностью трубки, а внутренние образуют осевой путь для прохождения света. Внутренний край спирали скручен. Витки спирали образуют экраны, которые разбивают завихрения пылегазового потока, проникающего в насадку, благодаря чему пыль оседает между ними. Недостатками такой насадки являются сложность изготовления, установки и очистки от пыли пылезащитных перегородок. Кроме того, для надежной защиты от пыли трубки с пылезащитными перегородками должны иметь довольно большую длину.

Более простая насадка [21] (рис. 13, д) состоит из трубки 8, внутри которой расположены пылезащитные перегородки 9. Они выполнены в виде конусных колец, расположенных таким образом, что сужающаяся часть их направлена в сторону газохода, оставляя свободный путь для прохождения светового потока. Конусные кольца распо-

ложены друг от друга на расстоянии, равном внутреннему радиусу насадки. Это создает наиболее благоприятные условия для разрушения завихрений пылегазового потока, благодаря чему пыль оседает между конусными кольцами и не доходит до смотрового стекла. Такие пылезащитные перегородки просты в изготовлении, легко разбираются и очищаются от осевшей пыли, а использование их позволяет уменьшить длину пылезащитных насадок.

Были подвергнуты промышленной проверке в течение 1 мес насадки без пылезащитных перегородок и с перегородками различной конструкции. Проверка показала, что насадки без пылезащитных перегородок не обладают пылезащитными свойствами. Использование в насадках пылезащитных перегородок в виде дисков также не дает положительного результата. И только применение конусных колец обеспечивает надежную пылезащиту. Уже при установке внутри насадки двух колец замечается резкое уменьшение количества пыли, проникшей и осевшей на внутренней стенке насадки между конусными кольцами. Опыт промышленной эксплуатации показал, что насадки с пятью конусными кольцами обладают хорошими пылезащитными свойствами.

Рассмотрим второй путь исключения влияния запыления смотровых стекол, когда в результате измерения концентрации пыли вводится коррекция, учитывающая запыление стекол. Возможны два случая: 1 — осуществляют коррекцию, не зная степени запыления смотровых стекол; 2 — непрерывно измеряют запыленность смотровых стекол и на основании полученных результатов вводят автоматическую коррекцию.

В первом случае для коррекции запыления смотровых стекол используют двухлучевую оптическую схему. Поскольку в измерительном

канале световой поток дважды проходит через смотровые стекла, в канале сравнения световой поток направляют таким образом, чтобы он также дважды проходил через смотровые стекла. Используя отношение световых потоков, прошедших через измерительный канал и канал сравнения, исключают уменьшение интенсивности светового потока в измерительном канале за счет частичного

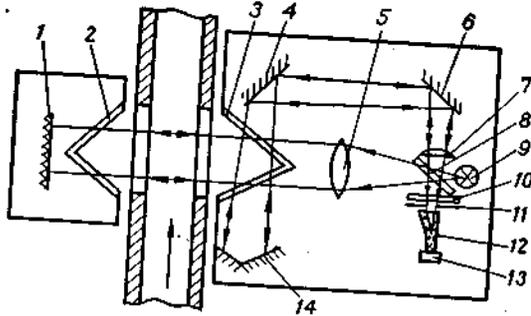


Рис. 14. Оптическая схема пылемера с автоматической коррекцией запыления смотровых стекол.

поглощения его светом оставшейся пыли. Данный способ используется в приборе R-72 [59]. Свет от источника 9 (рис. 14) делится на два потока с помощью зеркального модулятора 8. В измерительном канале свет проходит через линзу 5, смотровые стекла 2, 3, выполненные из двух плоских стекол, установленных друг к другу под углом 90°, измеряемый пылегазовый поток и, отразившись от зеркала 1, расположенного на противоположной стенке газохода, возвращается тем же путем. Отражившись от модулятора, световой поток через фильтр 10 и диафрагму 11 попадает на фотоприемник 13. Для более полного собиранья света на фотоприемнике использован

световод 12. В канале сравнения световой поток с помощью системы зеркал 6, 4, 14 дважды проходит через смотровое стекло 3, а затем через линзу 7, модулятор 8 и попадает на тот же фотоприемник 13. В электронной схеме прибора выходной сигнал фотоприемника усиливается, разделяется по фазе и формируется отношение I_0/I ,

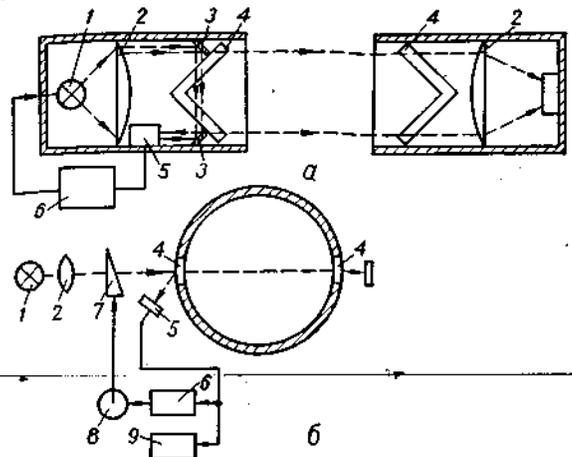


Рис. 15. Оптические схемы пылемеров с контрольным фотоприемником для автоматической коррекции запыления смотровых стекол: а — вариант I; б — вариант II.

где I_0 и I — выходные сигналы каналов сравнения и измерительного.

Во втором случае для измерения степени запыления смотровых стекол 4 вводят контрольный фотоприемник 5 (рис. 15) [29]. Свет на него направляют от источника света 1 через линзу 2 с помощью системы зеркал 3 таким образом, чтобы он проходил через смотровое стекло 4, выполненное из двух плоских стекол, установленных друг к другу под углом 90°, в направлении,

указанном на рис. 15, а. При запылении смотрового стекла пыль будет осаждаться, прежде всего в вершине прямого угла. При этом свет, направляемый зеркалами 3, будет поглощаться осевшей на стекле пылью. Выходной сигнал контрольного фотоприемника 5 подают на усилитель 6, который регулирует величину напряжения питания источника света 1. С увеличением запыления смотровых стекол увеличивают напряжение питания источника, чтобы скомпенсировать уменьшение интенсивности светового потока.

Рассмотренный способ автоматической коррекции запыления смотровых стекол, давая в общем положительный эффект, имеет ряд недостатков. Во-первых, неприемлема сама форма смотрового стекла в виде прямого угла. Световой поток от источника света, падая на грани угла, частично отражается от них, частично проходит через стекло. При незначительном осаждении пыли, которая скапливается в вершине угла, интенсивность светового потока резко уменьшается, в основном в центральной части, что ведет к неравномерному освещению измеряемого пылегазового потока и вносит погрешность в результаты измерения. Во-вторых, при использовании в качестве регулируемого параметра напряжения питания источника света вносится дополнительная погрешность, обусловленная изменением температуры нити накала при изменении напряжения питания и, как следствие, изменением спектрального состава излучения.

Практика показывает, что лучше всего использовать плоские смотровые стекла, расположенные таким образом, чтобы световой поток падал перпендикулярно к их поверхности. При этом потери света за счет отражения от поверхности стекла минимальны. Контрольный фотоприемник 5 устанавливают под углом к наружной

поверхности стекла [3] (рис. 15, б). Частицы пыли, осевшей на внутренней поверхности стекла, частично рассеивают падающий на них световой поток от источника 1. Выходной сигнал контрольного фотоприемника подают на усилитель 6 и реверсивный двигатель 8. Последний по мере увеличения выходного сигнала контрольного фотоприемника выводит нейтральный оптический клин 7 из светового потока источника света настолько, чтобы величина светового потока, освещающего измеряемый пылегазовый поток, оставалась постоянной. Кроме того, выходной сигнал контрольного фотоприемника поступает на сигнализатор 9. Последний выдает аварийный сигнал, когда запыленность смотрового стекла достигает предельного значения, при котором невозможна дальнейшая нормальная работа прибора. Аварийный сигнал указывает, что необходимо протереть смотровые стекла и ввести в световой поток клин 7. Использование в качестве регулирующего органа нейтрального оптического клина не ведет к изменению спектрального состава излучения и поэтому не вносит дополнительной погрешности в результат измерения.

Как показали экспериментальные данные (рис. 16, а), интенсивность света рассеянного осевшей на стекле пылью и регистрируемого контрольным фотоприемником, зависит от поверхностной концентрации C_d осевшей пыли (зависимость получена при установке контрольного фотоприемника под углом 45° к оптической оси освещающего светового потока). Интенсивность регистрируемого контрольным фотоприемником рассеянного света зависит также от угла φ расположения его по отношению к направлению падающего светового потока (рис. 16, б). Оптимальное значение угла φ лежит в области $45-60^\circ$.

Изменение дисперсного состава пыли. Дисперсный состав пыли оказывает влияние на величину удельного показателя поглощения κ по закону Бугера — Ламберта — Бера. Если предположить, что все частицы пыли имеют одинаковую

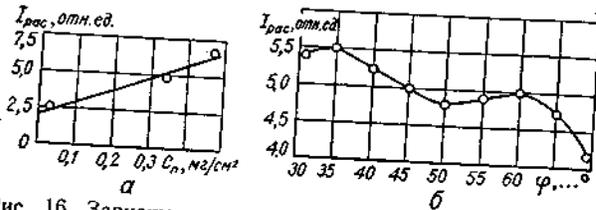


Рис. 16. Зависимость интенсивности рассеянного света $I_{рас}$: а — от поверхностной концентрации C_p осевшей пыли; б — от угла ϕ расположения контрольного фотоприемника относительно направления падающего светового потока.

ую сферическую форму, то κ может быть представлен в следующем виде [68]:

$$\kappa = \frac{3}{4} \frac{Q}{\rho} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{r_i}, \quad (16)$$

где Q — коэффициент, характеризующий оптические свойства пыли; ρ — плотность пыли; a_i — процентное содержание частиц радиуса r_i ;

$$\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{r_i} = F(r), \quad (17)$$

— коэффициент дисперсного состава.

Используя уравнения (11), (16) и (17), получим следующую зависимость между концентрацией пыли и ее дисперсным составом:

$$C = \frac{3\rho}{4QIF(r)} \ln \frac{I_0}{I}. \quad (18)$$

Эта зависимость была подвергнута экспериментальной проверке на пылевой камере, работающей

по принципу отсоса. Концентрация пыли в камере изменялась в диапазоне от 0,1 до 28,5 г/м³ с помощью регулируемого дозатора пыли. Длина газохода 14 м, диаметр 411 мм.

При исследованиях использовались следующие виды пыли: шарики из стекла, молотый из-

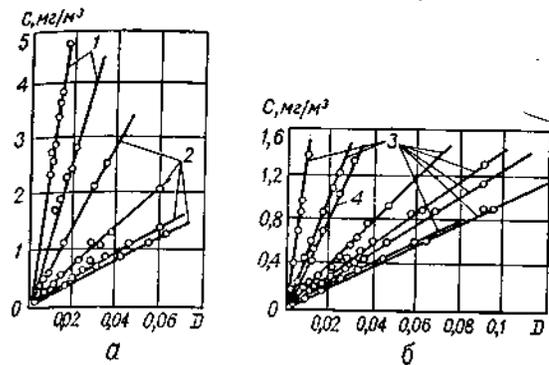


Рис. 17. Градуировочные кривые для различных видов пыли: 1 — стеклянной; 2 — молотого известняка; 3 — сажи; 4 — угольной.

вестняком, сажей и угольной пылью. Наиболее правильную форму, близкую к сферической, имеет стеклянная пыль. Рис. 17 иллюстрирует полученные во время эксперимента градуировочные прямые для различных видов пыли. Все прямые описываются обобщенным уравнением:

$$C = aD + b,$$

где $a = f[\kappa, F(r), \rho] = K\rho/F(r)$ — функция удельного показателя поглощения κ , плотности ρ и дисперсного состава $F(r)$ пыли, причем коэффициент пропорциональности K является величиной постоянной.

Зависимость a от отношения $\rho/F(r)$ для указанных видов пыли имеет линейный характер

(рис. 18, а). Отсюда следует, что для стеклянной пыли и пыли молотого известняка любого дисперсного состава достаточно определить параметр $\rho/F(r)$, чтобы затем по измеренной оптической плотности D определить массовую концентрацию пыли C . Для этого по отношению $\rho/F(r)$ по графику рис. 18, а находят параметр a , затем

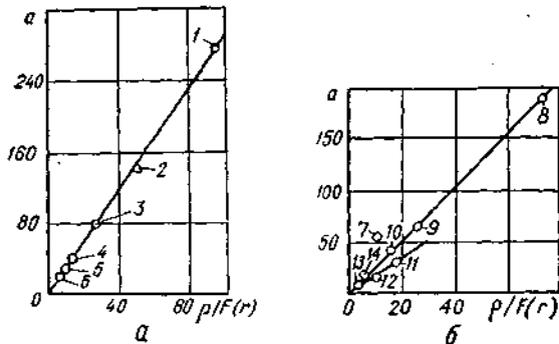


Рис. 18. Зависимость параметра a от отношения $\rho/F(r)$ для различных видов пыли: 1, 2 — стеклянной; 3, 4, 5, 6 — молотого известняка; 7 — угольной; 8—14 — сажи.

строят на рис. 17, а градуировочную прямую $C = aD + b$ для данной фракции пыли.

Градуировочные кривые для сажи и угольной пыли также имеют линейный характер (рис. 17, б). Однако коэффициент K для указанной совокупности пыли уже нельзя считать постоянным, что видно из рис. 18, б, где показана зависимость параметра a от отношения $\rho/F(r)$. Изменения K обусловлены изменением оптических свойств сажи. Для сажи, оптические свойства которой приблизительно одинаковы, применимы выводы, сделанные для стеклянной пыли и пыли молотого известняка.

Результаты, полученные для угольной пыли

резко отличаются от результатов, полученных для других видов пыли. Причина расхождений, скорее всего, в различии структуры поверхности частиц пыли.

Таким образом, если оптические свойства пыли постоянны, то можно учесть изменение ее дисперсного состава и внести соответствующую поправку в результат измерения. Если же наряду с дисперсным составом пыли изменяются и ее оптические свойства, то учесть одновременное изменение обоих факторов не представляется возможным и требуются дополнительные исследования свойств пыли.

Отметим некоторые преимущества оптических методов измерения концентрации пыли и, в частности, оптического абсорбционного метода, который дает возможность непрерывно измерять в потоке мгновенное значение концентрации пыли без пробоотбора при полной автоматизации процесса измерения. Он не вносит возмущений в измеряемую среду по сравнению с методами, основанными на предварительном осаждении пыли. К недостаткам абсорбционного метода следует отнести влияние изменений химического и дисперсного состава пыли, сравнительно узкий диапазон измерения и относительный характер получаемых результатов. Большинство перечисленных недостатков может быть устранено при градуировке прибора на конкретную пыль в определенном интервале концентраций.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ АБСОРБЦИОННЫЕ ПЫЛЕМЕРЫ

Сигнализатор запыленности воздуха (рис. 19) в газоходах аспирационных систем [40], характеризующийся улучшенными техническими характеристиками, предназначен для контроля

работы фильтров и выявления аварийных ситуаций (разрыв фильтрующей ткани). Он имеет релейный выход для подключения системы аварийной сигнализации и блокировки.

Сигнализатор нечувствителен к запылению оптических деталей (смотровых стекол). Работает он следующим образом. В схему введен блок 2 для автоматического поддержания освещенности фотоприемника 3 на одном уровне.

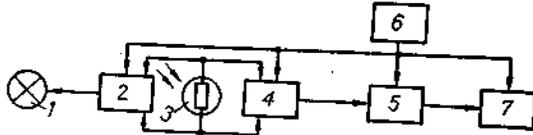


Рис. 19. Структурная схема сигнализатора запыленности.

представляет собой интегрирующий усилитель с большой постоянной времени, на входе которого включен фотоприемник 3, а на выходе источник света 1. При уменьшении выходного сигнала фотоприемника из-за запыления стекол увеличивается выходной сигнал интегрирующего усилителя. Это ведет к увеличению напряжения питания источника света до тех пор, пока выходной сигнал фотоприемника не станет равным прежнему значению, соответствующему его оптимальной освещенности. Таким образом, обеспечивает нечувствительность к медленному изменению освещенности в результате запыления смотровых стекол.

При аварийной ситуации (разрыв фильтрующей ткани рукавного фильтра) резко (скачкообразно) изменяется освещенность фотоприемника. Выходной сигнал его через согласующий каскад 4 подается на дифференциальный усилитель 5, который обеспечивает надежный запуск выходного релейного блока 7, включающего систему

аварийной сигнализации и блокировки. Питание прибора осуществляется от общего блока питания 6. Однако возможны и ложные срабатывания сигнализатора при случайном кратковременном затемнении фотоприемника. Это является недостатком прибора.

Сигнализатор внедрен на Шебекинском химкомбинате и может быть применен в различных областях промышленности.

Для контроля выбросов катализаторной пыли в атмосферу в процессе крекинга нефти создан фотометрический концентратор пыли [44] (катализаторная пыль содержит частицы размером менее 2,5 мкм — 97,7% по массе, от 2,5 до 4 мкм — 2,3%). В приборе используется однолучевая оптическая схема. Оптические элементы схемы обдуваются очищенным сжатым воздухом. Для исключения влияния изменений температуры окружающей среды на результаты измерения фотоприемник термостабилизирован. На источник света подается стабилизированное напряжение. Влияние старения источника света и фотоприемника устраняется корректирующим устройством. Прибор градуируют в единицах оптической плотности по непереносимым аттестованным стеклам марки НС. Градуировку в единицах концентрации пыли осуществляют непосредственно в месте установки прибора. Пределы измерения катализаторной пыли составляют 0—4 г/м³. Основная приведенная погрешность измерения прибора ±8%. Прибор внедрен на Ново-Бакинском нефтеперерабатывающем заводе на установке каталитического крекинга.

В приборе контроля выбросов сажи газомазутными котлоагрегатами электростанций [1; 11] используется метод, основанный на измерении величины пульсаций оптической плотности дымовых газов. Пульсации образуются в результате

турбулентных флуктуаций, возникающих при движении в газоходе пылегазовых потоков. В результате экспериментальных исследований обнаружено, что с увеличением среднего уровня оптической плотности наблюдается рост пульсаций. Использование этого метода позволяет исключить влияние старения источника света и фотоприемника, изменения температуры и влаж-

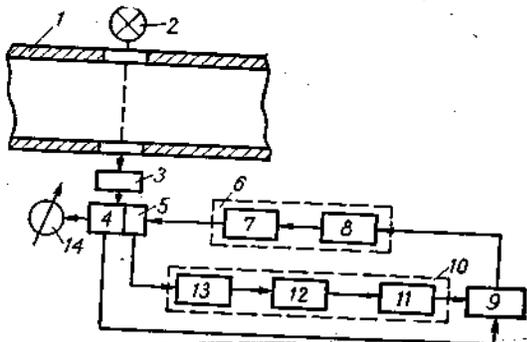


Рис. 20. Структурная схема прибора для контроля выбросов сажи.

ности окружающей и контролируемой сред, загрязнения оптических деталей и др.

Прибор контроля выбросов сажи (рис. 20) состоит из источника света 2 и фотоприемника 3, которые укреплены в газоходе 1 таким образом, чтобы соблюдалось условие соосности. Выходной сигнал фотоприемника подается на измерительный блок 4, а затем на измеритель 14. Кроме того, выход измерительного блока связан через размыкающиеся контакты реле 9 со стабилизатором нуля 6 и функциональным блоком 10. Стабилизатор нуля состоит из усилителя 8 и электропривода 7, который воздействует на корректор нуля 5 измерительного блока 4. Функциональный блок управляет работой реле 9 и состоит

из полосового фильтра 13, усилителя 12 и детектора 11.

Прибор работает следующим образом. Медленные изменения выходного сигнала измерительного блока, вызванные, например, старением источника света или фотоприемника, запыленностью оптических деталей и др., непрерывно автоматически компенсируются стабилизатором нуля 6, который воздействует на корректор нуля 5 таким образом, чтобы выходной сигнал измерителя 14 был равен нулю. Если же выходной сигнал измерительного блока содержит переменную составляющую, обусловленную турбулентными флуктуациями оптической плотности пылегазового потока в газоходе, а амплитуда переменной составляющей превышает определенную величину, то срабатывает реле 9. Последнее отключает стабилизатор нуля 6. При этом показания измерителя 14 соответствуют оптической плотности измеряемого пылегазового потока.

Промышленные испытания прибора показали, что дрейф нуля не превышает 5% в месяц, в то время как приборы, основанные на измерении постоянной составляющей оптической плотности, имеют в аналогичных условиях дрейф нуля на порядок выше. Таким образом, надежность прибора значительно повысилась, что очень важно при осуществлении непрерывного контроля выбросов сажистых частиц на газомазутных котлоагрегатах.

ОПТИЧЕСКИЕ АБСОРБЦИОННЫЕ ПЫЛЕМЕРЫ, ВЫПУСКАЕМЫЕ ЗАРУБЕЖНЫМИ ФИРМАМИ

Одноканальный пылемер «С.Е.Р.О.П.» [51] (Англия) состоит из источника света и фотоприемника, которые размещены на общей платформе. Это увеличивает жесткость связи между ними

и облегчает совмещение оптических осей. Общей платформой служит трубка-зонд длиной 2,29 м и диаметром порядка 70 мм. На одном конце зонда, вводимом в газоход, установлен источник света, а на противоположном, находящемся вне газохода, — фотоприемник. При таком расположении уменьшается нагрев фотоприемника отходящими газами. Размеры зонда выбраны такими, чтобы работать с ним можно было одному человеку. В зонде вырезаны щели длиной 1,37 м. С одной стороны они уже, чем с другой. Соотношение между шириной щелей таково, что линии, проведенные между их краями, образуют угол 45° . Зонд располагают в газоходе узкой щелью навстречу пылегазовому потоку. Экспериментально проверено, что при такой форме щели и расположении ее в газоходе уменьшается турбулентность и завихрения потока у ее краев.

В приборе предусмотрен обдув оптических деталей, контактирующих с пылегазовым потоком, чистым воздухом. Допускается только горизонтальное расположение зонда в газоходе, так как при вертикальном пыль оседает на фотоприемнике под действием силы тяжести.

В приборе применен сульфид-кремниевый фотоприемник высокой чувствительности, что позволило максимально упростить оптическую схему прибора: исключить линзы, формирующие световой поток, идущий от источника к фотоприемнику. Это намного облегчает настройку прибора как во время эксплуатации, так и при замене источника света и фотоприемника, и, кроме того, уменьшает влияние вибраций. Предусмотрена периодическая проверка нулевого показания и чувствительности прибора. При этом зонд выводят из газохода и щели закрывают специальным экраном. После проверки нулевого показания проверяют чувствительность прибора с по-

мощью нейтральных фильтров различной оптической плотности. Прибор «С.Е.Р.О.П.» применяется для непрерывного контроля концентрации пыли в топочных газах, температура которых не превышает 150°C .

Наиболее совершенными являются оптические абсорбционные двухканальные пылемеры серии RM (ФРГ). Они нашли широкое применение

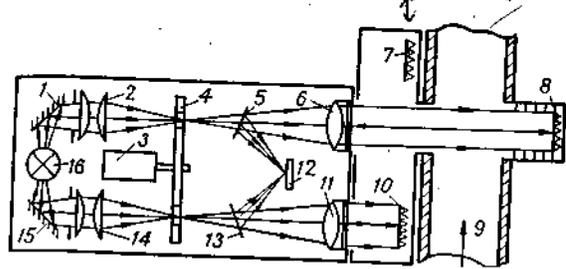


Рис. 21. Оптическая схема прибора RM-3.

ние на предприятиях стекольной промышленности, промышленности строительных материалов (цементные, битумные и другие заводы), электростанциях.

Первый образец серии RM (RM-0) в первичном измерительном преобразователе имеет два канала: измерительный и канал сравнения. Свет от общего источника 16 (рис. 21) с помощью зеркал 1 и 15 и систем линз 2 и 14 формируется в два световых потока — измерительный и сравнительный. Потоки направляются на модулятор 4, приводимый во вращение электродвигателем 3. Диск модулятора имеет два ряда отверстий, расположенных по окружности на разных расстояниях от его оси, что позволяет осуществить модуляцию света в обоих каналах с различной частотой: 1,5 кГц в измерительном канале и 3,9 кГц в канале сравнения. Использование разных частот

модуляции делает возможным последующее разделение сигналов. В измерительном канале модулированный свет проходит через полупрозрачное зеркало 5 и линзой 6 формируется в параллельный световой поток, который проходит через запыленный газ 9 и, отразившись от зеркала 8 расположенного на противоположной стороне газохода, возвращается тем же путем и попадает на фотоприемник 12. В канале сравнения свет проходит через полупрозрачное зеркало 13, линзу 11 и, отразившись от зеркала 10, возвращается тем же путем, попадая на общий фотоприемник 12.

Во вторичном приборе пылемера выходной сигнал фотоприемника подают на усилитель, разделяют по частотам, усиливают и демодулируют. Затем формируют отношение сигналов обоих каналов и логарифм этого отношения, равный оптической плотности D измеряемой пылегазовой среды. Результаты измерений фиксируются измерителем. Возможна регистрация результатов измерений.

В приборе RM-3 предусмотрена периодическая проверка нулевого показания непосредственно во время эксплуатации прибора. Для этого в измерительный канал входит зеркало 7. При этом перекрывается доступ света в измеряемый пылегазовый поток. Свет, отразившись от зеркала 7 и пройдя линзу 6, направляется полупрозрачной пластинкой 5 на фотоприемник. Поскольку в обоих каналах свет проходит в одинаковой среде один и тот же путь, выходной сигнал измерителя должен быть равен нулю. Если показания измерителя отличны от нуля, проводят ручную регулировку, добиваясь нулевого показания прибора.

Прибор RM-3 имеет высокую чувствительность. При измерительной базе длиной 2 м порог чув-

ствительности равен 10 мг/м^3 . Однако имеет место значительный разброс результатов измерений.

Проводились совместные измерения двумя образцами приборов RM-3. На основании полученных результатов построен график (рис. 22), по которому можно оценить корреляцию между показаниями обоих образцов.

В приборе RM-4 [49] технические характеристики прибора значительно улучшены в результате усовершенствования как оптической, так и электрической схемы прибора. Используемая двухканальная оптическая схема позволила получить более равномерное освеще-

ние измеряемого пылегазового потока по сравнению с RM-3, а также уменьшить влияние вибраций. Максимальный путь, проходимый световым потоком в газоходе в прямом и обратном направлениях, равен 32 м.

Более тщательный выбор фотоприемника позволил исключить погрешность, обусловленную высокой влажностью отходящих газов. Максимум спектральной чувствительности фотоприемника соответствует $0,5 \text{ мкм}$. Таким образом, он нечувствителен в инфракрасной области спектра, где свет интенсивно поглощается влагой, содержащейся в отходящих газах.

Используемая структурная схема прибора позволяет осуществить автоматическую компенсацию запыления смотровых стекол, старения источника света, изменений температуры и питаю-

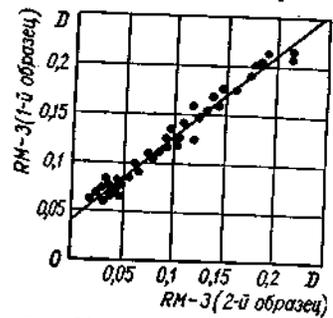


Рис. 22. Корреляционная зависимость между показаниями двух приборов RM-3.

шего напряжения, а также обеспечивает сигнализацию в аварийных ситуациях. Реализуется это следующим образом. Выходной сигнал фотоприемника 1 (рис. 23) подают на усилитель 2, регулятор 3 и полосовые фильтры 4 и 12. С помощью фильтра 4 выделяют измерительный сигнал, который подают на демодулятор 5 и логарифматор 6. Выходной сигнал последнего равен оптической плотности D измеряемой пылегазовой

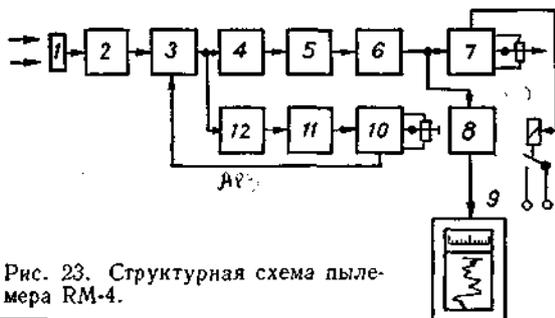


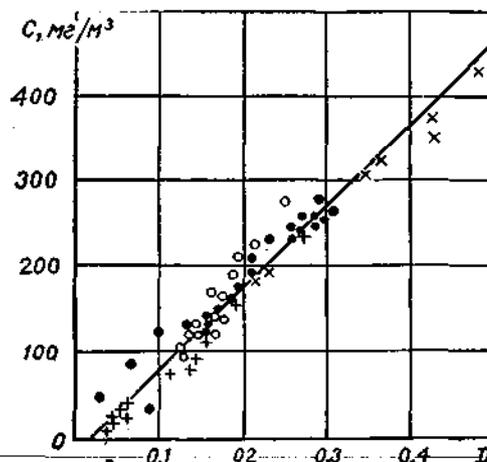
Рис. 23. Структурная схема пылемера RM-4.

среды. С логарифматора измерительный сигнал поступает на нормирующий преобразователь 8, на выходе которого получают стандартный сигнал 0-20 мА, который фиксируется регистратором 9. Введенный в приборе сигнализатор 7 автоматически отключает производство или часть его при превышении предельных допустимых концентраций.

Сигнал сравнения выделяют фильтром 12 и подают на демодулятор 11 и регулятор 10. Последний управляет общим усилением сигналов в измерительном канале и в канале сравнения перед подачей их на полосовые фильтры.

Об улучшении метрологических параметров прибора можно судить по его градуировочной характеристике (рис. 24), полученной в результате проведения 57 совместных измерений кон-

центраций пыли C весовым методом и оптической плотности D запыленного газа пылемером RM-4 при воздействии различных производственных помех. В диапазоне от 10 до 450 мг/м³ зависимость



- - нормальные условия работы;
- - отклонения от нормальных условий;
- × - переходный режим работы;
- + - увлажненная пылегазовая среда.

Рис. 24. Градуировочная характеристика пылемера RM-4.

между C и D имеет линейный характер и описывается уравнением регрессии $C = 0,96D - 14$. Значение коэффициента корреляции при воздействии различных производственных помех изменяется от 0,959 до 0,999.

Линейность шкалы прибора и изменение ее за 3 мес проверялись с помощью набора нейтральных фильтров. Результаты проверки, приведенные в табл. 3, показали, что отклонение от линейности не превышает $\pm 2\%$ от предела

измерения. Испытания в течение 3 мес подтвердили также высокую устойчивость показаний ($R_{1,2} = 0,999$) двух образцов RM-4 (рис. 25).

Проверка влияния колебаний напряжения питания и температуры окружающей среды на результаты измерений подтвердила достаточно высокую устойчивость показаний прибора RM-4 к изменению указанных величин: максимальная

Таблица 3

Проверка показаний прибора RM-4 с помощью набора нейтральных фильтров

Номер фильтра	Оптическая плотность фильтра	Показания прибора	
		в начале проверки	через 3 мес
Без фильтра	0,000	0,000	0,002
1	0,175	0,180	0,172
2	0,275	0,275	0,268
1, 2	0,450	0,460	0,462
3	0,560	0,565	0,552
1, 3	0,735	0,740	0,720
2, 3	0,835	0,830	0,812

дополнительная приведенная погрешность измерения, обусловленная изменением напряжения питания на ± 20 В, составляет 2%; максимальная дополнительная приведенная погрешность измерения, обусловленная изменением температуры окружающей среды в пределах от -8 до $+55^\circ\text{C}$, составляет $\pm 1,8\%$.

К пылемеру RM-4 разработан интегратор [81], который имеет три диапазона интегрирования: 6 ч (градация через 0,5 ч), 15 мин (градация через 75 с) и 9 мин (градация через 45 с). Интегратор с диапазоном 9 мин и 6 ч имеет на выходе аварийный сигнал и отключающий контакт, с диапазоном 15 мин — только аварийный сигнал.

Из результатов, полученных при непрерывном измерении в течение 3 мес с помощью RM-4 концентрации пыли, выбрасываемой в атмосферу цементной печью, следует, что для цементной печи чаще всего концентрация пыли в выбросе составляет 150—200 мг/м³.

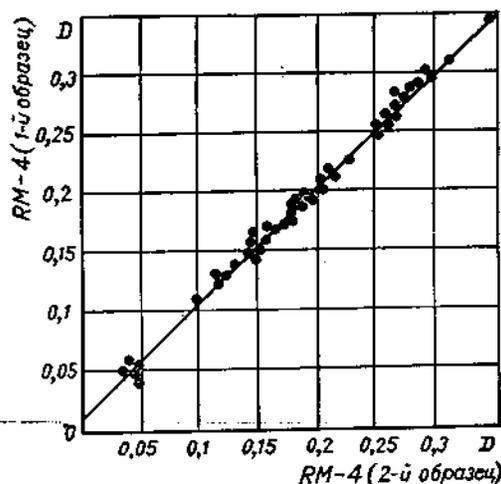


Рис. 25. Корреляционная зависимость между показаниями двух приборов RM-4.

Большой интерес представляет сравнение показаний оптического абсорбционного пылемера с показаниями пылемеров, основанных на других методах измерения, более точных с точки зрения сложившихся представлений и традиций. Были проведены такие сравнительные испытания. В качестве оптического абсорбционного пылемера был взят наиболее совершенный в настоящее время прибор RM-4. Образцами, используемыми для сравнения, были β -пылемер фирмы «Крона» [63] и пылемер FH-62C2 [64], основанные на радиоизотопном методе измерения. Во

время испытаний получено хорошее совпадение показаний β -пылемера и прибора RM-4, а результаты измерений прибором FH-62C2 оказались заниженными на 15—20%. Отсюда можно сделать вывод, что погрешности измерения концентрации пыли в газоходе радиоизотопным оптическим абсорбционным методами, положенными в основу работы сравниваемых приборов, одинаковы. Однако причины их возникновения различные. Так, значительная погрешность радиоизотопного метода связана с неравномерным осаждением пыли в центре фильтра и на его периферии, поэтому результаты измерений существенно зависят от размера частиц и доли частиц данного размера в общей массе пыли, т. е. от ее дисперсного состава. Погрешность оптического абсорбционного метода обусловлена в основном влиянием изменения поверхностных свойств частиц пыли и дополнительной абсорбцией света газом при изменении его влажности и состава. Оптический абсорбционный метод более приемлем, когда требуется малая инерционность результатов измерений. Радиоизотопный метод дает более точные результаты при измерениях больших концентраций.

Поскольку в оптическом абсорбционном пылемере осветитель и фотоприемник крепятся с противоположных сторон газохода, важно соблюдение соосности между ними. В противном случае происходит резкое уменьшение чувствительности или полная потеря ее. Соосность, полученная при установке прибора на газоход, может нарушаться во время его эксплуатации из-за вибрации газохода. В приборах серии RM не предприняты меры для сохранения соосности между осветителем и фотоприемником. В приборе «С.Е.Р.О.П» для этой цели используется штанга, которая является общей платформой для источ-

ника света и фотоприемника. Однако такое решение не универсально, поскольку оно мало пригодно для газоходов больших диаметров. Более рациональным является создание специального регулятора для установки по окружности источника света и фотоприемника в газоходах различных диаметров [30]. Схематическое изображение такого регулятора приведено на рис. 26. Источник света 5 и фотоприемник 1 помещены в корпуса, которые устанавливаются в газоход 6. К каждому корпусу крепятся по два плеча регулятора, которые представляют собой полые трубки, изогнутые под углом 90° .

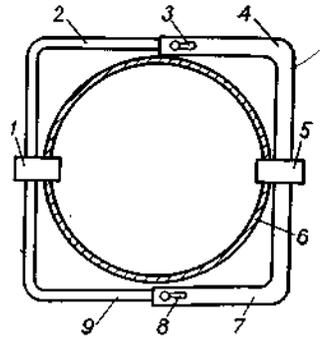


Рис. 26. Оптический абсорбционный пылемер с регулятором положения.

Одна пара плеч 2 и 9 сделана из трубок, наружный диаметр которых меньше внутреннего диаметра трубок другой пары плеч 4 и 7. Во время установки источника света и фотоприемника в газоход плечи 2 и 9 вводят внутрь плеч 4 и 7. После выбора оптимального положения источника света и фотоприемника их фиксируют установочными винтами 3 и 8. Такая конструкция регулятора позволяет не только фиксировать расстояние между источником света и фотоприемником, но и устанавливать их строго в одной плоскости, а также создает удобства при снятии и повторной установке прибора в газоход.

ОПТИЧЕСКИЕ ПЫЛЕМЕРЫ СВЕТОРАССЕЯНИЯ

СВЕТОРАССЕИВАЮЩИЕ СВОЙСТВА ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

Пылегазовый поток представляет собой дисперсную систему, в которой дисперсионной средой являются отходящие газы производства, а дисперсной фазой служат частицы пыли. Поскольку дисперсная фаза создает оптические неоднородности, то при прохождении света через дисперсную систему происходит его ослабление в результате не только поглощения, но и рассеяния.

Закономерности распространения света в рассеивающих средах зависят от длины волны падающего света, формы и оптических свойств частиц, а также распределения частиц по размерам.

Основные светорассеивающие свойства зависят от ряда факторов:

отношения радиуса частицы r к длине световой волны λ ; обычно используют параметр дифракции ρ , равный отношению длины окружности частицы к длине волны света: $\rho = 2\pi r/\lambda$,

комплексного показателя преломления n частицы: $n = \nu + ik$, где ν — коэффициент преломления; k — коэффициент поглощения;

угла между направлением падающего и рассеянного света Θ .

Полное аналитическое решение для рассеяния излучения сферической частицей описывается уравнением Ми

$$I_{\text{рас}}(\Theta) = \frac{\lambda^2}{8\pi R^2} [i_1(\rho, n, \Theta) + i_2(\rho, n, \Theta)], \quad (19)$$

где $I_{\text{рас}}(\Theta)$ — интенсивность рассеянного света в направлении Θ (рассчитанная на единицу ин-

тенсивности падающего света); R — расстояние от точки наблюдения до частицы; $i_1(\rho, n, \Theta)$ — интенсивность рассеянного света, поляризованного перпендикулярно к плоскости рассеяния; $i_2(\rho, n, \Theta)$ — интенсивность рассеянного света, поляризованного параллельно плоскости рассеяния. Из формулы (19) видно, что свет, рассеянный частицей, состоит из двух некогерентных плоскополяризованных компонент $i_1(\rho, n, \Theta)$ и $i_2(\rho, n, \Theta)$, плоскости поляризации которых взаимно перпендикулярны.

Реальные пылегазовые потоки в большинстве случаев относятся к полидисперсным системам, которые содержат частицы пыли различных размеров. Представив распределение полидисперсных частиц по размерам в виде непрерывной функции $N(r)$ внутри интервала $r_1 \leq r \leq r_2$, получим общее число частиц N в единице объема

$$N = \int_{r_1}^{r_2} N(r) dr. \quad \text{В общем случае функцию рас-}$$

пределения частиц по размерам $N(r)$ можно представить в виде [8]

$$N(r) = ar^\beta \exp(-br^\gamma), \quad 0 \leq r \leq \infty. \quad (20)$$

Четыре константы a , b , β , γ — положительные вещественные числа (β — целое число).

На практике часто встречаются три модели распределений частиц, приведенные на рис. 27. Этим моделям соответствуют следующие значения параметров распределения $N(r)$ в формуле (20):

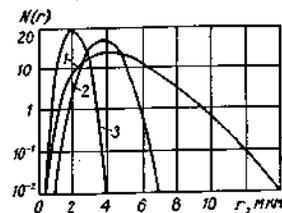


Рис. 27. Модели распределения $N(r)$ частиц по размерам.

модель C_1 : $a = 2,3720$; $\beta = 6$; $b = 3/2$; $\gamma = 1$;
 модель C_2 : $a = 1,0851 \cdot 10^{-2}$; $\beta = 8$; $b = 1/24$; $\gamma = 3$;

модель C_3 : $a = 5,5556$; $\beta = 8$; $b = 1/3$; $\gamma = 3$.
 При рассмотрении рассеяния света пылегазовым потоком необходимо учитывать, что в процессе рассеяния участвует совокупность частиц пыли в пределах освещенного объема.

Интенсивность света, рассеянного под углом Θ объемом V , содержащим в единице объема N независимых частиц, можно записать следующим образом [35]:

$$I_{\text{рас}}(\Theta) = \frac{3\lambda^2}{32\pi^3 R^2} I_0 C_V \frac{\int_0^\infty i(r, n, \lambda, \Theta) N(r) dr}{\int_0^\infty r^3 N(r) dr}, \quad (21)$$

где I_0 — интенсивность падающего неполяризованного света; $i(r, n, \lambda, \Theta)$ — функция Ми, пропорциональная интенсивности света, рассеянного в заданном направлении Θ отдельной частицей радиуса r ; C_V — объемная концентрация частиц. При этом предполагается, что функция $N(r)$ описывается уравнением (20).

Важной оптической характеристикой светорассеивающей среды является индикатриса рассеяния. Она характеризует пространственную картину рассеяния света частицей и равна отношению интенсивности света, рассеянного частицей в данном направлении Θ , к интенсивности света, рассеянного во все стороны:

$$f(\Theta) = I_{\text{рас}}(\Theta) / \int_{4\pi} I_{\text{рас}}(\Theta) d\omega.$$

Для малых частиц, удовлетворяющих условиям $\rho \ll 1$ и $\rho n \ll 1$, индикатриса рассеяния описывается формулой Релея

$$f(\Theta) = 1 + \cos^2 \Theta.$$

Построенная по этой формуле индикатриса (рис. 28, а) является симметричной. Максимальное рассеяние имеет место в направлениях $\Theta = 0^\circ$ и $\Theta = 180^\circ$, причем по ходу луча рассеивается такое же количество света, как и в обратном направлении. Максимальное значение параметра ρ , при котором наблюдается релейское распределение рассеянного света, в свою очередь,

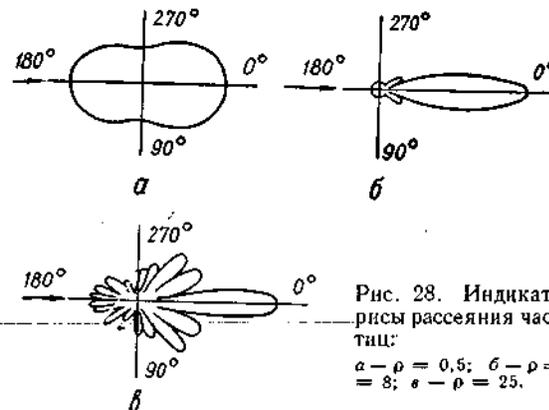


Рис. 28. Индикатрисы рассеяния частиц:
 $a - \rho = 0,5$; $б - \rho = 8$; $в - \rho = 25$.

зависит от электрооптических свойств вещества частиц, характеризуемых величиной комплексного показателя преломления n . Для проводящих частиц (большие n) эта область значений ρ всегда уже, чем для непроводящих (малые n). Так, если для диэлектрических частиц релейское распределение рассеянного излучения имеет место при $\rho \leq 10^{-2}$, то для проводящих частиц с n , близким к 100, аналогичное распределение будет наблюдаться лишь у частиц с $\rho \leq 10^{-1}$.

С увеличением величины ρ и полуширины функции распределения частиц по размерам интенсивность света, рассеянного в переднюю полусферу, возрастает (рис. 28, б).

Индикатрисы полидисперсных сред при малых ρ гладкие, без характерных экстремумов. Изменение полуширины функции распределения частиц по размерам слабо влияет на угловую зависимость интенсивности света, рассеянного в области углов $\Theta > 90^\circ$. Однако в области углов $\Theta < 90^\circ$ индикатриса очень чувствительна к изменению полуширины функции распределения частиц по размерам.

По мере роста радиуса частиц чувствительность индикатрисы к функции распределения частиц по размерам в области углов $\Theta \leq 90^\circ$ уменьшается, индикатриса рассеяния непрерывно меняет свою форму, становясь все более асимметричной и вытянутой вперед (эффект Ми) (рис. 28, в). Рассеяние в переднюю полусферу системами частиц с $\rho < 7,5$ характеризуется гладкими кривыми $I_{\text{рас}}(\Theta)$. Даже при очень узких распределениях частиц по размерам в области углов $\Theta < 25^\circ$ не обнаруживается экстремум.

Для дисперсных систем, состоящих из более крупных частиц, намечается резкий изгиб кривой $I_{\text{рас}}(\Theta)$, который с увеличением параметра дифракции ρ смещается в сторону меньших углов. Расчеты, выполненные в Институте физики АН БССР для систем, состоящих из крупных частиц ($30 \leq \rho \leq 200$), показывают, что изменение распределения частиц по размерам от 100 до 200 мкм при фиксированном ρ практически не изменяет угловое распределение интенсивности рассеянного света. При $\rho > 50$ индикатриса очень стабильна в области углов $20^\circ < \Theta < 90^\circ$ и описывается показательной функцией [36]:

$$I_{\text{рас}}(\Theta) = \frac{4,56 \cdot 10^{12} e^{-4,4\Theta}}{k \int_{r_1}^{r_2} r^3 N(r) dr} \times$$

$$\times \int_{r_1}^{r_2} r^2 N(r) dr = \frac{4,56 \cdot 10^4}{kr_{\text{ср}}} e^{-4,4\Theta}, \quad (22)$$

где $r_{\text{ср}}$ — усредненный радиус частицы; k — волновое число.

Следует отметить, что индикатриса рассеяния элементарного объема полидисперсной среды определяется суммарным действием частиц разных размеров и угловое распределение интенсивности света, рассеянного полидисперсной средой, нельзя отождествлять с индикатрисой какой-то ни было отдельной частицы среднего размера.

Итак, характеристики света, рассеянного частицей, существенно зависят от параметра дифракции ρ . Можно выделить три основных диапазона: $\rho \ll 1$, $\rho \approx 1$, $\rho \gg 1$, каждый из которых характеризуется своими специфическими особенностями. При $\rho \ll 1$ размеры частиц малы по сравнению с длиной волны λ , рассеяние света частицей из диэлектрика для неполяризованного света описывается законом Релея и интенсивность рассеянного света пропорциональна отношению r^6/λ^4 . Если $\rho \approx 1$, то интенсивность рассеянного света определяется уравнениями Ми, т. е. зависимость между интенсивностью рассеянного света, размером частиц r и λ является очень сложной. При $\rho \gg 1$ размеры частиц значительно больше длины волны падающего света (крупные частицы). Поскольку частицы пыли предприятий многих отраслей промышленности относятся к этому диапазону, рассмотрим его подробнее. Ряды в уравнении Ми сходятся крайне медленно, а сами уравнения становятся слишком сложными. Однако для случая рассеяния света крупными частицами теория Ми совпадает с положениями классической оптики. Интенсивность рассеянного света для крупных частиц не зависит от длины

волны λ и пропорциональна счетной концентрации N частиц и площади проекции частицы на направление распространения падающего света

$$I_{\text{рас}}(\Theta) = Br^2N. \quad (23)$$

Для больших прозрачных не поглощающих свет частиц рассеяние сводится к отражению света без проникновения его в частицу; преломлению света с внутренним отражением или без него дифракции.

Дифракционная составляющая рассеянного света направлена вперед. Величина ее зависит от формы и размера частиц, но не зависит от ее природы и состояния поверхности.

Рассмотрим влияние формы и отражающих свойств крупных частиц на характеристики рассеянного ими света. В общем случае количество света, рассеянного частицей неправильной формы в заданном направлении, меняется в зависимости от ориентации ее по отношению к падающему световому потоку. Среднее геометрическое поперечное сечение такой частицы составляет $1/4$ площади ее поверхности S : $\bar{G} = S/4$. Для шара, например, $S = 4\pi r^2$, $\bar{G} = \pi r^2$. Рассеяние, обусловленное отражением света от крупной выпуклой частицы, ориентированной случайным образом, тождественно отражению света от крупной сферической частицы из того же вещества с теми же свойствами поверхности. Действительно, при случайной ориентации частицы нормали к любому элементу ее поверхности распределены таким же образом, как нормали ко всем элементам поверхности на шаре. Поэтому и картина рассеяния при отражении должна быть одна и та же.

При рассмотрении отраженной составляющей рассеянного света возможна следующая классификация частиц на классы: полностью отражаю-

щие свет частицы с гладкой поверхностью; металлические частицы с гладкой поверхностью; «белые» частицы с диффузным отражением.

Для частиц первого класса отражение является зеркальным и полным, второго — зеркальным, но частичным. Отражение света «белыми» частицами будет полным, но диффузным. При этом понятие диффузное отражение имеет смысл только для участков поверхности с размерами много большими длины волны света. Большинство диффузно отражающих «белых» поверхностей подчиняется закону Ламберта. Индикатриса рассеяния для шара, элементы поверхности которого подчиняются закону Ламберта, определяется уравнением

$$I(\Theta) = 8(\sin \Theta - \Theta \cos \Theta)/3\pi.$$

Сказанное относится к рассеянию света системой независимых частиц, когда имеет место однократное рассеяние света. Это значит, что на каждую частицу попадает световой поток одинаковой интенсивности, равной интенсивности падающего светового потока. При большом числе N частиц падающий поток ослабевает в результате взаимодействия с частицами. Поэтому они освещаются потоком разной интенсивности. Кроме того, каждая частица одновременно облучается светом, рассеянным другими частицами. Указанные эффекты, обусловленные многократным рассеянием света, ведут к нарушению пропорциональности интенсивности рассеянного света $I_{\text{рас}}$ числу N частиц, т. е. нарушается закон аддитивности.

Практически для оценки влияния многократного рассеяния можно пользоваться параметром [48]

$$\tau = r^2 r_1 / r_2^3,$$

где r — радиус частицы; r_1 — размер рассеивающего объема; r_2 — среднее расстояние между центрами частиц. Условие $\tau \ll 1$ означает, что многократным рассеянием можно пренебречь.

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ МЕТОДОМ СВЕТОРАССЕЯНИЯ

Приведенный теоретический анализ характеристик света, рассеянного системой частиц, подтверждает возможность определения концентрации частиц пыли путем измерения суммарной интенсивности светорассеяния. Метод характеризуется высокой чувствительностью. В работе [50] указывается на возможность измерения методом светорассеяния микроконцентраций, равных 10^{-5} мг/м³. Прибор «Зигрист» [83], основанный на данном методе, имеет чувствительность 0,005 мг/м³. Метод отличается простотой осуществления, практической безынерционностью, возможностью измерения объемной концентрации пыли, достаточно высокой точностью для решения задач автоматического контроля концентрации пыли в выбросах в атмосферу промышленных предприятий. Так, согласно работе [75], погрешность измерения концентрации пыли оптически пылемерами, основанными на методе светорассеяния, составляет $\pm 15\%$, тогда как погрешность оптических абсорбционных пылемеров равна $\pm 30\%$. В работах [57; 65] указывается на особую эффективность метода при измерении малых концентраций.

При использовании метода светорассеяния необходимо знать оптические свойства частиц пыли. Исследование оптических свойств позволяет определить диапазон концентраций, для которого существует линейная зависимость между концентрацией и интенсивностью рассеянного света,

оценить концентрационную чувствительность метода для данного вида пыли, выбрать оптимальный угол регистрации рассеянного света Θ .

Исследование оптических свойств пыли следует начинать с выбора угла Θ , для чего необходимо измерить индикатрису рассеяния. Поскольку в большинстве случаев промышленная пыль является полидисперсной, теоретический расчет индикатрисы рассеяния представляет определенные трудности. Поэтому индикатрисы рассеяния пыли измеряют экспериментально на пылевой установке, условия работы на которой максимально приближаются к реальным условиям пылевого контроля в промышленном газоходе. В пылевой установке должен быть создан равномерный пылевоздушный поток. Особые трудности возникают при создании равномерного потока грубодисперсных аэрозолей, к которым относится большинство видов промышленной пыли. Эту же установку можно использовать при оценке концентрационной чувствительности метода и диапазона линейности для конкретного вида пыли. В таком случае в установке необходимо предусмотреть возможность изменять концентрацию пыли в потоке в определенном интервале и поддерживать ее стабильной во время измерений.

На рис. 29, а представлена лабораторная пылевая установка для исследования оптических свойств пыли. В установке создается пылевоздушный поток с различным содержанием пыли. Измерительная кювета представляет собою стеклянный цилиндрический сосуд 1 со скошенным дном, который установлен на подставке 7 с массивным основанием. На дно засыпается определенное количество пыли 6, предварительно высушенной в сушильном шкафу при температуре порядка 100°C в течение 1 ч. В верхней части установлен диск 4 с лопастями. Сосуд герметично

закрывается крышкой 2. Электродвигатель 3 приводит во вращение диск 4, создавая в замкнутом объеме сосуда пылевоздушный поток в результате вовлечения в круговое движение находящихся на дне частиц пыли. Число лопастей, их расположение и конфигурация подбираются таким

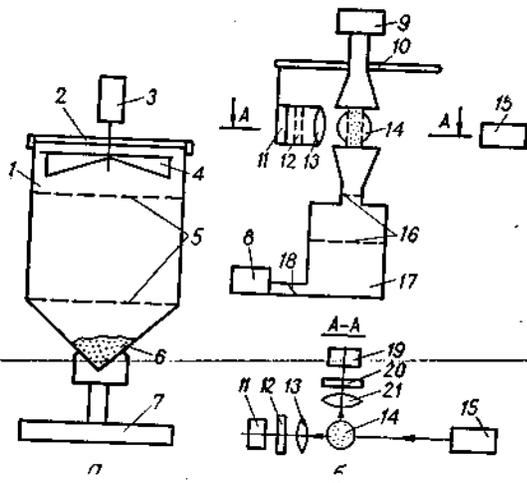


Рис. 29. Установки для исследования оптических свойств пылевоздушных потоков:
а — со стеклянной измерительной кюветой; б — бескюветная.

чтобы создать равномерный пылевоздушный поток. Для стабилизации равномерного распределения пыли внутри сосуда вмонтированы две сетки 5, которые ограничивают измерительный объем. Концентрация пыли в измерительном объеме измеряется путем изменения напряжения питания электродвигателя, при этом изменяется частота вращения диска с лопастями. Малогабаритная, удобная в эксплуатации установка позволяет быстро и качественно проводить исследова-

ния. Она может быть использована при проведении контрольных измерений, не требующих высокой точности. К недостаткам установки относятся недостаточная равномерность пылевоздушного потока, узкий диапазон изменения концентрации пыли в измерительном объеме. Кроме того, в результате измерения вносится погрешность из-за влияния паразитного светового фона и бликов на стенках измерительной кюветы.

Указанные недостатки устранены в установке (рис. 29, б), в которой пылевоздушный поток на некотором небольшом отрезке своего пути движется, не будучи ограниченным в пространстве стенками кюветы [22]. Вентилятор 8 нагнетает воздух в кювету 17, куда загружается исследуемая пыль. Пыль смешивается с воздухом и через сетки 16 отсасывается вверх с помощью вытяжного вентилятора 9. Между соплами создается равномерная пылевоздушная струя 14, диаметр и структура которой регулируются выбором формы и размеров сопел, величины зазора между ними. Концентрацию пыли можно изменять перемещением заслонки 18.

Оптическая часть установки включает источник света 15 и два фотоприемника 11 и 19 с линзами 13, 21. Один фотоприемник неподвижно укреплен против источника и воспринимает свет, прошедший через исследуемую пылевоздушную струю. Второй фотоприемник 19 с помощью зажима соединен с круговым лимбом 10 и может перемещаться в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, проходящей через ось пылевоздушной струи.

Установка позволяет исследовать индикатрисы рассеяния пылевоздушной струи, т. е. измерять относительное распределение по углам света, рассеянного измеряемым объемом, локальным способом. В этом случае фотоприемник, вращаясь

вокруг визируемого рассеивающего объема, регистрирует свет, рассеянный им в разные стороны. Источник создает узкий параллельный пучок света, который проходит через центр пылевоздушной струи. Рассеянный в горизонтальной плоскости свет через линзу попадает на измерительный фотоприемник 19. Последний фотометрирует последовательно свет, рассеянный под разными углами Θ . Установка предназначена для определения индикатрис рассеяния при углах $10 \leq \Theta \leq 350$. Фотоприемник регистрирует свет, рассеянный от большого числа отдельных частиц, кратковременно пребывающих в пучке, поэтому индикатрисы получают усредненными.

В качестве источника света используется квантовый генератор типа ЛГ-75, обладающий повышенной стабильностью и позволяющий получить узкий монохроматический параллельный пучок света.

Непостоянство пылевоздушной струи требует применения компенсационной схемы измерения. При этом рассеянный потоком частиц свет воспринимается фотоприемником 19, а ослабленный основной пучок света (часть 6%) — контрольным фотоприемником 11. Непрерывное сопоставление двух сигналов — измеряемого и контрольного — позволяет исключить нестабильность измеряемой пылевоздушной струи, которая может исказить снимаемую угловую зависимость интенсивности рассеяния света.

Установка дает возможность проводить измерения в поляризованном свете. Во время этих измерений перед фотоприемниками 11 и 19 устанавливаются скрещенные поляризаторы 12 и 20, а сами фотоприемники устанавливают симметрично относительно оптической оси источника света. Так как пылевоздушный поток освещается поляризованным светом квантового генератора,

то отношение сигналов фотоприемников дает возможность судить о степени деполяризации рассеянного света. Изменяя угол между оптическими осями источника света и фотоприемника, можно исследовать зависимость между углом рассеяния и степенью деполяризации рассеянного света.

Установка позволяет также измерять зависимость между концентрацией пыли в потоке и ин-

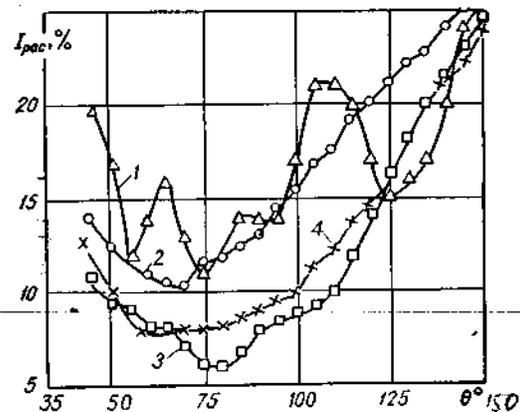


Рис. 30. Индикатрисы рассеяния $I_{рас}$ (%) различных видов промышленной пыли: 1 — мучной; 2 — угольной (тонкая фракция); 3 — железорудной; 4 — кварцевой.

тенсивностью рассеянного света, определять порог чувствительности метода для конкретного вида пыли и рабочий диапазон измерений.

Измеренные на установке индикатрисы рассеяния для разных видов промышленной пыли даны на рис. 30.

Экспериментальные исследования метода проведены на следующих видах пыли: угольной (тонкая фракция), кварцесодержащей (порошок М-5) и мучной [16]. Из кривых дисперсного состава указанных видов пыли, которые приведены на

рис. 4, видно, что исследуемая угольная и кварцесодержащая пыль относится к монодисперсным системам со средним размером частиц соответственно 2 и 4 мкм. В отличие от них мучная пыль является полидисперсной с широким диапазоном изменения размеров частиц. Однако, с некото-

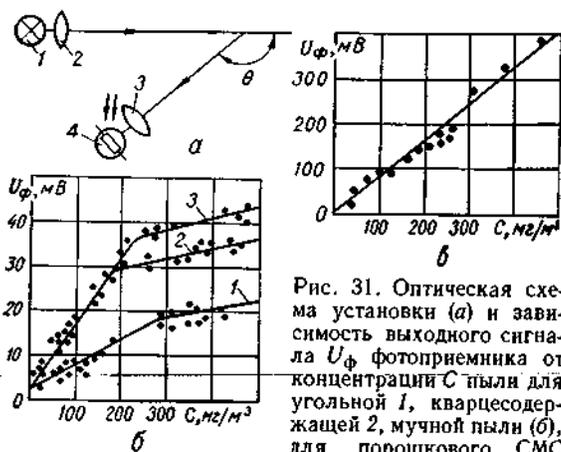


Рис. 31. Оптическая схема установки (а) и зависимость выходного сигнала U_{ϕ} фотоприемника от концентрации C пыли для угольной 1, кварцесодержащей 2, мучной пыли (б), для порошкового СМС «Лотос» (в).

рым приближением, она может быть представлена в виде смеси трех монодисперсных систем со средним диаметром частиц 5, 21 и 34 мкм, причем относительное содержание их в смеси равно 14 : 4 : 1 соответственно, т. е. преобладают частицы размером 5 мкм. Исследуемая пыль состоит из крупных частиц, размеры которых значительно превышают длину волны λ облучающего света.

Исследования проводились на установке, оптическая схема которой показана на рис. 31, а. Она включает источник света 1 и систему линз 2 для формирования параллельного светового потока, который освещает измеряемый пылевоздушный поток. Свет, рассеянный частицами пыли,

с помощью линзы 3 фокусируется на светочувствительной поверхности измерительного фотоприемника 4. Исследования индикатрис рассеяния угольной, мучной и кварцесодержащей пыли показали, что измерительный фотоприемник наиболее рационально устанавливать под углом 130° к оптической оси облучающего потока.

В качестве источника света использовалась мощная малогабаритная кварцевая лампа накаливания типа КГМ-12-100, а в качестве фотоприемника выбран высокочувствительный фоторезистор типа СФЗ-1.

Установка испытывалась на действующей пылевой камере, в которой создаются и автоматически поддерживаются заданная запыленность, скорость воздушного потока, температура и влажность воздуха. Указанные параметры регистрируются группой самопишущих приборов, смонтированных на пульте управления.

Во время испытаний устройство устанавливали внутри пылевой камеры. Концентрация пыли в месте установки устройства контролировалась весовым методом. Для этого в указанном месте пылевой камеры устанавливали специальный патрон с предварительно взвешенным на аналитических весах типа ВЛА-200-М с точностью $\pm 0,1$ мг фильтром типа АФА-В-10 на расстоянии порядка 100 мм по ходу пылевоздушного потока от зоны измерения. После окончания измерения фильтр извлекали из патрона и вновь взвешивали. Для выполнения условия изокINETИЧНОСТИ при отборе пробы пыли применяли насадки со следующими входными отверстиями: 15 мм для скорости движения воздуха 2—3 м/с, 10 мм для скорости движения воздуха 3—6 м/с.

В результате исследований получены зависимости выходного сигнала U_{ϕ} измерительного фотоприемника от концентрации C частиц пыли

$U_{\phi} = f(C)$ (рис. 31, б) для угольной 1, кварцесодержащей 2 и мучной 3 пыли. Из приведенных графиков следует, что в диапазоне от 0 до 200 мг/м³ имеет место линейная зависимость между C и U_{ϕ} для всех видов пыли. При концентрациях, превышающих 200 мг/м³, линейная зависимость нарушается. Это связано с тем, что при столь больших концентрациях начинает сказываться многократное рассеяние света.

Сравнительная оценка результатов, полученных для разных видов пыли, показывает, что концентрационные чувствительности для кварцесодержащей и мучной пыли совпадают и равны 14,0 мВ · мг⁻¹ м³, для угольной пыли чувствительность в 2—3 раза меньше. Указанные различия обусловлены неодинаковыми отражающими свойствами частиц (угольная пыль относится к полностью отражающим частицам с гладкой поверхностью, а мучная и кварцесодержащая — к «белым» частицам с полным, но диффузным рассеянием света).

Результаты измерений обработаны статистическим методом для определения степени вероятностной связи между значениями концентрации пыли, полученными весовым методом и методом светорассеяния. Расчет показал, что для линейного участка кривых коэффициент корреляции равен: для угольной пыли 0,84, для кварцесодержащей 0,93 и для мучной 0,96, т. е. существует довольно тесная корреляционная связь, которая варьирует в небольших пределах в зависимости от вида пыли.

Для оценки достоверности коэффициентов связи получены средние квадратичные ошибки σ_R определения коэффициента корреляции $R_{1,2}$ по формуле

$$\sigma_R = (1 - R_{1,2}^2) / \sqrt{n},$$

где n — число измерений.

Результаты расчетов показали, что для угольной пыли $\sigma_R = 0,070$; для кварцесодержащей $\sigma_R = 0,022$ и для мучной $\sigma_R = 0,017$. Отсюда получены с вероятностью $P = 0,95$ следующие значения доверительных интервалов: $0,70 < R_{1,2} < 0,98$ для угольной пыли, $0,89 < R_{1,2} < 0,97$ для кварцесодержащей, $0,93 < R_{1,2} < 0,99$ для мучной. Таким образом, с вероятностью не менее 0,95 можно считать, что рассчитанная корреляционная связь между C и U_{ϕ} действительно существует. Оценка точности измерений показала, что для линейного участка кривой $U_{\phi} = f(C)$ основная приведенная погрешность составляет $\pm 10\%$.

Исследование метода светорассеяния проведено также на порошковой фракции СМС типа «Лотос» [17] на той же пылевой камере. Получена зависимость $U_{\phi} = f(C)$ (рис. 31, в), которая в диапазоне от 30 до 400 мг/м³ имеет линейный характер и описывается уравнением $U_{\phi} = 0,82 C$. Рассчитанный по результатам эксперимента коэффициент корреляции $R_{1,2} = 0,982$ указывает на наличие связи между U_{ϕ} и C , близкой к функциональной. Коэффициент корреляции определен с погрешностью 0,09.

Рассмотрим факторы, вносящие погрешность в результат измерения концентрации пыли методом светорассеяния, и способы уменьшения их.

Наличие влаги в отходящих газах. На практике наиболее часто приходится сталкиваться с влиянием повышенного влагосодержания отходящих газов, возникающего в результате использования мокрых методов пылеочистки. Влага в отходящих газах может присутствовать в виде капель, водной оболочки, окружающей частицу пыли. Возможно растворение частиц пыли в воде. Частица пыли с водной оболочкой представляет собой двухслойную частицу, геометрическое

поперечное сечение которой является суммой геометрических сечений самой частицы и водной оболочки, обладающих существенно различными физическими и оптическими свойствами. Теоретические исследования интегральных характеристик рассеяния света двухслойными частицами, выполненные в институте физики АН БССР, показали следующее. Для малых частиц ($\rho < 1,5$) в начальной стадии обводнения имеется некоторая область размеров частиц, в которой поглощение света частицей заметно превышает рассеяние. Для остальных значений ρ рассеяние преобладает над поглощением. Практически получается, что если радиус частицы в десятки раз больше радиуса оболочки, то влияние последней на светорассеивающие свойства частицы становится неощутимым. Таким образом, суммарный эффект, создаваемый полидисперсной системой двухслойных частиц, зависит от функции распределения частиц по размерам. Поэтому если для крупной промышленной пыли влияние водной оболочки можно не учитывать, то для мелкой пыли это влияние существенно.

О влиянии влажности на результаты измерения концентрации пыли методом светорассеяния можно судить по результатам экспериментальных исследований, приведенных в работе [74]. Концентрация пыли измерялась с помощью фотометра, принцип действия которого основан на методе светорассеяния, и прибора *H-V-S*, в котором используется весовой метод измерения. Чтобы учесть влияние влаги, запыленный воздух в фотометр подавался через пробоотборную трубку, снабженную электрическим обогревателем, и концентрация пыли измерялась при выключенном и включенном обогревателе. Результаты измерений концентрации сухой пыли (рис. 32, а)

описываются уравнением регрессии

$$y = 0,36x - 2,96,$$

а пыли с наличием влаги (рис. 32, б) уравнением регрессии

$$y = 0,96x - 37,7, \quad \checkmark \text{ влага}$$

где x — показания прибора *H-V-S*, мг/м^3 ; y — показания фотометра, мг/м^3 .

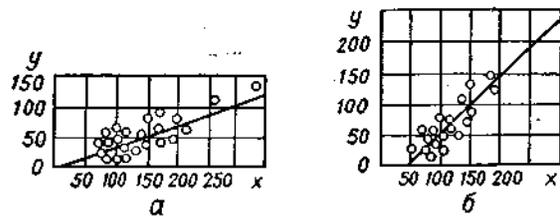


Рис. 32. Результаты измерений концентрации пыли фотометром, основанном на регистрации рассеянного света:

а — сухой; б — влажной.

В обоих случаях четко просматривается корреляционная зависимость между показаниями сравниваемых методов (для сухой пыли коэффициент корреляции равен 0,828, для влажной — 0,945), однако наличие влаги ведет к увеличению показаний фотометра приблизительно в 2 раза, т. е. погрешность измерения концентрации пыли за счет наличия влаги составляет 100%. Кроме того, поскольку прямая регрессии на рис. 32, б по оси x смещена вправо, при наличии влаги фотометром можно измерять концентрации пыли более 40 мг/м^3 .

Исключить влияние влаги можно путем введения автоматической коррекции в результат измерения. Для этого, кроме основного сигнала, получаемого с выхода измерительного фотоприемника, необходимо иметь контрольный сигнал,

дающий информацию о количественном содержании влаги в отходящих газах. Такая информация может быть получена следующим образом. В качестве источника света 1 (рис. 33) используют лампу накаливания, в спектр излучения которой входит видимая и ближняя инфракрасная области. Линза 2 формирует параллельный световой поток, освещающий измеряемый пылегазовый поток в газоходе 3. Измерительный фотоприемник 14 регистрирует суммарный световой поток, рассеянный частицами пыли и влагой, содержащейся в отходящих газах, и собранный линзой 15 на его светочувствительной поверхности. Предполагая, что частицы пыли и водные капли относятся к крупным монодисперсным частицам, применим приближенную формулу

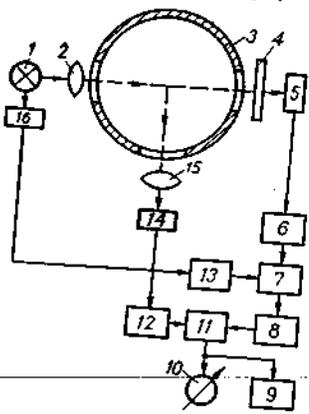


Рис. 33. Структурная схема оптического пылемера светорассеяния с автоматической компенсацией влияния влаги.

(23) для определения интенсивности рассеянного ими света:

$$I_{\text{рас}} = I_{\text{рас.п}} + I_{\text{рас.в}} = B_{\text{п}} N_{\text{п}} r_{\text{п}}^2 + B_{\text{в}} N_{\text{в}} r_{\text{в}}^2,$$

где $I_{\text{рас.п}}$ — интенсивность света, рассеянного частицами пыли; $I_{\text{рас.в}}$ — интенсивность света, рассеянного водными каплями; $N_{\text{п}}$, $N_{\text{в}}$ — счетная концентрация частиц пыли и водных капель; $r_{\text{п}}$, $r_{\text{в}}$ — радиус частиц пыли и водных капель; $B_{\text{п}}$, $B_{\text{в}}$ — коэффициенты, учитывающие оптические свойства частиц пыли и водных капель.

Выходной сигнал измерительного фотоприемника, снимаемый с резистора нагрузки $R_{\text{п}}$,

$$U_1 = S_{\text{ф}} R_{\text{п}} (B_{\text{п}} N_{\text{п}} r_{\text{п}}^2 + B_{\text{в}} N_{\text{в}} r_{\text{в}}^2),$$

где $S_{\text{ф}}$ — интегральная чувствительность измерительного фотоприемника.

Контрольный фотоприемник 5 устанавливают на противоположной по отношению к источнику света стенке газохода соосно с ним. В качестве контрольного используют фотоприемник, максимум спектральной чувствительности которого находится в ближней инфракрасной области спектра. Так как для воды характерно интенсивное поглощение света в ближней инфракрасной области, то контрольный фотоприемник, измеряя прошедший свет, является измерителем влагосодержания в потоке. Перед контрольным фотоприемником устанавливают светофильтр 4, отсекающий видимую область спектра.

Выходной сигнал контрольного фотоприемника подается на усилитель 6 и блок отношения сигналов 7, на который также поступает усиленный услителем 13 сигнал с фотоприемника сравнения 16. Сигнал на выходе блока отношения пропорционален величине

$$I_0/I = \exp(\kappa_{\text{в}} C_{\text{в}} l),$$

где I_0 — интенсивность падающего света; I — интенсивность света, прошедшего через измеряемый пылегазовый поток; $\kappa_{\text{в}}$ — удельный показатель поглощения воды; $C_{\text{в}}$ — концентрация воды в пылегазовом потоке; l — путь, пройденный световым потоком в измеряемой среде. Затем сигнал поступает на логарифматор 8, выдающий сигнал

$$U_2 = \ln I_0/I = \kappa_{\text{в}} C_{\text{в}} l.$$

Суммирующий блок 11 проводит вычитание U_2 из предварительно усиленного услителем 12

ВЫХОДНОГО сигнала U_1 измерительного фотоприемника:

$$U_2 = K_1 U_1 - K_2 U_2 = K_1 S_{\phi} R_{\phi} (B_{\phi} N_{\phi} r_{\phi}^2 + B_{\phi} N_{\phi} r_{\phi}^2) - K_2 \kappa_{\phi} C_{\phi} l,$$

где K_1 — коэффициент усиления выходного сигнала измерительного фотоприемника; K_2 — поправочный коэффициент, который выбирается таким образом, чтобы сигнал на выходе суммирующего блока не зависел от концентрации влаги C_{ϕ} в газоходе, т. е.

$$K_1 S_{\phi} R_{\phi} B_{\phi} N_{\phi} r_{\phi}^2 - K_2 \kappa_{\phi} C_{\phi} l = 0.$$

Отсюда

$$K_2 = K_1 S_{\phi} R_{\phi} B_{\phi} N_{\phi} r_{\phi}^2 / \kappa_{\phi} C_{\phi} l.$$

Концентрация воды в пылегазовом потоке

$$C_{\phi} = \frac{4}{3} \pi r_{\phi}^3 N_{\phi}.$$

Тогда

$$K_2 = \frac{3}{4} \frac{K_1 S_{\phi} R_{\phi} B_{\phi}}{\pi \kappa_{\phi} r_{\phi} l}.$$

Выходной сигнал суммирующего блока подается на измеритель 10 и непрерывно записывается на диаграммной ленте реостата 11.

Запыление смотровых стекол. Чтобы исключить запыление смотровых стекол в пылемерах, в которых используется метод светорассеяния, могут быть применены все методы, изложенные выше. Следует лишь отметить специфику использования пылезащитных насадок. В оптических абсорбционных пылемерах насадки являются надежным средством пылезащиты только в вертикальных газоходах. В оптических пылемерах светорассеяния насадки можно использовать и в горизонтальных газоходах (рис. 34), установив их в верхней половине газохода под углом к пылегазовому потоку, большим 90° .

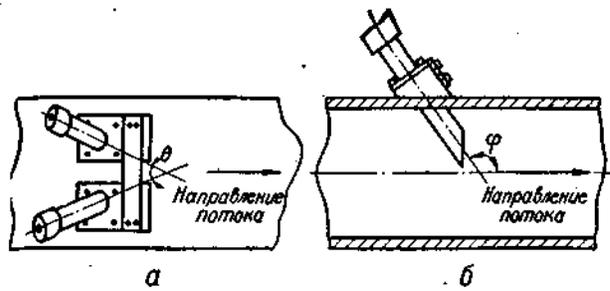


Рис. 34. Способы установки пылезащитных насадок в горизонтальном газоходе:

а — вид сверху; б — вид сбоку.

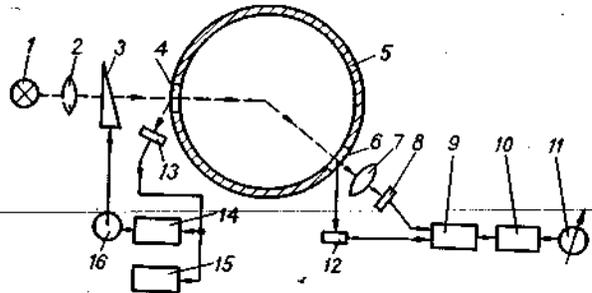


Рис. 35. Структурная схема оптического пылемера светорассеяния с автоматической компенсацией запыления смотровых стекол:

1 — источник света; 2, 7 — линзы; 3 — оптический клин; 4, 6 — смотровое стекло; 5 — газоход; 8 — измерительный фотоприемник; 9 — суммирующий блок; 10, 14 — усилитель; 11 — измеритель; 12, 13 — контрольный фотоприемник; 15 — сигнализатор; 16 — реверсивный двигатель.

Автоматическая компенсация запыления смотровых стекол в оптических пылемерах светорассеяния (рис. 35) имеет свои особенности. Для осветителя она остается аналогичной компенсации запыления в оптических абсорбционных пылемерах (см. рис. 15, б). Для осуществления автоматической компенсации запыления смотрового стекла 6 перед измерительным фотоприемником 8

помещают еще один контрольный фотоприемник 12 под углом к поверхности смотрового стекла 6 для регистрации интенсивности света, рассеянного осевшей на стекле пылью. Выходной сигнал контрольного фотоприемника 12 содержит комплексную информацию, включающую информацию о запыленности смотрового стекла 6, зависящую, в свою очередь, от концентрации пыли в газозоде. Таким образом, на величину выходного сигнала контрольного фотоприемника 12 влияют два фактора: концентрация пыли в газозоде и запыленность смотрового стекла. С увеличением концентрации пыли в газозоде увеличивается интенсивность рассеянного света, который проходит через смотровое стекло 6 и освещает осевшую на нем пыль. При этом с увеличением количества осевшей пыли увеличивается интенсивность рассеянного ею света. В результате выходной сигнал контрольного фотоприемника

$$U_1 = A_1 C C_p$$

где C — концентрация пыли в газозоде; C_p — поверхностная концентрация осевшей пыли; A_1 — коэффициент пропорциональности.

Выходной сигнал измерительного фотоприемника 7 уменьшается с увеличением запыленности смотрового стекла 6 и может быть записан в виде

$$U_2 = A_2 C - A_3 C C_p$$

где A_2, A_3 — коэффициенты пропорциональности.

Для автоматической коррекции запыления смотрового стекла 6 необходимо суммировать выходные сигналы обоих фотоприемников, измерительного и контрольного, таким образом, чтобы выходной сигнал блока суммирования 9 не зависел от запыления смотрового стекла 6:

$$U_2 = A_4 U_1 + U_2 = A_4 A_1 C C_p + A_2 C - A_3 C C_p = A_2 C, \quad (24)$$

где $A_4 = A_3/A_1$ — коэффициент, указывающий, какую часть выходного сигнала контрольного фотоприемника нужно использовать, чтобы выполнялось условие (24); A_4 находят экспериментально, поскольку A_1 и A_3 обычно неизвестны.

Проведена экспериментальная проверка описанного метода автоматической коррекции.

Таблица 4

Поверхностная концентрация C_p пыли, осевшей на смотровых стеклах, и показания измерительного фотоприемника U_2

C_p , мг/см ²		U_2 , мВ	ΔU_2 , мВ	$\gamma_2 = (\Delta U_2 / U_2) \times 100$, %
на стекле 4	на стекле 6			
0	0	7,82	0	0
0,03	0,03	7,68	0,14	2
0,34	0,34	7,55	0,27	3,5
0,45	0,45	7,48	0,34	5
3,11	3,11	7,14	0,68	9

Прежде всего, получена зависимость между C_p осевшей пыли и показаниями U_2 измерительного фотоприемника 8 для случая, когда пыль осаждалась на оба смотровых стекла: перед осветителем 4 и перед измерительным фотоприемником 6. Концентрация пыли в газозоде поддерживалась постоянной. В табл. 4 приведены полученные экспериментальные данные, а также значения абсолютной ΔU_2 и относительной γ_2 погрешностей измерения концентрации пыли C_p , обусловленных запылением смотровых стекол. Была получена также зависимость между C_p и показаниями измерительного и контрольного фотоприемников для случая, когда пыль осаждалась только на смотровое стекло 6 перед измерительным фотоприемником. Полученные резуль-

таты приведены в табл. 5. Там же приведены значения абсолютной ΔU_2 и относительной γ_2 погрешностей, обусловленных запылением смотрового стекла перед измерительным фотоприемником. На основании результатов измерения

Таблица 5

Поверхностная концентрация C_n пыли, осевшей на смотровом стекле перед измерительным фотоприемником, и суммарный сигнал U_Σ измерительного и контрольного фотоприемников

C_n , мг/см ² , на стекле 6	U_1 , мВ	ΔU_1 , мВ	$\gamma_1 = (\Delta U_1 / U_1) \cdot 100$, %	U_2 , мВ	U_1 / A_4 , мВ	$U_\Sigma = U_1 + U_2 / A_4$, мВ	ΔU_Σ , мВ	$\gamma_2 = (\Delta U_\Sigma / U_\Sigma) \cdot 100$, %
0	7,82	0	0	0,22	0,03	7,85	0	0
0,03	7,78	0,04	0,5	0,32	0,05	7,83	0,02	0,1
0,34	7,72	0,10	1,2	0,66	0,11	7,83	0,02	0,25
0,45	7,70	0,12	1,5	0,89	0,15	7,85	0	0

рассчитаны поправочный коэффициент $A_4 = \Delta U_1 / \Delta U_2 = 6$, суммарный сигнал U_Σ для разных значений C_n , абсолютная ΔU_Σ и относительная γ_2 погрешности измерения после введения автоматической коррекции запыления.

Результаты, приведенные в табл. 4 и 5, показывают, что запыленность смотрового стекла, установленного перед измерительным фотоприемником, дает максимальную погрешность 3%, запыленность смотровых стекол, установленных перед измерительным фотоприемником и осветите-

лем, дает максимальную погрешность 9%, а введение автоматической коррекции запыленности обоих стекол позволяет уменьшить погрешность до 0,25%.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПЫЛЕМЕРЫ СВЕТОРАССЕЯНИЯ

К первой попытке создания оптического пылемера светорассеяния относится разработка устройства [15], которое предназначалось для автоматического контроля запыленности в выхлопных газоходах аспирационных и пневмотранспортных сетей на предприятиях мукомольной промышленности. Устройство выполнено в виде отдельных блоков: осветителя, измерительного фотоприемника, фотоприемника сравнения, измерительного блока, блока сигнализации и блока питания. Первичный измерительный преобразователь устройства, включающий осветитель, измерительный фотоприемник и фотоприемник сравнения были установлены на выхлопном газоходе диаметром до 500 мм.

Для измерения интенсивности рассеянного частицами пыли света была разработана схема двухканального фотометра с общим источником света 2 (рис. 36). Световой поток последнего с помощью линзы 3 формируется в параллельный. Для использования обратного светового потока источника света применено сферическое зеркало 1, расположенное от него на двойном фокусном расстоянии. Параллельный световой поток, пройдя через смотровое стекло, освещает измеряемый пылевоздушный поток. Часть света, рассеянного движущимися частицами пыли, с помощью линзы 8 фокусируется на светочувствительной поверхности измерительного фотоприемника 9.

На основании исследования индикатрис рассеяния мучной пыли [16] измерительный фотоприемник устанавливался под углом 130° оптической оси облучающего светового потока, поскольку интенсивность света, рассеянного в данном направлении, достаточно высокая и составляет порядка 60% интенсивности света, рассея-

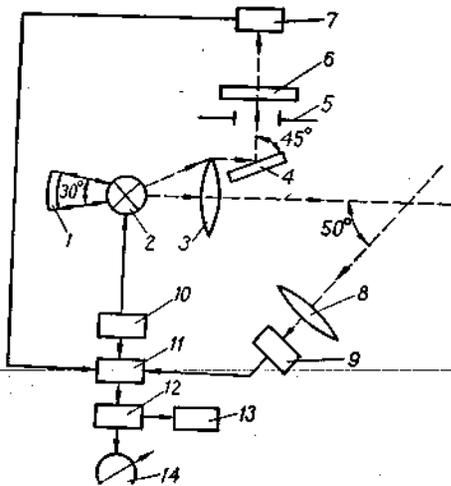


Рис. 36. Структурная схема двухканального фотометра с общим источником света.

ного вперед под углом 20° . При этом нет необходимости использовать мощный источник света для получения достаточной освещенности на больших расстояниях; появляется возможность расположить источник света и фотоприемник по одну сторону газохода; можно создать компактную конструкцию первичного измерительного преобразователя с общим основанием, что является преимуществами при измерении концентрации пыли в газоходах больших диаметров.

Для компенсации начального сигнала, обусловленного фоновым сигналом за счет отражения света от внутренних стенок газохода, если частиц пыли в газоходе нет, на выходе измерительного фотоприемника введен фотоприемник сравнения 7. Он освещается частью светового потока источника света, отраженного от плоского зеркала 4. Площадь его составляет 0,1 поперечного сечения светового потока, освещающего пылегазовый поток. Перед фотоприемником сравнения установлены матовое стекло 6 и диафрагма 5 переменного диаметра для плавной регулировки его освещенности при настройке.

Для получения высокой концентрационной чувствительности пылемера, основанного на методе светорассеяния, необходим мощный источник света и высокочувствительный фотоприемник. Источник света, давая световой поток высокой интенсивности, должен быть стабильным, малогабаритным и иметь большой срок службы. Этим требованиям удовлетворяет лампа накаливания с галогеновым циклом типа КИМ-12-40, световой поток которой равен 720 лм. Благодаря галогеновой добавке (йодит вольфрама), обеспечивающей конденсацию паров вольфрама при высокой температуре горения на поверхность тела накала, стенки кварцевого баллона на протяжении всего срока службы не темнеют и световой поток остается стабильным. В результате продолжительность горения лампы увеличена до 300 ч, а уменьшение светового потока к концу срока службы не превышает 4—5%.

В качестве фотоприемника применен фоторезистор типа СФЗ-1, основными достоинствами которого являются: высокая пороговая чувствительность ($2 \cdot 10^{-11}$ лм) и низкий уровень собственных шумов (ЭДС шумов не превышает 10 мкВ/В), что позволяет применять его для

измерения слабых световых потоков. Инерционные характеристики СФЗ-1 значительно лучше по сравнению с характеристиками других фоторезисторов. Так, при освещенности 20 лк и температуре $20 \pm 2^\circ \text{C}$ постоянная времени по нарастанию электрического тока $\tau_n = 0,06 \text{ с}$, а постоянная времени по спаду $\tau_{сп} = 0,01 \text{ с}$. К существенным недостаткам СФЗ-1 относится довольно высокий температурный коэффициент $\beta = -1,5\% / ^\circ \text{C}$.

В конструкции первичного измерительного преобразователя предусмотрены: регулировка перемещения источника света вдоль оптической и вертикальной осей, измерительного фотоприемника вдоль оптической оси, удобство подхода к регулируемым элементам, а также к деталям, подлежащим замене в процессе эксплуатации. Для предотвращения запыления смотровых стекол, находящихся в контакте с пылевоздушным потоком, использованы пылезащитные насадки с коническими пылеулавливающими кольцами.

Измерительный блок устройства состоит из мостовой измерительной схемы 11 и усилителя 12. В мостовую схему включены измерительный фотоприемник и фотоприемник сравнения. Питание ее осуществляется постоянным стабилизированным напряжением 15 В от унифицированного низковольтного блока питания 10 типа БП-51-1, который обеспечивает стабилизацию напряжения с погрешностью не более $\pm 0,25\%$. Выходной сигнал измерительной схемы усиливают и подают на измерительный прибор 14, а также на вход блока сигнализации 13, который выдает световой и звуковой сигналы, если концентрация пыли в газоходе превышает 60 мг/м^3 .

В результате градуировки устройства установлено, что оно имеет линейную зависимость

между концентрацией мучной пыли, измеряемой весовым методом, и показаниями измерительного прибора в диапазоне от 10 до 200 мг/м^3 . Промышленные испытания устройства показали, что оно обладает нестабильностью показаний и дрейфом нуля. Указанные недостатки обусловлены, прежде всего, нестабильностью характеристик усилителя, фотоприемника и источника света в результате изменений напряжения питания, температуры и влажности окружающей среды, а также нестабильностью постороннего светового фона и других неинформативных параметров измеряемой и окружающей сред. Это ограничило его дальнейшее использование. Большинство из указанных недостатков устранены в последующих разработках оптических пылемеров светорассеяния: ИВА-1, ИВА-2, ИВА-11.

Прибор ИВА-1 предназначен для непрерывного автоматического контроля пылевых выбросов предприятий химической промышленности и, прежде всего, для предприятий, изготовляющих порошковые синтетические моющие вещества. Прибор обеспечивает непрерывное измерение концентрации пыли в отходящих газах, выбрасываемых в атмосферу, в диапазоне от 10 до 300 мг/м^3 при скорости пылегазового потока до 12 м/с , температуре отходящих газов до $+70^\circ \text{C}$. Прибор рассчитан для установки непосредственно в выхлопных газоходах, в которых возможно наличие светового фона, изменяющегося как в течение суток, так и на протяжении года. Диаметр газохода не более 1500 мм. Прибор состоит из осветителя, фотоприемника, измерительного блока, блока питания и регистратора. Первичный измерительный преобразователь, включающий блоки осветителя 1 и фотоприемника 2, крепится в газоходе (рис. 37, а). Остальные блоки устанавливаются на общем пульте управления

на расстоянии до 20 м от первичного измерительного преобразователя.

В приборе используется однолучевая оптическая схема (рис. 37, б) с модуляцией светового

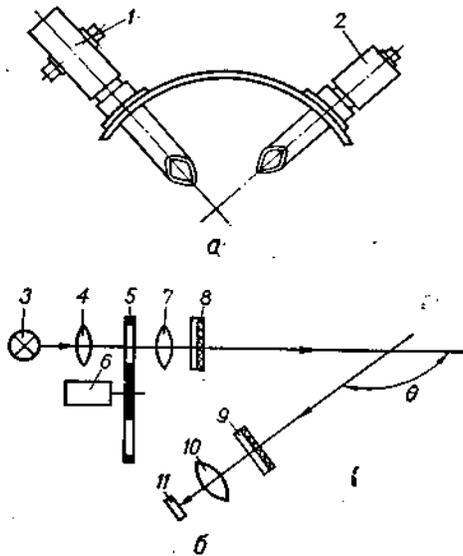


Рис. 37. Прибор ИВА-1:

а — установка первичного измерительного преобразователя в газоходе; б — оптическая схема.

потока. Использование этой схемы позволяет исключить влияние светового фона. Свет от источника 3 фокусируется линзой 4 в плоскость расположения модулятора 5, приводимого во вращение электродвигателем 6. Модулированный частотой 483 Гц свет линзой 7 формируется в параллельный световой поток, равномерно освещающий измеряемый пылегазовый поток. Часть света, рассеянного частицами пыли, с помощью линзы 10 собирается на светочувствительной по-

верхности фотоприемника 11. Угол рассеяния Θ выбирается, исходя из индикатрис рассеяния измеряемой пыли. Для пылевых выбросов предприятий химической промышленности максимальная чувствительность может быть получена при $\Theta = 50^\circ$, когда измеряется рассеянный вперед свет. Однако угол $\Theta = 50^\circ$ рекомендуется использовать при измерении концентрации пыли в газоходах малых диаметров (до 400 мм). В газоходах больших диаметров целесообразнее использовать угол $\Theta = 135^\circ$.

На смотровые стекла 8, 9 нанесены гидрофобные покрытия, которые предохраняют как от конденсации капелек воды, так и от сплошного увлажнения поверхности. Гидрофобизация заключается в обработке стекол кремнийорганическими защитными покрытиями, которые отличаются значительной эксплуатационной стойкостью (свойства покрытий сохраняются в течение 5—10 лет). Гидрофобные покрытия, благодаря более низкому значению показателя преломления (1,44—1,45) по сравнению со стеклом, могут служить одновременно и для уменьшения отражения света от поверхности стекла. Кроме того, покрытия устойчивы к воздействию растворов сильных кислот и органических растворителей (ацетона, бензина, бензола и др.). Для защиты стекол 8, 9 от запыления используются пылезащитные насадки с конусными пылеулавливающими перегородками.

В приборе ИВА-1 применены лампа накаливания КИМ-6,6-65 (световой поток 1079 лм) и фоторезистор ФПФ-7В, температурный коэффициент которого равен $0,6\%/^\circ\text{C}$, что меньше указанного коэффициента фоторезистора СФЗ-1 ($1,5\%/^\circ\text{C}$).

Для согласования фоторезистора со входом усилителя введена трансформаторная схема

включения. При этом исключается постоянная составляющая тока в цепи фоторезистора, что стабилизирует его рабочую точку. Параллельно вторичной обмотке входного трансформатора включен конденсатор, который вместе с данной обмоткой образует колебательный контур, настроенный на частоту модуляции светового потока. В результате повышаются избирательность и величина сигнала на выходе схемы, а также устраняется гальваническая связь между источником питания фоторезистора и входом схемы.

Со вторичной обмотки трансформатора сигнал подается на трехкаскадный усилитель, выполненный по обычной реостатно-емкостной схеме с применением глубокой отрицательной обратной связи по току, охватывающей все каскады усиления. Для обеспечения устойчивости в усилителе применены RC-цепочки коррекции частотных и фазовых характеристик каскадов.

Чтобы получить линейную шкалу измерителя, последний совместно с выпрямительным мостиком включен в цепь отрицательной обратной связи по току. Введена защита выходного прибора от перегрузок за счет использования диодного ограничителя.

Для изменения чувствительности параллельно прибору подключен шунт. С целью уменьшения температурной погрешности последовательно с рамкой измерителя включен терморезистор, который расположен внутри магнитной системы выходного прибора. Блок питания устройства ИВА-1 обеспечивает стабилизацию напряжения питания фоторезистора, источника света и усилителя с погрешностью $\pm 0,25\%$. Шкала прибора отградуирована на пылевидную фракцию СМС типа «Лотос». Градуировочная кривая описывается линейным уравнением регрессии $N = 0,45 + 0,20 C$. Коэффициент корреляции составляет

0,96; основная приведенная погрешность измерения равна $\pm 15\%$.

Прибор ИВА-1 прошел промышленные испытания на двух заводах: Днепропетровском заводе химических изделий (ДЗХИ) и Гомельском химическом заводе (ГХЗ). Испытания на ДЗХИ проводились при установке первичного измерительного преобразователя ИВА-1 в верхней части

вертикального участка газохода цеха порошковых СМС. Расстояние от места установки до колена газохода составляло 2,15 м и превышало $5D$, где $D = 0,42$ м — диаметр газохода. Угол между оптическими осями осветителя и фоторезистора составлял 45° . Зона измерения находилась на оси газохода. Одновременно с измерением концентрации пыли прибором ИВА-1 проводились измерения концентрации и весовым методом. При этом алонж с фильтром устанавливали на одной линии тока с зоной измерения ИВА-1 на расстоянии от нее порядка 50 мм по ходу пылевоздушного потока.

Испытания на ГХЗ проводились в цехе фтористого алюминия в отделении расфасовки готовой продукции. Первичный измерительный преобразователь был установлен на вертикальном участке вентиляционного газохода после рукавного фильтра ФВ-30М перед вентилятором. Методика испытаний аналогична методике испытаний на ДЗХИ.

Результаты проведенных испытаний (рис. 38) показывают, что концентрационные чувствитель-

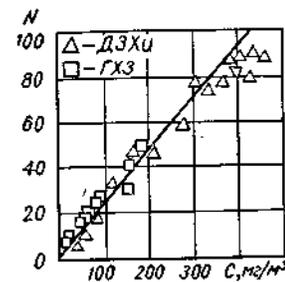


Рис. 38. Зависимость между показаниями N прибора и концентрацией C пыли.

ности ИВА-1 для обоих видов пыли одинаковы. Хорошая сопоставимость результатов объясняется тем, что, во-первых, оба вида пыли относятся к грубодисперсным системам, во-вторых, частицы имеют выпуклую форму, и, в третьих, характеризуются одинаковыми рассеивающими свойствами, так как все они являются «белыми» частицами с диффузным рассеянием света.

Прибор ИВА-11 в отличие от ИВА-1 может быть использован при изменениях температуры окружающей среды в широких пределах (от -30 до $+35^{\circ}\text{C}$) [5; 20]. Такие условия эксплуатации пылемеров на практике встречаются довольно часто, поскольку выхлопные газоходы, где устанавливаются приборы, обычно находятся на открытом воздухе.

Фоторезисторы чувствительны к изменениям температуры, причем чувствительность их увеличивается с уменьшением температуры. Чтобы исключить влияние температуры, а также повысить чувствительность в приборе ИВА-11 (рис. 39, а) в блоке фотоприемника введена термостабилизация. Для этого используется микроохладитель 2, на рабочей грани которого установлен измерительный фотоприемник 1. Терморезистором 3 измеряется температура рабочей грани микроохладителя. В качестве рабочей точки взята температура 0°C . Выходной сигнал терморезистора подают на терморегулятор 4, который регулирует работу микроохладителя 2 таким образом, чтобы температура его оставалась постоянной и равной 0°C с точностью $\pm 2\%$.

При разработке пылемера ИВА-11 большое внимание было уделено вопросам помехозащитности. В приборе осуществлена защита от внешнего светового фона и от промышленных помех. Для защиты от внешнего светового фона используется модуляция светового потока осве-

тителя. Влияние промышленных помех исключается в результате синхронного детектирования. При этом выходной сигнал измерительного фотоприемника после усиления подается на вход синхронного детектора. Он представляет собой линейный шестиполосник, проводимость которого

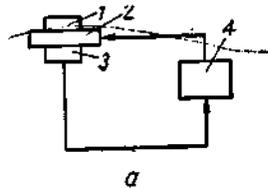
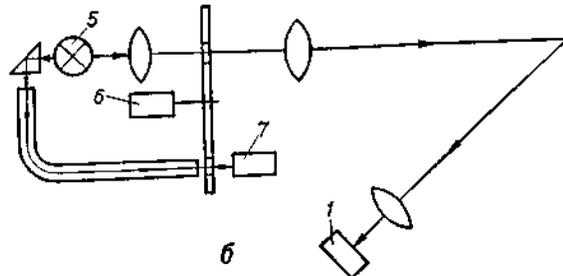


Рис. 39. Прибор ИВА-11: а — схема термостабилизации измерительного фотоприемника; б — оптическая схема.



при помощи опорного напряжения переменного тока периодически изменяется синхронно с частотой этого опорного напряжения. Для получения опорного напряжения в оптическую схему введен опорный канал на базе фотоприемника 7 (рис. 39, б). Последний освещается светом, который подается от общего источника 5 по световоду 6. Оба световых потока — измерительный и опорный — модулируются с одной и той же частотой, и выходной сигнал фотоприемника в опорном канале после усиления также подается на вход синхронного детектора, который обеспечивает получение узкой полосы пропускания. При этом значительно уменьшается влияние

непостоянства частоты модуляции света. Сигнал с выхода синхронного детектора подается на измеритель и регистратор.

Введение термостатирования и модуляции светового потока с использованием синхронного детектирования позволило улучшить метрологические характеристики прибора.

Измеритель пылевых выбросов ИВА-2 отличается простотой, повышенной надежностью и удобством при промышленной эксплуатации. Он предназначен для измерения концентрации пыли в выхлопных газоходах, в которых световой фон либо отсутствует, либо сохраняется постоянным. Это газоходы, в которые дневной свет непосредственно не проникает. На практике концентрация пыли измеряется в них гораздо чаще, чем в газоходах, в которые проникает дневной свет. Отсутствие дневного света в месте измерения позволяет упростить оптическую схему пылемера, что делает его более простым в наладке и эксплуатации, уменьшает влияние вибрации газохода, которая всегда имеет место, а также облегчает настройку прибора после замены в нем деталей, вышедших из строя во время его эксплуатации. В комплект ИВА-2 входят: первичный измерительный преобразователь, измерительный блок, блок питания и регистрирующее устройство, которое непрерывно регистрирует на диаграммной ленте значения мгновенной концентрации пыли.

Технические характеристики ИВА-2

Измеряемая среда . . .	Пылевоздушные потоки
Диапазон измерения концентрации пыли, мг/м ³	10—500 (цементная пыль)
Предел допустимой основной приведенной погрешности измерения от	

верхнего предела измерения, %	±15%
Шкала	Линейная

Быстродействие, с	Не менее 0,1
Температура измеряемой среды, °С	+15 — +35
Относительная влажность измеряемой среды, %	До 80
Напряжение питания, В	220 ± 10
Частота питающего напряжения, Гц	50 ± 1
Потребляемая мощность, ВА	Не более 100
Габаритные размеры, не более, мм:	
блок осветителя	120 × 110 × 140
блок фотоприемника	Диаметр 80, длина 330
измерительный блок	140 × 120 × 275
блок питания	400 × 140 × 200
Масса, не более, кг:	
блок осветителя	3,0
блок фотоприемника	1,5
измерительный блок	3,0
блок питания	6,0

Общая схема первичного измерительного преобразователя приведена на рис. 40. Он состоит из блока осветителя и блока фотоприемника, которые крепятся на вертикальном участке газохода на расстоянии не менее 5D (D — диаметр газохода) от изгиба газохода или места установки пылеулавливающей аппаратуры. Измерительный блок и блок питания размещаются на общем пульте управления, причем расстояние между первичным преобразователем и остальными блоками не должно превышать 40 м.

В приборе ИВА-2 применена однолучевая оптическая схема. Свет от источника 1 линзой 2

формируется в параллельный поток, который, пройдя смотровое стекло 4, равномерно освещает измеряемую пылегазовую среду в газоходе 6. Часть света, рассеянного частицами пыли и прошедшего через смотровое стекло 12, собирается линзой 13 на светочувствительной поверхности фотоприемника 14. Угол θ регистрации рассеянного света выбран равным 135° . Для защиты

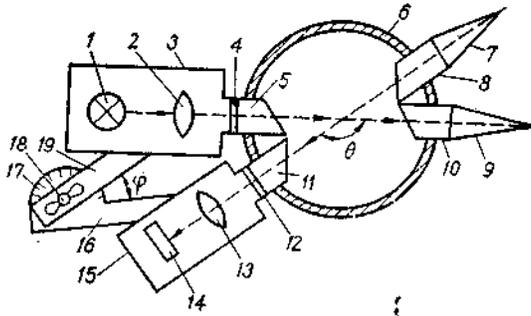


Рис. 40. Структурная схема первичного измерительного преобразователя ИВА-2.

стекла 4 и 12, контактирующих с измеряемым пылегазовым потоком, применены насадки 5 и 11 с пылезащитными перегородками.

При измерении концентрации пыли в газоходах, и особенно в газоходах малых диаметров, возникает погрешность за счет фона и световых бликов, появляющихся в результате отражения светового потока источника света, прошедшего через измеряемую среду, от внутренних стенок газохода. Частицы пыли непрерывно осаждаются на внутренних стенках газохода, образуя слой пыли, которые периодически срываются. Поэтому отражающие свойства стенок изменяются во времени, что ведет к изменению светового фона внутри газохода. Нестабильность светового фона не

позволяет учесть его и внести соответствующую корректировку в результат измерения. Обычно для исключения фона в оптических приборах, основанных на измерении рассеянного света, применяют световые ловушки. Одна ставится против осветителя и гасит световой поток источника света, прошедший через измеряемую среду. Вторая устанавливается против фотоприемника и гасит световые блики, находящиеся в поле его зрения. Однако использовать световые ловушки в таком виде в промышленных газоходах, по которым непрерывно движется пылевоздушный поток, невозможно, поскольку внутри ловушек оседает пыль, которая через некоторый промежуток времени полностью заполняет ее. Периодическая чистка ловушек также не дает ощутимого результата, так как непрерывное оседание пыли все время изменяет их светопоглощающие свойства, в результате чего фон внутри газохода также постоянно изменяется.

Для исключения влияния фона в пылемере ИВА-2 используются две световые ловушки. Одна из них 9 устанавливается на одной оптической оси с источником света 1 на противоположной ему стенке газохода. Вторая 7 устанавливается на одной оптической оси с фотоприемником 14 на противоположной ему стенке газохода. Обе ловушки имеют пылезащитные насадки 8 и 10, по конструкции аналогичные пылезащитным насадкам 5 и 11 источника света и фотоприемника, но имеющие больший проходной световой диаметр. Использование пылезащитных насадок 8 и 10 исключает попадание пыли внутрь ловушек, в результате светопоглощающие свойства последних не изменяются во время эксплуатации.

При установке первичного преобразователя внутри газохода очень важно расположить блок осветителя и блок фотоприемника в плоскости

одного и того же поперечного сечения газохода. Чтобы достичь этого, а также для того, чтобы иметь возможность точно выставить заданный угол между оптическими осями осветителя и фотоприемника в газоходах различных диаметров, блоки фотоприемника и осветителя соединены друг с другом с помощью регулятора. Последний включает две направляющие 16 и 19, одна из которых крепится к корпусу 3 осветителя, другая — к корпусу 15 фотоприемника. Направляющие соединены между собой винтом 18, который позволяет изменять угол φ по шкале 17 между направляющими и фиксировать его. Угол

$$\varphi = 2 \arcsin \frac{D}{2a} \sin \frac{180 - \theta}{2},$$

где a — длина направляющих; D — диаметр газохода.

Таким образом, регулятор позволяет достаточно просто устанавливать необходимый угол θ в газоходе любого диаметра D , не проводя непосредственных измерений указанного угла θ внутри газохода, которые связаны с определенными трудностями. Кроме того, существенно упрощается повторная установка блоков осветителя и фотоприемника в газоходе после профилактического осмотра и текущего ремонта.

В пылемере ИВА-2 в качестве фотоприемника используется фоторезистор типа ФПФ-7В, который включен в мостовую измерительную схему. Для линейаризации шкалы прибора введен резистор, шунтирующий фоторезистор. Напряжение разбаланса моста подается на усилитель постоянного тока типа Ф7024, предназначенный для линейного преобразования напряжения постоянного тока в унифицированный выходной сигнал постоянного тока. Усилитель преобразует постоянное напряжение в переменное с помощью

демодулятора, собранного по мостовой схеме на полевых транзисторах, усиливает с помощью трех усилительных ячеек, выполненных на интегральных схемах, и демодулирует. Выпрямленное демодулятором напряжение подается на вход усилителя постоянного тока. Получение заданных технических параметров усилителя достигается путем введения последовательной отри-

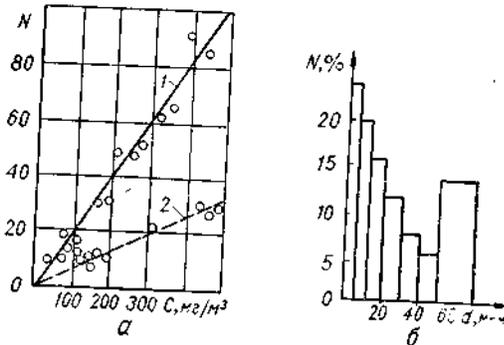


Рис. 41. Градуировочная характеристика ИВА-2 для цементной пыли (а) и гистограмма частиц цементной пыли, используемой при градуировке прибора (б).

цательной обратной связи по напряжению. С выхода усилителя сигнал подается на измеритель и регистратор.

Блок питания выдает напряжения для питания источника света, мостовой измерительной схемы и усилителя.

Прибор отградуирован (рис. 41, а, кривая 1) на цементную пыль, гистограмма частиц которой дана на рис. 41, б. Градуировочная кривая описывается линейным уравнением $N = 0,02 \pm 0,2 S$. Коэффициент корреляции составляет 0,96.

С целью сравнения показаний прибора ИВА-2 для различных видов промышленной пыли

проведена также градуировка прибора на угольную пыль (рис. 41, а, кривая 2), светорассеивающие свойства которой существенно отличаются от аналогичных свойств цементной пыли. Из сопоставления градуировочных кривых для цементной и угольной пыли следует, что концентрационная чувствительность прибора ИВА-2 для цементной пыли в 3 раза больше концентрационной чувствительности для угольной пыли.

Прибор ИВА-2 испытан на цементной, древесной и кварцесодержащей пыли на Киевском комбинате «Стройиндустрия», где и внедрен в промышленную эксплуатацию.

Испытания на комбинате «Стройиндустрия» проводились на заводе центрифугированных труб (ЦФТ), заводе мягкой кровли и ремонтно-строительном цехе (РСЦ). На ЦФТ первичный измерительный преобразователь прибора устанавливался в надбункерном отделении бетоносмесительного узла (БСУ) после рукавного фильтра ФВК-30 в газоходе диаметром 450 мм. Измерялась концентрация цементной пыли в отходящих газах, температура которых равна 15—20° С. На заводе мягкой кровли измерялась концентрация кварцевой пыли в отделе гранул после циклона-промывателя в газоходе диаметром 300 мм при температуре отходящих газов 15—20° С. В РСЦ измерялась концентрация древесной пыли на выходе циклона «Гипродрев», очищающего воздух в помещении, где работают деревообрабатывающие станки. Характер изменений концентрации пыли в газоходе для разных заводов и разных видов пыли различен и зависит в основном от режима работы пылеочистного оборудования, а также от динамики технологического процесса. Расчеты показали, что максимальный разброс (80%) мгновенных значений концентраций наблюдается при контроле содержания

кварцевой пыли в отделе гранул, где для пылеочистки используют циклон-промыватель. В ЦФТ разброс значений мгновенной концентрации цементной пыли составляет 40%. Минимальный разброс концентраций (20%) получен для древесной пыли в РСЦ, где для пылеочистки используют сухой циклон. Малая величина разброса обусловлена равномерной работой как самого пылеочистного оборудования, так и деревообрабатывающих станков.

Исследования работы рукавного фильтра показали, что очистка отходящих газов между двумя встряхиваниями осуществляется крайне неравномерно. В начальный момент времени происходит быстрое, почти мгновенное увеличение концентрации пыли на выходе фильтра в результате засорения его пор. Затем концентрация растет очень медленно. Отсюда следует, что малоэффективная работа фильтра обусловлена плохой регенерацией рукавов. Таким образом, по характеру изменений мгновенных значений концентрации пыли в газоходе можно судить о причинах недостаточно эффективной работы пылеочистного оборудования.

При эксплуатации пылемера в промышленных условиях очень важно осуществлять периодическую поверку показаний прибора. В пылемере ИВА-2 это можно сделать с помощью специального поверочного блока, который совместно с первичным измерительным преобразователем позволяет получить контрольные сигналы для остальной части прибора. Во время поверки световой поток от блока осветителя подается на имитатор (физический эквивалент контролируемой пылегазовой среды). Свет, рассеянный имитатором под определенным углом, поступает непосредственно на фотоприемник. При этом показания пылемера отсчитываются по измерительному прибору или

фиксируются на диаграммной ленте регистрирующего устройства.

Основной предпосылкой для создания пeverочного блока является наличие соответствующего имитатора, который должен иметь механическую прочность и стабильные метрологические характеристики, а светорассеивающие свойства его должны соответствовать светорассеивающим свойствам частиц пыли, находящихся во взвешенном состоянии.

Наиболее подходящим материалом для изготовления имитаторов пылегазовой среды при измерении концентрации пыли методом светорассеяния являются светорассеивающие стекла. Образцы из такого стекла стабильны во времени, удобны в обращении, отличаются сравнительно хорошей механической прочностью, имеют легко очищаемую поверхность. Промышленностью освоены 4 марки светорассеивающих стекол с различными оптическими свойствами: МС-16, МС-17, МС-18 и МС-19. В качестве исходного стекла взят крон марки ЛК6, в который специально введена окись кальция, вызывающая появление мутности.

Для характеристики светорассеивающих свойств стекол марки МС выбраны следующие физические величины:

натуральный показатель рассеяния σ , который характеризует общую мутность стекла и определяется выражением

$$\tau = (1 - R)^2 \exp(-\sigma l_0),$$

где τ — коэффициент пропускания; R — френелевский коэффициент отражения; l_0 — толщина образца;

коэффициент рассеяния α , пропорциональный интенсивности света, рассеянного под углом 90° :

$$\alpha = \beta_n n^2 / \pi l,$$

где β_n — коэффициент яркости рассеивающего слоя толщиной l в направлении, перпендикулярном направлению падения освещающего пучка; n — показатель преломления стекла;

Таблица 6

Характеристики светорассеивающих стекол

Марка стекла	Содержание СаО, % по массе	Натуральный показатель рассеяния	Коэффициент рассеяния α
МС-16	0,02	Меньше 0,03	(1—10) 10^{-2}
МС-17	0,03	0,03—0,10	(1—10) 10^{-3}
МС-18	0,04	0,10—0,20	(1—10) 10^{-3}
МС-19	0,60	13—33	

индикатриса рассеяния, дающая представление о пространственном распределении рассеянного света.

В табл. 6 приведены значения σ и α для стекол марки МС. Содержание окиси кальция в процентном отношении невелико, но она является важным компонентом стекла, поскольку существенно изменяет его оптические характеристики вследствие изменения его структуры (образование микронеоднородностей).

Индикатрисы рассеяния светорассеивающих стекол показаны на рис. 42. Для удобства сопоставления формы индикатрис стекол разных марок значения β приведены к единице при угле рассеяния $\Theta = 25^\circ$. Индикатрисы сняты для образцов стекол, имеющих форму цилиндра, что

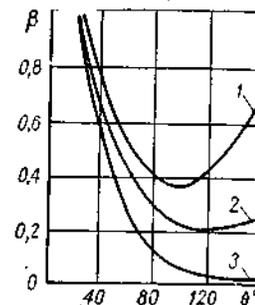


Рис. 42. Индикатрисы рассеяния светорассеивающих стекол: 1 — МС-16; 2 — МС-17; 3 — МС-18.

позволяет при фотометрировании рассеянного света не учитывать преломления и отражения света на границе стекло — воздух. Из приведенных графиков видно, что для стекла МС-16 индикатриса рассеяния довольно близка к релеевской. У стекла МС-17 и МС-18 индикатриса вы-

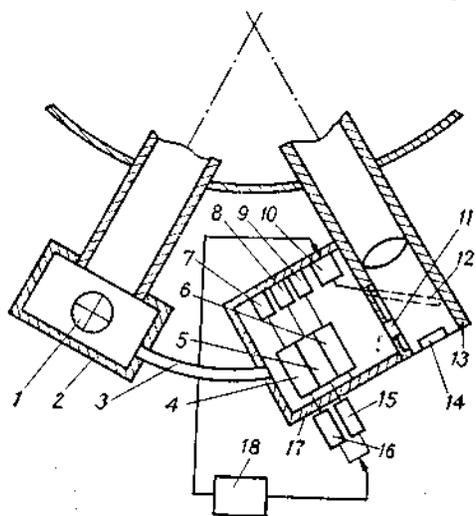


Рис. 43. Поверочный блок к пылемеру ИВА-2.

тянута вперед по направлению распространения падающего пучка. Особенно резко это выражено у стекла марки МС-18.

Стекла марки МС с дозированными в определенных пределах характеристиками светорассеяния соответствуют характеристикам светорассеяния большого класса объектов различного происхождения, в том числе и пылевоздушных смесей.

Поверочный блок к пылемеру ИВА-2 (рис. 43) вмонтирован в первичный измерительный преобразователь. Основными элементами его являются

световод 3, набор имитаторов 4, 5, 6 и подвижное зеркало 12. Световод, укрепленный одним концом в корпусе осветителя 2, другим — в корпусе имитаторов 17, направляет часть светового потока от источника 1 на имитаторы. Положение последних фиксируется упругими элементами 7, 8, 9. Рассеянный имитаторами свет попадает через отверстие 11 на подвижное зеркало, которое направляет его на фотоприемник 14. Во время измерения концентрации пыли в газоходе подвижное зеркало плотно прилегает к боковой стенке корпуса фотоприемника 13 и закрывает отверстие 11. При этом на фотоприемник попадает свет, рассеянный измеряемым пылегазовым потоком в газоходе.

Во время проверки коммутирующее устройство 18 выдает сигнал на соленоид 10, который перемещает подвижное зеркало в положение, указанное на рисунке пунктиром. При таком положении зеркала рассеянный имитаторами свет через отверстие 11 попадает на подвижное зеркало и, отразившись от него, регистрируется фотоприемником. В это время свет, рассеянный пылегазовым потоком, перекрывается подвижным зеркалом и на фотоприемник не попадает.

Цикл проверки включает контролирование трех точек градуировочной прямой прибора. В начальный момент при положении имитаторов, изображенном на рис. 43, контролируется максимальная $C_{\text{макс}}$ концентрация пыли, измеряемая прибором. Затем коммутирующий блок выдает сигнал, который приводит в действие электромагнит 16. Последний выводит из светового потока, направляемого на имитаторы световодом 3, имитатор 4. При этом показания прибора должны соответствовать некоторому промежуточному значению $C_{\text{пром}}$ концентрации пыли. Далее коммутирующий блок выдает сигнал, в результате

которого электромагнит 15 выводит имитатор 5 из светового потока, а показания прибора соответствуют минимальному значению $C_{\text{мин}}$ концентрации пыли. После окончания проверки коммутующий блок выдает сигнал соленоиду 10, который возвращает подвижное зеркало в начальное положение. На этом цикл проверки прибора заканчивается.

В поверочном блоке к ИВА-2 имитаторы изготовлены из стекла марки МС-17. С учетом индикатрис рассеяния МС-17, используется свет, рассеянный под углом 30° к направлению падающего светового потока. Поверочный блок к ИВА-2 обеспечивает высокую надежность генерации контрольных сигналов.

ОПТИЧЕСКИЕ ПЫЛЕМЕРЫ СВЕТОРАССЕЯНИЯ, ВЫПУСКАЕМЫЕ ЗАРУБЕЖНЫМИ ФИРМАМИ

Фирма Сименс (ФРГ) изготавливает пылемеры типа «Зигрист» [83]. В них применена двухлучевая схема с оптической компенсацией в канале сравнения. Свет от источника 1 (рис. 44) модулируют с частотой 600 Гц качающимся зеркалом 12. В измерительном канале свет зеркалом 10 направляют на пробу запыленного газа, отобранную из газохода через пробоотборную трубку 11 с помощью воздуходувки 6. Свет, рассеянный частицами пыли под углом, близким к 0° , регистрируется фотоэлементом 4. В канале сравнения свет зеркалом 9 направляют на эталон светорассеяния 5, а рассеянный им свет регистрируется тем же фотоэлементом 4. Выходной сигнал последнего, равный разности интенсивностей световых потоков в измерительном канале и канале сравнения, подается на усилитель 3 и реверсивный электродвигатель 2, который механически соединен с оптическим клином 8 в канале сравне-

ния и перемещает его до полного уравнивания интенсивностей обоих световых потоков. С клином связан барабан 7, шкала которого отградуирована в единицах измерения концентрации пыли.

Прибор обладает высокой чувствительностью ($0,005 \text{ мг/м}^3$). В нем предусмотрены два диапазо-

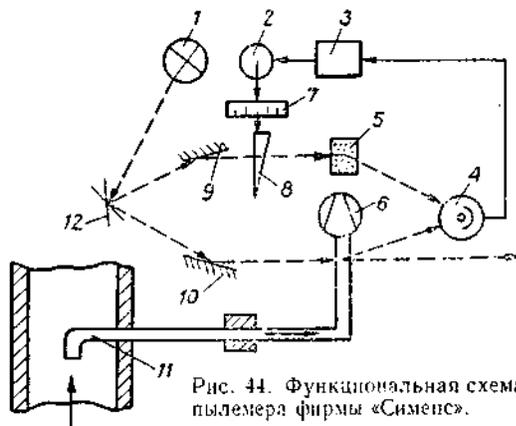


Рис. 44. Функциональная схема пылемера фирмы «Сименс».

на измерения ($0-0,5$ и $0-1000 \text{ мг/м}^3$), для каждого из них применяют различные пробоотборные трубки.

Во время сравнительных измерений концентрации пыли весовым методом и пылемером «Зигрист» [73] отбор проб пыли осуществляли в 10 местах поперечного сечения газохода с соблюдением условия изокINETИЧНОСТИ. Малые концентрации дают хорошее совпадение результатов, полученных обоими методами. При концентрациях, превышающих 500 мг/м^3 , показания пылемера ниже массовой концентрации пыли, измеренной весовым методом.

ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ

МНОГОТОЧЕЧНЫЙ ПЫЛЕВОЙ КОНТРОЛЬ

Контроль не в одной, а в нескольких точках одновременно является более действенным и эффективным, поскольку он непрерывно выдает информацию об общем количестве пыли, выбрасываемой предприятием в атмосферу. Особенно это важно для крупных промышленных предприятий, имеющих несколько выхлопных газопроводов. Если высокая концентрация пыли в выбросе одного выхлопного газопровода не представляет большой опасности, то высокие концентрации во многих, а иногда и во всех выхлопных газопроводах — это аварийная ситуация для производства. Иногда требования производства в некоторый момент времени не позволяют уменьшить концентрацию пыли в одном из выхлопных газопроводов, но это можно компенсировать временным переходом других участков производства в режим, допускающий уменьшение количества пылевых выбросов, иногда и за счет остановки одного из участков производства с целью уменьшения общего выброса.

Рассмотрим пример осуществления многоточечного пылевого контроля (рис. 45) на предприятии, имеющем n газопроводов, через которые пылевые выбросы попадают в атмосферу. Для получения непрерывной информации о количестве выбрасываемой пыли могут быть использованы, например, оптические пылемеры светорассеяния. На каждом газопроводе устанавливают первичный измерительный преобразователь 1, в состав которого входят блок осветителя 2 и блок фотоприемника 3 со стабилизированными источ-

никами питания 4, 5. Выходные сигналы всех n блоков фотоприемников подают на вход коммутатора измерительных сигналов. С выхода коммутатора сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь и цифровое печатающее устройство,

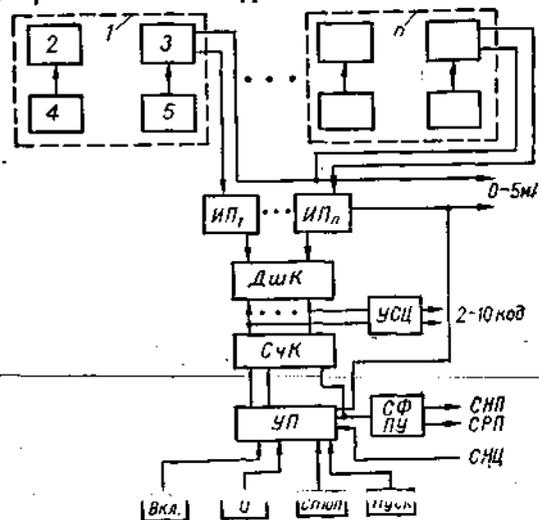


Рис. 45. Структурная схема осуществления многоточечного пылевого контроля.

предназначенное для цифровой регистрации результатов контроля. В Институте газа АН УССР разработан такой коммутатор измерительных сигналов на интегральных переключателях МОП-структур, управление которыми осуществляется от биполярных интегральных схем.

В состав коммутатора измерительных сигналов входят: счетно-дешифрирующее устройство (СчК, ДшК — счетчик и дешифратор каналов), предназначенное для управления набором коммутирующих элементов $ИП_1 - ИП_n$; устройство связи с цифровым печатным устройством (УСЦ), обеспечиваю-

щее согласование уровней потенциалов выходного кода $CчК$ с уровнем потенциалов цифрочающего устройства, а также индикацию кода номера канала опроса; схема формирования $CФ$ и преобразования уровня $ПУ$ управляющих сигналов; устройство управления, обеспечивающее автоматическую установку коммутатора в положение 0 по признакам включения питания и окончания цикла опроса первичных измерительных преобразователей, восприятие сигналов начала цикла $СНЦ$ от внешних устройств, электронную блокировку повторного запуска во время цикла опроса; изменение интервалов опроса, выработку тактирующих серий для синхронизации входящих в $CчК$ триггерных элементов; выработку сигналов начала преобразования $СНП$ и сигналов разрешения печати $СРП$ для аналого-цифровых преобразователей и цифрочающего устройства.

Коммутация первичных измерительных преобразователей и выработка управляющих сигналов осуществляются в автономном и автоматическом режимах. После включения питания устройство управления автоматически устанавливает $CчК$ в положение 0. Разрешение цикла опроса происходит по команде «Пуск» или по приходу внешних сигналов, генерируемых транскриптором, ЭВМ или другими устройствами через интервалы времени, достаточные для опроса всего цикла первичных измерительных преобразователей.

Устройство управления вырабатывает одиночные импульсы $+ICч$, которые регистрируются $CчК$. Интервалы следования импульсов $+ICч$ соответствуют времени опроса первичного измерительного преобразователя. Устройством $УСЦ$ выходной код $CчК$ преобразуется в уровни, достаточные для восприятия цифрочающим ус-

ройством, а также дешифрируется $ДшК$ при поочередном подключении первичных измерительных преобразователей ко входу аналого-цифрового преобразователя.

Для разрешения преобразования измерительных сигналов в числовой эквивалент схемой $CФ$ и $ПУ$ через время t_1 из счетных импульсов вырабатываются сигналы начала преобразования $СНП$, а для разрешения печати цифрочающему устройству через время t_2 — сигналы $СРП$.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННОГО ПЫЛЕВОГО КОНТРОЛЯ

Во многих отраслях промышленности проводится большая работа по снижению количества промышленных выбросов в атмосферу.

Рассмотрим методику определения экономической эффективности работы прибора контроля пылевых выбросов на предприятиях, для которых технологические и вентиляционные выбросы являются либо готовым продуктом, либо ценным сырьем. Экономическая эффективность

$$\mathcal{E} = [(C_1 - C_2) - E_n K_{\text{доп}}] A, \quad (25)$$

где C_1, C_2 — стоимость 1 т сырья или готового продукта до и после внедрения прибора соответственно; E_n — нормативный коэффициент эффективности; $K_{\text{доп}}$ — дополнительные затраты; A — плановый выпуск продукции в год. Величина E_n для приборостроительной промышленности равна 0,2.

Стоимость 1 т сырья или готового продукта после внедрения прибора определяется по формуле $\Phi = C_1 A$, где Φ — финансовый план завода.

Своевременное устранение причин, вызывающих увеличение концентрации, позволит возвра-

тять часть готовой продукции или сырья B , полученную за счет уменьшения выбросов в атмосферу, на расфасовку или в технологический цикл. Для определения величины B необходимо знать расход воздуха при производстве 1 т продукции Q , предельные допустимые концентрации выбросов ПДВ, предельные допустимые потери $K_{пдв} = ПДВ \cdot Q$ на выбросе при производстве 1 т продукции.

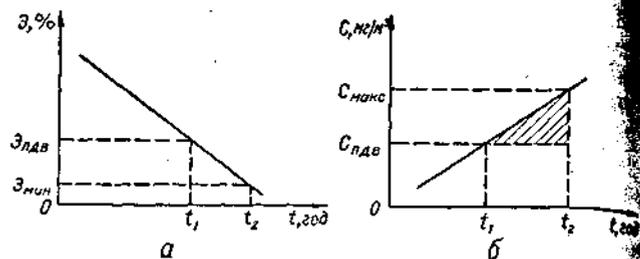


Рис. 46. К методике определения экономической эффективности работы пылеочистных сооружений.

Из графика работы очистных сооружений (рис. 46, а) определяем следующие величины: t_1 — время, при котором концентрация пыли в выбросах достигает предельного допустимого значения $C_{пдв}$; t_2 — время, при котором концентрация пыли в выбросах достигает максимальной величины $C_{макс}$ и требуется чистка или ремонт очистных сооружений. На основании полученных величин $C_{макс}$, t_1 , t_2 строим график зависимости концентрации пыли в выбросах C от времени t работы очистных сооружений $C = f(t)$ (рис. 46, б), из которого определяем потери B при производстве 1 т продукции, интегрируя площадь фигуры, находящейся над линией $C = C_{пдв}$ и заключенной между кривой $C = f(t)$ и прямой $t = t_2$.

Информация, выдаваемая прибором о достижении концентрации пыли в выбросе значений $C_{пдв}$, обязывает очистить и отремонтировать очистные сооружения. В результате принятых мер величина C должна сохраняться в диапазоне $C \leq C_{пдв}$. Определив потери B продукции или сырья, которые будут возвращены производству при своевременном уменьшении концентрации пыли в выбросах, можно рассчитать стоимость 1 т продукции после внедрения прибора контроля пылевых выбросов следующим образом. От переработки всей продукции или сырья будет сэкономлено $D = BA$, т. е. выпуск продукции за этот же период на тех же площадях $A_2 = A + D$.

Исходя из финансового плана предприятия Φ , находим стоимость 1 т продукции после внедрения прибора по формуле $C_2 = \Phi/A_2$. Зная C_1 и C_2 , рассчитываем экономию на 1 т продукции.

Капитальные вложения определяются из условий потребности завода в приборах, стоимости одного серийного или опытного образца прибора, а также включают все вложения по общепринятой методике расчета экономической эффективности.

Подставив все величины в формулу (20) и вычитая из полученного значения стоимость дополнительного ремонта или чистки пылеочистных сооружений, получим ожидаемую экономическую эффективность от внедрения прибора.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПЫЛЕВОГО КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ

Рассматривая перспективы развития промышленного пылевого контроля, прежде всего, остановимся на возможностях использования лазеров.

В последние годы проведены работы по использованию лазеров для контроля загрязнения воздушного бассейна, в основном, применительно

к газовому анализу, т. е. определению газообразных загрязнителей. Так как лазер имеет лучшую чувствительность и избирательность вследствие большой полезной мощности в узкой полосе спектра, не требует дополнительных оптических узлов для формирования луча и характеризуется высокой монохроматичностью по сравнению с излучением от тепловых источников, то применение его для контроля пылевых выбросов промышленных предприятий позволяет повысить как качественные, так и количественные показатели данного контроля. В промышленном пылевом контроле лазер, прежде всего, может быть использован как новый источник света, обладающий более высокими техническими характеристиками по сравнению с существующими источниками света.

На основе лазера ЛГ-75 Семibrатовский филиал НИИОгаз разработал квантовый пылемер [7]. Концентрация пыли измеряется методом светорассеяния. Рассеянный свет регистрируется фотоумножителем ФЭУ-28, установленным под углом 90° к направлению прямого светового потока. Предусмотрено использование квантового пылемера для измерения концентрации пыли в газоходах больших диаметров (180 см), для чего в центре газохода устанавливают пробоотборную трубку, которая направляет часть измеряемого пылегазового потока через зону измерения пылемера, размещенную вне газохода. В приборе имеется световая ловушка, расположенная против лазера на одной оптической оси с ним, которая позволяет существенно уменьшить паразитный световой фон в зоне измерения. Квантовый пылемер предназначен для измерения низких концентраций пыли: от 3 до 50 мг/м^3 .

В США разработана установка (рис. 47) для контроля пылевых выбросов мощных тепловых

электростанций с использованием лазера. В основу работы установки положено явление поглощения света контролируемой средой. Используется двухканальная оптическая схема. В измерительном канале световой поток лазера 1 формируется линзой 2, проходит через полупрозрачную пластинку 13, вибратор 6 и направляется

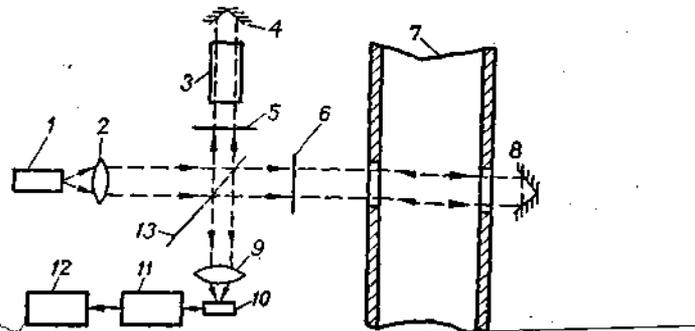


Рис. 47. Установка для контроля пылевых выбросов ТЭС с использованием лазера.

в газоход 7. Пройдя через контролируемый пылегазовый поток, свет отражается от рефлектора 8 и проходит поперечное сечение газохода в обратном направлении. Затем полупрозрачной пластинкой 13 свет направляется на линзу 9 и на фотоприемник 10, выходной сигнал которого подается на измерительный блок 11 и далее на цифровое печатающее устройство 12. В канале сравнения излучение лазера полупрозрачной пластинкой 13 направляется через калибровочную ячейку 3, отражается от рефлектора 4, проходит в обратном направлении и фиксируется фотоприемником 10. Вибраторы 5 и 6 осуществляют коммутацию каналов. Работая синхронно, они поочередно переключают измерительный канал и канал

сравнения. В измерительном блоке сравниваются интенсивности света в обоих каналах. Использование в описанной установке лазера позволило повысить чувствительность и измерять низкие концентрации пыли в выбросах.

Однако более эффективно использовать лазеры для дистанционного зондирования, когда параметры контролируемой среды измеряются на расстоянии. Дистанционные измерения имеют три основных преимущества перед локальными измерениями:

возможность получения количественной информации в таких местах, где локальное измерение неосуществимо (например, на значительных высотах);

возможность охвата измерениями больших пространств. Одно устройство дистанционного измерения может дать информацию, эквивалентную одно-, двух- или трехмерной сети локальных устройств, причем при этом не требуется сложная система коммуникаций для передачи на центральный пункт;

возможность получения осредненных данных. Такие данные часто имеют больший смысл, чем измерения в одной точке, которые могут быть недостаточно представительными.

Наряду с этими преимуществами дистанционные измерения имеют и недостатки, основные из которых — высокая стоимость аппаратуры и сравнительно низкая точность измерений.

Принцип действия установок для дистанционного контроля пылевых выбросов промышленных предприятий с применением лазеров аналогичен принципу действия лидаров лазерных локаторов. Основными элементами систем с лазерами являются излучатель и приемное устройство. В качестве излучателя могут быть использованы как импульсные лазеры, так и лазеры непрерывного

действия. Для импульсных лазеров длительность импульсов обычно лежит в пределах от 10 до 20 нс. Мощность в импульсе достигает десятков мегаватт.

Дистанционное зондирование выбросов промышленных предприятий возможно путем просвечивания, однопозиционного рассеяния (прием и передача совмещены в пространстве) и двухпозиционного рассеяния (прием и передача разнесены на некоторое пространство). При всех указанных методах используется односторонняя лидарная система для обнаружения и идентификации загрязнений от стационарных и подвижных источников. При первом из указанных методов луч лазера направляют через дымовой столб к рефлектору, расположенному за объектом измерения, и затем на приемное устройство, совмещенное с излучателем. При втором методе излучатель и приемное устройство также совмещены, но последнее регистрирует свет, рассеянный дымовым столбом. Третий метод предусматривает пересечение оптических осей излучателя и приемного устройства под разными углами. Изменяя указанный угол, например, в результате поворота оси приемного устройства, можно менять высоту зондирования. Первый и второй методы требуют использования импульсного лазера. В третьем предпочтительнее использовать лазеры с непрерывным излучением.

Оптическая схема лидарной установки дистанционного контроля выбросов с совмещенными излучателем и приемным устройством приведена на рис. 48. Излучение лазера 1, пройдя полупрозрачную пластинку 2, направляется зеркальной системой 4 на дымовой столб. Рассеянный свет проходит через ту же зеркальную систему и полупрозрачной пластинкой направляется на приемник излучения 3.

В 1969 г. в ФРГ впервые создана лидарная установка [58] дистанционного контроля пыли в отходящих газах предприятий металлургической, химической, нефтеперерабатывающей, энергетической и керамической отраслей промышленности. Установка выдает достоверные данные

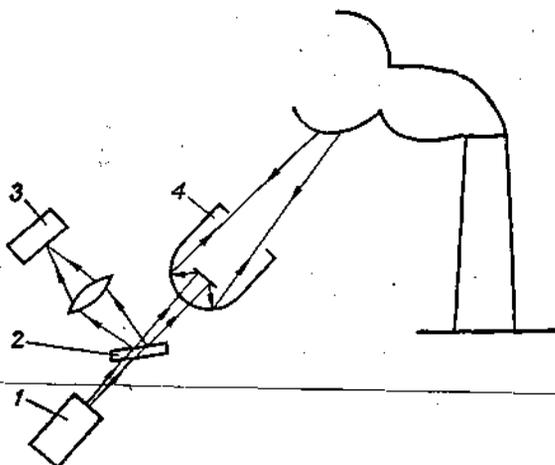


Рис. 48. Оптическая схема лидарной установки дистанционного контроля выбросов.

о перемещении дымовых султанов в атмосфере как в дневное, так и в ночное время суток на расстоянии до 8 км. Лидарная установка компании «Импульстехник» (ФРГ) фиксирует загрязнение атмосферы твердыми частицами на расстоянии до 10 км.

Лидарная установка фирмы «Сименс» (ФРГ) определяет размеры, положение и плотность облака дыма на расстоянии до нескольких километров. В установке используется метод просвечивания с применением двухканальной оптической системы. Излучателем служит лазер с излучением

в видимой области спектра. С помощью отклоняющего зеркала с приводом луч лазера направляют поочередно сквозь дымовой столб к рефлектору и затем на приемное устройство и по кратчайшему пути через оптическую призму и зеркало на то же приемное устройство. При разности интенсивностей излучения, прошедшего через измерительный канал и канал сравнения, двигатель перемещает призму в канале сравнения до полного уравнивания потоков в обоих каналах. Через равные промежутки времени автоматически проверяется положение нулевой точки и чувствительность.

Созданная в США [53] лидарная установка для определения концентрации твердых частиц в газах основана на методе однопозиционного рассеяния. Используется лазер с излучением в инфракрасной области спектра ($\lambda = 1,06$ мкм), работающий в импульсном режиме с длительностью импульсов 20 нс и мощностью 1 МВт. Отраженные импульсы регистрируются германиевым фотоприемником. Местоположение источника выбросов и концентрация пылевых частиц в выбросах определяются автоматически.

Для исключения влияния поглощения при методе однопозиционного рассеяния может быть использована лидарная установка (рис. 49) [32]. Она включает передатчик 1 с двумя импульсными источниками 2 и 4, которые генерируют излучение двух разных длин волн λ_1 и λ_2 . Величину λ_1 выбирают равной длине волны, поглощаемой измеряемым объектом. С помощью оптических систем 3 и 5 излучение направляют на объект измерения 6. Рассеянный свет регистрируется приемным устройством 7. Оно включает оптические системы 10, 13, фильтры 9, 12 (один из них пропускает свет длиной волны λ_1 , другой — λ_2) и фотоприемники 8, 11. Выходные сигналы обоих

фотоприемников подают предварительно на усилители 14, 17, а затем на дифференцирующий блок 15, выдающий разностный сигнал, который пропорционален интенсивности рассеянного света и не зависит от поглощающих свойств измеряемого объекта. Для индикации результатов измерения используют электроннолучевую трубку 16.

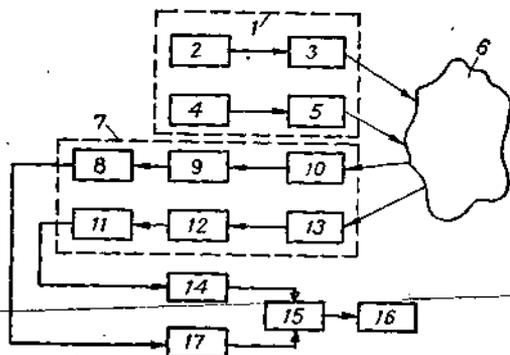


Рис. 49. Структурная схема лидарной установки на двух длинах волн.

Метод лазерного зондирования в дальнейшем предполагается использовать для комплексного анализа промышленных выбросов: определения места расположения источника выбросов, концентрации и химического состава содержащихся в нем твердых частиц и других загрязнителей.

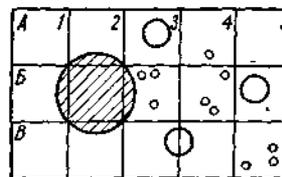
Лидарная установка имеет ограниченный радиус действия. Поэтому в больших промышленных городах, где большое количество источников выбросов (оно может исчисляться сотнями), локацию необходимо проводить во многих опорных точках. Отсюда следует, что, несмотря на оперативность метода дистанционного зондирования, его реализация в больших городах связана со

значительными временными и материальными затратами.

Далеко не все районы города представляют интерес для лазерной локации. Так, районы, в которых отсутствуют источники загрязнения воздушной среды, как правило, не нуждаются в ней. В связи с этим необходимо научно обоснованное районирование города с распределением районов по этапам лазерной локации.

Для выявления районов первоочередных исследований следует составить схему размещения

Рис. 50. Схема размещения источников загрязнения (обозначены кружками). (Заштрихована площадь, охватываемая лазерным детектором из одной опорной точки).



источников загрязнения в городе, выполненную так, чтобы диаметр нанесенного на схему знака был пропорционален годовому количеству выбросов в атмосферу (рис. 50). Такая схема дает наглядное представление о вкладе каждого источника в общий фон загрязнения воздушного бассейна. Далее на схему накладывается сетка квадратов с диагональю, равной $2R$, где R — оптимальный радиус работы лидара. Определяется годовая сумма выбросов для каждого квадрата. Квадраты исследуют в порядке убывания их сумм загрязнений.

Часто не принимаются во внимание источники с незначительными годовыми выбросами. Между тем выбросы таких источников, сконцентрированных в одном квадрате, по сумме могут превысить выбросы самого большого отдельного источника загрязнений. Поэтому при составлении схемы размещения источников загрязнения необходимо это учитывать. За опорную

точку при лазерной локации следует, по возможности, принимать центр квадрата на схеме.

Таким образом, методы непрерывного пылевого контроля выбросов промышленных предприятий развиваются в направлении контроля выброса непосредственно в газоходе (локальный контроль) и контроля выброса в дымовом шлейфе на расстоянии (дистанционный контроль).

Учитывая трудности установки и эксплуатации пылемеров непосредственно в газоходе (большую удаленность от земли, высокие температуры отходящих газов в газоходе, запыление деталей пылемеров, находящихся в контакте с пылегазовым потоком, слишком большой разброс в диаметрах газоходов и неравномерное распределение концентрации пыли по сечению газохода, что требует создания конструкции пылемера для каждого конкретного случая и исключает их унификацию) и в связи с возрастающим значением контроля выбросов промышленных предприятий в аспекте проблемы защиты окружающей среды от загрязнения, предполагается, что в будущем второе направление будет иметь некоторое преимущественное развитие. Однако и значение локального контроля выбросов огромно, поскольку объем полезной информации, которую он дает как самому промышленному предприятию, так и контролирующим органам, велик.

Дальнейшее развитие локального пылевого контроля будет направлено, прежде всего, на уменьшение влияния неинформативных параметров, повышение точности и чувствительности измерения.

Решение этих задач может быть достигнуто двумя путями. Первый путь состоит в разработке новых методов измерения концентрации пыли в газоходах, на результаты которых не оказывают влияние изменения параметров измеряемой

среды (химического и дисперсного состава пыли, температуры, влажности и скорости пылегазового потока, наличия в нем других вредных ингредиентов и т. д.), окружающей среды (температуры, влажности, давления), а также параметров, характеризующих конкретные условия эксплуатации пылемера на данном производстве (наличие вибраций, изменение частоты и напряжения сетевого питания, механические удары и т. п.). Второй путь состоит в использовании существующих методов измерения с введением автоматической коррекции показаний прибора при изменении параметров измеряемой и окружающей среды и условий эксплуатации.

Из новых методов измерения концентрации пыли следует отметить наиболее перспективные. Первый из них относится к акустическим [33]. Первичный измерительный преобразователь (рис. 51) состоит из трубок 1 и 4. Трубка 1 заканчивается гибкой мембраной 2, закрепленной по окружности. В трубке 4 создается разрежение, а по трубке 1 подается часть контролируемого пылегазового потока. В результате разрежения в трубке 4 мембрана 2 прогибается внутрь трубки 1. Частицы пыли, попадающие в трубку 1, ударяются о мембрану и возбуждают звук, который можно усилить за счет введения конусообразной трубки 3, являющейся продолжением трубки 1. Положение трубок 1, 4 и мембраны 2 выбирают таким, чтобы частицы пыли, ударяясь о мембрану, отскакивали от нее. Таким образом, чувствительный элемент — мембрана — является

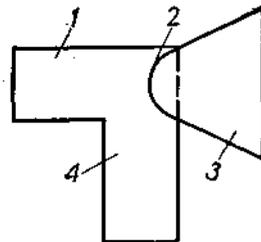


Рис. 51. Структурная схема акустического первичного измерительного преобразователя.

самоочищающимся. В этом основное преимущество метода. Второе преимущество состоит в простоте метода, которая обуславливает его эксплуатационную надежность.

Второй метод предназначен для измерения концентрации золы, выбрасываемой в атмосферу при сжигании твердого (каменного угля) и жидкого (нефтяные отходы) топлива и газа [85]. В основу его положено измерение люминесценции, которая возникает при облучении золы возбуждающим излучением. Используя в качестве последнего излучение лазера, можно осуществлять дистанционный контроль. Метод отличается высокой избирательностью, чувствительностью, но область применения его ограничена видами пыли, обладающими люминесцентными свойствами. Применение метода особенно эффективно, когда необходимо осуществить избирательный контроль одного вида пыли в пылегазовой смеси, содержащей пыль нескольких видов.

Флуктуационный метод непрерывного измерения концентрации пыли в потоке основан на использовании турбулентных флуктуаций пыли в потоке. Первые попытки использовать метод относятся к 1968 г. Авторами работы [21] было создано устройство контроля выноса пыли из дымовой трубы, принцип действия которого основан на зависимости частоты модуляции светового потока от количества пересекающих его частиц пыли. При этом измеряется только переменная составляющая выходного сигнала фотоприемника. Для измерения турбулентных флуктуаций концентрации пыли в газоходе [66] использовались различные первичные измерительные преобразователи: емкостные, электростатические, ультразвуковые и оптические. Лучше других работают измерительные преобразователи, основанные на методе светорассеяния. Световой поток,

регистрируемый таким преобразователем, модулирован турбулентным движением частиц. Экспериментальные данные, приведенные в работе [67], дают основание полагать, что существует зависимость между средним значением концентрации пыли в газоходе и величиной изменения концентрации около среднего значения.

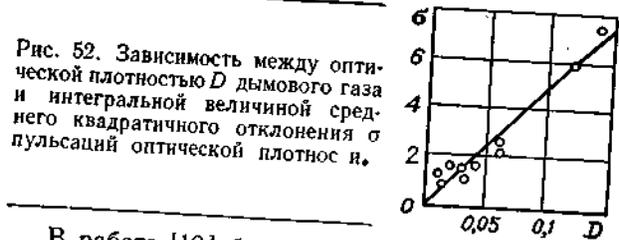


Рис. 52. Зависимость между оптической плотностью D дымового газа и интегральной величиной среднего квадратичного отклонения σ пульсаций оптической плотности σ .

В работе [12] было отмечено, что пульсации оптической плотности дымовых газов возрастают по мере увеличения среднего значения. Автором исследована частотная структура процесса путем спектрального анализа записей пульсации оптической плотности дымовых газов. В результате получена линейная зависимость между оптической плотностью D дымового газа и интегральной величиной среднего квадратического отклонения σ пульсаций оптической плотности (рис. 52).

При реализации указанной зависимости с целью упрощения прибора можно для оценки среднего квадратического отклонения случайного процесса использовать метод среднего выпрямленного, в котором трудно реализуемая операция квадрирования заменена операцией простого выпрямления. Полосовой фильтр выделяет пульсации определенной частоты f , которые затем подаются на выпрямитель и усредняющее устройство. Измерительный прибор фиксирует среднее выпрямленное значение пульсаций, которое является мерой концентрации пыли в газоходе. При

выборе рабочей частоты f полосового фильтра следует исходить из того, что чувствительность метода увеличивается с уменьшением f .

Существенным преимуществом флукуационного метода является то, что в нем сведены к минимуму влияния изменений параметров контролируемой среды.

К перспективным следует отнести метод, основанный на измерениях в диапазоне СВЧ-радиосигналов. Метод не менее результативен и перспективен, чем методы с использованием лазеров. Техника СВЧ достигла довольно высокого уровня развития, накоплен значительный опыт применения приборов СВЧ в разных отраслях науки и техники. Частицы пыли, как и другие материалы, обладают свойством как поглощать энергию СВЧ, так и излучать ее, причем каждому виду пыли присуща строго определенная длина волны СВЧ-сигнала. Помехозащищенность такого пылемера при осуществлении дистанционных измерений может быть выше, чем у лазерного, поскольку на распространение СВЧ-колебаний меньше влияет оптическая прозрачность атмосферы. Данный метод использован в радиационном автоматическом измерителе выбросов фирмы «Рисерч Эплейнс Ко». Измеритель позволяет регистрировать частицы менее 0,2 мкм.

Интересным решением вопроса исключения влияния изменений дисперсного состава пыли на измерение ее концентрации методом светорассеяния является использование метода двух углов, сущность которого состоит в следующем. Свет, рассеянный дисперсной системой, измеряется под двумя углами Θ_1 и Θ_2 , при этом результат измерения пропорционален объемной концентрации дисперсной фазы. Для использования метода весьма существенно выбрать оптимальную пару углов Θ_1 и Θ_2 , соответствующую измерению

объемной концентрации с максимальной точностью. При выборе углов необходимо учитывать следующее: во-первых, разность между углами Θ_1 и Θ_2 должна быть минимальной и, во-вторых, значения углов Θ_1 и Θ_2 следует принимать достаточно малые, чтобы они соответствовали углам, на которые эффективно рассеивают крупные частицы (именно к таким частицам довольно часто относятся частицы промышленной пыли). При малых углах, удовлетворяющих условию $(\pi d/\lambda)\Theta \ll 1$ (d — диаметр частицы, λ — длина волны облучающего света), интенсивность света, рассеянного под углом Θ_1 , описывается уравнением [9]:

$$I_{\text{рас}}(\Theta) = \frac{K\pi^2 d_0}{4\lambda^2} A_3,$$

где K — коэффициент пропорциональности; A_3 — параметр, равный объемной концентрации дисперсной фазы; d_0 — параметр, равный диаметру частиц монодисперсной системы, эквивалентной по светорассеянию рассматриваемой полидисперсной системе.

Экспериментальные исследования метода показали, что он позволяет измерять объемную концентрацию дисперсной фазы с относительной погрешностью не более 4% при $\Theta_1 = 10^{-2}$ рад и $\Theta_2 = 4 \cdot 10^{-2}$ рад. Проведены измерения объемной концентрации полидисперсных систем частиц с нормальным распределением, одинаковым модалным размером $d_m = 12$ мкм и различным значением дисперсии $\sigma = 0,5; 1; 2$ и 3 мкм. При всех рассмотренных значениях дисперсии относительная погрешность измерения объемной концентрации изменяется незначительно. Как показали расчеты, метод двух углов можно использовать при любом распределении частиц по размерам.

Следует отметить, что по мере увеличения модального размера d_m необходимо переходить на меньшие углы Θ_1 и Θ_2 измерения интенсивности рассеянного света, так как с увеличением размера частицы дифракционная составляющая рассеянного света концентрируется на меньших углах. Так, выбор углов вблизи значений $\Theta_1 = 10^{-2}$ рад и $\Theta_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ рад обеспечивает достаточно высокую точность определения объемной концентрации для спектров частиц с $d_m < 30$ мкм.

Основными преимуществами метода двух углов, очень важными при осуществлении непрерывного промышленного пылевого контроля, являются высокая точность измерения объемной концентрации частиц (особенно крупных) и несущественное влияние изменений дисперсного состава на результаты измерения. Кроме того, метод не требует априорной информации о характере дисперсного состава частиц.

Второй путь развития локального пылевого контроля, заключающийся в использовании существующих методов измерения с введением автоматической коррекции показаний прибора при изменении параметров измеряемой и окружающей сред и условий эксплуатации, уже сейчас находит применение при разработке пылеизмерительной аппаратуры.

Как уже рассматривалось в предыдущих главах, введение автоматической коррекции позволяет исключить запыление защитных стекол, наличие влаги в пылегазовых потоках, изменение температуры окружающей среды. Однако в настоящее время вопрос автоматической коррекции всех факторов, влияющих на результаты измерения концентрации пыли, решен еще далеко не полностью.

Возможен третий путь развития пылевого

контроля, позволяющий повысить достоверность измерительной информации. Поскольку все методы измерения концентрации пыли имеют ограничения по диапазону измеряемых концентраций, порогу чувствительности, диапазону размеров регистрируемых частиц и точности измерения, то необходимо изменить подход к решению задачи путем использования многопараметрового метода [18] подобно тому, как это делается при изучении свойств клеток в медицине и исследовании физиологических растворов. Сущность многопараметрового метода состоит в измерении нескольких физических параметров различными средствами. Использование его целесообразно при необходимости расширить диапазон измерения, повысить точность, исключить или свести к минимуму влияние вредных сопутствующих факторов, увеличить объем измерительной информации.

Приращение информации при использовании многопараметрового метода всегда дает выигрыш в точности по сравнению с наиболее точным из используемых методов.

К числу задач непрерывного промышленного пылевого контроля выбросов, уже решенных или успешно решаемых на практике, можно отнести следующие.

1. Разработаны пылемеры промышленного применения непрерывного действия, в основу работы которых положены методы измерения концентрации пыли без предварительного ее осаждения. Приборы обладают высокой чувствительностью, практически безынерционны и дают значения мгновенной концентрации пыли. Выходная информация пылемера используется для управления сигнализацией, а также для регули-

рования работы пылеочистных сооружений. Однако приборы чувствительны к изменениям параметров как контролируемой, так и окружающей среды. Поэтому эти пылемеры целесообразно использовать как технологические приборы, предназначенные для измерения концентрации пыли в условиях конкретного производства и проградурованные в этих же условиях на тот вид пыли, для измерения концентрации которого они предназначены.

2. Разработаны пылемеры промышленного применения циклического действия, в основу работы которых положены методы измерения концентрации пыли с предварительным ее осаждением. Приборы мало чувствительны к изменениям параметров контролируемой среды. Однако циклический режим работы затрудняет использование их для управления сигнализацией и работой пылеочистных сооружений. Для этого требуется введение дополнительных операций, а также полная автоматизация всего процесса измерения (сюда входит и процесс пробоотбора), что слишком усложняет и удорожает аппаратуру. Хотя влияние изменений химического и дисперсного состава пыли, формы частиц и других свойств в этих пылемерах значительно меньше, чем в предыдущих, а иногда и вовсе отсутствует, здесь в результате измерения существенную погрешность может внести процесс пробоотбора. Вопрос получения представительной пробы еще не решен.

Таким образом, если в приборах непрерывного действия концентрация пыли измеряется непосредственно в потоке, но с меньшей точностью, то в приборах циклического действия с большей точностью измеряется только часть отобранного пылегазового потока, причем достоверность того, что отобранная проба с высокой точ-

ностью представляет измеряемый пылегазовый поток, вызывает сомнения. Отсюда следует, что обеим группам пылемеров присущи погрешности измерения, но погрешности эти имеют различную природу. Невольно возникает вопрос о возможном сочетании приборов обеих групп с целью взаимного исключения этих погрешностей.

3. Разработаны основы построения многоотчетного пылевого контроля на крупных промышленных предприятиях, где выброс в атмосферу осуществляется из нескольких газоходов.

4. Наряду с локальным пылевым контролем разработан метод дистанционного зондирования и создана аппаратура с использованием лазеров и излучения СВЧ-диапазона. Метод дистанционного зондирования позволяет перейти от местного контроля к дистанционному.

5. Решены вопросы, связанные с практическим применением оптических пылемеров (защита оптических деталей, находящихся в контакте с контролируемым пылегазовым потоком, от запыления) и касающиеся исключения влияния на результат измерения изменений параметров контролируемой и окружающей сред: температуры окружающей среды; паразитного светового фона; влажности контролируемой среды. При решении этих вопросов используются и методы автоматической коррекции результатов контроля.

Требуют решения следующие основные задачи:

1. Исследование свойств пыли, выбрасываемой в атмосферу промышленными предприятиями (химического и дисперсного состава, формы частиц и др.), анализ возможных пределов изменений свойств пыли для конкретного производства, определение пылевых полей и параметров контролируемой среды. На основании проведенных

исследований необходимо ввести классификацию всех видов промышленной пыли.

2. Теоретическое и экспериментальное исследование методов измерения концентрации пыли с точки зрения влияния изменений свойств пыли на результат измерения: количественная оценка пределов дополнительных погрешностей, обусловленных изменениями свойств пыли. Здесь, прежде всего, следует исследовать влияние изменений дисперсного состава пыли.

3. Разработка методов исключения влияния изменений свойств пыли, а также параметров контролируемой и окружающей сред на результат измерения и повышение достоверности пылевого контроля.

4. Разработка методов и средств периодического удаления пылевого осадка с поверхности чувствительного элемента пылемера без нарушения его метрологических характеристик. Это относится, главным образом, к пьезоэлектрическим пылемерам.

5. Повышение точности пылевого контроля в результате сочетания в одном приборе различных методов.

6. Осуществление метрологического обеспечения промышленного пылевого контроля.

Последняя из перечисленных задач стоит особенно остро, поскольку количество используемых пылемеров будет с каждым годом увеличиваться. Применяемые в настоящее время поверочные методы и средства имеют ряд серьезных недостатков и ограничений, связанных с влиянием различных факторов окружающей среды и большой трудоемкостью процесса измерения. Создание методов и средств градуировки и автоматической поверки пылемеров должно идти по пути разработки в целях унификации поверочных смесей — эквивалентов и автоматических пылемеров со встроен-

ными поверочными блоками с применением физических эквивалентов контролируемой пылегазовой смеси для осуществления периодической поверки прибора во время эксплуатации.

1. А. с. 402721 (СССР).
2. А. с. 479997 (СССР).
3. А. с. 570818 (СССР).
4. Автоматический фотометр для контроля аэрозолей УПКА-65 / Р. И. Алхазшвили, И. В. Девдариани, В. Г. Ковальский, Э. Г. Султанов, М. А. Карабегов.— Приборы и системы управления, 1968, № 9.
5. Готовкин В. Е.— В кн.: Организация контроля за технологическими выбросами, загрязняющими атмосферу. М., общ. «Знание» РСФСР, 1978.
6. Готовкин В. Е.— В кн.: Проблемы контроля и защиты атмосферы от загрязнения. К., Наукова думка, 1977.
7. Громов Ю. И., Мальгин А. Д., Новиков А. Д.— Промышленная и санитарная очистка газов, 1976, № 1.
8. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М., Мир, 1971.
9. Зимин Э. П., Кругерский А. М., Михневич З. Г.— Оптика и спектроскопия, 1975, вып. 1, т. 39.
10. Зонва И. П.— Гигиена населенных мест, 1975, вып. 14.
11. Ивантотов А. А. Тезисы Всесоюзной научно-технической конференции «Автоматизация санитарно-химического контроля при защите атмосферы от загрязнения». К., 1976.
12. Ивантотов А. А.— Теплоэнергетика, 1977, № 8.
13. Измайлов Г. А., Коганов В. Ю. Изв. вузов СССР. Сер. Черная металлургия. 1970, № 9.
14. Комчатнов В. П., Катаева И. А.— Гигиена труда и профзаболевания, 1974, № 6.
15. Клименко А. П., Рудько Б. Ф., Ларченко В. И.— В кн.: Проблемы контроля и защиты атмосферы от загрязнения. К., Наукова думка, 1974.
16. Клименко А. П., Королев В. И.— Инженерно-физический журнал, 1975, № 2.
17. Клименко А. П., Готовкин В. Е.— Химическая технология, 1976, № 1.
18. Клименко А. П.— В кн.: Проблемы контроля и защиты атмосферы от загрязнения. К., Наукова думка, 1976.
19. Клименко А. П., Готовкин В. Е.— В кн.: Нормирование и контроль промышленных выбросов в атмосферу. Л., Гидрометеониздат, 1977.
20. Клименко А. П., Готовкин В. Е., Михалевич С. И.— В кн.: Методы и средства контроля загрязняющих атмосферу промышленных выбросов. К., общ. «Знание» УССР, 1978.
21. Контроль выноса пыли из доменной печи / Б. П. Довгалюк, Ю. М. Самарец, А. В. Клименко, Н. К. Пильгий.— Автоматизация горно-рудного и металлургического производства. К., Техніка, 1968.
22. Королев В. И. Материалы 3-й Всесоюзной конференции по аэрозолям. М., Наука, 1977.
23. Кораблев И. В. Изв. вузов СССР. Сер. Приборостроение, 1976, № 10.
24. Кораблев И. В.— Измерительная техника, 1973, № 6.
25. Лукашев А. А., Козловский В. А. НИИ краевой патал. Каз. ССР, 1976, т. 29, ч. 1.
26. Милютин М. М.— Химическая промышленность, 1977, № 3.
27. Определение дисперсности муки и других порошкообразных продуктов в СССР и за рубежом. М., ЦИНТИ, 1969.
28. Пат. 3500450 (США).
29. Пат. 1247688 (ФРГ).
30. Пат. 3949234 (США).
31. Пат. 3510666 (США).
32. Пат. 50—3195 (Япония).
33. Пат. 1396398 (Великобритания).
34. Пальцев В. С. Усовершенствование мельничных вен-
1977
35. Пришивалко А. П., Науменко Е. К. Рассеяние света сферическими частицами и полидисперсными средами. Ч. II. Минск, АН БССР, 1972.
36. Пришивалко А. П. Изв. АН СССР, 1974, т. 9, № 7. Сер. Физика атмосферы и океана.
37. Рудой М., Степаненко Н.— Мукомольно-элеваторная промышленность, 1971, № 11.
38. Свойства аэрозолей вращающихся печей / Ф. Г. Бонет, Т. П. Чеснокова, Н. Н. Чернобаева, А. С. Гаврилова. Тр. ВНИИЦементной промышленности, 1976, вып. 31.
39. Симонян С. А., Брагин Г. Я., Карабегов М. А.— Измерительная техника, 1971, № 2.
40. Сигнализатор запыленности в трубопроводах аспирационных систем / А. М. Шиман, Б. А. Громаз, Л. Д. Бромберг, О. Д. Харитоненко, А. П. Захаров,

- А. В. Кузовкин.— Автоматизация и контрольно-измерительные приборы, 1976, № 8.
41. Состав пылегазовых вредностей, выбрасываемых печами стекольного производства / В. М. Тарасов, М. А. Розенбаум, Е. Г. Левков, В. И. Грацай, В. И. Звягинцев, В. К. Гончаренко.— Промышленная и санитарная очистка газов, 1975, № 5.
 42. Степаненко В. Ф., Таран Н. М., Чухлатый А. Т.— Заводская лаборатория, 1977, № 3.
 43. Ульянов Ю. В.— Масло-жировая промышленность, 1975, № 1.
 44. Фотоэлектрический концентратомер пыли в дымовых газах каталитического крекинга / Г. М. Гаджиев, В. И. Константинов, П. Г. Попов, Г. А. Шалаевских. Охрана воздушного бассейна от пыли и пылевой контроль. Киев, общ. Знание УССР, 1977.
 45. Чижиков В. А.— В кн.: Руководство по гигиене атмосферного воздуха. М., Медицина, 1976.
 46. Шаган И. Б., Шрагин Ю. М. Тр. Ленинградского санитарно-гигиенического мед. института, 1974, т. 105.
 47. Шапиро Л. М.— Измерительная техника, 1969, № 8.
 48. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. М., Гостехиздат, 1951.
 49. Bentner H. P. Rock Prod., 1974, v. 77, N 5.
 50. Bölen V. Chemia, 1969, v. 23, N 1.
 51. Bühne K. W. Staub — Reinhalt. Luft, 1971, Bd. 31, N 7.
 52. Bulcraig W. R. Glass Technol., 1976, v. 17, N 3.
 53. Chamber Mines J., 1972, v. 14, N 7.
 54. Davis T. A. IEEE Cem. Ind. Techn. Conf., Mexiko, 1974, New-York, N. Y., 1974.
 55. Dave J. M., Maira S. K. Chem. Age India, 1976, v. 27, N 3.
 56. Diewald J. Chemieunterricht, 1976, Bd. 7, N 1.
 57. Dorsey J. A., Burckle J. O. Chem. Eng. Progr., 1971, v. 67, N 8.
 58. Dreyhaupt F. J. Proc. 2nd Clean Air Congr., Washington, D. C., 1970, New — York — London, 1971.
 59. Diewel L. Proc. 2nd Int. Clean Air Congr., Washington, D. C., 1970, New — York — London, 1971.
 60. Erwin W. Staub, 1961, Bd. 21, N 7.
 61. Evan H. Z. Int. Lab. Rev., 1974, v. 110, N 3.
 62. Fuchs N. A. Atmos. Environ., 1975, v. 9, N 8.
 63. Geipel W. Dechema Monogr., 1976, v. 79, N 1589—1615 (Teil B).
 64. Geipel W. Verfahrenstechnik, 1975, Bd. 9, N 12.
 65. Hach C. C. Instrum. and Control Syst., 1968, v. 41, N 12.
 66. Harris D. B., Beck M. S., Hewitt P. J. IMEKO 6, Dresden, 1973, Sec. 6 Meas. Syst. Contr. Pollut. Prepr., Berlin, 1973.
 67. Harris D. B., Hiewellyn G. I., Beck M. S. Chem. and Ind., 1976, N 15.
 68. Hermann J., Lüberweiser H. J. Staub-Reinhalt. Luft, 1974, Bd. 34, N 5.
 69. Hixat E. Environ. Sci. and Technol., 1975, v. 9, N 1.
 70. Hudson A. E., Zweben R. AIChem. Symp. Ser., 1976, v. 72, N 156.
 71. Iverstine J. C. Chem. Eng., 1974, v. 81, N 22.
 72. Kantner A. VGB Kraftwerkstechn., 1974, Bd. 54, N 10.
 73. Killingmo O. Chemie Ing. Techn., 1973, v. 45, N 1.
 74. Köler A., Birkle M. Staub-Reinhalt. Luft, 1975, Bd. 35, N 1.
 75. Kocucupe Xapy. Keuco, Instrumentation, 1973, v. 16, N 8.
 76. Learmonth R. A. Heat. and Vent. Eng., 1973, v. 46, N 547.
 77. L'industrie cementiere, une industrie propre. Ind. miner, 1977, v. 59, N 4.
 78. Lucas D. H., Ling W. D. Proc. Clean Air Conf., Milburne, 1972, Parkville, 1972.
 79. Lukas W., Wiemann H. J. Freiberg. Forschungsh., 1976, A, N 566.
 80. Myers G., Gary E. Amer. Ind. Hyg. Ass. J., 1974, v. 35, N 5.
 81. Pfister E. Staub — Reinhalt. Luft, 1974, Bd. 34, N 2.
 82. Pompowski T. Ochr. powietrza, 1975, 9, N 4.
 83. Rüb F. Wasser, Luft und Betrieb, 1972, Bd. 16, N 11.
 84. Strelow R. Pollut. Eng., 1976, v. 8, N 12.
 85. Tucker A. W., Birnbaum M., Fincher C. L. J. Luminescence, 1974, N 1.
 86. Zenker P. Staub-Reinhalt. Luft, 1972, Bd. 32, N 1.

Предисловие		
ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ		
Пылевые выбросы предприятий химической промышленности	5	
Пылевые выбросы предприятий промышленности строительных материалов	12	
Пылевые выбросы предприятий других отраслей промышленности	16	
ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К АППАРАТУРЕ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ		
Требования к пылемерам	24	
Условия эксплуатации пылемеров	27	
Соответствие пылемеров современным требованиям производства	30	
Достоверность контроля, выбор зоны измерения и места установки пробоотборного устройства	32	
Выбор метода и измерительного преобразователя для осуществления непрерывного контроля концентрации пыли	46	
ОПТИЧЕСКИЕ АБСОРБЦИОННЫЕ ПЫЛЕМЕРЫ		
Оптический абсорбционный метод измерения концентрации пыли	61	
Отечественные оптические абсорбционные пылемеры	83	
Оптические абсорбционные пылемеры, выпускаемые зарубежными фирмами	87	
ОПТИЧЕСКИЕ ПЫЛЕМЕРЫ СВЕТОРАССЕЯНИЯ		
Светорассеивающие свойства пылегазовых потоков	98	
Измерение концентрации пыли методом светорассеяния	106	
Отечественные оптические пылемеры светорассеяния	125	
Оптические пылемеры светорассеяния, выпускаемые зарубежными фирмами	148	
ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ		
Многоточечный пылевой контроль	150	
Экономическая эффективность промышленного пылевого контроля	153	
Перспективы развития промышленного пылевого контроля концентрации пыли	155	
Список литературы	176	

*Альбина Павловна Клименко,
канд. техн наук,
Виталий Иванович Королев,
Виктор Иванович Шевцов*

НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ

*Редактор Л. А. Каванцева
Оформление художника В. К. Жигулина
Художественные редакторы
Л. А. Дикарев, Н. Ф. Соловьева
Технический редактор Е. Г. Рублев
Корректор Т. А. Прожогина*

Информ. Бланк. № 1277

Сдано в набор 17.08.79. Подписано в печать 23.01.80. БФ 01621. Формат 73×96¹/₃₂. Бумага типогр. № 2. Гарн. лит. Печ. выс. Усл. печ. л. 7,18. Уч.-изд. л. 7,2. Тираж 4000 экз. Сес. № 9—2164. Цена 45 к.

Издательство «Техника». 252601, Киев, 1, ГСП, Крещатик, 5.

Отпечатано с матриц Головного предприятия республиканского производственного объединения «Полграфкинг» Госкомиздата УССР, 252057, г. Киев-57, Довженко, 3, в Харьковской городской типографии № 16, Харьков 3, ул. Университетская, 16. Зак. 1058.