СПРАВОЧНИК
по пыле-и золо-улавливанию

ББК 38.93
С74
УДК 621.928.9 (035)

Авторы: М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков, В. Ю. Падва, А. А. Русанов, И. И. Урбах

Справочник по пыле- и золоулавливанию/
С74 М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др.; Под общ. ред. А. А. Русанова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 312 с., ил.

В пер.: 2 р. 10 к.

В книге, первое издание которой вышло в 1975 г., систематизированы основные материалы, используемые в СССР при проектировании и эксплуатации систем пыле- и золоулавливания. Описаны конструкции и дана номенклатура различных газоочистных устройств. Даны краткие рекомендации по проектированию и эксплуатации систем пыле- и золоулавливания.

Книга рассчитана на специалистов, работающих в области пыле- и золоулавливания.

С $\frac{3403000000-064}{051(01)-83}$ 16-82

ББК 38.93
669.5

Рецензент: Гордон Г. М

МАРК ИСААКОВИЧ БИРГЕР
АРНОЛЬД ЮРЬЕВИЧ ВАЛЬДБЕРГ
БОРИС ИВАНОВИЧ МЯГКОВ
ВИКТОР ЮЛЬЕВИЧ ПАДВА
АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ РУСАНОВ
ИЗА ИСААКОВИЧ УРБАХ

СПРАВОЧНИК ПО ПЫЛЕ- И ЗОЛОУЛАВЛИВАНИЮ

Редактор Ю. В. Донченко
Редактор издательства А. А Кузнецов
Технический редактор А. С. Давыдова
Корректор Г. А. Полонская

ИБ № 2676

Сдано в набор 21.06.82 Подписано в печать 15.10.82 Т-19727
Формат 70×100¹/₁₆ Бумага типографская № 1 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ л. 25,35 Усл. кр.-отт. 25,35 Уч.-изд. л. 33,09
Тираж 20.000 экз. Заказ 170 Цена 2 р. 10 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, Москва, М-54, Валовая, 28

© Энергоатомиздат, 1983

ПРЕДИСЛОВИЕ

Защита воздушного бассейна от выбросов промышленных предприятий и энергетических объектов является одной из важнейших проблем современного производства Загрязнение воздушной среды может вызывать нарушения экологических систем, ухудшить санитарно-гигиеническое состояние атмосферного воздуха и нанести ущерб народному хозяйству. Именно это послужило основанием для принятия постановлений Партии и Правительства, направленных на осуществление необходимых мер по предотвращению выбросов в атмосферу, своевременному строительству очистных сооружений, разработке и освоению серийного производства новых видов газоочистного и пылеулавливающего оборудования. Помимо защиты окружающей среды очистка промышленных газов от содержащихся в них твердых и жидких взвешенных частиц необходима в целом ряде технологических процессов: для извлечения из газов ценных продуктов; примесей, затрудняющих проведение технологического процесса, уменьшения износа оборудования; улучшения условий труда.

Настоящая книга является вторым изданием справочника по пыле- и золоулавливанию, вышедшего в издательстве «Энергия» в 1975 г При подготовке второго издания авторами исключен ряд устаревших, для техники пыле- и золоулавливания материалов.

Авторы справочника ставили своей целью объединить в одной книге основные материалы, необходимые для работы в области пыле- и золоулавливания. За годы, прошедшие после выхода первого издания справочника, во многих научно-исследовательских институтах и проектных организациях значительно расширился объем работ, направленных на создание более совершенного газоочистного оборудования, повышение уровня проектных решений систем пыле- и золоулавливания, был разработан ряд новых методов определения физико-химических свойств подлежащих улавливанию частиц, созданы более эффективные газоочистные установки, появились новые нормативные материалы, используемые при проектировании систем пыле- и золоулавливания. Поэтому подготовка справочника к переизданию была связана со значительным обновлением его содержания

Первый раздел справочника, в котором рассматриваются физико-химические свойства подлежащих улавливанию частиц, параметры очищаемых газов и оценка эффективности систем пыле- и золоулавливания, дополнен материалами, разработанными Семибратовским филиалом НИИОГаз, РТМ 26-14-10-78 «Пыль промышленная Лабораторные методы исследования физико-химических свойств» и РТМ 26 14-07-77 «Электрофильтры Способ определения удельного электрического сопротивления». Наряду с этим в книге не приведены описания таких традиционных методов определения дисперсного состава частиц, как ситовый анализ, воздушная сепарация, жидкостная седиментация и микроскопия, которые остаются в числе методов исследования при оценке технологических свойств порошкообразных материалов, но постепенно утрачивают свое значение в технике пыле- и золоулавливания.

Во втором разделе, посвященном осадительным камерам и аппаратам сухой инерционной очистки газов, в более простой форме изложен метод расчета эффективности седиментационного осаждения частиц из турбулентного потока газов и значительно сокращен параграф, относящийся к мало применяемым в настоящее время жалюзийным пыле- и золоуловителям; несколько расширены параграфы, в которых рассматриваются циклоны и батарейные циклоны.

В третьем разделе, касающемся охлаждения газов до температур, на которые рассчитаны те или иные пыле- и золоулавливающие аппараты, за счет сокращения сведений о малоприменяемых для этой цели поверхностных теплообменниках расширен объем материалов по охлаждению газов в контактных теплообменниках.

В четвертом разделе, в котором рассматриваются аппараты мокрой очистки газов, несколько сокращены материалы описательного характера и сведения с переставших находить достаточно широкое применение пыле- и золоуловителях, таких, например, как пенные пылеуловители с переливными тарелками, золоуловители ЦС-ВТИ и МП-ВТИ Раздел дополнен техническими характеристиками и нормативными материалами, относящимися к ряду новых аппаратов, принятых к серийному изготовлению отечественной промышленностью. К последним относятся тарельчатые аппараты ПВПР, гидродинамические пылеуловители ГДП, скрубберы СЦВБ-20, скрубберы Вентури с горловиной кольцевого сечения, мокрые скоростные золоулови-

тели МС-ВТИ и др. Значительно расширен параграф, в котором рассматриваются пути интенсификации работы аппаратов мокрой очистки газов.

Пятый раздел, посвященный очистке газов фильтрацией, переработан с учетом освоения промышленностью новых видов фильтрующих материалов, изменения номенклатуры серийно выпускаемых тканевых и волокнистых фильтров.

В шестом разделе приведены данные о новых типах электрофильтров и агрегатов их питания, освоенных промышленностью На основе выполненных в последние годы исследований раздел дополнен сведениями, характеризующими зависимость работы электрофильтров от таких факторов, как вторичный унос осажденных частиц, удельное электрическое сопротивление слоя частиц, высота электродов и др. Приведены данные по расчету электрофильтров, применяемых в теплоэнергетике.

В разделах с седьмого по десятый обновлены технические характеристики запорных, регулирующих и предохранительных клапанов, вентиляторов и дымососов, устройств для выгрузки уловленной золы или пыли, теплоизоляционных покрытий и ряда других устройств, применяемых в системах пыле- и золоулавливания.

Несколько расширен раздел одиннадцатый, содержащий ряд практических рекомендаций по проектированию систем пыле- и золоулавливания.

В отличие от первого издания справочника большинство вопросов, связанных с эксплуатацией систем пыле- и золоулавливания, рассматриваются не в отдельном разделе, а в параграфах и в разделах, относящихся к тем или иным видам оборудования, из которого компонуются эти системы.

Так же как и в первом издании, не рассматриваются вопросы, связанные с очисткой дымовых газов мощных тепловых электростанций и аспирационных выбросов атомных, поскольку проектированием и эксплуатацией соответствующих газоочистных установок занято сравнительно небольшое число специализированных организаций, располагающих необходимыми для этого материалами.

Работа над справочником распределялась следующим образом: разд. 1 написан А. А. Русановым; разд. 2—В Ю Падвой при участии И. И. Урбаха: разд 3 и 4 — А. Ю. Вальдбергом; разд 5 — Б. И. Мягковым; разд 6 — М. И Биргером; разд 7 — 10 — А. А. Русановым и И. И Урбахом совместно; разд 11 — И. И Урбахом

Авторы будут признательны за все замечания, которые следует направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб , 10, Энергоиздат

Авторы

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗОЛЫ И ПЫЛЕЙ. ПАРАМЕТРЫ ОЧИЩАЕМЫХ ГАЗОВ. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПЫЛЕ- И ЗОЛОУЛАВЛИВАНИЯ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Надежность и эффективность работы систем газоочистки зависят от физико-химических свойств частиц, подлежащих улавливанию, и от основных параметров пылегазовых потоков. Ниже рассматривается главным образом влияние этих свойств и параметров на работу систем пыле- и золоулавливания и на выбор для них соответствующих аппаратов. Из многочисленных методов и приборов для определения физико-химических свойств частиц и параметров газовых потоков кратко рассматриваются только те, которые, во-первых, специфичны именно для техники пыле- и золоулавливания, и во-вторых, по своей простоте и доступности приобретения или изготовления необходимого оборудования могут найти достаточно широкое применение на многочисленных промышленных предприятиях и электростанциях, в отделах технической помощи проектных организаций. В остальных случаях приведены ссылки на соответствующую литературу.

В зависимости от изучаемого свойства частиц и выбранного метода определения соответствующий анализ может быть выполнен либо с непосредственным отбором твердой фазы в соответствующий прибор либо с использованием заранее отобранной и доставленной в лабораторию пробы золы или пыли. В последнем случае необходимо тщательно отобрать представительную первичную пробу частиц и правильно подготовить ее к анализу.

Первичная проба частиц, содержащихся в газах, поступающих в пыле- или золоуловитель, представляет собой совокупность всех проб частиц, отобранных в сечении газохода перед газоочистным аппаратом за равные промежутки времени в течение одного опыта. Первичная проба частиц, содержащихся в очищенных газах, представляет собой совокупность всех проб, отобранных в сечении газохода после газоочистного аппарата за равные промежутки времени в течение одного опыта. Первичная проба частиц, уловленных пыле- или золоулавливающим аппаратом, представляет собой совокупность всех равных по массе проб, отобранных в течение опыта через равные промежутки времени из системы пыле- или золоудаления Если масса первичной пробы больше, чем необходимо для анализа, проба подвергается перемешиванию и сокращению.

Перемешивание пробы производится по способу конуса, заключающемуся в постепенном насыпании порций частиц в коническую кучу таким образом, чтобы насыпаемый материал равномерно распределялся относительно оси конуса. Для этого целесообразно применять воронку, укрепленную на штативе и постепенно поднимаемую по мере увеличения высоты конуса. После того как вся проба насыпана в коническую кучу, производят повторное перемешивание. Для этого, передвинув штатив с воронкой на другое место, начинают насыпать новый конус, забирая порции материала из нижних наружных слоев первого конуса со всех сторон. Операцию такого перемешивания повторяют 3—4 раза.

Сокращение пробы производят методом квартования. Для этого перемешанную и насыпанную в виде конуса пробу сплющивают, в результате чего получается усеченный конус небольшой высоты, который делят на четыре равных сектора крестовиной, спаянной из двух взаимно перпендикулярных жестяных полос. Часть пробы, содержащейся в одной паре противоположных секторов, отбрасывают, а оставшуюся используют для дальнейшей такой же переработки до тех пор, пока не будет получена проба необходимой для данного анализа массы. Перед каждым квартованием пробу перемешивают по методу конуса.

Первичные пробы частиц, отобранные из сечений газоходов до и после газоочистного аппарата, часто столь невелики, что целиком используются для анализа. Методы отбора первичных проб частиц из сечений газоходов см. в § 1.15.

Если проба слишком мала для перемешивания по способу конуса, ее можно перемешать следующим образом — на гладкий квадратный лист бумаги высыпают пробу частиц, разравнивают и приподнимают один край листа до тех пор, пока валик пробы, перекатываясь, не достигнет противоположного края бумаги. Затем под-

нимают этот край и повторяют описываемый процесс до тех пор, пока валик пробы не займет ширину листа. После этого перекатывание производят в перпендикулярном направлении Эту процедуру повторяют не менее 5—6 раз. Пробу для анализа забирают шпателем из различных мест образовавшегося валика

1.2. ПЛОТНОСТЬ ЧАСТИЦ

В технике пыле- и золоулавливания принято различать истинную, кажущуюся и насыпную плотность твердых частиц.

Истинная плотность твердой частицы определяется как отношение массы ее вещества к занимаемому ею объему за вычетом объема пор и газовых включений, которые может иметь частица.

Кажущаяся плотность определяется как отношение массы частицы к занимаемому ею объему, включая объемы пор и газовых включений. Для гладких монолитных твердых частиц (так же как и для жидких) кажущаяся плотность совпадает с истинной.

Ощутимое снижение кажущейся плотности по сравнению с истинной наблюдается у пылей, склонных к коагуляции или к спеканию частиц, таких как сажа, окислы цветных металлов и др.

Например, истинная плотность частиц газовой сажи составляет 1,8—1,9 г/см^3, а кажущаяся — около 0,13 г/см^3 Кажущаяся плотность частиц золы может изменяться в пределах от долей грамма на 1 см^3 для вспученных пористых частиц недожога топлива до нескольких граммов на 1 см^3 для частиц, содержащих железо, восстановленное из окислов, входящих в состав минеральной части топлива.

Для расчетов, связанных с выбором или оценкой работы пыле- и золоулавливающих аппаратов, необходимы данные о кажущейся плотности частиц, так как именно кажущаяся плотность наряду с некоторыми другими факторами определяет поведение частиц в газовых потоках

Достаточно точные методы определения кажущейся плотности позволяют находить ее значение лишь для отдельно взятой частицы и поэтому пригодны в основном для научных исследований в области механики аэрозолей. При решении практических вопросов нужны данные о некотором усредненном значении кажущейся плотности, найденном для всей совокупности частиц в пробе, в которой могут встречаться и частицы, различные по своему химическому составу. Подобные данные могут быть получены методом пикнометрии с применением жидкости, не смачивающей частицы и, следовательно, не заполняющей имеющихся в них пор [1.2]. Однако воспроизводимость полученных при этом данных обычно невысока.

В литературе по пыле- и золоулавливанию и по контролю пылеулавливающих установок, как правило, отсутствуют не только методики определения кажущейся плотности частиц, но и достаточно ясные указания о том, что в большинство расчетных зависимостей для определения эффективности осаждения частиц в явном или скрытом виде входит именно кажущаяся плотность частиц, которая, как это было показано на примере с сажей, может на порядок величины отличаться от истинной плотности.

В связи с трудностью получения данных о кажущейся плотности частиц широко используется прием косвенного учета этого параметра в соответствующих расчетах. В основные из уравнений, используемых при расчете эффективности систем пыле- и золоулавливания, в явной или скрытой форме входит определяющее инерционные свойства подлежащих улавливанию частиц отношение их размера к кажущейся плотности. Например, в уравнение (1.54) входит отношение d_m/d_{50}, в котором d_m является средним размером подлежащих улавливанию частиц, найденным по результатам их дисперсионного анализа, а d_{50} — взятым из технических характеристик газоочистного аппарата размером частиц, улавливаемых с эффективностью 50%.

Если кажущаяся плотность подлежащих улавливанию частиц отличается от кажущейся плотности частиц, использованных при изучении эффективности газоочистного аппарата, то значения d_m и d_{50} должны быть приведены к одинаковой кажущейся плотности путем умножения одного из них соответственно на $\sqrt{\rho_ч/\rho_{ч,50}}$ или на $\sqrt{\rho_{ч,50}/\rho_ч}$.

Здесь $\rho_ч$ — кажущаяся плотность подлежащих улавливанию частиц; $\rho_{ч,50}$ — кажущаяся плотность частиц, для которых в характеристике газоочистного аппарата указано значение d_{50}.

Методы дисперсионного анализа, распространенные в настоящее время, основаны на разделении частиц по размерам в зависимости от их инерционных свойств. Следовательно, в уравнения, используемые при обработке экспериментальных данных дисперсионного анализа, так же как и при расчете эффективности газоочистных аппаратов, необходимо подставлять значения кажущейся плотности частиц. Но поскольку в конечном счете основное значение имеют именно инерционные свойства частиц, а не абсолютные значения параметров, влияющих на эти свойства, при обработке экспериментальных результатов дисперсионных анализов оказывается возможным условно принимать кажущуюся плотность анализируемых частиц равной 1000 кг/м^3 и находить после этого такие размеры ча-

стиц, при которых они будут обладать такими же инерционными свойствами, как и анализируемые частицы с реальными значениями их размеров и кажущейся плотности. Таким образом, во многих практически встречающихся случаях оказывается возможным обходиться без экспериментального определения кажущейся плотности подлежащих улавливанию частиц.

Насыпная плотность определяется отношением массы свеженасыпанных твердых частиц к занимаемому ими объему, при этом учитывается наличие воздушных промежутков между частицами. Величиной насыпной плотности пользуются для определения объема, который занимают зола или пыль в бункерах сухих газоочистных аппаратов. С увеличением однородности частиц по размерам их насыпная плотность уменьшается, так как увеличивается относительный объем воздушных прослоек. Насыпная плотность слежавшейся пыли оказывается в 1,2—1,5 раза больше, чем свеженасыпанной.

1.3. ДИСПЕРСНЫЙ СОСТАВ ЗОЛЫ И ПЫЛЕЙ

Основные положения

В технике пыле- и золоулавливания принято различать первичные размеры частиц, свойственные им в момент их образования; размеры агрегатированных частиц, возникающих в процессе коагуляции частиц в пылегазовых трактах; размеры частиц в виде хлопьев и комочков после выделения их из газовой фазы.

В первых двух случаях используется понятие о так называемых стоксовских размерах частиц. Под стоксовским размером любой, в том числе агрегатированной частицы неправильной формы понимается размер сферической частицы, имеющей такую же скорость седиментации, как и данная несферическая частица или агрегат. Из-за трудности определения действительной кажущейся плотности частиц (см. § 1.2) эта величина при определении стоксовского размера частиц обычно принимается равной 1000 кг/м³ (1 г/см³). Одни методы и приборы для экспериментального определения дисперсности частиц позволяют находить их фактические размеры, другие — стоксовские диаметры. Кроме того, в одних случаях может быть найдено распределение частиц по первичным размерам, в других — с учетом степени их агрегации в газовых потоках.

При решении большинства вопросов, связанных с очисткой газов, основной интерес представляют распределения по стоксовским размерам, приобретаемым частицами в пылегазовых трактах и определяющим их поведение в пыле- и золоулавливающих аппаратах. С этой точки зрения исследования дисперсного состава золы и пылей целесообразно выполнять с помощью методов, позволяющих разделять частицы на фракции непосредственно в газоходах.

По результатам дисперсионного анализа можно составить таблицу фракционного состава пыли. Фракцией называют относительную долю частиц, размеры которых находятся в определенном интервале значений, принятых в качестве нижнего и верхнего пределов. Можно также составить таблицу, из которой будет видно, какую долю частиц составляют частицы крупнее определенного размера.

В табл. 1.1 и 1.2, иллюстрирующих рассмотренные способы представления результатов дисперсионных анализов, приведены характеристики летучей золы, обра-

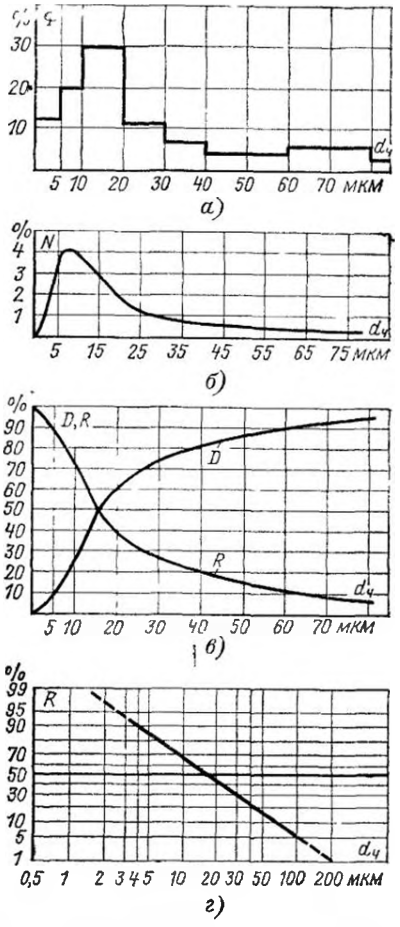


Рис. 1.1. Графическое изображение дисперсного состава золы тощего донецкого угля:

а — распределение по фракциям; *б* — дифференциальная кривая распределения; *в* — интегральное распределение в линейном масштабе координат; *г* — интегральное распределение в вероятностно-логарифмической системе координат

Таблица 1.1. **Дисперсный состав летучей золы из котлов со слоевым сжиганием различных топлив**

Вид топлива	Тип топки	Фракционный состав, %. Размеры частиц, мкм								
		0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—86	86—100	>100
Антрацит АК (дробленый)	С ручным обслуживанием	3	3	4	3	4	3	7	6	67
Антрацит АРШ	С ручным обслуживанием	3	6	7	8	7	4	14	5	46
	ПМЗ с подвижной решеткой	7	9	11	10	8	6	11	5	33
Антрацит АС и АРШ	С механической цепной решеткой	11	9	18	7	6	5	13	4	27
Подмосковный уголь Б	С ручным обслуживанием	32	15	11	8	6	5	9	3	11
	С механической цепной решеткой	6	4	9	22	18	12	15	5	9
	ПМЗ с неподвижной решеткой	9	10	8	7	6	5	9	4	42
	ПМЗ с решеткой обратного хода	26	18	10	7	5	4	11	2	17
Воркутинский уголь ПЖ	С ручным обслуживанием	26	20	12	10	11	6	6	2	7
	С механической цепной решеткой	6	10	10	10	8	8	10	3	35
	ПМЗ с неподвижными решетками	10	9	8	7	5	4	9	4	44
Донецкий уголь Г	ПМЗ с неподвижной решеткой	19	11	8	6	5	4	8	3	36
	ПМЗ с решеткой обратного хода	16	14	10	8	7	6	11	4	24
Донецкий уголь Д	ПМЗ с неподвижной решеткой	12	11	7	6	5	4	8	4	43
	ПМЗ с решеткой обратного хода	19	14	10	8	6	4	10	4	25
Донецкий уголь ПЖ	ПМЗ с неподвижной решеткой	8	9	8	7	6	5	12	5	40
Донецкий уголь Т	ПМЗ с решеткой обратного хода	17	13	10	8	7	5	10	4	26
Торф кусковой	С механической цепной решеткой	13	19	18	12	8	6	9	2	13

Таблица 1.2. **Дисперсный состав летучей золы из котлов с пылевидным сжиганием различных топлив**

Тип топлива	Тип мельницы	Доля частиц с размерами крупнее данного, %. Размеры частиц, мкм				
		>5	>15	>30	>40	>60
Донецкий уголь АШ	Шаровая барабанная	91,0	67,0	44,0	34,0	18,0
Донецкий тощий		92,0	75,0	58,0	47,0	27,0
Кузнецкий тощий		88,0	49,0	29,0	23,0	13,0
Кемеровский уголь		92,0	62,5	40,0	30,0	16,0
Экибастузский уголь	Шаровая барабанная	94,0	71,0	38,0	29,7	23,0
	Молотковая	94,5	75,0	54,3	46,0	33,8
Челябинский бурый	Шаровая барабанная	93,5	71,5	46,0	37,0	24,0
Подмосковный бурый		89,0	57,5	34,0	26,0	14,0
Челябинский бурый	Молотковая	95,0	68,0	40,5	30,5	18,0
Подмосковный бурый						
Ткварчельский уголь	Шаровая барабанная	95,5	72,0	39,5	31,1	22,0
	Среднеходная	97,0	85,0	57,0	41,0	27,0
Интинский уголь	Молотковая	92,5	63,0	25,0	16,0	8,0
	Среднеходная	92,5	66,0	39,0	30,0	19,0
Воркутинский уголь	Молотковая	90,5	57,0	25,0	13,0	5,0
	Среднеходная	90,5	57,0	26,0	19,0	1,0
Ленинский уголь	Молотковая	96,5	83,0	53,0	38,0	26,0
Александрийский уголь		95,0	69,0	35,0	23,0	11,0
Канский уголь		96,0	77,0	47,0	34,0	18,0
Фрезерный торф		88,0	72,0	56,0	47,0	34,0

зующейся при различных способах сжигания наиболее распространенных видов топлива.

Результаты дисперсионных анализов могут быть изображены графически. Принимая равномерным распределение частиц по размерам внутри каждой фракции, можно построить ступенчатый график, называемый гистограммой. По оси абсцисс откладываются размеры частиц, а по оси ординат — относительные содержания фракций, т. е. процентное содержание каждой фракции, отнесенное к массе всего материала (рис. 1.1,*а*).

Если процентное содержание каждой фракции разделить на разность размеров частиц, принятых в качестве граничных, и найденные значения отложить в системе координат, как ординаты точек, абсциссы которых равны среднему для соответствующих фракций размеру частиц, то через полученные точки можно провести плавную дифференциальную кривую распределения частиц по размерам (рис. 1.1,*б*). Однако наиболее удобным является графическое изображение результатов дисперсионных анализов в виде интегральных кривых $D(d_ч)$ или $R(d_ч)$, каждая точка которых показывает относительное содержание частиц с размерами больше или меньше данного размера (рис. 1.1,*в*).

Обозначения D и R на осях ординат соответствуют начальным буквам немецких слов Durchgang (проход) и Rückstand (остаток), так как вначале характеристики зернового состава пылевидных материалов давались в основном по результатам ситового анализа и соответствующие значения отвечали относительной доле материала, прошедшего сквозь сито с ячейками данного размера или оставшегося на нем.

Для целого ряда расчетов, в которых используются данные дисперсионных анализов, удобно аналитическое описание функций распределения частиц по размерам. Ненарушенные распределения частиц по первичным размерам чаще всего являются логарифмически-нормальными и могут быть записаны в виде

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lg\sigma_ч} e^{-\frac{\lg^2(d_ч/d_m)}{2\lg^2\sigma_ч}}, \qquad (1.1)$$

где ξ — удельное содержание частиц с размерами $d_ч$; $\lg(d_ч/d_m)$ — логарифм отношения размера частиц $d_ч$ к медианному для данного распределения размеру d_m, который представляет собой такой размер, при котором количество частиц крупнее d_m равно количеству частиц мельче d_m; $\lg\sigma_ч$ — среднее квадратичное отклонение в функции данного распределения.

Интегральная кривая для частиц с логарифмически-нормальным распределением может быть записана в виде

$$D(d_ч) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}\lg\sigma_ч}\int_{-\infty}^{\lg d_ч} e^{-\frac{\lg^2(d_ч/d_m)}{2\lg^2\sigma_ч}} d(\lg d_ч) \qquad (1.2)$$

или

$$R(d_ч) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}\lg\sigma_ч} \times$$

$$\times \int_{+\infty}^{\lg d_ч} e^{-\frac{\lg^2(d_ч/d_m)}{2\lg^2\sigma_ч}} d(\lg d_ч). \qquad (1.2')$$

Если прибегнуть к подстановке

$$t = \frac{\lg(d_ч/d_m)}{\lg\sigma_ч}, \qquad (1.3)$$

то уравнения (1.2) и (1.2′) примут вид:

$$D(d_ч) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{t} e^{-t^2/2}\,dt; \qquad (1.4)$$

$$R(d_ч) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}}\int_{+\infty}^{t} e^{-t^2/2}\,dt, \qquad (1.4')$$

что позволяет при соответствующих вычислениях пользоваться табулированными значениями интеграла вероятности и стандартными программами ЭЦВМ.

Интегральные кривые для частиц с логарифмически-нормальным распределением удобно строить в вероятностно-логарифмической системе координат, в которой они приобретают вид прямых линий (рис. 1,1,*г*). Для построения такой системы координат по оси абсцисс в логарифмическом масштабе откладывают значения $d_ч$, а по оси ординат — значения $D(d_ч)$ или $R(d_ч)$.

Относительные длины отрезков, соответствующих различным значениям $D(d_ч)$ или $R(d_ч)$, которые для построения вероятностно-логарифмической системы координат следует откладывать в выбранном масштабе от начала оси абсцисс, приведены ниже:

%	x	%	x	%	x
50	0	30; 70	0,524	10; 90	1,282
48; 52	0,050	28; 72	0,583	8; 92	1,405
46; 54	0,100	26; 74	0,643	6; 94	1,555
44; 56	0,151	24; 76	0,706	5; 95	1,645
42; 58	0,202	22; 78	0,772	4; 96	1,751
40; 60	0,253	20; 80	0,842	3; 97	1,881
38; 62	0,305	18; 82	0,915	2; 98	2,054
36; 64	0,358	16; 84	0,994	1; 99	2,326
34; 66	0,412	14; 86	1,080	0,5; 99,5	2,576
32; 68	0,468	12; 88	1,175	0,3; 99,7	2,748

Поскольку в вероятностно-логарифмической системе координат ось абсцисс начинается от точки на оси ординат, соответствующей значению 50%, значения x

Таблица 1.3. **Дисперсный состав пылей, образующихся при некоторых технологических процессах**

Наименование оборудования	Материал частиц	Запыленность газов, г/м³	d_m	$\lg \sigma_q$
Вращающаяся клинкерно-обжиговая печь (мокрый способ производства)	Клинкер	25—30 9—9,6 28,5 18,5	23 9,5 14 8	0,501 0,602 0,535 0,494
Шахтная мельница	Гипс	1050	56	0,970
Крекинг-установка ГК-3 (после циклонов регенератора)	Алюмосиликатный катализатор	10—20	16	0,250
Крекинг-установка АМ-1 (после циклонов регенератора)	Алюмосиликатный катализатор	15	17	0,301
Углесушильный барабан	Каменный уголь	—	15	0,334
Шаровая мельница	Цемент	—	20	0,468
Вращающаяся цементная печь (сухой способ производства)	Клинкер Смесь шлака и трепела	40 20	11 20	0,345 0,652
Электролизер алюминия (боковой токоподвод)	Окислы алюминия	1	20	0,352
Вращающаяся печь обжига	Магнезит Доломит	100—120 35—45	43 28	0,615 0,506
Распылительная сушилка	Двойной суперфосфат	3—5	80	0,210
Барабанная сушилка	То же	12—16	35	0,360

для $D(d_q)$ или $R(d_q)$ больше 50% откладываются вверх от начала оси абсцисс, а меньше 50% — вниз.

Построив по результатам дисперсионного анализа интегральную функцию распределения частиц по размерам в вероятностно-логарифмической системе координат, можно (если получившийся график имеет вид прямой линии, свидетельствующий о логарифмически-нормальном характере изучаемого распределения) выразить это распределение в виде двух параметров d_m и $\lg \sigma_q$ (табл. 1.3).

Значению d_m отвечает точка пересечения построенного графика с осью абсцисс, а $\lg \sigma_q$ находят из соотношения, которое является свойством интеграла вероятности:

$$\lg \sigma_q = \lg d_{15,9} - \lg d_m = \lg d_m - \lg d_{84,1}, \quad (1.5)$$

если строился график функции $R(d_q)$, или

$$\lg \sigma_q = \lg d_{84,1} - \lg d_m = \lg d_m - \lg d_{15,9}, \quad (1.5')$$

если строился график функции $D(d_q)$.

Здесь $d_{84,1}$ и $d_{15,9}$ — абсциссы точек, ординаты которых имеют значения 84,1 и 15,9 соответственно.

В ряде случаев первичные логарифмически-нормальные распределения (ЛНР) частиц по размерам оказываются нарушенными или с самого начала не являются ЛНР. При этом результаты дисперсионного анализа, выполненного методом, позволяющим находить распределение частиц по первичным размерам, в вероятностно-логарифмической системе координат не будут выражаться прямой линией и, следовательно, не будут описываться уравнениями (1.1), (1.2) или (1.2′).

Для подобных случаев имеется целый ряд более общих, чем формулы ЛНР, формул, выражающих функции распределения частиц по размерам [1.5, 1.6]. Однако распределения частиц по размерам, найденные с учетом степени их агрегации в газовых потоках, в подавляющем большинстве оказываются логарифмически-нормальными даже в том случае, если распределение частиц по первичным размерам не было та-

ковым. По-видимому, множество разнородных механизмов, определяющих степень агрегации частиц в потоке газов, является очень сильным, «нормализующим» получаемое распределение фактором. К таким механизмам могут быть отнесены различные виды коагуляции и одновременное разрушение наиболее крупных частиц под действием гидродинамических сил потока.

Определение дисперсного состава

Необходимость определения дисперсного состава частиц с учетом их агрегации в газовых потоках получила широкое признание в начале 60-х годов. К этому же времени относится создание первых образцов приборов, позволяющих разделять частицы на фракции без предварительного выделения из газовой фазы. В дальнейшем традиционные методы дисперсионного анализа (микроскопия, ситовый анализ, седиментометрия и воздушная сепарация) постепенно утратили свое значение в технике пыле- и золоулавливания, оставаясь в числе основных при оценке технологических качеств порошков.

Каскадные импакторы. В настоящее время данные дисперсионных анализов, используемых для выбора или оценки работы пылеулавливающих аппаратов, получают в основном с помощью каскадных импакторов. Принцип действия каскадных импакторов основан на инерционной сепарации частиц по размерам при пропускании пробы газа через ряд последовательно установленных сопл или сопловых решеток с расположенными под ними осадительными поверхностями (подложками). Сопло или сопловая решетка и расположенная ниже подложка составляют каскад прибора. Диаметры одиночных сопл или диаметры и число сопл в сопловых решетках подбираются так, чтобы размеры частиц, которые могут осесть в данном каскаде, были меньше размеров частиц, способных осесть в предыдущем.

Для улавливания наиболее мелких частиц на выходе из последнего каскада инерционного осаждения обычно устанавливается фильтр — каскад осаждения методом фильтрации. Таким образом, анализируемые частицы оказываются разделенными на фракции, число которых равно общему числу каскадов импактора, включая фильтр.

Простой принцип действия позволяет разрабатывать каскадные импакторы весьма различными по своему конструктивному оформлению, для того чтобы тот или иной прибор наиболее полно отвечал основным условиям его применения. Среди существующего многообразия конструкций следует отличать приборы, основным назначением которых является отбор проб из газоходов промышленных предприятий, от приборов, рассчитанных в основном на отбор проб из атмосферы или воздуха производственных помещений. Конструкция первых позволяет, как правило, собирать на подложках осадки частиц в количестве, достаточном для взвешивания на обычных аналитических весах, а габариты дают возможность вводить прибор в газоход через штуцер сравнительно небольшого сечения.

Для того чтобы частицы, столкнувшись с подложкой, не покидали ее поверхность в результате упругого отскока и сдувания, на поверхность осаждения наносят специальную липкую смазку или формируют эту поверхность из волокнистого материала. Для накопления на подложках достаточ-

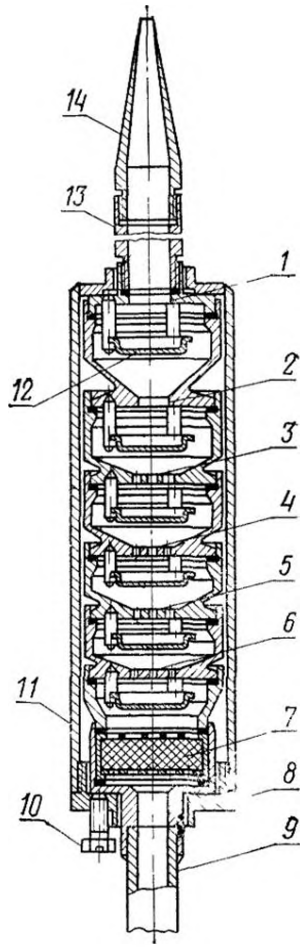


Рис. 1.2. Импактор со сменными подложками (модели НИИОГаз Vм):

1 и *2* — одиночные сопла; *3—6* — сопловые решетки, *7* — фильтр; *8* — крышка; *9* — отсосная трубка, *10* — поджимной болт для уплотнения прокладок; *11* — корпус; *12* — сменная тарельчатая подложка; *13* — пробоотборный носик со сменным наконечником *14*

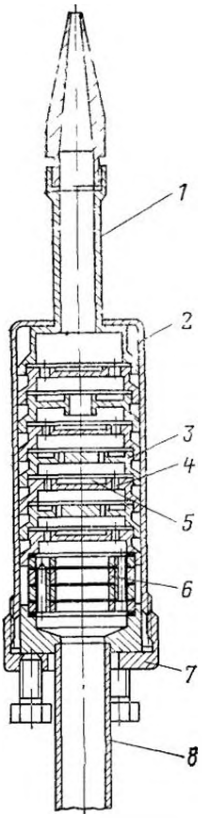


Рис. 1.3. Импактор НИИОГаз с плоскими сопловыми решетками:

1 — пробоотборный носик со сменным наконечником; *2* — корпус; *3* — сопловая решетка; *4* — сопло; *5* — выемка в сопловой решетке для подложки; *6* — фильтр; *7* — крышка; *8* — отсосная трубка

ных для взвешивания осадков частиц первоначально были предложены двухфазные липкие смазки, твердая фаза которых сообщала смазке густоту, позволяющую противостоять сдувающему действию истекающих из сопл газовых струй, а жидкая обеспечивала удержание оседающих частиц за счет смачивания их благодаря диффузии жидкой фазы из слоя смазки в нарастающий слой осадка.

Основным недостатком таких смазок является необходимость внесения довольно грубых поправок на летучесть жидкой фазы, особенно при повышенных температурах и большой длительности отбора пробы. При высоких температурах любые смазки вообще не применимы. Поэтому в дальнейшем, когда выяснилась возможность накопления значительных по массе осадков частиц на подложках с поверхностью, сформированной из волокнистого материала, двухфазные смазки практически утратили свое значение.

Поверхность подложки, сформированную из тонковолокнистого материала, можно рассматривать как состоящую из множества так называемых «потенциальных ям», т. е. таких точек поверхности, в которых энергия удара частицы гасится деформацией волокон и силы адгезии частиц к волокнам или аутогезии друг к другу превышают силы сдувающего действия потока.

Конструкции импакторов НИИОГаз приведены на рис. 1.2 и 1.3.

Прибор (рис. 1.2) имеет сменные подложки в виде тарелок, в которые запрессовывают тонковолокнистый материал (ткань типа ФП, стекловату и т. п.). При высоких температурах, когда не удается подобрать достаточно термостойкий тонковолокнистый материал, в подложки в виде тарелок может быть установлен осадительный элемент ячеистой структуры. Ячеистая структура образуется двумя лентами из фольги — гладкой и гофрированной, намотанными по спирали. Гофрирование лент шириной 3—5 мм производится под углом 75±15°, с тем чтобы площадь каждой ячейки не превышала 1—2 мм². Применение осадительных элементов с ячеистой структурой приводит к некоторому снижению полноты разделения частиц на фракции.

Прибор (рис. 1.3) имеет плоские сопловые решетки, насчитывающие от одного до семи сопл, причем сопловая решетка данного каскада является одновременно подложкой предыдущего (для осаждения частиц используются участки вокруг одиночного сопла или в центре окружности, образованной несколькими соплами). Конструкция способствует уменьшению габаритов прибора, однако из-за отсутствия сменных подложек весь прибор после отбора каждой пробы приходится доставлять для взвешивания подложек в лабораторию.

Большим недостатком каскадных импакторов является заметное осаждение частиц вне поверхности подложек. В импакторах типа показанного на рис. 1.2 основные потери частиц происходят на стенках первых двух-трех каскадов. При сравнительно небольшом отношении диаметра прибора к диаметру сопла первого каскада, свойственном приборам, рассчитанным на отбор проб из газоходов промышленных предприятий, на стенках каждого из этих каскадов оседают в основном те частицы, которые должны были бы осесть на подложке следующего за данным каскада. Поскольку массы осадков на стенках распределяются по каскадам примерно пропорционально распределению масс осадков на подложках этих каскадов, потери на стенках мало влияют на точность определения дисперсного состава (но не концентра-

ции!) частиц [1.8, 1.20]. Концентрация частиц должна при этом определяться отдельно одним из методов, рассмотренных в § 1.15.

В импакторе, показанном на рис. 1.3, потери частиц происходят в основном на обратной стороне сопловых решеток. Осадки этих частиц учитываются в результатах анализа, так как взвешивается вся сопловая решетка. Однако масса тех частиц, которые осели на обратной стороне сопловой решетки, а должны были бы осесть в следующем за данным каскаде, оказывается при этом отнесенной к массе осадка на подложке предшествующего данному каскада. Поэтому приборы данного типа, позволяя наряду с дисперсным составом определять и концентрацию частиц, дают несколько большую погрешность в измерении дисперсного состава.

Дисперсионные анализы, выполненные с помощью каскадных импакторов, сводятся к определению относительной доли и размеров частиц, осевших в каждом каскаде после отбора через прибор пробы газа. Размеры частиц находят, используя известную из калибровки прибора зависимость эффективности осаждения частиц от числа Стокса:

$$\mathrm{Stk}=wd^2_{ч}\rho_{ч}/\mu D_c. \qquad (1.6)$$

При этом в качестве границ разделения на фракции принимают значения d_{50}, т. е. размеры частиц, осаждаемых в соответствующих каскадах с эффективностью 50%.

Для импакторов с соплами круглого сечения

$$d_{50}=\left(\frac{\pi\mu D_c^3 n}{4Q\rho_{ч}C}\right)^{1/2}\mathrm{Stk}_{50}^{1/2} \qquad (1.7)$$

и щелевого сечения

$$d_{50}=\left(\frac{\mu D^2_c l n}{Q\rho_{ч}C}\right)^{1/2}\mathrm{Stk}_{50}^{1/2}. \qquad (1.7')$$

В этих формулах μ — динамическая вязкость газа; D_c — диаметр круглого или ширина щелевого сопла; n — число сопл в данном каскаде; l — длина щелевого сопла; Q — расход газов через прибор при отборе пробы; $\rho_{ч}$ — кажущаяся плотность частиц; C — поправка Кэнингема; Stk_{50} — значение числа Стокса, отвечающее 50%-ной эффективности осаждения частиц в данном каскаде и определяемое при калибровке прибора; w — скорость газов в сопле.

Влияние допущений, используемых при описываемом способе обработки экспериментальных данных, на точность результатов дисперсионных анализов рассматривается в [1.8, 1.21]. Здесь достаточно отметить, что величина ошибок, связанных с допущением о том, что значения d_{50} являются границами разделения частиц на фракции, сильно зависит от дисперсии распределения анализируемых частиц по размерам и при тех значениях $\lg\sigma_{ч}$, которые могут встретиться при анализе промышленных пылей, точность результатов оказывается вполне достаточной для практических целей.

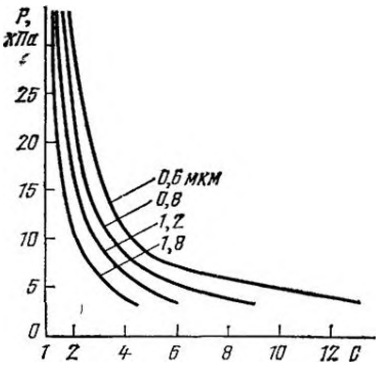


Рис. 1.4. Зависимость поправки Кэнингема от абсолютного давления воздуха при температуре 22 °С для частиц различного размера

Для удобства обработки экспериментальных результатов правая часть уравнений (1.7) и (1.7′) может быть представлена в виде трех множителей:

$$d_{50}=\left(\frac{\pi}{4}D^2_c n\,\mathrm{Stk}_{50}\right)^{1/2}(\mu/Q\rho_{ч})^{1/2}C^{-1/2} \qquad (1.8)$$

и

$$d_{50}=(D^2_c l n\,\mathrm{Stk}_{50}^{1/2})^{1/2}(\mu/Q\rho_{ч})^{1/2}C^{-1/2}. \qquad (1.8')$$

Величины, входящие в первый множитель, зависят только от конструкции прибора. Если обозначить $\left(\frac{\pi}{4}D^2_c n\,\mathrm{Stk}_{50}\right)^{1/2}=A$ и $(D^2_c l n\,\mathrm{Stk}_{50})^{1/2}=A'$, то A и A' являются постоянными для каждого из каскадов того или иного прибора. Второй множитель включает в себя величины, зависящие от условий проведения эксперимента. Третий множитель представляет собой поправку Кэнингема, его абсолютная величина отличается от единицы только для наиболее мелких частиц и при достаточно глубоких разрежениях. Если величина C не может быть принята равной единице, то ее значение находят по формулам, приведенным в специальной литературе. Для воздуха, находящегося при комнатной температуре, значение C может быть найдено по графику на рис. 1.4 в зависимости от абсолют-

Таблица 1.4. **Значение параметра *A* каскадов импакторов для пользования номограммой на рис. 1.5 и для расчетов по уравнению (1.8)**

Тип импактора	Номер каскада	Диаметр сопл, мм	Число сопл в каскаде, шт.	Параметр $A \cdot 10^3$, $м^{3/2}$	Расход воздуха при калибровке, л/мин	Калибровочные значения d_{50}, мкм при $\rho_ч = 1$ г/см³
Импактор НИИОГаз, модель V	1	20,0	1	4,05	10	42,5
	2	14,0	1	2,38		24,5
	3	10,0	1	1,43		15,0
	4	7,0	1	0,99		8,5
	5	5,0	1	0,51		5,2
	6	3,5	1	0,29		3,2
	7	2,0	1	0,13		1,4
Импактор НИИОГаз, модель Vм	1	14,0	1	2,89	10	29,9
	2	10,0	1	1,73		17,9
	3	3,6	7	0,96		10,0
	4	2,5	7	0,67		6,9
	5	2,0	7	0,43		4,5
	6	1,2	7	0,18		2,0
Импактор НИИОГаз с плоскими сопловыми решетками[1]	1	10,0	1	1,44	10	15,0
	2	4,0	7	0,96		8,5
	3	6,0	1	0,67		5,5
	4	2,6	7	0,48		4,0
	5	2,8	3	0,31		3,2
	6	1,4	6	0,19		2,4
	7	1,4	4	0,125		1,7
Импактор НИФХИ им. Карпова	1	8,0	1	0,81	15	7,5
	2	4,5	1	0,45		4,0
	3	3,5	1	0,28		2,5
	4	2,0	1	0,16		1,5
	5	1,5	1	0,09		0,75
Импактор ВНИИ Биотехника, модель МБ-1	1	2,0	200	2,07	30	11,6
	2	1,5	200	1,25		7,2
	3	1,3	200	0,91		5,8
	4	0,8	400	0,62		4,0
	5	0,6	400	0,44		2,3
	6	0,4	400	0,20		1,0
	7	0,25	400	0,10		0,6

[1] Имеются модели с другим числом и диаметрами сопл.

ного давления и размера частиц. Последнему придают ориентировочное значение d_{50}, и расчет ведут методом последовательных приближений

Таким образом, уравнения (1.8) и (1.8′) принимают вид:

$$d_{50} = A\,(\mu/Q\rho_ч)^{1/2} C^{-1/2}; \qquad (1.9)$$

$$d_{50} = A'\,(\mu/Q\rho_ч)^{1/2} C^{-1/2}. \qquad (1.9')$$

Значения параметра A для каскадов наиболее распространенных в СССР импакторов приведены в табл. 1.4.

Из уравнений для определения значений d_{50} видно, что условные границы разделения частиц на фракции зависят, в частности, от расхода газов через прибор во время отбора пробы. Варьируя значения Q, можно сдвигать диапазон разделения на фракции частиц в сторону больших или меньших размеров. Не рекомендуется однако изменять значения Q более чем в два раза по сравнению с расходом газа, выбранным при калибровке прибора, так как при этом могут заметно измениться и значения Stk_{50}.

Значения расхода воздуха при нормальных (или очень близким к ним) условиях, использованные при калибровке некоторых приборов и полученные при этом значения d_{50} также приведены в табл. 1.4.

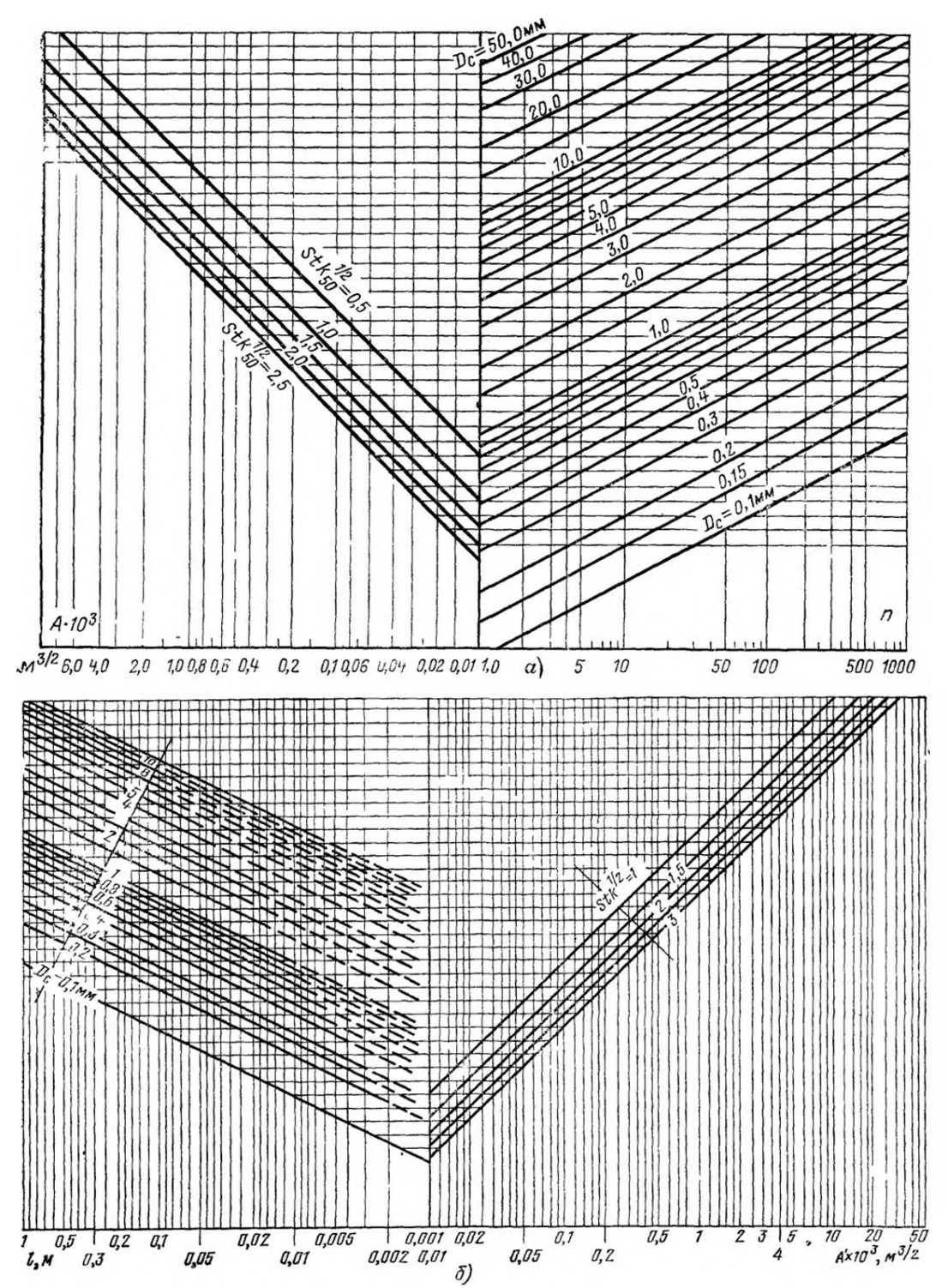


Рис. 1.5. Номограммы:

а — уравнение $A=\left(\frac{\pi}{4}D^3_c n\mathrm{Stk}_{50}\right)^{1/2}$; *б* — уравнение $A'=(D^3_c ln\ \mathrm{Stk}_{50})^{1/2}$;

При значении C, равном 1, уравнения (1.8) и (1.8′) могут быть решены с помощью номограмм, приведенных на рис. 1.5.

Условные границы разделения частиц на фракции (значения d_{50}, найденные для каждого из каскадов импактора с учетом условий отбора пробы) при построении графиков распределения частиц по размерам являются абсциссами точек, ординаты которых соответствуют доле частиц R_k или D_k, осажденных в данном и во всех последующих или предыдущих без данного каскадах:

$$R_k = \sum_{i=1}^{k} g_i \Big/ \sum_{i=1}^{K} g_i, \qquad (1.10)$$

или

$$D_k = \sum_{i=K}^{k-1} g_i \Big/ \sum_{i=1}^{K} g_i, \qquad (1.11)$$

где g_i — масса частиц, найденных в i-м каскаде; K — общее число каскадов, включая фильтр; k — номер каскада.

В каскадных импакторах для определения дисперсного состава микробных частиц, например в приборе МБ-1, разработанном для исследования газовоздушных выбросов предприятий микробиологической промышленности, в качестве подложек используются чашки Петри, залитые питательной средой для инкубирования из осажденных на ней микроорганизмов видимых невооруженным глазом колоний. Для уменьшения вероятности наложения двух или более микробных частиц друг на друга с последующим инкубированием из них только одной колонии такие приборы имеют сопловые решетки с большим (в импакторе МБ-1 до 400 штук) количеством сопл. Вероятное число микробных частиц P, из которых на питательной среде выросло n колоний, находят по уравнению

$$P = N \sum_{m=0}^{m=n-1} \frac{1}{N-m}, \qquad (1.12)$$

где N — число отверстий в сопловой решетке.

Для дальнейшей обработки экспериментальных результатов используются урав-

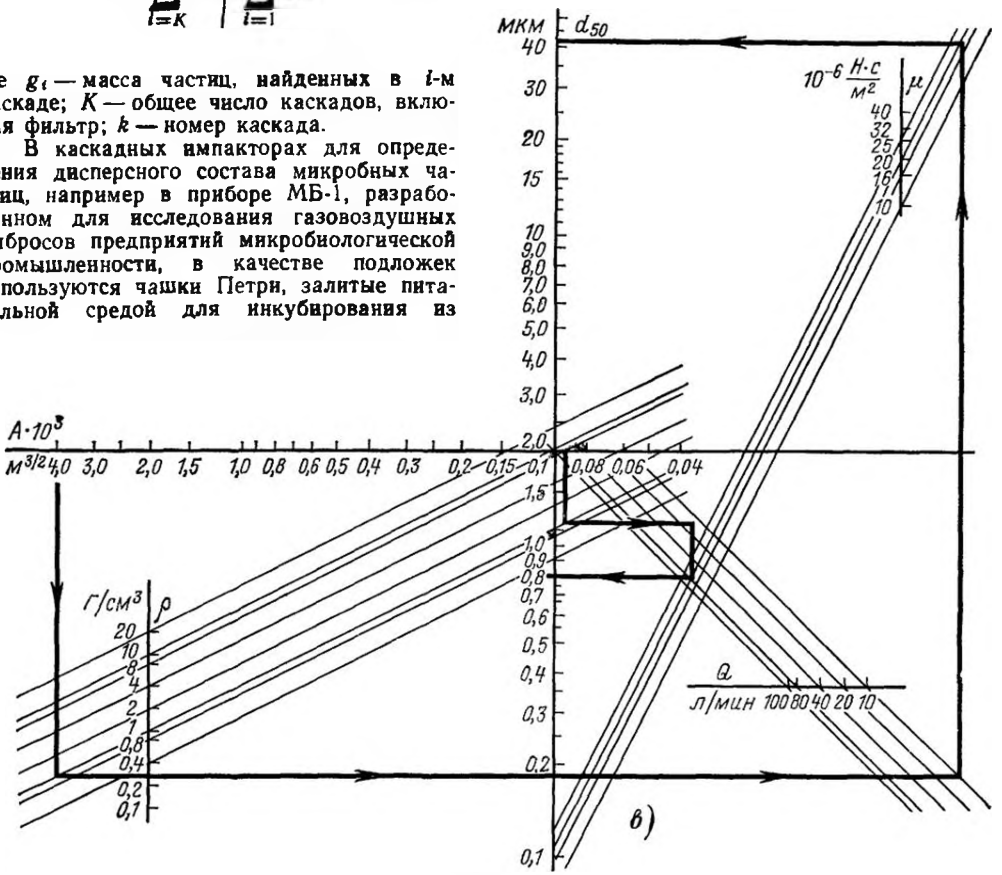


Рис. 1.5. Номограммы:

в — уравнения $d_{50}=A\,(\mu/Q\rho_и)^{1/2}$ и $d_{50}=A\,(\mu/Q\rho_и)^{1/2}$

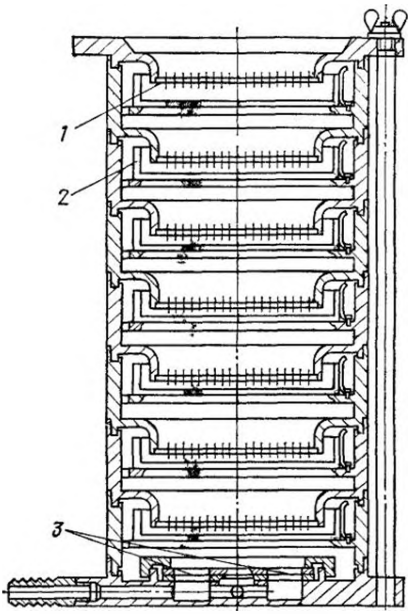


Рис. 1.6. Импактор ВНИИБиотехника (МБ-1):

1 — сопловая решетка; *2* — чашка Петри; *3* — фильтры типа АФА-БА.

нения (1.10) или (1.11), в которых вместо значений массы осадка g_1 подставляют значение P.

Импактор МБ-1 (рис. 1.6) разработан институтом ВНИИБиотехника. От импактора Андерсена [1.22] отличается в основном тем, что имеет каскад, предназначенный для осаждения наиболее мелких частиц методом фильтрации через бактериальные фильтры типа АФА-БА. Кроме того, в некоторых из конструкционных решений прибора нашли отражение требования технологии его несерийного изготовления.

Из-за значительных габаритных размеров, обусловленных применением в качестве подложек чашек Петри диаметром около 100 мм, размещение импактора МБ-1 внутри газоходов практически невозможно. Поэтому при необходимости исследовать газовоздушные выбросы предприятий микробиологического производства отбор проб производится из факелов над обычно невысокими трубами для рассеивания этих выбросов. Значительно худшие результаты дает отбор проб с помощью пробоотборных трубок, к которому иногда прибегают при значительной высоте труб для рассеивания выбросов. В последнем случае пробоотборную трубку соединяют с сопловой решеткой первой ступени через диффузор с углом раскрытия 12—15°.

Наибольшую известность среди ряда других приборов, позволяющих находить распределения частиц по размерам с учетом их агрегации в газовых потоках, получили устройства, состоящие из последовательно или параллельно установленных лабораторных циклонов, а также РАД — ротационный анализатор дисперсного состава промышленной пыли [1.6]. Однако все они неконкурентоспособны по сравнению с импакторами.

Особое место среди методов определения дисперсного состава частиц без их предварительного выделения из газовой фазы занимает метод светорассеяния под малыми углами [1.23], позволяющий находить функцию распределения частиц по размерам путем математической обработки результатов измерения индикатрисы рассеяния монохроматического света этими частицами (индикатриса рассеяния — зависимость интенсивности рассеянного света от угла рассеяния).

Современные варианты аппаратурного оформления рассматриваемого метода предусматривают использование лазера (в качестве источника света) и ЭВМ (для обработки индикатрисы), что крайне сужает возможности его применения при обследовании газовоздушных выбросов промышленных предприятий.

Практическое применение этот метод, с которым в начале его разработки связывались большие надежды [1.24], находит главным образом в научных исследованиях, когда любые другие методы оказываются неприемлемыми, например при изучении дисперсного состава капель, образующихся в проточной части паровых турбин, в горловинах труб — распылителей скрубберов Вентури и т. п. [1.23].

1.4. АУТОГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ

Общие положения

Прочность сцепления частиц золы или пыли с различными макроскопическими поверхностями и друг с другом определяется соответственно адгезионными и аутогезионными свойствами.

Адгезионные свойства могут проявляться только в монослое частиц, осевших на стенках или фильтрующих поверхностях газоочистных аппаратов, и из-за очень малой толщины такого слоя, как правило, не оказывают влияния на работу систем пыле- и золоулавливания.

Эксплуатационная надежность систем пыле- и золоулавливания зависит главным образом от аутогезионных свойств (сцепления частиц друг с другом), причем в технике газоочистки за этими свойствами прочно закрепился термин «слипаемость».

Одной из распространенных неполадок систем газоочистки является частичное или

полное забивание отдельных аппаратов и других элементов улавливаемым продуктом Поэтому для многих газоочистных аппаратов, пылевых затворов установлены определенные границы применимости в зависимости от слипаемости подлежащих улавливанию золы или пыли Для установления таких границ используется условное разделение золы или пылей по степени слипаемости на четыре группы (табл. 1 5).

Первоначально вопрос о занесении различных видов золы или пылей в ту или иную группу по слипаемости решался на основании качественных суждений об их поведении в тех или иных условиях. В настоящее время достаточно широкое распространение получил прибор Е. И. Андрианова, позволяющий сравнивать между собой и относить к той или иной группе различные по слипаемости пыли на основании количественного показателя — разрывной прочности специально сформированных пылевых слоев.

Приборы и методы определения слипаемости пыли

Основной частью прибора Е. И Андрианова (рис 1.7) является полый составной цилиндр внутренним диаметром 17 мм и высотой 25 мм.

Цилиндр состоит из укрепленного на основании *1* стакана *2* и сторцованной с ним трубки *3*. Соосность стакана и трубки, выполненных из дюралюминия, обеспечивается четырьмя центрирующими выступами на стакане. Внутрь цилиндра помещают исследуемый материал *4*, который уплотняют с помощью плунжера *5*. Уплотняющее и измерительное устройства смонтированы на вращающейся опоре, которая состоит из втулки *16* и вала *13*. Вал может поворачиваться на угол 90° (на схеме этот угол для наглядности развернут до 180°) В одном из его крайних положений место по оси цилиндра занимает уплотнительный шток *15* с грузом *14*.

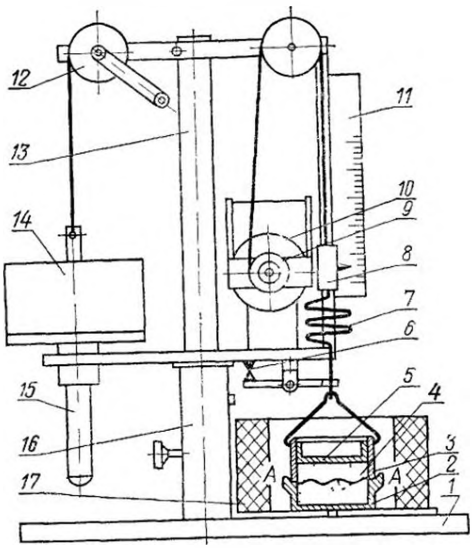


Рис 1 7. Прибор Е. И. Андрианова для определения разрывной прочности пылевых слоев

Подъем и опускание штока осуществляется плавным поворотом ручки блока *12*, на который наматывается привязанная к штоку струна. После уплотнения пробы золы или пыли, повернув вал *13*, над цилиндром устанавливают устройство, служащее для приложения к сформированному слою измеряемого разрывающего усилия F. Калиброванная пружина *7*, прикрепленная к ползуну *8*, зацепляется другим концом за дужку на трубке *3*. Пружина растягивается с помощью нити, наматываемой на барабан *9*, который приводится во вращение электродвигателем *10*

При некотором значении постепенно нарастающего усилия F_k разрывается пылевая масса по сечению *A-A* (месту стыка частей цилиндра). Трубка *3* вместе с частью слоя пыли отделяется от стакана *2*. В этот момент разъединяются контакты *6* и электродвигатель отключается. Отметив по шкале *11* усилие F_k, ползун возвращают в исходное положение (барабан имеет обратный ход) и с помощью той же пружины *7* определяют балластное усилие g_k — вес трубки *3* с плунжером и пылью, удерживаемой силами адгезии и трения о стенки. Прочность слоя P рассчитывается по соотношению

$$P = \frac{F_k - g_k}{S} = \frac{F}{S}, \qquad (1.13)$$

где S — площадь поперечного сечения слоя

Количество материала подбирают так, чтобы расстояние от поверхности плунжера до сечения разрыва составляло не менее 3 мм. При этом общая высота слоя равна примерно 8 мм.

Для повышения точности измерений применяются сменные пружины с различными модулями.

Поскольку слипаемость многих пылей зависит от температуры, прибор оборудован съемным электронагревательным элементом *17*, что позволяет исследовать разрывную прочность слоев в интервале температур до 300 °С. Небольшая серия прибора выпущена трестом «Цветметэнергоочистка».

В модификации прибора, выполненной Семибратовским филиалом НИИОГаз, усилие, необходимое для разрыва слоя пыли, создается соленоидом, на который подается регулируемое напряжение. Шкала микроамперметра, измеряющего ток, при котором сначала происходит разрыв слоя частиц, а затем уравновешивание балластного уси-

Таблица 1.5. **Слипаемость некоторых видов золы и пыли**

Группа слипаемости, разрывная прочность P по Е. И. Андрианову, Па	Наименование золы и пыли
I. Неслипающиеся, $P \leqslant 60$	Шлаковая пыль, глиноземная пыль, доломитовая пыль, шамотная пыль
II. Слабослипающиеся, $60 < P < 300$	Летучая зола с недожогом более 30% при пылевидном сжигании каменных углей, летучая зола при слоевом сжигании любых углей, коксовая пыль, магнезитовая пыль (не сорбировавшая влагу), сланцевая зола, доменная пыль (после первичных пылеосадителей), апатитовая сухая пыль
III. Среднеслипающиеся, $300 < P < 600$	Летучая зола без недожога (зола подмосковных углей), торфяная зола, марганцитовая пыль (сорбировавшая влагу), пыль концентратов цветной металлургии и железного колчедана, пыль окиси цинка, свинца, олова (предварительно скоагулировавшаяся), влажная магнезитовая пыль, сухой цемент
IV. Сильнослипающиеся, $P > 600$	Цементная пыль, выпавшая из воздуха с большим влагосодержанием, гипсовая и алебастровая пыль, пыль глины, каолина и мергелей (мелкая), огарковая пыль при 500 °С, мучная пыль, волокнистые пыли (асбест, хлопок, шерсть), пыль, содержащая крупные примеси (после отсеивания зерна и т. п.), зола антрацитового штыба с недожогом менее 25%, пыль с максимальной величиной частиц 10 мкм

лия от веса трубки с пылью и плунжером, имеет градуировку в паскалях.

Для оценки прочности пылевых слоев, образующихся в процессе работы систем газоочистки на стенках аппаратов, на электродах электрофильтров, на поверхности ткани в рукавных фильтрах, может быть использован метод эрозионного разрушения слоя частиц воздушной струей. Эрозия — интенсивный унос частиц с поверхности слоя золы или пыли — начинается при определенной пороговой скорости потока $w_п$. Разрушение слоя частиц под действием узкой струи воздуха, направленной на его поверхность, практически всегда носит эрозионный характер. Денудация (т. е. отрыв сразу целых участков слоя) может начаться лишь после того, как в зоне эрозионного разрушения слоя обнажится поверхность, на которой образовался этот слой, или при скачкообразном увеличении скорости воздуха.

Расчетные методы определения прочности слоя по пороговой скорости потока, вызывающей эрозию, весьма приближенны и не универсальны. Поэтому для определения прочности пылевого слоя по значению пороговой скорости воздушного потока, вызывающего эрозию, проводят дополнительные экспериментальные исследования.

С помощью прибора (рис. 1.7) определяют ряд значений прочности слоев исследуемых частиц на разрыв при различных значениях уплотняющей нагрузки. После этого определяют значения пороговой скорости эрозионного разрушения слоев, сформированных при тех же значениях уплотняющей нагрузки, и строят график зависимости $P=f(w_п)$.

В логарифмической системе координат такие зависимости в большинстве случаев имеют вид прямых линий, поэтому для построения конкретной зависимости достаточно определить значения P и $w_п$ для двух-трех значений уплотняющей нагрузки. После этого, пользуясь построенным графиком, находят значение P, отвечающее измеренному значению $w_п$ для слоя частиц, образовавшегося на той или иной поверхности в процессе эксплуатации системы газоочистки.

Поскольку начало эрозионного разрушения слоя фиксируется визуальным наблюдением, для определения пороговой скорости воздушного потока приходится либо отключать соответствующий аппарат от потока очищаемых газов либо снабжать его смотровыми окнами.

Поток воздуха для определения пороговой скорости эрозионного разрушения создается с помощью трубки с внутренним диаметром 1,5—2 мм, располагаемой на расстоянии 2—3 мм от поверхности исследуемого слоя частиц. Интервал значений пороговой скорости для различных слоев частиц широк. Рыхлые отложения частиц, образовавшихся в результате седиментационного или диффузионного осаждения,

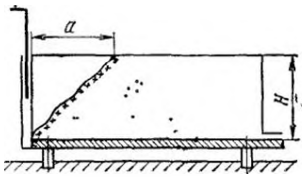


Рис. 1.8. Устройство для определения статического угла естественного откоса

подвергаются эрозии при скорости воздушной струи 0,5—1 м/с. Эрозия плотных слоев тонкодисперсных частиц, образовавшихся в результате фильтрации или электроосаждения, начинается при скоростях 100—160 м/с. Измерения пороговой скорости характеризуются хорошей воспроизводимостью результатов, разброс которых обычно не превышает 3—5%.

Со слипаемостью тесно связана другая характеристика золы или пыли — ее сыпучесть Сыпучестью определяются статический и динамический углы естественного откоса, от которых, в частности, зависит поведение золы или пыли в бункерах газоочистных аппаратов, крутизна стенок которых и диаметры пылевыпускных отверстий выбираются с учетом сыпучести улавливаемых частиц

Разработанным Семибратовским филиалом НИИОГаз РТМ 26-14-10-78 «Пыль промышленная. Лабораторные методы исследования физико-химических свойств» регламентируются следующие методы определения углов естественного откоса.

Метод определения статического угла естественного откоса. Метод заключается в измерении угла наклона поверхности материала, образовавшейся в результате обрушения слоя частиц при удалении подпорной стенки.

Устройство для определения статического угла естественного откоса состоит из измерительного сосуда и камеры для засыпки золы или пыли. Измерительный сосуд представляет собой прямоугольный сосуд из стекла размером 70×40×40 мм, одна из торцевых стенок которого съемная (рис. 1 8).

Камера для засыпки золы или пыли представляет собой параллелепипед, имеющий основание размерами 70×40 мм и высоту 400 мм. В верхней части камеры вмонтирован бункер. Течка бункера перекрывается задвижкой. Расстояние от задвижки до верхней кромки измерительного сосуда должно быть не менее 350 мм.

В основании камеры имеется подвижная пластина, на которой устанавливается сосуд. Передвижением пластины сосуд вдвигается под бункер и выдвигается из-под него.

Пробу частиц в количестве 30—40 г помещают в бункер камеры. Открывают задвижку бункера. Через 10—15 мин сосуд выдвигают из-под течки бункера. Излишний материал удаляют линейкой вровень с кромкой сосуда. После этого осторожно убирают съемную стенку сосуда. При этом часть материала обрушивается, образуя наклонный откос. Замеряют с точностью до 0,5 мм величину освободившейся верхней кромки сосуда a и высоту слоя частиц в сосуде H.

Статический угол естественного откоса вычисляют по формуле

$$\alpha_{ст} = \operatorname{arctg}(H/a), \qquad (1.14)$$

где a — величина освободившейся верхней кромки сосуда, мм; H — высота слоя материала в сосуде, мм.

За результат определения статического угла естественного откоса принимают среднее арифметическое шести параллельных определений. Расхождение между результатами отдельных измерений и их средней арифметической величиной не должно превышать 10%.

Каждое определение желательно проводить из новых порций пробы золы или пыли.

Метод определения динамического угла естественного откоса. Метод заключается в непосредственном измерении угла, под которым располагается наружная поверхность зернистого материала при падении частиц на плоскость.

Устройство для определения динамического угла естественного откоса представляет собой прямой пространственный угол, образованный тремя деревянными плоскостями. В ребре, образованном вертикальными стенками, имеется цилиндрический канал диаметром 10 мм, ось которого совпадает с пересечением внутренних плоскостей стенок. В канал с помощью воронки из бункера засыпается анализируемый материал. На боковые стенки и дно устройства нанесены угломерные шкалы. Высота боковых стенок 40—70 мм. В основание устройства вмонтирован штатив для крепления бункера.

Перед началом измерений устанавливают воронку над устройством так, чтобы носик воронки был продолжением канала. Бункер для засыпки золы или пыли располагают над воронкой на расстоянии 5—7 см. Выпускное отверстие бункера должно быть соосно с носиком воронки.

Пробу частиц в количестве 30—40 г помещают в бункер устройства, приоткрывают задвижку бункера так, чтобы пыль тонкой струйкой высыпалась из бункера в воронку, а из нее в угол устройства до тех пор, пока вершина конуса не достигнет верхнего среза стенок устройства (рис. 1.9).

Динамический угол естественного откоса считывают с угломерных шкал по положению образующей конуса материала с точ-

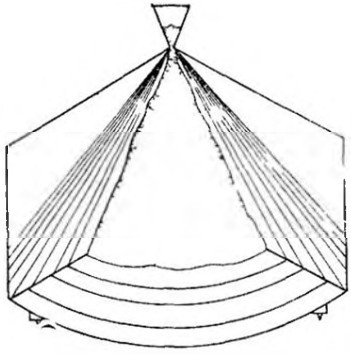


Рис. 1.9. Устройство для определения динамического угла естественного откоса

ностью до 1°. За результат определения динамического угла естественного откоса в градусах принимают среднее арифметическое шести параллельных измерений Расхождение между результатами отдельных измерений и их средней арифметической величиной не должно превышать 10%.

1.5. АБРАЗИВНОСТЬ ЧАСТИЦ

Абразивность частиц. Интенсивность абразивного износа пыле- и золоулавливающих установок при прочих равных условиях зависит от твердости, размера и плотности частиц. По данным [1.32] частицы, имеющие острые грани при прочих равных условиях, разрушают металл более чем в 10 раз быстрее, чем частицы округлой формы. В [1.11] показано, что по мере увеличения размеров частиц золы износ металла вначале возрастает и затем, достигнув максимума, снижается. Максимальный износ металла вызывают частицы золы с размерами 90±2 мкм.

Истирающее действие частиц золы или пыли должно учитываться при выборе скоростей запыленных потоков, толщины металла для изготовления газоходов и газоочистных установок или выборе для них облицовочных материалов.

В связи с разработкой [1.11] метода расчета золового износа экономайзерных труб паровых котлов предложена [1.12] методика определения безразмерного коэффициента абразивности a для золы различных видов топлива. Коэффициент a определяет утонение стенки поперечно обтекаемой трубы из стали 20 в местах ее максимального износа при концентрации частиц 1 г/м³ и скорости потока 1 м/с, при равномерном распределении поля скоростей и концентраций, при комнатной температуре в течение 1 ч.

Таблица 1.6. Коэффициенты абразивности золы некоторых видов топлива

Вид топлива	Коэффициент абразивности золы $a\times10^8$
Донецкий уголь	5,4
Подмосковный уголь	5,4
Челябинский уголь	4,0
Кизеловский уголь	3,5
Богословский уголь	2,2
Волжские сланцы	3,0
Экибастузский уголь[1]	8,8
Куу-чекинский уголь[1]	6,9
Черемховский уголь[1]	1,83

[1] Значения получены для частиц с размерами 90±2 мкм.

Значения коэффициента a (табл. 1.6), полученные по этой методике, могут быть использованы в практике проектирования золоулавливающих установок для сравнительной оценки абразивности золы некоторых видов топлива.

Методика определения коэффициента a, приведенная в [1.12], пригодна для определения абразивных свойств и других пылевидных материалов, но имеет громоздкое аппаратурное оформление.

Компактное аппаратурное оформление имеет метод определения коэффициента абразивности частиц, регламентированный РТМ 26-14-10-78. «Пыль промышленная. Лабораторные методы исследования физико-химических свойств»

Для определения коэффициента абразивности используется абразивметр (рис. 1.10), состоящий из кассеты *1* для крепления образца *2*, трубки *3* длиной 150 мм с внутренним диаметром 6 мм, изготовленной из нержавеющей стали Х18Н10Т и предназначенной для центробежного разгона исследуемых частиц, приемной воронки

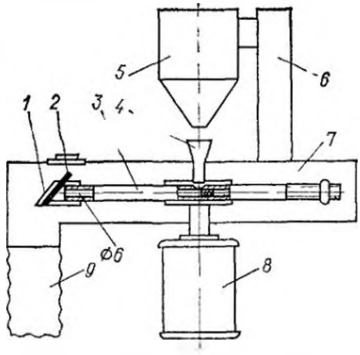


Рис. 1.10. Установка для определения коэффициента абразивности частиц

4, вибрационного питателя 5, 6, обеспечивающего расход частиц не более 3 г/мин, корпуса 7, электродвигателя 8 и сборника частиц 9

Образец 2 размером 10×12×2 мм изготовляется из стали 20. Рабочую поверхность образца подвергают механической обработке с целью удаления окисной пленки и шлифованию. Подготовленный образец устанавливают в кассету прибора, загружают в бункер вибропитателя 10 г золы или пыли и включают прибор.

Коэффициент абразивности исследуемых частиц K_a, м²/кг, вычисляют по уравнению

$$K_a = A\Delta G, \qquad (1.15)$$

где $A = 1{,}185 \cdot 10^{-5}$ м²/кг² — постоянная абразивметра; ΔG — потеря массы образца в результате истирания частицами, кг.

Рассмотренный метод применим для частиц, имеющих коэффициент абразивности $>0{,}5 \cdot 10^{-12}$ м²/кг.

1.6. УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СЛОЯ ЧАСТИЦ ЗОЛЫ ИЛИ ПЫЛИ

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) слоя частиц золы или пыли влияет на эффективность работы установок электрической очистки газов Зависимость удельного сопротивления от температуры и влажности газа (рис. 1 11), а также от некоторых других факторов используется в практике электрогазоочистки для соответствующей подготовки (кондиционирования) газов перед электрофильтрами для улучшения их работы

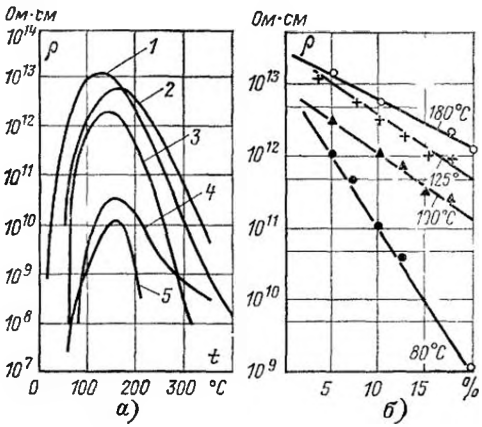


Рис 1 11. Удельное электрическое сопротивление некоторых видов промышленной пыли и золы:

а — зависимость от температуры *б* — зависимость от влажности на примере золы подмосковного угля, *1* — зола подмосковного угля, *2* — свинцовый дым; *3* — синтетические катализаторы, *4* — цементная пыль; *5* — зола донецкого антрацита марки АШ

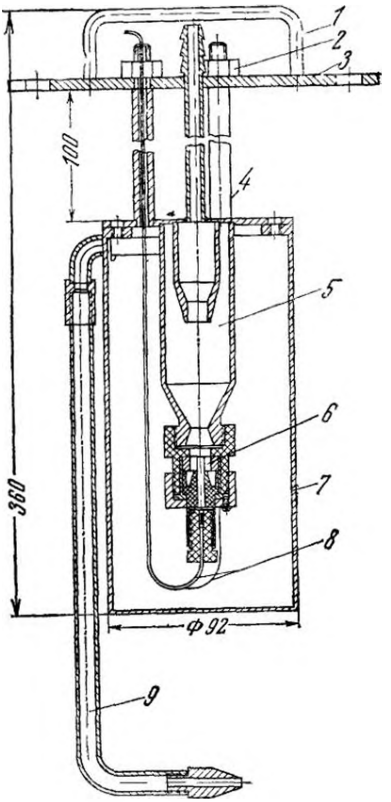


Рис. 1.12 Прибор для измерения удельного электрического сопротивления слоя пыли «Циклоном-1»:

1 — ручка; *2* — гайка, *3* — фланец; *4* — шпилька; *5* — циклон, *6* — датчик, *7* — защитный кожух; *8* — измерительные провода, *9* — заборная трубка

Большинство из наиболее распространенных методов определения удельного электрического сопротивления предусматривает формирование слоя золы или пыли между специальными измерительными электродами Абсолютные значения измеряемых величин оказываются при этом зависящими от способа формирования слоя между электродами и от других особенностей того или иного метода

НИИОГаз разработал удобный в эксплуатации прибор «Циклоном-1» [1 14], состоящий из малогабаритного лабораторного циклона с расположенными в его бункере измерительными электродами (рис. 1 12)

К тераомметру проводами с кремнийорганической изоляцией марки ПТЛ-250 подключается измерительная система прибора

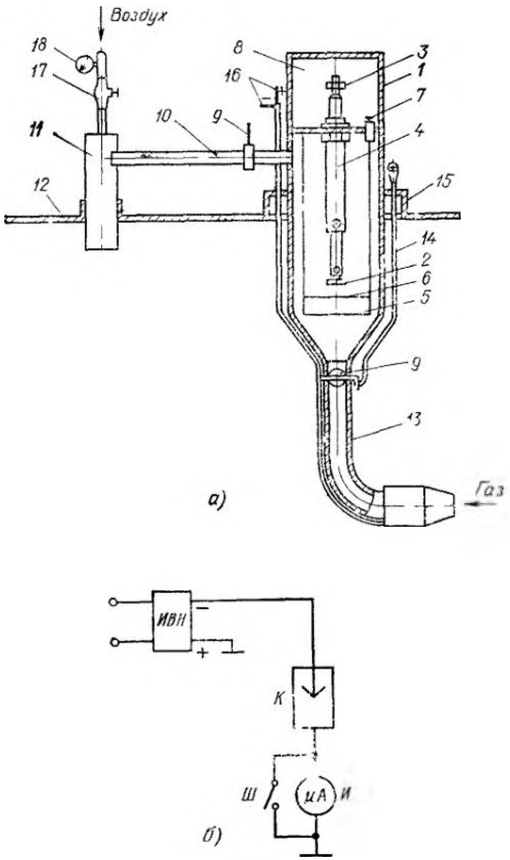


Рис. 1.13. Устройство для измерения удельного электрического сопротивления по РТМ 26-14-07-77:

а — конструкция устройства; *б* — схема электрических соединений; *1* — измерительная камера; *2* — измерительные электроды, *3* — измерительные клеммы; *4* — изоляторы; *5* — рамка коронирующего электрода; *6* — коронирующий электрод, *7* — клемма коронирующего электрода; *8* — экран; *9* — шиберная заслонка; *10* — отводной патрубок; *11* — эжектор; *12* — стенка газохода; *13* — заборная трубка; *14* — тяга шиберной заслонки; *15* — фланец *16* — импульсная трубка; *17* — вентиль; *18* — манометр; *ИВН* — источник высокого напряжения, *К* — камера устройства; *μА* — микроамперметр; *Ш* — шунтирующий тумблер

Порядок работы с прибором следующий. Прибор через специально предусмотренный для этого лючок вводят в газоход и прогревают, затем подключают к вакуумной линии и устанавливают расход газа 15—25 л/мин. Для предотвращения засорения источника разрежения золой или пылью, не уловленной циклоном, в линии отсоса рекомендуется устанавливать фильтр. Время, необходимое для заполнения измерительной системы прибора уловленными частицами, определяется опытным путем.

После окончания отбора пробы определяют электрическое сопротивление слоя частиц, находящегося между измерительными электродами. Благодаря специально подобранной геометрии электродов электрическое сопротивление, Ом, измеренное тераомметром, численно равняется удельному электрическому сопротивлению, Ом·см

РТМ 26-14-07-77 «Электрофильтры. Способ определения удельного электрического сопротивления пылей», разработанным Семибратовским филиалом НИИОГаз, устанавливается способ определения удельного электрического сопротивления слоя частиц, сформированного в электрическом поле коронного разряда, в зазоре между измерительными электродами устройства, показанного на рис 1.13.

Отбор пробы золы или пыли для измерения удельного электрического сопротивления осуществляется путем изокинетического отбора газа в измерительную камеру *1*, помещенную в газоход, и осаждения частиц в электрическом поле коронного разряда на измерительные электроды *2*. Изокинетичность отбора газа соблюдается при равенстве нулю разности статических напоров внутри канала заборной трубки *13* и в газоходе Измерение разности статических напоров производится микроманометром. Отсос газа через измерительную камеру осуществляется эжектором *11*, подключенным к линии сжатого воздуха трубой диаметром 3/4″. Давление воздуха перед эжектором, измеряемое манометром *18*, должно быть не менее 200 кПа

Скорость отбора газа из газохода, соответствующая нулевому показанию микроманометра, устанавливается воздушным вентилем *17* эжектора (грубо) и шибером *9* на выходе из камеры (точно) и поддерживается в течение всего времени напыления. Для обеспечения заполнения зазоров пылью и повторяемости результатов измерений толщина слоя пыли на измерительных электродах должна составить 1—3 мм. Время, необходимое для формирования слоя пыли требуемой толщины, устанавливается предварительным опытом.

Измерительную камеру и эжектор соединяют с линией сжатого воздуха и отводящим патрубком камеры.

Двумя резиновыми шлангами соединяют согласно маркировке штуцеры микроманометра с соответствующими импульсными трубками *16* измерительной камеры. В течение 30 мин дают прогреться измерительной камере с установленными в ней измерительными электродами.

В начале опытов измеряют сопротивление изоляции между измерительными электродами *2*, которое должно быть не менее чем на два порядка выше сопротивления пыли. При несоблюдении этого условия поверхность изоляторов *4* тщательно протирают спиртом

Устанавливают шиберы *9* на входе в камеру и на выходе из камеры в положение «Открыто». На эжектор подают сжатый воздух и устанавливают нужную скорость отбора газа. Подключают к измерительным клеммам *3* с помощью высоковольтного кабеля источник высокого напряжения, а к клемме коронирующего электрода *7* — схему измерения тока коронного разряда.

Измерительные клеммы для предохранения от случайного прикосновения накрывают экраном *8*. Источник высокого напряжения и схема измерения должны быть надежно соединены с заземляющим проводом.

Включают источник и устанавливают напряжение, соответствующее току коронного разряда 10—20 мкА (в промежутках времени между измерениями тока короны измерительный прибор *ИП* должен быть зашунтирован тумблером *Ш*).

По истечении времени напыления измерительных электродов вентиль закрывают, шиберы *9* устанавливают в положение «Закрыто». Выключают источник высокого напряжения, снимают экран, снимают остаточный заряд прикосновением заземляющего провода к измерительным клеммам и отключают высоковольтный кабель.

Экранированными проводами подключают измерительные клеммы к тераомметру. На время измерения клеммы закрывают экраном. Измеряют сопротивление слоя частиц пыли.

Удельное электрическое сопротивление пробы золы или пыли, Ом·м, вычисляют по формуле

$$\rho = RS/b, \qquad (1.16)$$

где R — сопротивление слоя частиц, замеренное между клеммами измерительных электродов, Ом; S — площадь сечения активной части измерительных электродов, м²; b — зазор между измерительными электродами, м.

Площадь сечения активной части измерительных электродов и зазор между ними выбраны так, что отношение $S/b = 0{,}05$, благодаря этому расчетная формула приобретает вид:

$$\rho = 0{,}05R.$$

Для определения удельного электрического сопротивления пыли проводят десять опытов. Затем вычисляют среднее арифметическое значение

$$\rho_{ср} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{i=n} \rho_i$$

и среднее квадратическое отклонение величин ρ_i от их среднего значения

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{i=n} (\rho_i - \rho_{ср})^2},$$

где ρ_i — результаты измерений; n — количество измерений.

1.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЗАРЯЖЕННОСТЬ ЧАСТИЦ

Электрическая заряженность частиц оказывает влияние на эффективность их улавливания в газоочистных аппаратах, на взрывоопасность и аутогезионные свойства, в том числе на сыпучесть пылей. Известно [1.14], например, что в бункерах электрофильтров свежеуловленная зола или пыль, сохраняя электрический заряд, имеет угол естественного откоса, близкий к нулю, т. е. ведет себя почти как жидкость, а через несколько часов, после потери частицами электрического заряда, угол естественного откоса становится близким к 50°, достигая в отдельных случаях 90°. Этот пример сильного влияния заряженности частиц относится к случаю их искусственной зарядки, когда практически все частицы имеют заряд одного знака. Если частицы приобретают заряд в процессе своего образования или в результате адсорбции ионов естественного происхождения, трения друг о друга или о стенки газоходов, то среди них наряду с некоторым количеством нейтральных частиц при-

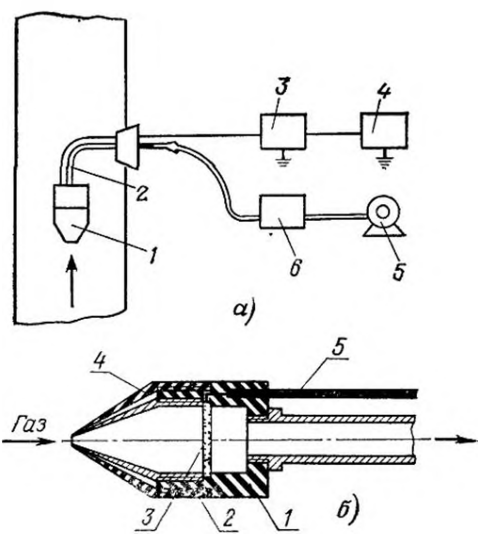


Рис. 1.14. Устройство для измерения суммарной электрической заряженности частиц:

а — принципиальная схема; *б* — пылеотборная головка

сутствуют как положительно, так и отрицательно заряженные частицы. Внешние проявления электрической заряженности частиц зависят при этом от их суммарного заряда, определяемого соотношением между нейтральными, положительно и отрицательно заряженными частицами.

Для измерения суммарного заряда частиц в газоходах систем пыле- и золоулавливания в НИИОГазе разработано устройство [1.18], принципиальная схема которого приведена на рис. 1.14,*а*.

Устройство состоит из пылеотборной головки *1* с отсосной трубкой *2*, блока накопительной емкости *3* и электрометра *4*, а также воздуходувки *5* с реометром *6*.

Пылеотборная головка предназначена для изокинетического отбора пробы частиц и накапливания их на поверхности электропроводящей фильтровальной перегородки (металлокерамика, металлическая сетка сплошного плетения и т. п.) и состоит (рис. 1.14,*б*) из фторопластового корпуса *1*, в который ввинчивается металлический носик *2*. Между корпусом и носиком зажимается фильтровальная электропроводящая перегородка *3*. Снаружи носик защищен фторопластовым экраном *4*, предотвращающим поступление дополнительного заряда в накопительную емкость за счет трибоэлектрического эффекта, возникающего при трении пыли о наружную поверхность носика. Носик и фильтр электрически соединены с накопительной емкостью термостойким экранированным проводом *5*, экран которого заземлен

Перед производством измерений пылеотборную головку через штуцер вставляют в газоход, поворачивают носиком по потоку газа и прогревают до температуры выше точки росы. При этом электрометр отключен от конденсатора, обе обкладки которого заземлены.

После прогрева одну из обкладок конденсатора электрически соединяют с фильтровальной перегородкой, устанавливают пылеотборную головку навстречу потоку и отбирают на фильтр (с соблюдением условия изокинетичности) пробу пыли массой 50—100 мг. По окончании отбора пробы пылеотборную головку вынимают из газохода, очищают от слоя осевшей на ней пыли, защищают электрическим экраном, чтобы исключить влияние внешних электрических полей, и после этого соединяют конденсатор с электрометром для измерения потенциала емкости U, В.

Удельный избыточный заряд q, Кл/г, приходящийся на единицу массы пыли, рассчитывают по формуле

$$q = CU/M, \qquad (1.17)$$

где C — общая емкость конденсатора, пылеотборной головки и соединительных проводов, M — масса пробы пыли, г.

В качестве накопительной емкости могут быть использованы конденсаторы типа ПГ-П или ФГТ. Измерение потенциала проводят с прибором, имеющим входное сопротивление (10^{10} Ом), например электрометром ВК2-16.

1.8. СМАЧИВАЕМОСТЬ ЧАСТИЦ

Смачиваемость частиц водой оказывает влияние на работу мокрых пыле- и золоулавливающих аппаратов. При соприкосновении плохо смачиваемой частицы с поверхностью жидкости частица захватывается этой поверхностью, но в противоположность легко смачиваемой не погружается в жидкость или не обволакивается каплей жидкости, а остается на ее поверхности. После того как поверхность жидкости оказывается в значительной мере покрытой захваченными ею частицами, очистка газов ухудшается, так как вновь подводимые к поверхности жидкости частицы в результате упругих соударений с ранее захваченными могут возвратиться в поток газа и оказаться неуловленными.

Для определения смачиваемости частиц для оценки их поведения в системах газоочистки применяется метод пленочной флотации. Схема разработанной Семибратовским филиалом НИИОГаз экспериментальной установки для реализации этого метода приведена на рис. 1.15.

Перед проведением анализа подбирают опытным путем ширину выпускного отверстия бункера *1*. Для этого из нескольких навесок исследуемой пыли и при включенном вибраторе *2*, уменьшая или увеличивая ширину выпускного отверстия бункера, добиваются, чтобы время высыпания 1 г частиц составляло 2±0,1 мин. Затем стеклянный сосуд *4* заполняют дистиллированной водой ниже его верхней кромки на 3—4 мм и ставят его на столик *6*, приводимый во вращение электродвигателем *5* типа ДСД-2 со скоростью 2 об/мин.

Расстояние между пылевыпускным отверстием бункера и поверхностью воды должно составлять 3—4 мм.

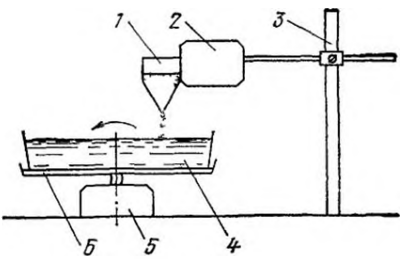


Рис. 1.15. Установка для определения смачиваемости частиц

Пробу анализируемых частиц массой около 1 г помещают в бункер при включенном вибраторе и следят, чтобы свежая порция пыли не попала на уже покрывшую воду и удерживающуюся в поверхностном слое пыль. Для этого после каждого оборота столика бункер с вибратором передвигают вместе со штативом *3* от периферии к центру. После высыпания всей пробы прибор останавливают. Воду с оставшимися на ее поверхности частицами сливают в стакан Осевшие на дне сосуда в процессе опыта частицы с помощью промывалки переносят в предварительно взвешенную и установленную в колбу для фильтрования под вакуумом воронку Шота. После отфильтровывания воронку с осадком помещают в сушильный шкаф или эксикатор и высушивают до постоянной массы

Долю смочившейся пыли (смачиваемость) вычисляют по формуле

$$\frac{M_{в.п} - M_в}{M_п} 100, \qquad (1.18)$$

где $M_{в.п}$ — масса воронки с пылью, г; $M_в$ — масса чистой воронки, г; $M_п$ — масса взятой для опыта навески, г.

Для определения смачиваемости пыли проводят 8 параллельных опытов.

Вычисляют среднее арифметическое полученных значений.

Расхождение между результатами отдельных измерений и их средней арифметической величиной не должно превышать 5%. Результаты измерений, отклоняющихся от среднего арифметического значения на величину, большую 5%, отбрасывают.

За окончательный результат принимают среднее арифметическое значение оставшихся измерений.

По смачиваемости, определенной методом пленочной флотации, промышленная пыль классифицируется на три группы: плохо смачиваемая — от 0 до 30%, средне смачиваемая — от 30 до 80%, хорошо смачиваемая — от 80 до 100%.

1.9. ПОЖАРО- И ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ЧАСТИЦ ПЫЛИ

Многие виды пыли из-за сильно развитой поверхности частиц способны гореть, самовоспламеняться, образовывать с воздухом взрывоопасные смеси даже в тех случаях, когда исходный материал, из которого получена пыль, является негорючим. Наиболее опасным является свойство многих пылей образовывать с воздухом взрывоопасные смеси. Первичный взрыв возникает при небольших скоплениях пыли вблизи источника воспламенения Взрывная волна и вибрация от первичного взрыва могут поднять в воздух крупные скопления пыли, осевшей в относительном отдалении от места первичного взрыва, и тем самым вызвать вторичный взрыв значительно большей силы. По зарубежным данным [1.33] каждые 60 первичных взрывов сопровождаются 10 вторичными.

Показатели пожаро- и взрывоопасности пылей определяются экспериментально. Поскольку существующие для этого методы не позволяют адекватно воспроизводить различные сочетания реальных условий, при которых возможно загорание или взрыв пыли, результаты соответствующих определений в известной мере условны и относительны.

Среди многочисленных характеристик пожаро- и взрывоопасных свойств пылей основное значение имеют такие показатели, как температура воспламенения и самовоспламенения, концентрационные пределы взрыва, скорость распространения фронта пламени, минимальная энергия зажигания, максимальное давление взрыва и скорость нарастания давления.

Температура воспламенения — наименьшая температура горючего вещества, при которой вещество выделяет горючие пары или газы с такой скоростью, что после воспламенения их от внешнего источника зажигания вещество устойчиво горит.

Температура самовоспламенения — наименьшая температура вещества (или его смеси с воздухом), при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, приводящее к возникновению пламенного горения.

За величину температуры самовоспламенения принимают минимальную температуру стенки реакционного сосуда, при которой наблюдается самовоспламенение смеси Эта температура не является константой данного вещества и зависит от условий эксперимента.

Пыль, взвешенная в воздухе, может воспламеняться только при определенных концентрациях. Различают нижний и верхний пределы воспламенения. Область концентрации между этими пределами называется диапазоном воспламенения.

В зависимости от скорости распространения фронта пламени различают воспламенение, сопровождающееся спокойным сгоранием пыли; вспышки, имеющие скорость горения от 4 до 10 м/с; взрывы, имеющие скорость горения более 100 м/с; детонацию, протекающую со скоростью распространения фронта пламени более 1000 м/с.

За нижний предел воспламенения аэровзвеси твердых веществ принимается наименьшая концентрация вещества в воздухе, при которой смесь способна воспламеняться

Наибольшая концентрация пыли в воздухе, при которой возможен взрыв, называется верхним пределом взрыва (воспламенения). Верхние пределы при

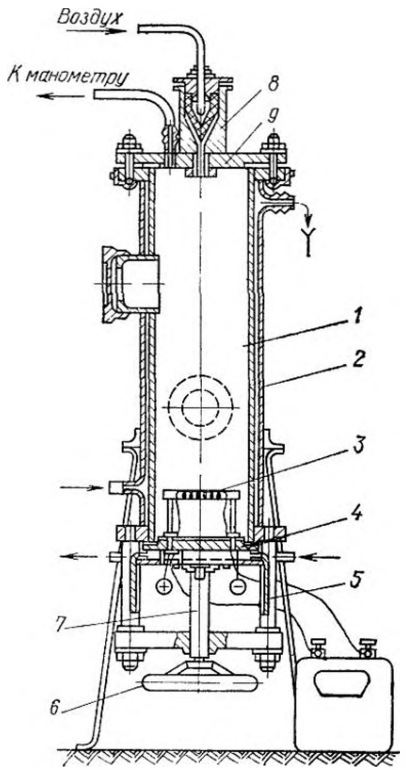


Рис 1.16. Установка конструкции ВНИИПО для определения нижнего предела взрываемости пылей:

1 — взрывной цилиндр; *2* — водяная рубашка; *3* — нагревательный элемент; *4* — нижняя крышка; *5* — крепежные болты; *6* — маховичок; *7* — винт; *8* — форсунка; *9* — верхняя крышка

рассмотрении вопросов пылеулавливания не имеют практического значения. Надежных методов расчета пределов воспламенения не существует.

Так как значение нижнего предела воспламенения зависит от метода его определения, всегда указывается, каким способом оно определялось.

Нижний предел воспламенения чаще определяют с помощью специальной установки ВНИИПО (рис. 1.16). Установка включает в себя взрывной цилиндр *1* и форсунку *8* для распыления навески исследуемой пыли. Распыленная с помощью воздуха, подаваемого в форсунку, пыль воспламеняется от источника воспламенения — нагревательного элемента, состоящего из шамотной пластинки с платиновой обмоткой

Концентрацию пыли при воспламенении или взрыве определяют путем деления количества пыли, перешедшей во взвешенное состояние, на объем взрывного цилиндра.

Нижний предел воспламенения, найденный таким способом, относится к условиям практически неподвижного воздуха. При движении воздуха, содержащего пыль, со скоростью 5 м/с нижний предел повышается в 2—3 раза [1.31].

Под минимальной энергией зажигания взвеси пыли в воздухе понимают наименьшую энергию конденсатора, при разряде которого через воздушный промежуток возникает искра, зажигающая с вероятностью 0,01 наиболее легко воспламеняемую смесь данного вещества с воздухом. Минимальная энергия зажигания позволяет сравнивать чувствительность различных пылей к воспламенению от внешних источников зажигания, а также непосредственно рассчитывать допустимую энергию электрических разрядов во взрывоопасной среде и разрабатывать эффективные противопожарные меры.

Предельно допустимая энергия электрического разряда не должна превышать 40% значения минимальной энергии зажигания. Эту величину учитывают «Правила изготовления взрывозащищенного электрооборудования» (ПИВЭ).

Минимальная энергия зажигания аэровзвесей твердых веществ определяется на установке ВНИИПО по методике, описанной в инструкции ВНИИПО.

Максимальное давление взрыва — это наибольшее давление, которое возникает при взрыве наиболее пожаровзрывоопасной смеси в замкнутом сосуде Максимальное давление взрыва учитывают в расчетах аппаратуры на взрывоустойчивость, в расчетах предохранительных клапанов и взрывных мембран, а также оболочек взрывонепроницаемого электрооборудования.

1.10. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗОЛЫ

Золой при определении характеристик топлива считается остаток, получающийся при прокаливании до постоянной массы навески топлива в присутствии кислорода при 800 °С.

Фазово-минералогические исследования состава золы различных видов топлива показывают, что основной фазой всех видов золы является стекло. Кристаллическая фаза представлена различными количествами кварца, гематита, магнетита и различными силикатами кальция.

Характеристики золы, полученной в результате озоления проб угля в лабораторных условиях, несколько отличаются по физико-химическим свойствам и химическому составу от летучей золы и шлака, образующихся в котлах. Такое отличие в первую очередь определяется температурными условиями. В топочной камере температура

продуктов сгорания значительно выше, чем при озолении топлива в лабораторных условиях (около 800 °С). Поэтому, например, сульфат кальция в топочной камере может практически полностью разлагаться, тогда как в лабораторных условиях может дополнительно образовываться из окиси кальция и двуокиси серы. Кроме того, озоление топлива в лабораторных условиях скорее аналогично слоевому процессу сжигания топлива, а не камерному, преобладающему в энергетике. В первом случае частицы угля и золы соприкасаются друг с другом и вероятность химического взаимодействия частиц различного состава и их спекания значительно больше, чем в камерных топках, где эти частицы разделены друг от друга газовой средой.

Одной из причин, определяющих различие состава и свойств летучей золы по сравнению с лабораторной пробой, является разделение минеральной части топлива в топке на шлак и летучую золу. При этом в шлак, как правило, переходят более легкоплавкие компоненты минеральной части топлива, а летучая зола соответственно обедняется ими. При небольших количествах образующегося шлака, например в топках с твердым шлакоудалением, отличие химического состава летучей золы от лабораторной и от шлака невелико, а в топках с жидким шлакоудалением может быть существенным.

Дисперсный состав золы зависит как от природы топлива, так и от технологических процессов пылеприготовления и пылесжигания. Топлива, содержащие примеси трудноразмалываемой породы, образуют в результате размола и сжигания более крупнодисперсную летучую золу, чем топлива, месторождениям которых сопутствуют глинистые породы. Малозольные топлива, как правило, имеют более мелкодисперсную золу, чем многозольные.

Дисперсный состав летучей золы зависит от степени измельчения топлива в мельничных устройствах, являясь более мелким при размоле топлива в шаровых барабанных мельницах. Наконец, дисперсный состав золы сильно зависит от степени осаждения минеральной части топлива в шлак. При увеличении выхода жидкого шлака повышается дисперсность золы как за счет осаждения более крупных частиц в шлак, так и в результате возгона в топочной камере при высоких температурах некоторых соединений минеральной части топлива с последующей конденсацией их при охлаждении дымовых газов. Наличие высокодисперсных частиц в продуктах сгорания является причиной, обусловливающей в некоторых случаях трудности очистки дымовых газов.

Дисперсный состав летучей золы основных энергетических топлив СССР, определенный в средних пробах, отобранных из газов, поступающих в золоуловители, при различных способах подготовки и сжигания топлив приведен в табл. 1.1 и 1.2.

Процентное содержание золы в топливе обозначают $A^р$, если за исходную массу навески принимается масса рабочего топлива, и $A^с$, если зольность относят к сухой массе топлива. Связь между этими величинами устанавливается соотношением

$$A^р = \frac{A^с (100 - W^р)}{100},$$

где $W^р$ — влажность рабочего топлива, %.

Для сравнительной оценки количества золы, получающейся при сжигании различных видов топлива с целью получения одного и того же количества теплоты, пользуются приведенной зольностью $A^{пр}$, % · МДж/кг,

$$A^{пр} = A^р / Q^р_н,$$

где $Q^р_н$ — низшая теплота сгорания рабочего топлива, МДж/кг.

В зависимости от содержания летучих веществ в топливе, тонкости его размола и режима горения вместе с летучей золой из топки уносится различное количество не полностью сгоревших частиц топлива, изменивших состав и форму под действием высокой температуры. При неудовлетворительном режиме горения, что наиболее часто происходит на установках небольшой мощности, из топки выносятся частицы сажи, окрашивающие дымовые газы в темный цвет.

Частицы, состоящие из летучей золы и недогоревшего топлива, выносимые дымовыми газами из топок котлов, называются уносом. Как правило, при сжигании топ-

Таблица 1.7. **Содержание некоторых микропримесей в земной коре и в золе углей [1.17]**

Элемент	Среднее содержание в земной коре, г/т	Среднее содержание в богатых золах, г/т	Коэффициент обогащения
Бор	3,0	600	200
Германий	7,0	500	70
Мышьяк	5,0	500	100
Уран	2,0	400	200
Бериллий	5,0	300	60
Молибден	15,0	200	13
Свинец	16,0	100	6
Цинк	40,0	200	5
Серебро	0,1	2	20
Скандий	5,0	60	12

Таблица 1.8. Содержание свободной окиси кальция, SO_3, в летучей золе некоторых топлив

Бассейн, месторождение, вид топлива	Марка топлива	Класс топлива	Содержание в летучей золе	
			SO_3, %	$CaO^{св}$, мг-экв/кг
Донецкий	А	Ш, СШ	0,53	125
	Т	Р	0,44	55
	Д	Р	0,50	50
	Г	Р, отсев	0,14	50
Краснобродский Красногорский Листвянский	Т	Р окисленный	0,22	155
Томь-Усинский	1СС, 2СС	Р окисленный	0,12	70
Экибастузский	СС	Р	0,09	10
Ирша-Бородинский	Б2	Р	1,10	3470
Березовское	Б2	Р	1,68	8080
Назаровское	Б2	Р	2,51	7160
Итатское	Б1	Р	1,97	4435
Подмосковный	Б2	Р, ОМСШ	0,64	45
Карагандинский	К	Промпродукт	0,34	70
Челябинский	Б3	Р, МСШ	0,64	190
Черемховский	Д	Р, отсев	0,46	120
Харанорское	Б1	Р	1,29	2440
Волынское	Г	Р	1,08	330
Кизеловское	Г	Р, отсев, К, М	0,42	15
Ангренское	Б2	ОМСШ	2,60	2380
Бакинское	Б2	Р	0,40	175
Воркутинское	Ж	Р, отсев энергетический	0,26	70
Сланец эстонский	Сланец	Мелкий	5,49	6650

лива с выходом летучих веществ до 15% в уносе содержится значительное количество недогоревших частиц, достигающее при неудовлетворительной эксплуатации 40% и более общей массы уноса. При сжигании топлива с высоким содержанием летучих веществ в уносе обычно имеется лишь небольшое количество несгоревшего углерода. Содержание в золе небольшого количества горючих веществ положительно влияет на работу электрофильтров, так как увеличивает электропроводность уноса. Кроме того, частицы золы, содержащие недогоревшее топливо, обладая относительно крупными размерами, улучшают отряхиваемость осадительных электродов (см. разд 6). Однако при слишком большом содержании горючих веществ удельное электрическое сопротивление слоя золы может уменьшиться настолько, что эффективность электрофильтра снизится из-за чрезмерно быстрой потери осевшими на осадительных электродах частицами их заряда.

Благодаря избирательному извлечению из почвы тех или иных веществ корнями растений-углеобразователей в золе содержится повышенное по сравнению с земной корой количество некоторых микропримесей (табл. 1 7).

При этом распределение содержания некоторых элементов в различных по размерам частиц фракциях летучей золы неравномерно и обычно увеличивается с уменьшением размера частиц.

В случае мокрого золоулавливания важное значение имеет содержание в золе щелочеобразующих окислов, основу которых составляет CaO.

Образующийся сульфит кальция ($CaSO_3$) в результате реакций

$$SO_2+H_2O=H_2SO_3;$$

$$H_2SO_3+CaO+H_2O=CaSO_3+2H_2O$$

может приводить к зарастанию элементов мокрого золоуловителя трудноудалимыми отложениями. Данные о содержании в золе свободной окиси кальция приведены в табл. 1.8.

1.11. СОСТАВ ГАЗОВ

Газами, обычно подлежащими очистке, являются воздух или дымовые газы. Плотность, вязкость, теплоемкость, молекулярная масса, газовая постоянная и другие существенные для процессов пыле- и золоулавливания свойства воздуха и дымовых газов, образующихся при сжигании различных видов топлива, мало отличаются между собой, поэтому при отсутствии других данных значения перечисленных величин для дымовых газов могут быть приняты по табличным данным для воздуха. Если подлежащие очистке газы заметно отличаются по своему составу от воздуха или дымовых газов, то это может быть связано только с особенностями технологического процесса, сопровождающегося выделением этих газов, и данные об их составе должны быть выданы организацией, связанной с разработкой или эксплуатацией соответствующего технологического оборудования.

Содержание компонента i в смеси газов, состоящей из n компонентов, может быть задано в процентах A или в долях a от единицы объема, в процентах B или долях b от единицы массы. Для пересчета этих величин при переходе от одного способа задания состава газовой смеси к другому служат соотношения

$$a_i = \frac{A_i}{100} = \frac{b_i M_i}{\sum_{i=1}^{n} b_i M_i} = \frac{b_i \rho_i}{\sum_{i=1}^{n} b_i \rho_i}; \quad (1.19)$$

$$b_i = \frac{B_i}{100} = \frac{a_i/M_i}{\sum_{i=1}^{n} a_i/M_i} = \frac{a_i \rho_i}{\sum_{i=1}^{n} b_i \rho_i}, \quad (1.20)$$

где M — молекулярная масса газа; ρ — плотность газа.

В технике пыле- и золоулавливания к анализу химического состава газов прибегают главным образом в тех случаях, когда это оказывается удобным для выявления присосов воздуха в газоходы и аппараты, работающие под разрежением.

Для этого достаточно установить на входе в газоочистной аппарат и на выходе из него содержание какого-либо из легко поддающихся определению компонентов либо отсутствующих в атмосферном воздухе, либо присутствующих в нем в отличной от очищаемых газов концентрации [1 2].

В случае дымовых газов такими компонентами могут быть CO_2 или O_2. Действительно, при известном объемном содержании на входе и выходе двуокиси углерода CO'_2 и CO''_2, абсолютное количество которого при этом, как правило, не меняется, коэффициент присоса — отношение объема присосанного воздуха к объему газов на входе в аппарат — с достаточной точностью можно найти по формуле

$$k_{пр} = \frac{CO'_2 - CO''_2}{CO'_2}.$$

Если известно содержание кислорода O'_2, O''_2, $k_{пр}$ определяют исходя из того, что в присасываемом воздухе его содержится 21%:

$$k_{пр} = \frac{O''_2 - O'_2}{21 - O'_2}.$$

Пример. Содержание в газах углекислоты и кислорода на входе в пылеуловитель составляет соответственно 12,5 и 8,5%, на выходе — 12 и 9%. Коэффициент присоса будет равен:

$$k_{пр} = \frac{12{,}5 - 12}{12{,}5} = \frac{9 - 8{,}5}{21 - 8{,}5} = 0{,}04.$$

Анализ газов на CO_2 и O_2 обычно производится переносными химическими газоанализаторами.

1.12. ПЛОТНОСТЬ, ВЯЗКОСТЬ, ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ЭНТАЛЬПИЯ ГАЗОВ

Для нормальных условий (абсолютная температура T_0=273 К и барометрическое давление $p_{бар}$=101 325 Па≈0,101 МПа) значения плотности ρ_0, кг/м³, и динамического коэффициента вязкости μ_0, Н·с/м², для наиболее распространенных газов приведены в приложении I.

Динамический коэффициент вязкости μ часто называют просто вязкостью. Наряду с динамическим иногда применяется кинематический коэффициент вязкости ν, м²/с:

$$\nu = \mu/\rho. \quad (1.21)$$

В системах пыле- и золоулавливания газ находится под абсолютным давлением $p_{абс}$, которое складывается из атмосферного барометрического $p_{бар}$ и избыточного давления или разрежения p, Па, т. е.

$$p_{абс} = p_{бар} \pm p.$$

Плотность газов, находящихся при температуре t, °С, под избыточным давлением (разрежением), определяют из соотношения

$$\rho = \rho_0 \frac{101\,325\,(273 + t)}{273\,(p_{бар} \pm p)}. \quad (1.22)$$

Значение динамического коэффициента вязкости зависит только от абсолютной температуры T, К, и не зависит от давления:

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2}. \quad (1.23)$$

Здесь C — константа Сезерленда, значения которой для наиболее распространенных газов приведены в приложении I

Удельная теплоемкость газа c, т. е. количество теплоты, которое требуется сообщить единице количества газа для нагрева на 1°С, зависит от того, происходит ли тепловой процесс при постоянном давлении (теплоемкость c_p) или при постоянном объеме (теплоемкость c_v).

Удельную теплоемкость обычно называют просто теплоемкостью Количество газа может быть измерено в кг, м³ и молях; сообразно этому различают и три вида теплоемкостей· массовую, объемную и мольную В расчетные уравнения, которыми пользуются в технике пыле- и золоулавливания, входит, как правило, массовая теплоемкость c_p (тепловые процессы в газоочистных аппаратах можно рассматривать, как протекающие при постоянном давлении).

Теплоемкость реальных газов зависит от температуры и давления, при которых они находятся, однако в тех интервалах температуры и давления, с которыми приходится сталкиваться в технике пыле- и золоулавливания, эта зависимость достаточно слаба и, как правило, не учитывается.

В тепловых расчетах, связанных с влажным газом, часто применяется величина i, Дж/кг, называемая **энтальпией** и представляющая собой количество теплоты, которое необходимо подвести к 1 кг газа при постоянном давлении, чтобы повысить его температуру от 0 °С до заданного значения температуры:

$$i = c_p t. \qquad (1.24)$$

Количество теплоты Q, Дж/кг, сообщаемого 1 кг газа при постоянном давлении, равно разности энтальпий начального и конечного состояний газа:

$$Q = i_2 - i_1.$$

Плотность, кг/м³, вязкость, Н·с/м², и теплоемкость, Дж/кг, смеси газов, состоящей из n компонентов, концентрация которых в долях от единицы объема a_1, a_2, ..., a_n и в долях от единицы массы b_1, b_2, ..., b_n известна (переход от одних долей к другим см. в § 1.11), находят из соотношений

$$\rho_{см} = a_1\rho_1 + a_2\rho_2 + \ldots + a_n\rho_n; \qquad (1.25)$$

$$\mu_{см} = \rho_{см}\left(\frac{\mu_1}{a_1\rho_1} + \frac{\mu_2}{a_2\rho_2} + \ldots + \frac{\mu_n}{a_n\rho_n}\right); \qquad (1.26)$$

$$c_{p,см} = b_1 c_{p,1} + b_2 c_{p,2} + \ldots + b_n c_{p,n}. \qquad (1.27)$$

Как правило, одним из компонентов подлежащих очистке газов являются пары воды, концентрация которых может быть задана не долей от единицы объема или массы смеси газов, а одной из других величин, подробно рассматриваемых в § 1.13, в частности величиной концентрации водяных паров f, отнесенной к 1 м³ сухого газа.

Если влажность газов f задана, то их плотность может быть найдена по уравнению

$$\rho_{0,вл} = \frac{\rho_{0,сух} + f}{1 + \dfrac{f}{0{,}804}}, \qquad (1.28)$$

где $\rho_{0,сух}$ — плотность сухих газов при нормальных условиях; 0,804 — плотность водяного пара при нормальных условиях.

Теплоемкость и энтальпию влажных газов, также как и влагосодержание x, относят к единице массы сухой части газа:

$$c_{p,вл} = c_{p,сух} + c_п x; \qquad (1.29)$$

$$i = c_{p,вл} t.$$

Здесь $c_{p,вл}$, $c_{p,сух}$ и $c_п$ — теплоемкость соответственно влажного газа, сухого газа и водяного пара.

1.13. ВЛАЖНОСТЬ ГАЗОВ

Влажность газов. Водяной пар, почти всегда присутствующий в подлежащей очистке смеси газов, относится вместе с тем к числу наименее стабильных из ее компонентов. Концентрация водяных паров может существенно изменяться в результате специального увлажнения газов для повышения эффективности их очистки в сухих электрофильтрах, в результате обработки газов в мокрых газоочистных аппаратах и т. п. Учитывая специфические особенности водяного пара, как одного из компонентов подлежащей очистке смеси газов, для выражения влагосодержания газов наряду с рассмотренными в § 1.11 часто применяются и некоторые другие способы. Концентрацию водяных паров, например, часто относят не к общему объему или массе смеси газов, включая и водяной пар, а к той части смеси, которая состоит из относительно стабильных компонентов, т. е. к объему или массе сухих газов.

Для выражения влагосодержания газов чаще всего применяются следующие способы:

1) концентрация водяных паров f, отнесенная к 1 м³ сухого газа при нормальных условиях (0 °С, 101 325 Па), г/м³ сух; концентрация водяных паров f', отнесенная к 1 м³ влажного газа при нормальных условиях, г/м³ вл; концентрация водяных паров f'', отнесенная к 1 м³ влажного газа при данных температуре и давлении, г/м³;

2) парциальное давление водяных паров p_w, равное произведению объемной доли пара на общее давление смеси, Па;

3) объемный процент $(p_w/p_{абс})100$, где $p_{абс}$ — абсолютное давление, которое складывается из атмосферного барометрического $p_{бар}$ и избыточного давления (разрежения) в газоходе или аппарате, $p_{абс} = p_{бар} \pm p$, Па;

4) концентрация водных паров, отнесенная к единице массы сухого газа, d, г/кг сух, или x, кг/кг сух,

5) относительная влажность, т. е. степень приближения к насыщенному состоянию при данных условиях:

$$\varphi = f''/f''_{нас} = f'/f'_{нас} = p_w/p_{w,нас} = f/f_{нас} = x/x_{нас}.$$

Обычно φ выражают не в долях от единицы, а в процентах.

Связь между различными способами выражения влагосодержания газов устанавливается следующими соотношениями:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f'} - \frac{1}{804} \text{ или } \frac{1}{f'} = \frac{1}{f} + \frac{1}{804}; \quad (1.30)$$

$$f' = 804\frac{p_w}{p}; \quad (1.31)$$

$$f'' = \frac{0{,}36p}{(273+t)\left(\frac{1}{f}+\frac{1}{804}\right)}. \quad (1.32)$$

При решении вопросов, связанных с проектированием и эксплуатацией газоочистных установок, необходимо учитывать температуру конденсации водяных паров и других жидкостей, которые могут присутствовать в подлежащих очистке газах. Например, в дымовых газах, образующихся при сжигании сернистых топлив, наряду с SO_2 присутствует некоторое количество SO_3, образующего в результате реакции с парами воды раствор H_2SO_4, конденсирующейся при более высокой температуре, чем водяные пары.

Температура, при которой газ находится в состоянии насыщения парами воды или другой жидкости и при которой начинается выпадение конденсата, называется точкой росы. Значения точки росы для паров воды и серной кислоты, экспериментально найденные при сжигании некоторых видов топлива, приведены в табл. 1.9.

При давлении, близком к барометрическому, точка росы для влажного воздуха и дымовых газов, образующихся при сжигании малосернистых топлив, может быть найдена с помощью i, x-диаграммы, связывающей между собой при заданном барометрическом давлении следующие параметры влажного воздуха: температуру t, °С; энтальпию i паровоздушной смеси, отнесенную к 1 кг сухого воздуха и 1 кг водяного пара, кДж/кг; влагосодержание x, кг/кг сухого воздуха; относительную влажность φ, %; парциальное давление водяного пара, содержащегося в паровоздушной смеси, p_w, кПа. Диаграмма i, x может быть построена для любого заданного барометрического давления.

На территории СССР расчетное барометрическое давление колеблется от 91,5 до 101,3 кПа (685 — 760 мм рт. ст.) и нормируется с интервалом 2 кПа (15 мм рт. ст). В соответствии с этим i, x-диаграммы разработаны для каждого из нормируемых барометрических давлений.

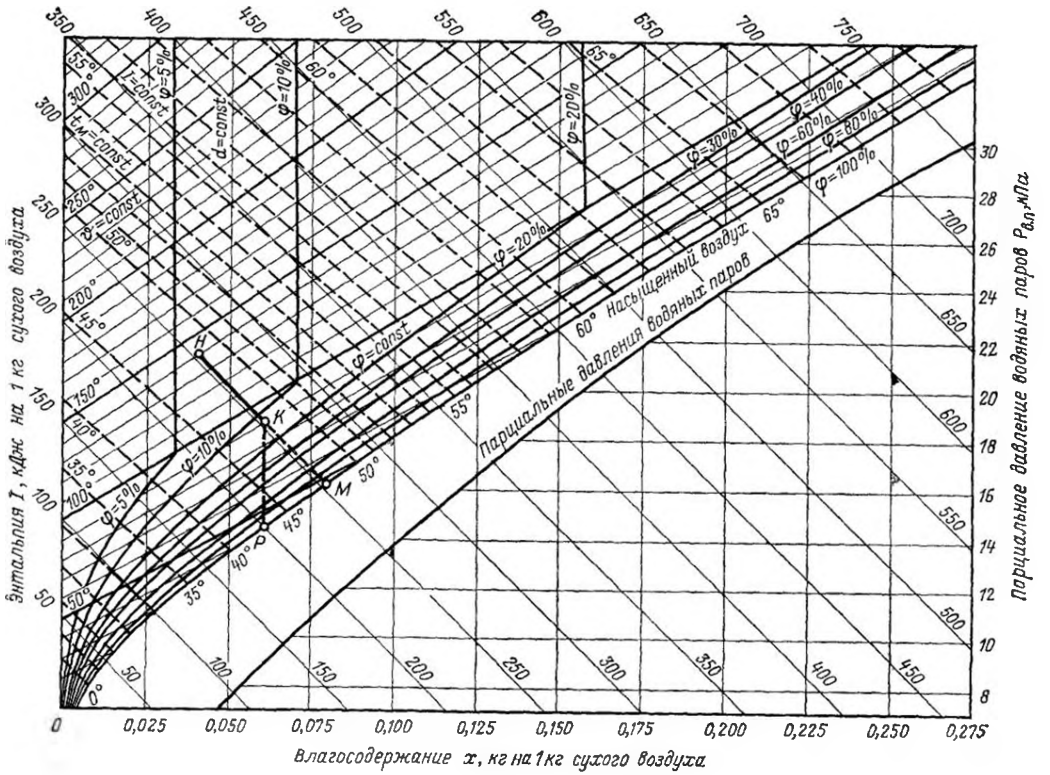


Рис. 1.17. i, x-диаграмма для влажного воздуха

Таблица 1.9. Температура точки росы дымовых газов наиболее распространенных топлив

Бассейн, месторождение, вид топлива	Марка топлива	Класс топлива	Температура точки росы, °С по H_2O, t_{H_2O}	Температура точки росы, °С по SO_3, $t_{H_2SO_4}$
Донецкий	А	Ш, СШ	28,2	107
	ПА	Р	37,8	93
	Т	Р	34,3	125
	Ж, К, ОС	Промпродукт	39,0	122
	Т	Р	38,9	132
	Д	Р	35,3	135
	Г	Промпродукт	40,4	132
	Т	Р, отсев	33,8	78
Краснобродский	Т	Р окисленный	35,3	78
Красногорский				
Листвянский				
Томь-Усинский	1СС, 2СС	Р окисленный	38,5	83
Экибастузский	СС	Р	39,6	65
Ирша-Бородинский	Б2	Р	49,2	—
Березовское	Б2	Р	49,2	—
Назаровское	Б2	Р	52,5	65
Итатское	Б1	Р	53,3	65
Карагандинский	К	Р	38,1	93
Подмосковный	Б2	Р, ОМСШ	52,9	140
Карагандинский	К	Промпродукт	40,2	91
Челябинский	Б3	Р, МСШ	46,0	71
Богословский	Б3	Р	50,8	65
Черемховский	Д	Р, отсев	42,5	105
Харанорское	Б1	Р	52,7	76
Волынское	Г	Р	39,6	135
Кизеловское	Г	Р, отсев, К, М	38,9	135
	Г	Промпродукт	39,9	153
Ангренское	Б2	ОМСШ	48,9	128
Бакинское	Б2	Р	56,5	100
Воркутинское	Ж	Р, отсев энергетический	37,3	93
Сланец эстонский	Сланец	Мелкий	49,4	—
Торф	Фрезерный	Крупный, средний, мелкий	62,1	65

Продолжение табл. 1.9

Бассейн, место рождение, вид топлива	Марка топлива	Класс топлива	Температура точки росы, °С по H_2O, t_{H_2O}	Температура точки росы, °С по SO_3, $t_{H_2SO_4}$
Мазут	—	Малосернистый	45,4	125
	—	Сернистый	44,3	145
	—	Высокосернистый	43,4	155

На рис. 1.17 приведена i, x-диаграмма, построенная для влажного воздуха, находящегося при барометрическом давлении 99,9 кПа (745 мм рт. ст.).

По оси ординат диаграммы отложена энтальпия влажного воздуха i, кДж/кг сухого воздуха.

Для лучшего использования площади диаграммы ось абсцисс проведена под углом 135° к оси ординат. На ней отложены значения абсолютной влажности x, кг/кг сухого воздуха. Соответствующие точки спроектированы на горизонтальную (условную) ось x.

На диаграмме нанесены линии постоянных значений x, идущие вертикально; постоянных значений i, идущие под углом 135° к оси ординат; постоянных температур воздуха t (газа) и постоянных значений относительной влажности φ. Температура t иначе называется температурой «сухого термометра», хотя в действительности это температура влажного ненасыщенного газа.

Кривая для $\varphi=100\%$ является пограничной, точки на ней соответствуют состоянию насыщенного воздуха. Область под кривой $\varphi=100\%$ является областью влажного пара (область «тумана»).

Под кривой $\varphi=100\%$ построена линия парциальных давлений водяного пара $p_w=f(x)$. Значения p_w можно прочитать на правой крайней ординате диаграммы.

Кроме того, на диаграмму нанесены пунктиром линии постоянных температур так называемого мокрого термометра $t_м$, идущие под небольшим углом к линиям $i=\text{const}$. В случае насыщенности парами воздуха ($\varphi=100\%$) «мокрый термометр» (т. е. термометр, измерительный конец которого увлажнен) покажет ту же температуру, что и сухой. Поэтому изотермы t и $t_м$ для одинаковых температур на кривой $\varphi=100\%$ пересекаются.

Для определения температуры конденсации водяных паров необходимо из точки, характеризующей состояние влажного газа, провести линию $x=\text{const}$ до пересечения с кривой $\varphi=100\%$. Изотерма, проходящая

через эту точку, определит температуру конденсации водяных паров, т. е. точку росы.

При многообразии существующих методов определения влажности газов [1.26, 1.27] в практике обследования газовоздушных выбросов промышленных предприятий чаще всего используется наиболее простой по аппаратурному оформлению конденсационный метод.

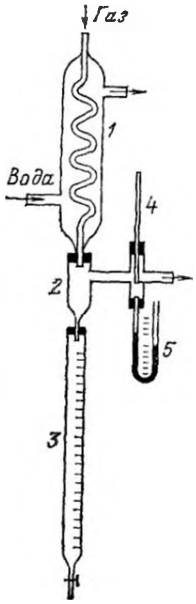


Рис. 1.18. Прибор для определения влажности газов конденсационным методом:

1 — холодильник-конденсатор; 2 — влагоотделитель; 3 — бюретка для измерения количества собранного конденсата; 4 — термометр; 5 — манометр

Сущность метода состоит в том, что газ, не насыщенный водяными парами, охлаждают до любой произвольно выбранной температуры ниже точки росы и замеряют количество сконденсированной влаги, а также температуру, до которой охладился газ. Влажность определяют как сумму отнесенной к единице объема газа сконденсированной влаги и влагосодержания насыщенного газа при данных температуре и давлении.

Прибор для определения влажности конденсационным методом приведен на рис. 1.18. Количество газа, пропущенного через прибор, определяют с помощью реометра или другого расходомера, а влагосодержание насыщенного газа, покидающего прибор, — по таблицам прил. IV.

Для непосредственного определения точки росы паров воды или других жидкостей регистрируют температуру, при которой на охлаждаемой тем или иным способом поверхности, обтекаемой потоком исследуемого газа, появляется пленка конденсата. Конструкция прибора ВТИ, основанного на таком принципе действия, показана на рис. 1.19. Основной деталью прибора является измерительный колпачок из молибденового стекла, на поверхности которого на расстоянии 7 мм друг от друга впаяны два платиновых электрода. К электродам подводится напряжение 12 В. Меж-

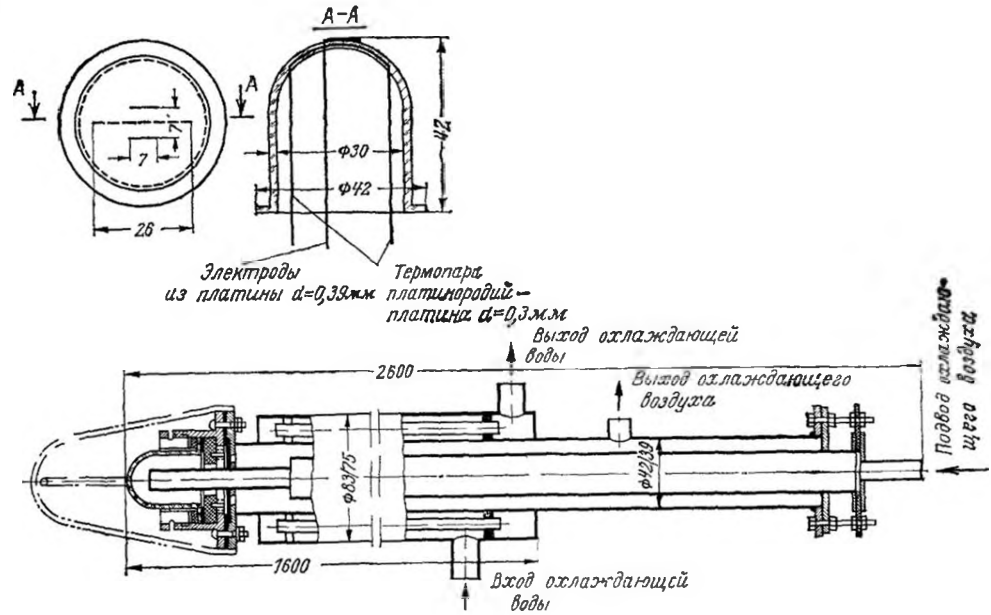


Рис. 1.19. Прибор ВТИ для определения точки росы.

ду ними в стекло впаяна платино-платинородиевая термопара.

Прибор устанавливается в газоход перпендикулярно движению газов или слегка наклонно навстречу потоку так, чтобы колпачок хорошо омывался газами и не находился в аэродинамической тени. После нагрева прибора внутрь колпачка по центральной трубе подается охлаждающий воздух. Когда температура колпачка снижается ниже точки росы, на его поверхности появляется пленка влаги, резко снижающая сопротивление участка между электродами. Изменения температуры и сопротивления записываются. Построенные на основе замеров графические зависимости позволяют наглядно судить о температуре точки росы.

1.14. РАСХОД ГАЗОВ

Расход газов, м³/с, если не известен заранее или не может быть найден путем соответствующих расчетов, находится как произведение площади сечения f газохода или аппарата на среднюю для этого сечения скорость $w_{ср}$, определяемую экспериментально:

$$Q=fw_{ср}. \qquad (1.33)$$

Скорость потока, м/с, запыленных газов обычно определяют с помощью пневмометрических трубок, используя соотношение

$$w=\sqrt{2p_д/\rho_г}, \qquad (1.34)$$

где $p_д$ — динамическое давление газов, Па; $\rho_г$ — плотность газов, кг/м³.

Динамическое давление, определяемое пневмометрическими трубками, представляет собой разность между полным давлением потока $p_{пол}$, действующим в направлении вектора скорости газов, и статическим давлением p, действующим в направлении, перпендикулярном вектору скорости:

$$p_д=p_{пол}-p. \qquad (1.35)$$

Поскольку давления (перепады давлений) при пылегазовых замерах чаще всего измеряются приборами, дающими значения измеряемых величин в высотах столба воды, ртути или другой жидкости, при этом удобно пользоваться уравнениями, включающими величины в единицах системы МКГСС, кгс/м² (мм вод. ст.):

$$w=\sqrt{2P_д g/\gamma} \qquad (1.34')$$

и

$$P_д=P_{пол}-P, \qquad (1.35')$$

где $g=9{,}81$ — ускорение силы тяжести, м/с²; γ — удельный вес газа, кгс/м³.

Пневмометрическая трубка имеет два канала, один из которых всегда воспринимает полное давление, а другой, в зависимости от конструкции трубки, либо только статическое давление либо статическое давление за вычетом динамического или несколько искаженного динамического. При подключении обоих каналов к показывающему прибору для измерения перепадов давления таким образом, чтобы воспринимаемые давления были направлены навстречу друг другу, прибор покажет разность между этими давлениями, т. е. в зависимости от конструкции трубки либо просто динамическое давление либо примерно удвоенное динамическое давление. Поэтому показания динамических давлений, полученные с помощью пневмометрических трубок, приходится умножать на поправочный коэффициент K, являющийся безразмерной величиной и представляющий собой отношение истинного значения $p_д$, Па, или $P_д$, мм вод. ст., к замеряемой его величине p_x или P_x:

$$p_д=p_xK, \qquad (1.36)$$

или

$$P_д=P_xK. \qquad (1.36')$$

Коэффициент K для трубки определенной конструкции находится параллельными замерами скорости газового потока данной трубкой и трубкой, коэффициент которой известен, или на тарировочных стендах в специальных лабораториях.

Материалом для изготовления пневмометрических трубок обычно служит латунь или сталь. Трубки для температур газового потока до 200 °С паяют оловом, а для более высоких температур — твердым припоем, например серебром, или пользуются сваркой.

Наиболее распространенные конструкции пневмометрических трубок приведены на рис. 1.20.

Трубка Прандтля (рис. 1.20,*а*) имеет головку с полусферическим наконечником, устанавливаемую параллельно движению газов. В головке имеется центральное сверление, соединяющееся с одним из каналов трубки. Через этот канал на показывающий прибор передается давление, соответствующее полному давлению движущегося потока, набегающего на полусферический наконечник.

На боковой поверхности головки имеются щелевые отверстия, сообщающиеся с другим каналом трубки. Отверстия воспринимают и передают на показывающий прибор лишь статическое давление, причем почти без искажений благодаря небольшой ширине щелей и их расположению в зоне нулевого динамического давления. Поэтому значение коэффициента K для трубки практически может быть принято равным единице. Недостатком трубки является подверженность щелей забиванию при работе на запыленном потоке в связи с небольшой их шириной.

Значительно надежнее работают в условиях запыленности изображенные на

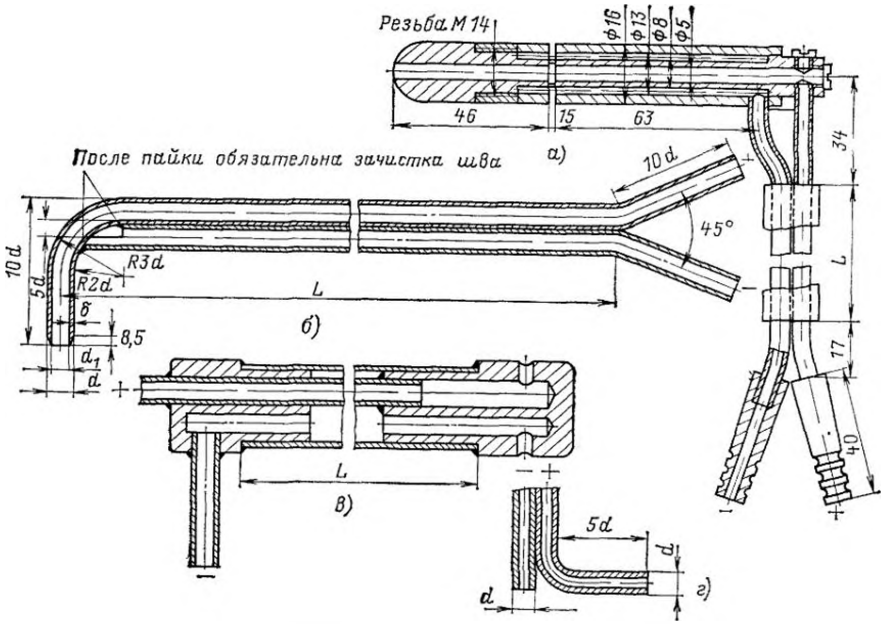


Рис. 1.20. Пневмометрические трубки:

а — трубка Прандтля; *б* — трубка конструкции НИИОГаз; *в* — трубка конструкции Гинцветмет; *г* — трубка Пито. Рекомендуемые значения d_1 в зависимости от L: L=0,5÷1,0 м; d_1=4 мм; L=1,0÷1,5 м; d_1=5 мм; L=1,5÷3 м; d_1=6 мм;

Тип трубки	Пито	Прандтля	НИИОГаз	Гинцветмет
Коэффициент K	1±0,1	1±0,04	0,51±0,02	0,49

рис. 1.20,*б* и *в* трубки НИИОГаз и Гинцветмет, у которых отверстия для замера статических давлений имеют большие размеры. Коэффициент K для обеих трубок составляет примерно 0,5.

В практике пылеулавливания для измерений динамических напоров пневмометрическими трубками и для измерений статических давлений в газоходах применяются U-образные манометры, тягонапоромеры типа ТНЖ, микроманометры типа ММН или другого типа.

Важным условием для получения достоверных результатов измерений пневмометрическими трубками является правильный выбор сечений газоходов для замеров. Сечения должны располагаться на прямолинейных, желательно вертикальных участках, имеющих равную площадь на всем протяжении и достаточно удаленных от фасонных частей — колен, диффузоров, шиберов. На участках не должны иметь места отложения пыли. Длина участков должна составлять восемь-девять условных диаметров, причем сечение для измерения необходимо располагать в третьей четверти длины участка по ходу газов. Участки круглого сечения следует предпочитать квадратным, а квадратные — прямоугольным.

Если участок не удовлетворяет перечисленным требованиям или имеются значительные возмущения газового потока на входе в участок, например из-за вращательного движения газов, выходящих из циклона, то в начале участка рекомендуется установить успокоительную решетку.

При соблюдении всех требований, предъявляемых к выбору сечений для замеров, в них сохранится некоторая неравномерность динамических давлений. Каждое измерение пневмометрической трубкой относится лишь к одной точке сечения газохода, поэтому измерения приходится вести в разных местах сечений с вычислением среднего значения динамического давления.

Газоходы круглого сечения условно разбивают на ряд концентрических колец с равновеликими площадями, и динамические давления пневмометрической трубкой замеряют в отдельных кольцах. Замеры производят в четырех точках каждого кольца по взаимно перпендикулярным диаметрам.

Газоходы прямоугольного сечения обычно разбивают на ряд равновеликих прямоугольников, подобных по форме сечению газохода, и замеры выполняют в центре каждого прямоугольника.

Считается, что достаточно надежные результаты могут быть получены, если стороны прямоугольников не будут превышать

150—200 мм, а газоходы круглого сечения в зависимости от диаметра будут разбиты на следующее число колец:

Диаметр газохода, мм	200	200—400	400—600
Число колец, шт . .	3	4	5

Диаметр газохода, мм	600—800	800—1000	>1000
Число колец, шт . .	6	8	10

Однако если требования, предъявляемые к выбору сечений для замеров, выдержать не удалось, то число колец должно быть увеличено.

Координаты точек замера для каждого кольца могут быть определены по формуле

$$l_x = R\sqrt{\frac{2x-1}{2n}}, \qquad (1.37)$$

где l_x — расстояние точки замера от центра газохода, м; x — порядковый номер кольца; n — число колец, на которые разделена площадь газохода, шт.

В выбранных сечениях газоходов прорезают отверстия и приваривают штуцера высотой 20—25 мм с навинчивающимися крышками. На газоходы круглого сечения взаимно перпендикулярно приваривают два штуцера. На газоходах прямоугольного сечения число штуцеров должно быть таким, чтобы наконечником пневмометрической трубки можно было попасть в центр любого прямоугольника, на которые разбиты выбранные сечения.

Среднее динамическое давление вычисляется как частное от деления суммы замеренных динамических давлений на число измерений. Подставив значение среднего динамического давления в формулу (1 34) или (1 34′), находят для данного сечения среднюю скорость.

Для снятия аэродинамической характеристики пыле- и золоулавливающих аппаратов и для приведения расхода газов к нормальным условиям необходимо измерение статических давлений. Если движение потока не имеет вращательного характера, то статическое давление мало изменяется по сечению и поэтому измеряется через отверстия в стенках газохода, снабженные патрубками для соединения с показывающими приборами. Отверстия для замера статического давления выполняются диаметром 5—8 мм с последующей зачисткой от заусенцев. При больших размерах сечений для большей точности замеров выполняется несколько штуцеров по периметру газохода, которые соединяются резиновым шлангом или металлической трубкой.

Статическое давление может быть также измерено пневмометрическими трубками, имеющими коэффициент $K=1$ (типа Прандтля). В этом случае от показывающего прибора отсоединяется шланг, сообщающийся с воспринимающим полное давление каналом пневмометрической трубки. При этом прибор покажет статическое давление в данной точке. Замеряя статическое давление, так же как и динамическое, необходимо следить за тем, чтобы трубка установилась строго перпендикулярно потоку, а головка трубки располагалась по оси газохода.

Замеры статического давления необходимо производить сразу же после измерения динамических давлений, с тем чтобы эти величины определялись при одном и том же режиме работы системы пыле- или золоулавливания.

1.15. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ ГАЗОВ

В технике пыле- и золоулавливания под **запыленностью** понимают выраженную в граммах (при очень низких концентрациях — в миллиграммах) массу частиц, содержащихся в 1 м³ газа при нормальных условиях.

Запыленность газов может быть определена прямым или косвенными методами. Прямой метод заключается в отборе пробы запыленного газа и взвешивании осажденных из нее частиц с последующим отнесением их массы к единице объема газа. Для определения запыленности газов косвенными методами используется зависимость физических свойств запыленного потока — степени поглощения световыхи тепловых лучей, цвета, способности воспринимать электростатический заряд и т. п. — от концентрации пыли. При этом в большинстве случаев требуется произвести предварительную тарировку используемого для определения запыленности устройства по прямому методу.

При проведении испытаний пылеулавливающих установок для определения запыленности газов всегда используется прямой метод, дающий наиболее достоверные результаты. Косвенные методы могут быть использованы для эксплуатационного контроля.

Прямой метод определения запыленности газов

Отбору проб при определении запыленности газов прямым методом предшествует снятие поля скоростей. Обе операции осуществляются с использованием одного и того же сечения участка газохода, требования к выбору которого приведены в § 1.14. При этом для учета неравномерности распределения концентрации частиц по сечению газохода снимают поле запыленности, отбирая пробы в тех же точках сечения, которые ранее использовались для снятия поля скоростей.

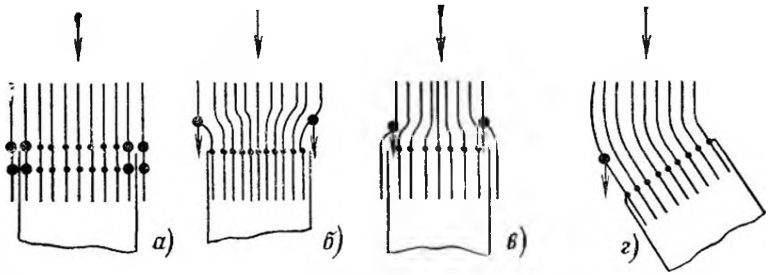


Рис. 1.21. Возможные ошибки при отборе газов для определения запыленности:
● — крупные частицы; ••• — мелкие частицы; *а* — правильная скорость отбора; *б* — повышенная *в* — пониженная, *г* — при правильной скорости отбора сечение входного отверстия пылезаборной трубки не перпендикулярно оси потока

Подсчет средней по сечению запыленности газов производится по формуле

$$c_{ср} = \frac{c_1 w_1 + c_2 w_2 + \cdots + c_n w_n}{w_1 + w_2 + \cdots + w_n}, \quad (1.38)$$

где $c_1, c_2, \ldots, c_n$ — средние значения запыленности газов в отдельных участках газохода, г/м³; $w_1, w_2, \ldots, w_n$ — средние скорости там же, м/с.

Подобное определение запыленности газа трудоемко, так как требует отбора проб из многих точек сечения газохода. Поэтому в тех случаях, когда можно предполагать более или менее постоянным распределение концентрации частиц по сечению газохода, средняя запыленность газа при последующих определениях может быть найдена путем отбора проб из одной точки сечения газохода с последующим умножением полученных значений запыленности в этой точке на так называемый коэффициент поля запыленности.

Коэффициент поля запыленности находят по следующему соотношению:

$$k_п = \frac{c_{ср}}{c_0}, \quad (1.39)$$

где c_0 — запыленность газов в выбранной основной точке (обычно в геометрическом центре сечения), г/м³.

Это же соотношение используют в дальнейшем при повторных замерах для нахождения средней запыленности по замеренной величине c_0:

$$c_{ср} = k_п c_0. \quad (1.39')$$

На точность результатов определения запыленности влияет скорость газов во входном отверстии используемого пробоотборного устройства, которая должна быть равна скорости запыленного потока в данной точке сечения газохода (изокинетический отбор газа). Если скорость отбора превышает скорость газового потока, более крупные частицы пыли из внешней части отбираемого объема газа, стремясь по инерции сохранить прежнее направление движения, могут пройти мимо входного отверстия пробоотборного устройства. В результате полученное значение запыленности окажется заниженным, а отобранная пыль будет более мелкой. При отборе с пониженной скоростью может произойти обратное явление — более крупные частицы пыли из внешней отклоняемой и не входящей в отбираемый объем части газового потока по инерции пройдут во входное отверстие пробоотборного устройства. В результате полученное значение запыленности окажется завышенным, а отобранная пыль будет более крупной. При отклонении оси входного отверстия от направления газового потока даже при соблюдении равенства скоростей будут получены заниженные результаты определения запыленности, а отобранная пыль будет более мелкой. Перечисленные явления наглядно иллюстрирует рис. 1.21.

Приведенные рассуждения полностью справедливы для случая отбора газа через трубки с очень тонкими стенками. Практически же газ отбирается с помощью пробоотборных устройств, имеющих значительные наружные размеры по сравнению с размерами входного отверстия. Из-за этого перед пробоотборным устройством может образоваться зона застоя с пониженной скоростью газов и заметным искривлением линий тока.

Некоторое повышение скорости отбора по сравнению с изокинетической способствует размыванию этой зоны и получению более точных результатов определения запыленности газов. Поэтому скорость отбора газа предпочтительно несколько повышать и тем больше, чем большие возмущения газового потока способно вызвать применяемое пробоотборное устройство.

Повышение скорости отбора, необходимое для получения действительных значений запыленности при использовании различных пробоотборных устройств, зависит от множества различных факторов, в том числе от дисперсного состава частиц, и не поддается точному определению.

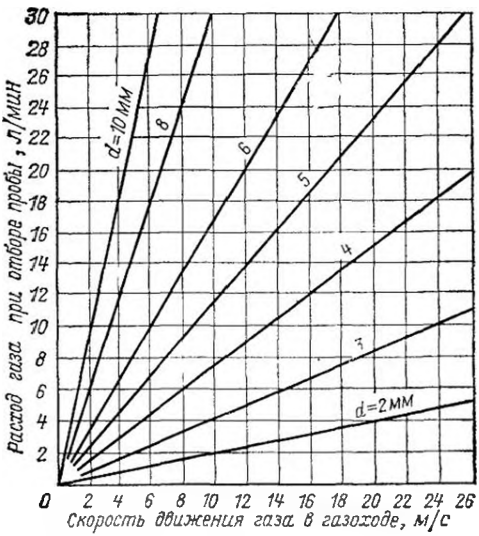


Рис. 1.22. Номограмма для подбора диаметра наконечника пылезаборной трубки

Расход газов, м³/с, необходимый по крайней мере для формального соблюдения условий, обеспечивающих представительность отбираемой пробы, при заданном диаметре пылезаборного отверстия d_0, м, может быть определен по формуле

$$Q_{отб} = \frac{\pi d^2_0}{4} w_г. \qquad (1.40)$$

Эта формула позволяет перейти к более удобному для практического использования выражению расхода газов в литрах в минуту:

$$q_{отб} = \frac{Q_{отб} \cdot 60}{1000} = 47\,100 d^2_0 w_г. \qquad (1.41)$$

Вместо расчетов по формуле (1.41) для получения необходимых величин можно пользоваться номограммой, приведенной на рис. 1.22.

Заборные устройства. Осаждение частиц для последующего взвешивания при определении запыленности может производиться внутри газохода или снаружи.

Аппаратура для определения запыленности газов прямым методом состоит из заборной трубки (при осаждении пыли вне газохода), устройства для осаждения пыли, устройства для измерения расхода отбираемых газов и средства для отсоса газов.

Заборные трубки снабжаются электрическим (реже паровым) обогревом. При температуре нагрева стенок трубки выше температуры отбираемого газа за счет термофореза уменьшается осаждение пыли на ее стенках. При высоком влагосодержании газов необходим обогрев для предотвращения конденсации водяных паров.

Наиболее распространены заборные трубки НИИОГаз и Гинцветмет. Существенных различий в представительности отбираемых проб или простоте изготовления трубки НИИОГаз и Гинцветмет не имеют, на рис. 1.23 приводится конструкция только одной из них. Во избежание осаждения частиц в канале трубки во время отбора пробы скорость газов рекомендуется поддерживать равной 20—30 м/с; скорости более 30 м/с значительно увеличивают гидравлическое сопротивление трубки. Для того чтобы одной и той же заборной трубкой можно было пользоваться при различных скоростях газового потока, трубка снабжена комплектом сменных наконечников различного диаметра.

Расчет необходимого диаметра наконечника производят с соблюдением условия

$$\frac{\pi d^2_{тр}}{4} (20 \div 30) = \frac{\pi d^2_0}{4} w_0, \qquad (1.42)$$

где $d_{тр}$ — диаметр канала трубки, м; d_0 — диаметр входного отверстия наконечника, м; w_0 — скорость во входном отверстии наконечника, м/с, которая должна быть равна или несколько больше скорости потока в газоходе $w_г$, м/с.

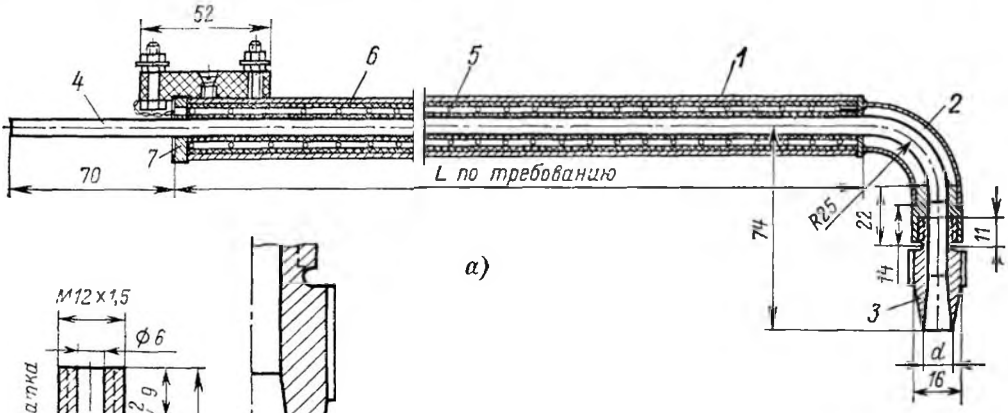
Применение заборных трубок с водяным охлаждением (рис. 1.24) позволяет использовать их при температуре запыленного газа, превышающей 1200—1500 °С.

Описанные выше простые заборные трубки применяются преимущественно в тех случаях, когда некоторые отступления от принципа изокинетичности отбора газа не вызывают большой погрешности, — при относительно небольших колебаниях скорости газового потока (порядка ±15%) и при умеренном содержании в газе крупных частиц.

Газ практически отбирается с некоторой постоянной скоростью, наиболее близкой к средней скорости газового потока, замеренной пневматической трубкой.

При значительных перепадах скорости газового потока по сечению газопровода и содержании в газе крупных частиц применяются пылезаборные трубки нулевого типа (рис. 1.25). В этих трубках для соблюдения изокинетичности отбора разность статических давлений, измеряемых соответственно внутри канала трубки (равного по площади сечения входному отверстию) или у входного отверстия и вне его (в газовом потоке, омывающем трубку), должна поддерживаться равной нулю.

Фильтровальные устройства для осаждения частиц. При умеренной концентрации частиц для их осаждения используются различные фильтры. В случае большой концентрации частиц



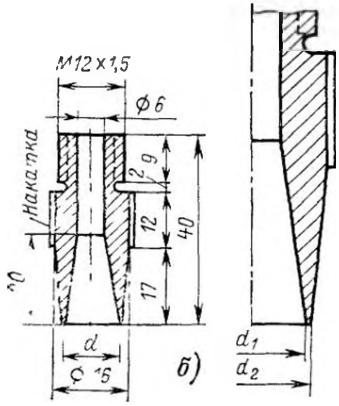


Рис. 1.23. Пылеотборная трубка НИИОГаз с электрическим обогревом:

а — трубка; *б* — сменный наконечник; *1* — корпус; *2* — шейка; *3* — наконечник; *4* — стальная трубка Ø 4—6 мм; *5* — нихромовая обмотка; *6* — асбестовая изоляция; *7* — изолирующая шайба.

Примечания: 1. За расчетный диаметр наконечника принимается $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$.

2. $d_2 = d_1 + 0{,}4$ мм.

3. Электрообмотки обогрева в зависимости от длины трубки:

Длина трубки, м	Сечение проволоки, мм²	Длина провода, м	Количество проводов
0,75	1	1,1	1
1,0	1	1,4	1
1,5	1	2,1	2
2,0	0,9	2,6	2

фильтры быстро забиваются. Для того чтобы исключить влияние случайных кратковременных изменений запыленности и точно учесть объем отобранного газа, желательно иметь не очень короткое время отбора пробы. Поэтому при большой концентрации частиц перед фильтром устанавливают небольшой циклончик, в котором происходит осаждение большей части пыли, а фильтр служит для улавливания наиболее мелких частиц, проскочивших через циклончик.

При осаждении частиц вне газохода к заборным трубкам могут быть присоеди-

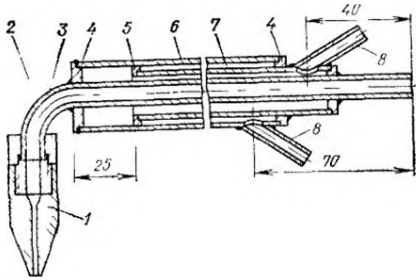


Рис. 1.24. Водоохлаждаемая пылезаборная трубка:

1 — наконечник; *2* — переходник; *3* — трубка пылезаборная; *4* — заглушка; *5* — крестовина; *6* — корпус; *7* — трубка; *8* — штуцер

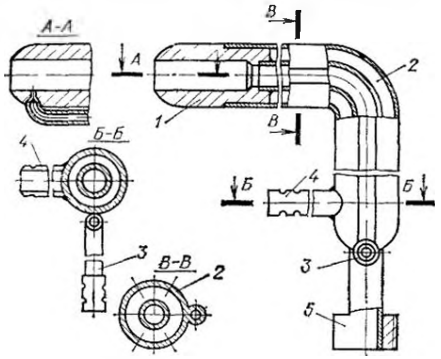
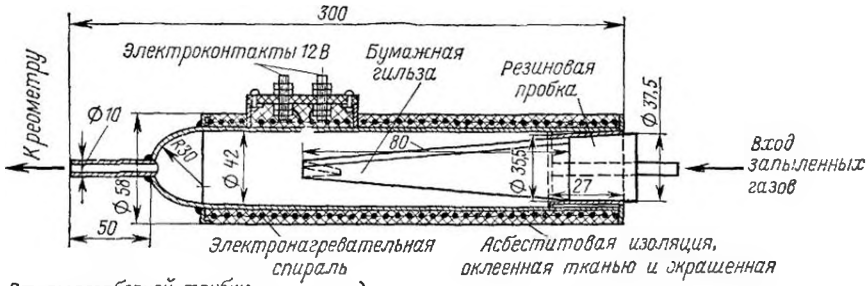
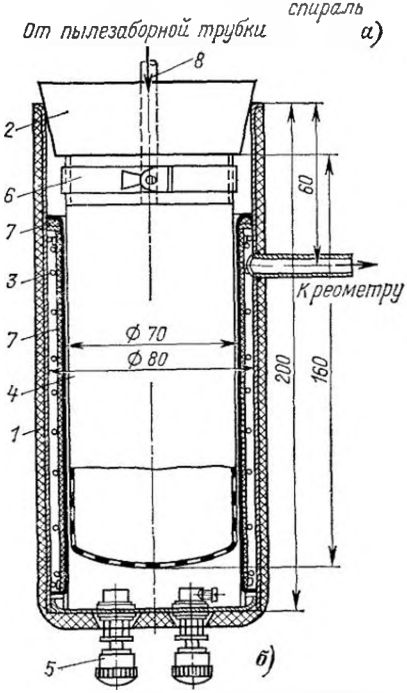


Рис. 1.25. Заборная трубка нулевого типа конструкции ВТИ:

1 — носик с боковым отверстием для измерения статического напора газа внутри трубки; *2* — внешняя трубка с отверстиями для измерения статического давления в газоходе; *3* — патрубок внутреннего статического давления; *4* — патрубок внешнего статического давления; *5* — муфта для присоединения к пробоотборному циклону (см. рис. 1.28)





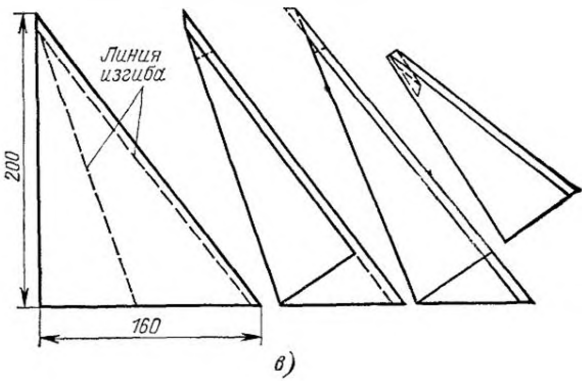


Рис. 1.26. Патроны для фильтров:

а — для бумажных фильтров; *б* — для тканевых фильтров; *в* — бумажный фильтр; *1* — корпус; *2* — резиновая пробка; *3* — обмотка электрообогрева; *4* — бумажный или тканевый фильтр; *5* — контакты обмотки электрообогрева; *6* — поясок для крепления тканевого фильтра; *7* — стакан с прорезями в нижней части; *8* — подвод газа

нены заключенные в специальные патроны бумажные или тканевые фильтры (рис. 1.26) или цилиндрические стеклянные фильтровальные патроны соответствующих размеров, набитые стеклянной ватой и асбестовым волокном, прокаленным при 400°С (рис. 1.27).

На рис. 1.28 показан циклончик, который может быть установлен перед любым из перечисленных фильтров в случае большой запыленности газов. Этот циклончик может быть присоединен к заборной трубке на резьбе с помощью накидной гайки или через короткий резиновый шланг. Фильтры соединяются с заборной трубкой или с циклончиком через резиновую пробку с отверстием.

Бумажные фильтры изготовляют из обычной фильтровальной бумаги и применяют при температуре проходящего через них газа, не превышающей 105 °С. В бумажном фильтре можно осадить от 1,5 до 7 г пыли (в зависимости от ее дисперсности). В тканевом фильтре можно осадить 50—80 г пыли. Для фильтрации газов с температурой до 100 °С применяются ворсистые шерстяные ткани, а с температурой свыше 100 °С (до 350 °С) — ткань из стекловолокна.

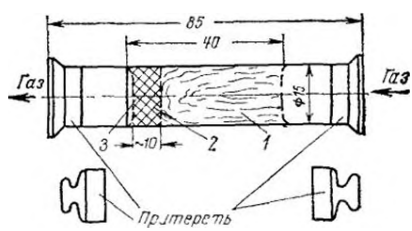


Рис. 1.27. Стеклянный фильтровальный патрон:

1 — стеклянная вата или стекловолокно; *2* — асбестовый тампон; *3* — металлическая сетка

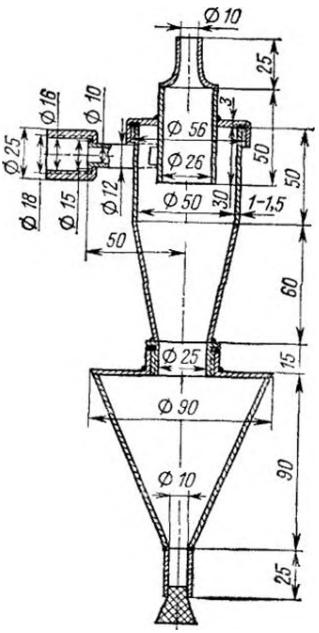


Рис. 1.28. Циклончик ВТИ

Патроны для бумажных или тканевых фильтров во избежание конденсации паров воды имеют электрообогрев, циклончики или стеклянные фильтровальные патроны теплоизолируются. Теплоизоляция стеклянных фильтровальных патронов должна быть легкосъемной, так как ее приходится удалять перед взвешиванием.

Стеклянные фильтровальные патроны должны набиваться стеклянной ватой и асбестовым волокном так, чтобы при расходе газов 20 л/мин их гидравлическое сопротивление составляло около 1000—1200 Па Тампон из стеклянной ваты предназначен для отделения в его объеме основной массы наиболее крупных частиц и поэтому не должен быть плотным. Мелкие частицы улавливаются асбестовым тампоном. Размер и плотность асбестового тампона устанавливаются опытным путем в процессе замеров, наблюдением за состоянием асбеста. Количество асбеста должно быть таким, чтобы последние 5—10 мм длины тампона не содержали видимой осевшей пыли. Во избежание выноса частичек асбеста после тампона (по ходу газа) вставляется латунная сеточка.

Бумажные гильзы, склеенные из обычной бумаги, перед употреблением высушивают в сушильном шкафу при температуре 80 °С в течение 20—30 мин, после чего выдерживают в течение суток на воздухе.

Параллельно со взвешиванием рабочих фильтров взвешивают одну и ту же пачку контрольных фильтров (обычно 10 шт.). После запыления фильтры вновь выдерживают в весовой комнате в течение суток и также взвешивают параллельно с контрольными фильтрами. В соответствии с изменением в массе контрольных фильтров вносятся необходимые поправки к массе запыленных фильтров.

Тканевые фильтры и патроны с набивкой из стеклянной ваты и асбестового волокна выдерживают в весовой комнате до тех пор, пока их масса не перестанет изменяться за счет высыхания или поглощения гидроскопической влаги. После запыления производят то же самое. Можно рекомендовать к применению контрольные тканевые фильтры или патроны, так же как в случае применения бумажных гильз

Для ускорения сушки все перечисленные типы фильтров можно помещать в эксикатор.

Для осаждения пыли внутри газохода при умеренной запыленности могут быть использованы фильтровальные патроны, показанные на рис. 1.29. Патрон набивается стекловатой и асбестовым волокном. Тампон из стеклянной ваты должен немного не доходить до носика патрона. После асбестового тампона должна быть установлена латунная сеточка. К плотности набивки предъявляются такие же требования, как и к набивке стеклянных трубочек в случае осаждения пыли вне газохода.

Фильтровальный патрон с помощью шнурового асбеста плотно, так чтобы не было подсоса газа, закрепляют в патронодержателе (рис. 1.30). Патронодержатель

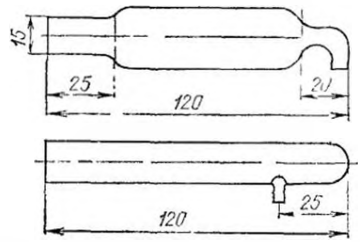


Рис. 1 29 Типы фильтровальных патронов для отбора проб методом внутренней фильтрации

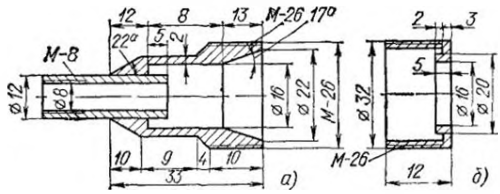


Рис 1 30 Держатель для фильтровальных патронов:

а — корпус; *б* — накидная гайка

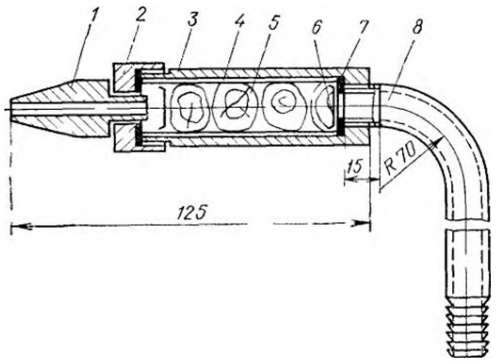


Рис. 1 31 Пылезаборная трубка с фильтровальным патроном из гильзы охотничьего патрона:

1 — сменный наконечник; *2* — крышка, *3* — корпус, *4* — гильза; *5* — фильтрующая набивка, *6* — сетка; *7* — прокладка, *8* — трубка

заканчивается длинной трубкой Ø 8—10 мм, позволяющей устанавливать фильтровальный патрон в нужной точке газохода и просасывать через него газ к расходомеру. При температурах, которые выдерживает резина, фильтровальный патрон может быть соединен с трубкой через резиновую пробку с отверстием или через короткий отрезок толстостенного шланга.

Стеклянные фильтровальные патроны обладают недостатками, основные из них хрупкость; трудность надежного уплотнения в держателе, связанная с обусловленными технологией изготовления отклонениями в размерах; тупые входные кромки носика. Поэтому многие организации, которым приходится заниматься пылегазовыми замерами, применяют патроны, изготовленные из металла или фторопласта. Конструкция этих патронов определяется в основном технологичностью изготовления. Удобно использовать латунные охотничьи патроны с вынутым капсюлем (рис. 1 31).

При концентрации частиц примерно до 1 г/м³ вместо объемных фильтров с набивкой из волокнистых материалов (см. рис. 1 27, 1 29 и 1 31), тканевых или бумажных фильтров, сшитых в виде мешочка или склеенных в виде конуса (см. рис. 1.26), могут быть использованы плоские мембранные нитроцеллюлозные фильтры, аэрозольные аналитические фильтры типа АФА и НЗЛ или фильтры, вырезанные из материала, типа ФП (см. § 5 5). Основным назначением мембранных нитроцеллюлозных фильтров является отбор проб воды для определения содержащейся в ней микрофлоры, однако эти фильтры можно использовать и для отбора проб из газовоздушных выбросов промышленных предприятий при температуре газов до 120 °С.

Мембранные фильтры представляют собой круглые пластинки диаметром 35 мм и толщиной 0,1—0,02 мм, изготовленные из пористой нитроцеллюлозной пленки По размерам пор фильтры подразделяются на шесть номеров (№ 1—6). Максимальный размер пор составляет соответственно 0,6; 0,7; 0,9; 1,2; 1,8 мкм. Для фильтров № 6 максимальный размер пор не регламентируется В случае отбора проб частиц из га-

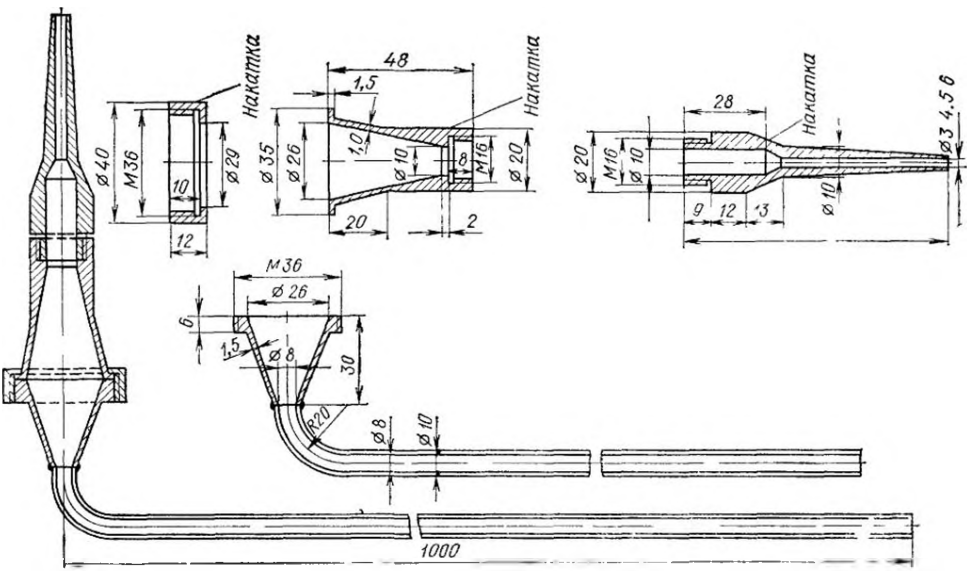


Рис. 1 32. Пылезаборная трубка для отбора проб на мембранные фильтры

зовоздушной среды подразделение фильтров по размеру пор не имеет существенного значения, так как при фильтрации газа эффективность улавливания частиц во много раз превышает эффективность этого процесса при фильтрации жидкости

Пылезаборная трубка для отбора проб частиц из газоходов методом внутренней фильтрации через мембранные фильтры показана на рис. 1 32

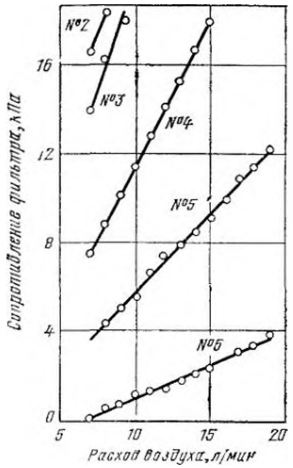


Рис. 1.33 Зависимость гидравлического сопротивления чистого мембранного фильтра от расхода воздуха

Диаметр отверстия носика пылезаборной трубки при отборе проб на те или иные плоские фильтры выбираются так, чтобы можно было соблюсти условие изокинетичности отбора пробы, варьируя расход газа в пределах пропускной способности фильтра и производительности источника разрежения.

Для мембранных нитроцеллюлозных фильтров расход газов при отборе пробы обычно лимитируется их сравнительно высоким гидравлическим сопротивлением (рис. 1 33). При отборе проб на фильтры типа АФА и НЗЛ расход газа не должен превышать указанного в прилагаемой к ним инструкции, так как при более высокой скорости фильтрации заметно снижается эффективность фильтров.

Взвешивание фильтровальных патронов рассчитанных на отбор проб методом внутренней фильтрации, производится с соблюдением требований, приведенных при рассмотрении отбора проб методом внешней фильтрации.

Расходомеры Для измерения расхода газов при отборах проб на запыленность обычно пользуются реометрами, значительно реже — ротаметрами. При этом могут быть использованы реометры как заводского, так и местного изготовления. Конструкция реометра, который может быть изготовлен в стеклодувных мастерских предприятий, показана на рис. 1.34.

Приближенную градуировку реометра можно произвести при помощи газового счетчика Трудность изготовления стеклянных диафрагм с точно заданными размерами отверстий требует тарировки каждой диаграммы. Из-за несимметричности профиля оплавленного отверстия стеклянной диафрагмы изменение направления движения газа в ней может значительно изменить показания прибора Поэтому на диафрагму наносится стрелка, указывающая направление движения газа, при котором производилась тарировка. Более подробные сведения о тарировке реометров см. в [1.27].

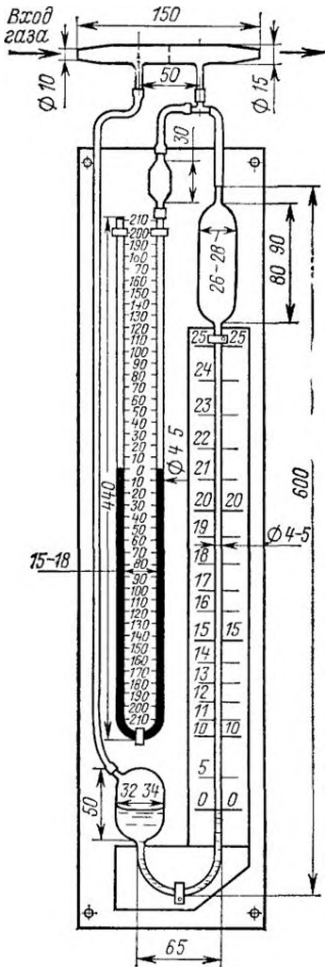


Рис 1 34 Реометр

Ротаметр представляет собой вертикальную трубку, несколько расширенную кверху в виде конуса, внутри которой находится поплавок, свободно плавающий в измеряемом газовом потоке. Поплавок при протекании газового потока поднимается до тех пор, пока кольцевой зазор между поплавком и стенкой трубки не увеличивается настолько, что подъемная сила, воздействующая на поплавок, уравновесится весом поплавка. Прибор должен устанавливаться строго вертикально. Недостатком ротаметров является то, что они очень чувствительны к конденсации влаги на стенках

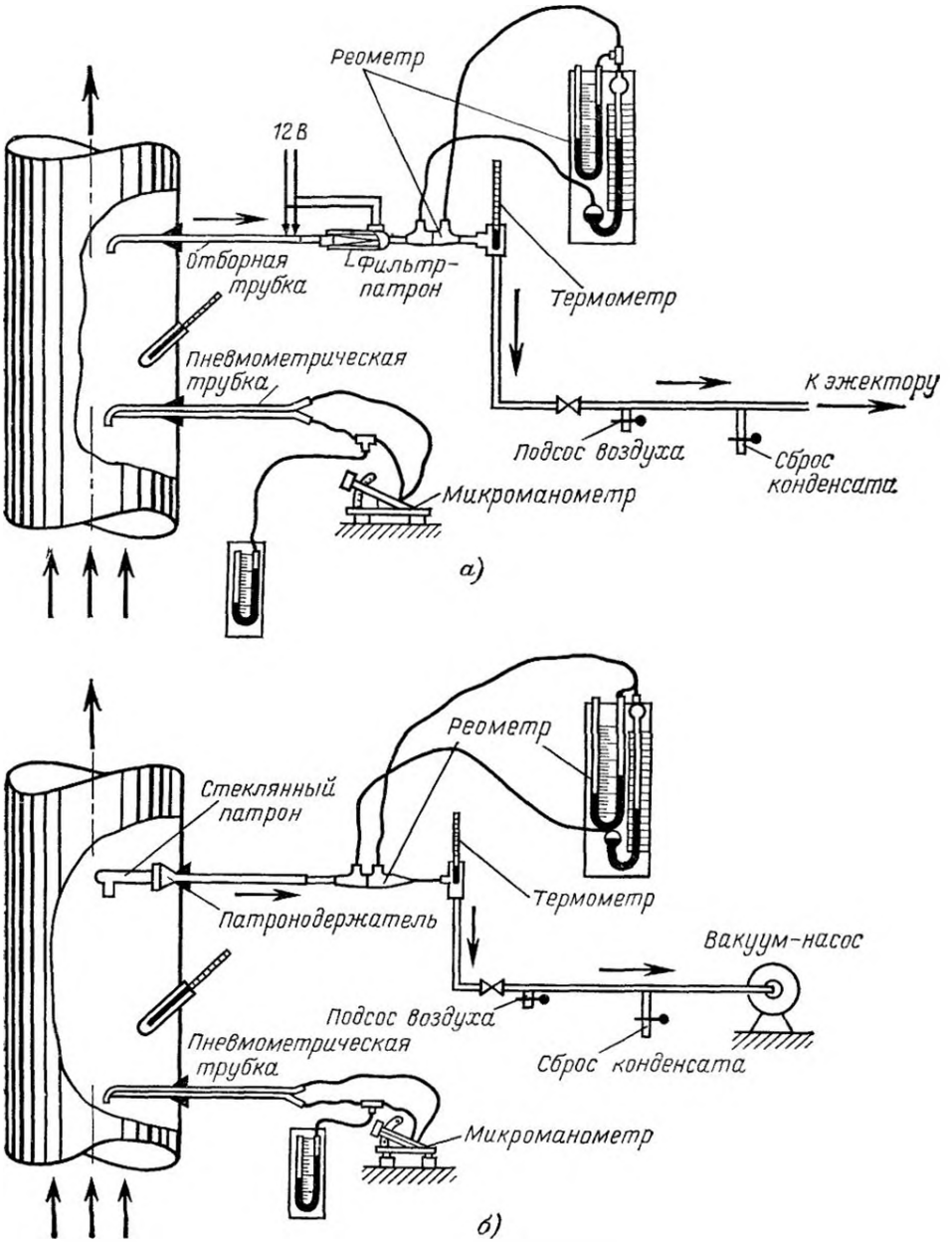


Рис. 1.35. Схемы установок для определения запыленности газов:
а — внутренней фильтрацией; *б* — внешней фильтрацией

трубки и поплавке. Его это происходит, прибор начинает давать заметные погрешности.

Шкалы или градуировочные кривые ротаметров или реометров отвечают вполне определенному значению плотности газа, при которой производилась тарировка. Практически же приходится работать при других плотностях, температурах и давлениях газа. Кроме того, основные параметры газа в точке отбора пробы могут значительно отличаться от соответствующих параметров газа в расходомере.

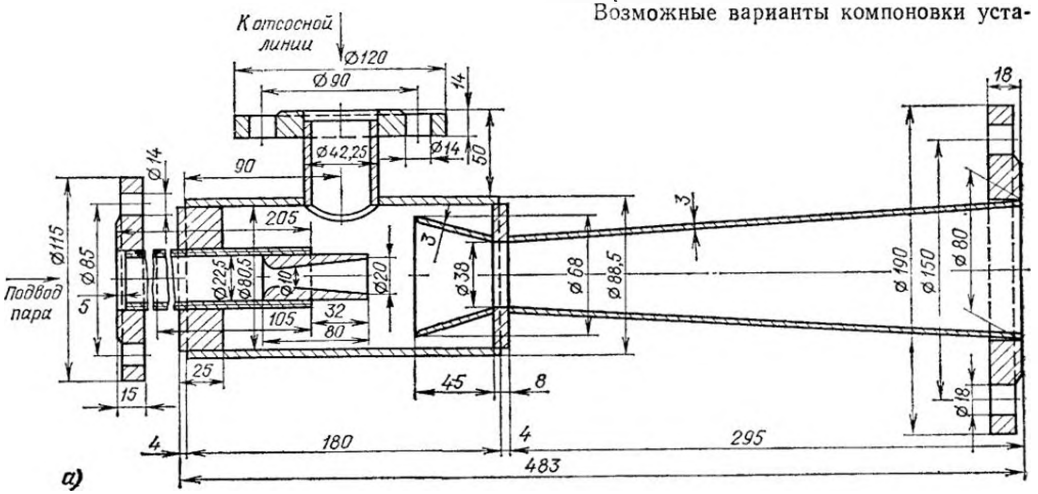
Все это учитывается формулой

$$q_ш = 47\,100 d^2_0 w_г \frac{T_р P_г}{T_г P_р} \sqrt{\rho_р/\rho_к}, \quad (1.43)$$

где $q_ш$ — объемный расход газов по шкале расходомера во время отбора пробы, л/мин; d_0 — диаметр пылезаборного отверстия, м; $w_г$ — скорость потока газов, из которого отбирается проба, м/с; $T_р$ и $T_г$ — температура газов в расходомере и в газоходе, К; $P_р$ и $P_г$ — абсолютные давления в расходомере и в газоходе, кПа или мм рт. ст.; $\rho_р$ — действительная плотность газов у расходомера, кг/м³; $\rho_к$ — плотность газа, при которой производилась калибровка прибора, кг/м³.

В формулу (1.43) входит отношение давлений, поэтому выбор единиц измерения для давления не имеет значения. Поскольку после расходомера обычно устанавливается ртутный U-образный манометр, величину давления удобно подставлять в мм рт. ст

Возможные варианты компоновки уста-



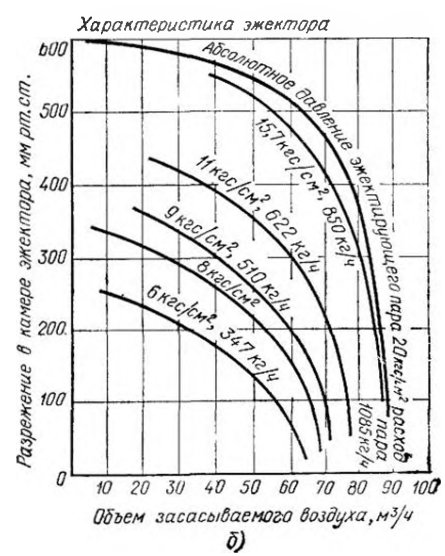


Рис. 1.36. Паровой эжектор:
а — конструкция; *б* — характеристики

новок для определения запыленности газов приведены на рис. 1.35

Источники разрежения. При определении запыленности в качестве источников разрежения проще всего использовать имеющиеся на многих предприятиях вакуумные линии. При отсутствии таковых для создания необходимого разрежения может быть использован паровой эжектор (рис. 1.36). Можно также использовать бытовые пылесосы.

Косвенные методы определения запыленности газов

Достоинством косвенных методов определения концентрации взвешенных в газе частиц является то, что почти любой из этих методов позволяет автоматизировать процесс измерений. Однако успехи в практической реализации рассматриваемых ме-

Таблица 1.10. **Приборы для измерения концентрации частиц в газоходе**

Марка прибора	Метод измерения	Измеряемые концентрации, г/м³	Характеристика потока		Режим измерения	Основная область применения
			Скорость, м/с	Температура, °С		
ПВ-2М	Весовой	0,1—100	10—30	До 400	Циклический	Цементные заводы
ПП-2	Весовой	До 40	8—30	До 350	Циклический	Цементные заводы
НИИМ-2	Оптический абсорбционный	Оптическая плотность 0—6,0	—	До 400	Непрерывный	Тепловые электростанции
УПК-65	Оптический абсорбционный	Оптическая плотность 0—1,0	—	До 200	Непрерывный	Тепловые электростанции
ПК-4	Контактно-электрический	0,05—50	До 70	До 300	Непрерывный	Агломерационные фабрики

тодов достигнуты только при разработке приборов, рассчитанных на измерение концентрации частиц в атмосферном воздухе производственных помещений.

Наличие в отходящих газах промышленных предприятий различных агрессивных примесей, чрезвычайно широкий диапазон возможных значений скорости и температуры газов, концентрации в них частиц, отличия в физико-химических свойствах частиц различного происхождения и целый ряд других факторов ограничивают возможность создания достаточно универсальных приборов.

Практически все косвенные методы определения запыленности газовоздушных выбросов промышленных предприятий предусматривают предварительную тарировку соответствующих приборов прямым методом. Тарировка, проводимая в конкретных условиях применения прибора, требует достаточно полного обследования данного источника газовоздушных выбросов.

Технические характеристики некоторых приборов, разработанных в СССР и изготовляемых небольшими сериями, в основном организациями-разработчиками, приведены в табл. 1.10.

1.16. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПЫЛЕ- И ЗОЛОУЛАВЛИВАНИЯ

Коэффициент очистки является основным показателем, характеризующим работу пыле- и золоулавливающих аппаратов в тех или иных конкретных случаях их применения, %:

$$\eta = \frac{M_{ул}}{M_{вх}} 100 = \frac{M_{вх} - M_{вых}}{M_{вх}} 100 = \frac{M_{ул}}{M_{ул} + M_{вых}} 100 = \frac{c_{вх}Q_{вх} - c_{вых}Q_{вых}}{c_{вх}Q_{вх}} 100, \quad (1.44)$$

где $M_{вх}$, $M_{ул}$, $M_{вых}$ — масса частиц, содержащихся в газах до их поступления в аппарат, уловленных в аппарате и содержащихся в газах после выхода из аппарата; $c_{вх}$ и $c_{вых}$ — средние концентрации частиц в газах на входе в аппарат и на выходе из него; $Q_{вх}$ и $Q_{вых}$ — количества газов, поступающих в аппарат и выходящих из него.

Если $Q_{вх} = Q_{вых}$, что имеет место при отсутствии присосов воздуха или утечки газов из аппарата, а также при отсутствии сильного увлажнения газов, то справедливо соотношение

$$\eta = 1 - c_{вых}/c_{вх} \cdot 100. \quad (1.45)$$

В тех случаях, когда необходимо оценить конечную запыленность или сравнить относительную запыленность газов на выходе из различных аппаратов, удобно пользоваться коэффициентом проскока (%), который связан с коэффициентом очистки соотношением

$$\varepsilon = 100 - \eta. \quad (1.46)$$

Значения коэффициентов очистки, которые могут быть получены с помощью тех или иных пыле- и золоулавливающих аппаратов, зависят от условий их эксплуатации, в том числе от дисперсного состава улавливаемых частиц.

Степень совершенства того или иного пыле- и золоулавливающего аппарата характеризуют достигаемые с его помощью фракционные (или парциальные) коэффициенты очистки при оптимальных по тех-

Таблица 1.11. **Значения нормальной функции распределения**

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
—2,70	0,0035	—1,00	0,1587	0,12	0,5478	1,26	0,8962
—2,60	0,0047	—0,98	0,1635	0,14	0,5557	1,28	0,8997
—2,50	0,0062	—0,96	0,1685	0,16	0,5636	1,30	0,9032
—2,40	0,0082	—0,94	0,1736	0,18	0,5714	1,32	0,9066
—2,30	0,0107	—0,92	0,1788	0,20	0,5793	1,34	0,9099
—2,20	0,0139	—0,90	0,1841	0,22	0,5871	1,36	0,9131
—2,10	0,0179	—0,88	0,1894	0,24	0,5948	1,38	0,9162
—2,00	0,0228	—0,86	0,1949	0,26	0,6026	1,40	0,9192
—1,98	0,0239	—0,84	0,2005	0,28	0,6103	1,42	0,9222
—1,96	0,0250	—0,82	0,2061	0,30	0,6179	1,44	0,9251
—1,94	0,0262	—0,80	0,2119	0,32	0,6255	1,46	0,9279
—1,92	0,0274	—0,78	0,2177	0,34	0,6331	1,48	0,9306
—1,90	0,0288	—0,76	0,2236	0,36	0,6406	1,50	0,9332
—1,88	0,0301	—0,74	0,2297	0,38	0,6480	1,52	0,9357
—1,86	0,0314	—0,72	0,2358	0,40	0,6554	1,54	0,9382
—1,84	0,0329	—0,70	0,2420	0,42	0,6628	1,56	0,9406
—1,82	0,0344	—0,68	0,2483	0,44	0,6700	1,58	0,9429
—1,80	0,0359	—0,66	0,2546	0,46	0,6772	1,60	0,9452
—1,78	0,0375	—0,64	0,2611	0,48	0,6844	1,62	0,9474
—1,76	0,0392	—0,62	0,2676	0,50	0,6915	1,64	0,9495
—1,74	0,0409	—0,60	0,2743	0,52	0,6985	1,66	0,9515
—1,72	0,0427	—0,58	0,2810	0,54	0,7054	1,68	0,9535
—1,70	0,0446	—0,56	0,2877	0,56	0,7123	1,70	0,9554
—1,68	0,0465	—0,54	0,2946	0,58	0,7190	1,72	0,9573
—1,66	0,0485	—0,52	0,3015	0,60	0,7257	1,74	0,9591
—1,64	0,0505	—0,50	0,3085	0,62	0,7324	1,76	0,9608
—1,62	0,0526	—0,48	0,3156	0,64	0,7389	1,78	0,9625
—1,60	0,0548	—0,46	0,3228	0,66	0,7454	1,80	0,9641
—1,58	0,0571	—0,44	0,3300	0,68	0,7517	1,82	0,9656
—1,56	0,0594	—0,42	0,3372	0,70	0,7580	1,84	0,9671
—1,54	0,0618	—0,40	0,3446	0,72	0,7642	1,86	0,9686
—1,52	0,0643	—0,38	0,3520	0,74	0,7703	1,88	0,9699
—1,50	0,0668	—0,36	0,3594	0,76	0,7764	1,90	0,9713
—1,48	0,0694	—0,34	0,3669	0,78	0,7823	1,92	0,9726
—1,46	0,0721	—0,32	0,3745	0,80	0,7881	1,94	0,9738
—1,44	0,0749	—0,30	0,3821	0,82	0,7939	1,96	0,9750
—1,42	0,0778	—0,28	0,3897	0,84	0,7995	1,98	0,9761
—1,40	0,0808	—0,26	0,3974	0,86	0,8051	2,00	0,9772
—1,38	0,0838	—0,24	0,4052	0,88	0,8106	2,10	0,9821
—1,36	0,0869	—0,22	0,4129	0,90	0,8159	2,20	0,9861
—1,34	0,0901	—0,20	0,4207	0,92	0,8212	2,30	0,9893
—1,32	0,0934	—0,18	0,4286	0,94	0,8264	2,40	0,9918
—1,30	0,0968	—0,16	0,4364	0,96	0,8315	2,50	0,9938
—1,28	0,1003	—0,14	0,4443	0,98	0,8365	2,60	0,9953
—1,26	0,1038	—0,12	0,4522	1,00	0,8413	2,70	0,9965
—1,24	0,1075	—0,10	0,4602	1,02	0,8461		
—1,22	0,1112	—0,08	0,4681	1,04	0,8508		
—1,20	0,1151	—0,06	0,4761	1,06	0,8554		
—1,18	0,1190	—0,04	0,4840	1,08	0,8599		
—1,16	0,1230	—0,02	0,4920	1,10	0,8643		
—1,14	0,1271	—0,00	0,5000	1,12	0,8686		
—1,12	0,1314	0,00	0,5000	1,14	0,8729		
—1,10	0,1357	0,02	0,5080	1,16	0,8770		
—1,08	0,1401	0,04	0,5160	1,18	0,8810		
—1,06	0,1446	0,06	0,5239	1,20	0,8849		
—1,04	0,1492	0,08	0,5319	1,22	0,8888		
—1,02	0,1539	0,10	0,5398	1,24	0,8925		

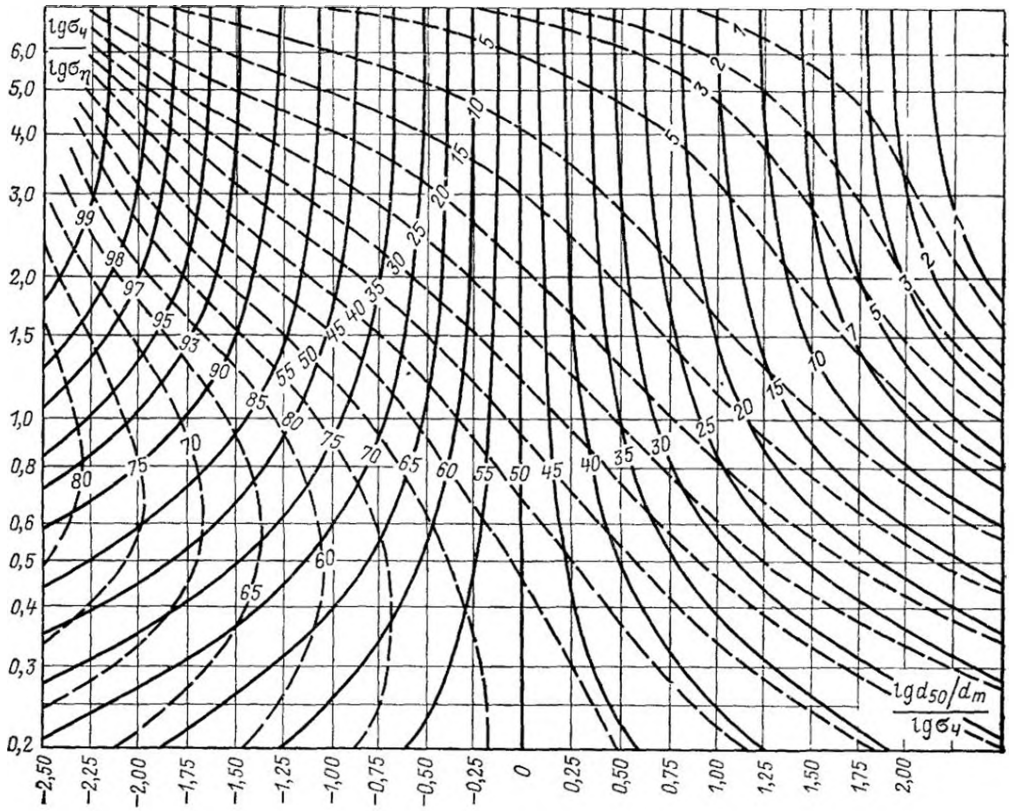


Рис. 1.37. Номограмма

нико-экономическим соображениям условиях эксплуатации.

Фракционный коэффициент равен отношению количества пыли данной фракции, уловленной в аппарате, к количеству входящей пыли той же фракции.

Парциальный коэффициент равен отношению количества частиц данного размера, уловленных в аппарате, к количеству частиц этого размера на входе в аппарат:

$$\eta_{\text{ф}}=M_{\text{ф}\,\text{ул}}/M_{\text{ф}\,\text{вх}}=\Phi_{\text{ул}}M_{\text{ул}}/\Phi_{\text{вх}}M_{\text{вх}}=\eta\Phi_{\text{ул}}/\Phi_{\text{вх}}, \qquad (1.47)$$

$$\eta_{\text{п}}=M_{N\,\text{ул}}/M_{N\,\text{вх}}=N_{\text{ул}}M_{\text{ул}}/N_{\text{вх}}M_{\text{вх}}=\eta N_{\text{ул}}/N_{\text{вх}}. \qquad (1.48)$$

Обычно фракционные (парциальные) коэффициенты очистки для различных пыле- и золоуловителей определяются экспериментально, путем проведения соответствующих испытаний аппаратов.

Полный коэффициент очистки может быть подсчитан по фракционному (парциальному) составу золы или пыли, входящей в аппарат, и по фракционным (парциальным) коэффициентам очистки:

$$\eta=\Sigma\eta_{\text{ф}}\frac{\Phi_{\text{вх}}}{100}; \qquad (1.49)$$

$$\eta=\Sigma\eta_{\text{п}}\frac{N_{\text{вх}}}{100}\Delta d_{\text{ч}}. \qquad (1.50)$$

Необходимо, чтобы интервалы размеров частиц для фракционного состава золы или пыли и для фракционных коэффициентов очистки при подстановке в формулу (1.49) совпадали. Суммы $\Phi_{\text{вх}}$ в формуле (1.49) и $N_{\text{вх}}\Delta d_{\text{ч}}$ в формуле (1.50) должны каждая составлять 100%.

Формула (1.50) может быть записана более точно:

$$\eta=\int_0^\infty \eta_{\text{п}}\frac{N_{\text{вх}}}{100}\,d(d_{\text{ч}}). \qquad (1.51)$$

В некоторых случаях графическая зависимость $\eta_{\text{п}}=f(d_{\text{ч}})$, построенная в вероятностно-логарифмической системе координат, приобретает вид прямой линии, свидетель-

ствующей о том, что она может быть записана в виде интеграла вероятности

$$\eta_{\text{п}} = \int_{-\infty}^{\lg d_{\text{ч}}/d_{50}} \frac{100}{\sqrt{2\pi}\lg\sigma_{\eta}} e^{-\frac{\lg^2 d_{\text{ч}}/d_{50}}{\lg^2\sigma_{\eta}}} \times$$

$$\times d(\lg d_{\text{ч}}/d_{50}), \qquad (1.52)$$

где $\lg d_{\text{ч}}/d_{50}$ — логарифм отношения текущего размера частиц $d_{\text{ч}}$ к диаметру частиц d_{50}, осаждаемых с эффективностью 50%, $\lg\sigma_{\eta}$ — стандартное отклонение в функции распределения парциальных коэффициентов очистки.

Значение d_{50} находят как точку пересечения графика $\eta_{\text{п}}=f(d_{\text{ч}})$ с осью абсцисс, а $\lg\sigma_{\eta}$ — из соотношения

$$\lg\sigma_{\eta} = \lg d_{84,1} - \lg d_{50}, \qquad (1.53)$$

где $d_{84,1}$ — значение абсциссы, ордината которой равна 84,1%.

Если распределение подлежащих улавливанию частиц по размерам является логарифмически-нормальным (см. § 1.3), а зависимость $\eta_{\text{п}}=f(d_{\text{ч}})$ может быть записана в виде интеграла вероятности, то значение полного коэффициента очистки можно найти по формуле

$$\eta = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{t^2}{2}} dx = \Phi(x), \qquad (1.54)$$

где $x = \dfrac{\lg d_m/d_{50}}{\sqrt{\lg^2\sigma_{\eta} + \lg^2\sigma_{\text{ч}}}}$, а d_m, $\lg\sigma_{\eta}$, d_{50} и $\lg\sigma_{\text{ч}}$ — параметры, полностью характеризующие дисперсный состав частиц (см. § 1.3) и зависимость $\eta_{\text{п}}=f(d_{\text{ч}})$ для данного аппарата. Значения функции $\Phi(x)$ приведены в табл. 1.11.

Вместо вычислений по формуле (1.54) можно воспользоваться номограммой, приведенной на рис. 1.37, на которой сплошные линии соответствуют постоянным значениям η для различных значений $\lg\sigma_{\text{ч}}/\lg\sigma_{\eta}$ и $\dfrac{\lg d_{50}/d_m}{\lg\sigma_{\text{ч}}}$, отложенных по осям координат. Пунктирные линии соответствуют постоянным значениям η для второго аппарата в случае последовательной установки двух одинаковых аппаратов.

Для возможности применения формул (1.49)—(1.51) и (1.54), а также рассмотренной номограммы необходимо, чтобы основные условия, для которых найдены значения фракционных или парциальных коэффициентов очистки, совпадали с условиями эксплуатации аппарата, для которых определяется значение полного коэффициента очистки.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ПЫЛЕОСАДИТЕЛЬНЫЕ КАМЕРЫ И АППАРАТЫ СУХОЙ ИНЕРЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

2.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

К аппаратам сухой инерционной очистки газов относятся пылеосадительные камеры и некоторые из простейших по конструкции пыле- и золоуловителей инерционного действия, жалюзийные аппараты, циклоны в одиночном и групповом исполнении, прямоточные циклоны, батарейные циклоны, ротационные пылеуловители, дымососы-пылеуловители.

Основным достоинством большинства из этих аппаратов является простота конструкции, определяющая возможность их изготовления на неспециализированных предприятиях. Однако эффективность очистки газов, достижимая в перечисленных аппаратах, часто оказывается недостаточной. Поэтому многие из аппаратов применяются главным образом в качестве первой ступени очистки газов перед более эффективными пыле- и золоуловителями.

Среди аппаратов сухой инерционной очистки газов наибольшее распространение получили различные циклоны, имеющие относительно высокие значения эффективности улавливания в них золы или пыли при умеренных значениях газодинамического сопротивления аппаратов. Применение пылеосадительных камер и простейших по конструкции пылеуловителей инерционного действия оправдано лишь при предварительном осаждении частиц, основная масса которых имеет размеры более 100 мкм.

Жалюзийные аппараты требуют для своего размещения значительно меньших производственных площадей по сравнению с многими другими аппаратами сухой инерционной очистки газов, так как их основной элемент — жалюзийная решетка — мо-

жет встраиваться в газоходы. Однако степень эксплуатационной надежности жалюзийных аппаратов обычно оказывается довольно низкой, и это особенно заметно при работе жалюзийных аппаратов на абразивных пылях.

Жалюзийные решетки требуют установки дополнительных устройств для осаждения образующегося в них пылевого концентрата. Этот недостаток присущ не только жалюзийным аппаратам, но и некоторым другим пыле- и золоуловителям, например прямоточным циклонам с отсосом части газов из бункера и дымососам-пылеуловителям.

Все аппараты с дополнительными устройствами для осаждения образующегося в них пылевого концентрата получили общее название — пылеконцентраторы. На линии отсоса пылевого концентрата чаще всего устанавливаются циклоны. Во многих случаях эти циклоны оказываются ненадежными в эксплуатации из-за ускоренного абразивного износа газовым потоком с высокой концентрацией частиц золы или пыли.

Батарейные циклоны выделены в отдельную разновидность аппаратов из-за конструкционных особенностей, связанных с раздачей потока по многим одинаковым элементам циклонного типа.

Ротационные пылеуловители пока не вышли из стадии опытных установок, так как достигаемая с их помощью эффективность очистки газов обычно не оправдывается чрезмерно высокими энергозатратами в аппаратах. Отчасти это объясняется тем, что ни в одной из предложенных конструкций не решен отвод отсепарированных частиц в бункер аппарата. Для этого используется процесс гравитационного осаждения.

Область промышленного применения дымососов-пылеуловителей пока ограничена. Относительно малые габариты и небольшие энергетические затраты на золоулавливание позволяют применять эти аппараты на передвижных электростанциях и в малых котельных, работающих на твердом топливе.

Эффективность улавливания дымососами-пылеуловителями частиц с размерами менее 10 мкм существенно ниже, чем у циклонов.

2.2. ПЫЛЕОСАДИТЕЛЬНЫЕ КАМЕРЫ И ПРОСТЕЙШИЕ ИНЕРЦИОННЫЕ ПЫЛЕОСАДИТЕЛИ

Пылеосадительные камеры. В пылеосадительных камерах используется гравитационное осаждение частиц из потока газов. Для достижения приемлемой эффективности очистки газов необходимо, чтобы частицы находились в пылеосадительной камере возможно более продолжительное время. Поэтому пылеосадительные камеры, рассчитанные на осаждение даже относительно крупных частиц, являются громоздкими сооружениями. Материалом для постройки камер могут служить кирпич или сборный железобетон, реже — сталь и дерево (для холодных газов). Габаритные размеры камеры, необходимые для седиментационного осаждения частиц крупнее заданного размера $d_{ч.з}$, обычно подбираются по отношению [2.1]

$$L = H\frac{w_г}{w_{ч.з}}, \qquad (2.1)$$

где L — длина камеры, м; H — высота камеры, м; $w_г$ — скорость движения газов в камере (обычно выбираемая от 0,2 до 0,8 м/с); $w_{ч.з}$ — скорость витания частиц с размером $d_{ч.з}$, м/с (может быть найдена по номограмме, приведенной в приложении II).

При этом теоретически достижимая эффективность очистки газов в пылеосадительной камере будет равна относительной доле частиц с размерами крупнее $d_{ч.з}$, найденной по результатам дисперсного анализа пыли (см. § 1.3). Следует учитывать, что при движении запыленных газов в камере турбулентность потока нарушает нормальное седиментационное осаждение, в особенности частиц малых размеров, и действительная эффективность очистки газов оказывается существенно ниже, чем определенная по уравнению (2.1).

Для пылеосадительных камер с $L/H > 3$ значения парциальных коэффициентов очистки, %, можно найти достаточно точно на основании расчетов средней концентрации частиц соответствующего размера в выходном сечении пылеосадительной камеры [2.2] по формуле

$$\eta_п = 100\left[1 - \frac{1}{i}\sum_0^i n\right], \qquad (2.2)$$

где i — число точек, для которых рассчитывается концентрация частиц; n — отношение концентрации частиц данного размера в расчетной точке выходного сечения камеры к их концентрации во входном сечении. Концентрация этих частиц во входном сечении принимается равномерно распределенной по сечению.

Определение n производится по уравнению (см. табл. 1.11)

$$n = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1, \qquad (2.3)$$

а значения x_1 и x_2 в свою очередь определяются из выражений

$$x_1 = \frac{H + h - Lw_ч/w_г}{\sqrt{2D_tL/w_г}};$$

$$x_2 = \frac{H - h + Lw_ч/w_г}{\sqrt{2D_tL/w_г}}. \qquad (2.4)$$

Здесь h — расстояние от потолка камеры; D_t — коэффициент турбулентной диффузии частиц; $w_ч$ — скорость витания частиц того размера, для которого находят значение $\eta_п$.

При выполнении условия $w_ч < Lg/w_г$ (g — ускорение свободного падения), охватывающего большинство практически встречающихся случаев, коэффициент турбулентной диффузии частиц совпадает с коэффициентом турбулентной диффузии потока и может определяться по формуле Шервуда и Вертца [2.3]:

$$D_t = 0{,}02 w_г H \sqrt{\lambda}, \qquad (2.5)$$

где λ — коэффициент трения потока.

Коэффициент трения потока можно приближенно принимать 0,03, что позволяет упростить выражение для x_1 и x_2:

$$x_1 = \frac{1 + h/H - L/H\,(w_ч/w_г)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} L/H}};$$

$$x_2 = \frac{1 - h/H + L/H\,(w_ч/w_г)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} L/H}}. \qquad (2.6)$$

Для частиц, улавливаемых с эффективностью 50%,

$$(w_ч/w_г)_{50} \approx 1{,}5 H/L. \qquad (2.7)$$

Дополнительные значения $w_ч/w_г$, необходимые для определения нескольких точек зависимости $\eta_п = f(d_ч)$, принимаются больше и меньше значения $(w_ч/w_г)_{50}$.

Применение рассмотренных зависимостей для определения эффективности осаждения частиц в пылеосадительных камерах показано на следующем примере.

Пылеосадительная камера имеет длину $L=10$ м, высоту $H=1$ м, ширину $B=2$ м.

Расход воздуха через камеру $Q=3600$ м³/ч.

Плотность частиц $\rho_ч = 500$ кг/м³.

Необходимо определить эффективность улавливания частиц различной крупности. Расчет проводится в следующей последовательности.

1. Скорость потока в сечении камеры

$$w_г = \frac{Q}{HB \cdot 3600} = 0{,}5 \text{ м/с}.$$

2. По уравнению (2.7) находим относительную скорость витания частиц, улавливаемых в камере с эффективностью, равной 50%:

$$\left(\frac{w_ч}{w_г}\right)_{50} = 0{,}15.$$

При скорости в камере 0,5 м/с имеем $(w_ч)_{50} = 0{,}075$ м/с и по номограмме приложения II получаем при плотности частиц 500 кг/м³ $d_{50} = 70$ мкм.

3. Для определения зависимости $\eta_п = f(d_ч)$ выбираем дополнительные значения

$$\frac{w'_ч}{w_г} = 0{,}1 \text{ и } \frac{w''_ч}{w_г} = 0{,}2.$$

Этим значениям относительных скоростей витания отвечают диаметры частиц $d'_ч = 60$ мкм и $d''_ч = 90$ мкм.

4. Среднюю концентрацию частиц на выходе из камеры можно определить как среднюю из концентраций в 4—5 точках сечения. Задаемся пятью значениями h/H: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0.

Результаты расчетов удобно представить в следующем виде:

	h/H	0	0,25	0,5	0,75	1,0
	x_1	0	0,95	1,89	2,83	3,78
$w_ч/w_г = 0{,}1$	x_2	7,56	6,63	5,65	4,73	3,78
	$\Phi(x_1)$	0,5	0,83	0,970	0,995	1
	$\Phi(x_2)$	1	1	1	1	1
	n	0,5	0,83	0,970	0,995	1

Среднее значение n составляет 0,86, а парциальный коэффициент очистки газа для частиц с размером $d_ч = 60$ мкм $\eta_п = 100(1-0{,}86) = 14\%$:

	h/H	0	0,25	0,5	0,75	1,0
	x_1	−3,78	−2,84	−1,89	−0,95	0
$w_ч/w_г = 0{,}2$	x_2	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
	$\Phi(x_1)$	0	0,002	0,03	0,171	0,5
	$\Phi(x_2)$	1	1	1	1	1
	n	0	0,002	0,03	0,171	0,5

Среднее значение n составляет 0,14, а парциальный коэффициент очистки газа для частиц с размером $d_ч = 90$ мкм $\eta_п = 100(1-0{,}14) = 86\%$.

Таким образом, в результате расчета получены три значения парциальных коэффициентов очистки газа (14; 50; 86%) при трех значениях $w_ч/w_г = 0{,}1$; 0,15 и 0,2. Задаваясь другими значениями $w_ч/w_г$, можно получить любые точки кривой $\eta_п = f(d_ч)$. Полный коэффициент очистки газа определяется по уравнению (1.50).

Рассмотренный метод расчета пылеосадительных камер может быть использован для оценки так называемого механического КПД горизонтального электрофильтра, т. е. эффективности пылеулавливания при отключенном источнике питания, а также в некоторых других случаях.

Для равномерного газораспределения по сечению пылеосадительные камеры могут снабжаться диффузорами и газораспределительными решетками, а для снижения высоты осаждения частиц — горизонтальными или наклонными полками. В некоторых конструкциях пылеосадительных камер для повышения их эффективности предусматривается устройство цепных или проволочных завес и отклоняющих перегородок. Это позволяет дополнительно к гравитационному эффекту использовать эффект инерционного осаждения частиц при обтекании потоком газов различных препятствий. Примеры конструкционного оформления пылеосадительных камер приведены на рис. 2.1.

Пылеосадительные камеры занимают много места и в качестве самостоятельных элементов систем пыле- и золоулавливания почти не применяются. Однако упрощен-

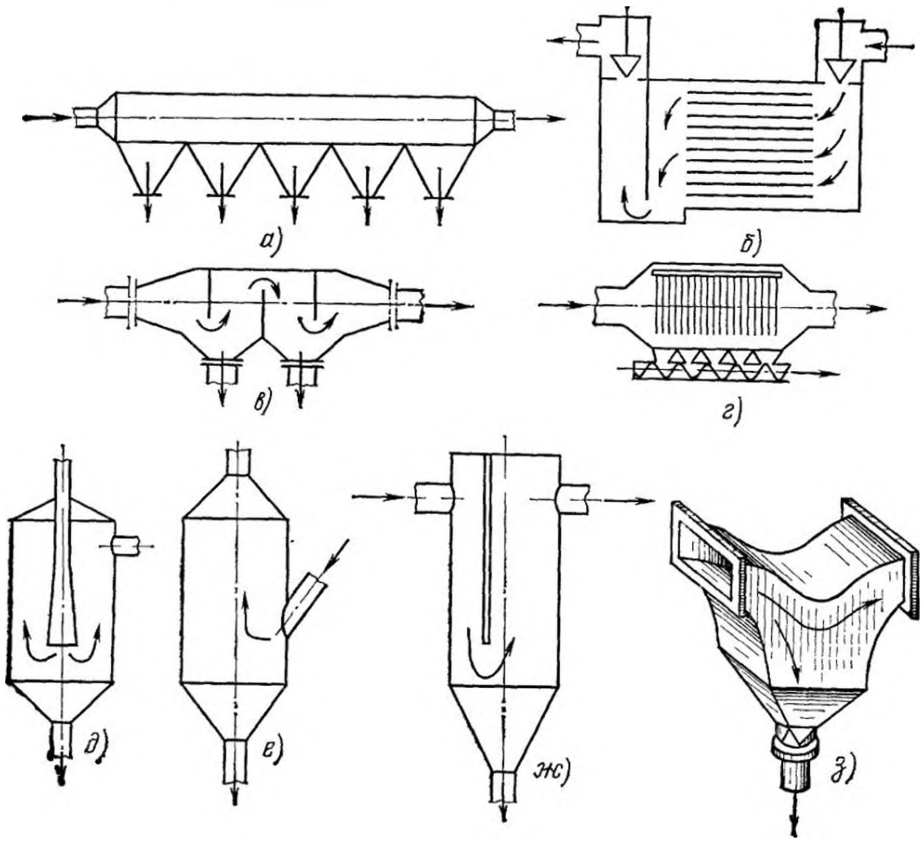


Рис. 2.1. Пылеосадительные камеры и простейшие пылеосадители инерционного действия:

а — простейшая пылеосадительная камера; *б* — многополочная камера; *в* — камера с перегородками; *г* — камера с цепными или проволочными завесами; *д* — пылевой мешок с центральным подводом газа; *е* — пылевой мешок с боковым подводом газа; *ж* — пылеосадитель с отражательной перегородкой, *з* — пылеосадитель, встраиваемый в газоходы

ные варианты пылеосадительных камер находят некоторое применение в качестве элементов основного технологического оборудования. Так, разгрузочные головки ряда вращающихся печей и сушильных барабанов снабжаются некоторым подобием пылеосадительных камер, позволяющих улавливать наиболее крупные частицы для разгрузки основного газоочистного оборудования и предупреждения осаждения частиц в соединительных газоходах.

Простейшие пылеосадители. К простейшим пылеосадителям относятся аппараты, показанные на рис. 2.1,*д*—*з*. В данном случае наряду с действием сил тяжести в значительно большей мере, чем в пылеосадительных камерах с завесами и перегородками, используются инерционные силы, благодаря которым пылевые частицы, стремясь сохранить направление своего движения после поворота потока газов, выпадают в бункер.

Инерционный пылеуловитель (рис. 2.1,*д*) нашел некоторое распространение в черной и цветной металлургии [2.4] под названием пылевого мешка. Скорости газов в подводящей трубе и в корпусе пылевого мешка выбирают в зависимости от вида пыли и желаемой степени улавливания.

В пылевых мешках, устанавливаемых непосредственно за доменными печами на заводах черной металлургии, скорость газов в цилиндре мешка принимают 1,0 м/с и во входной цилиндрической трубе около 10 м/с. При этом для относительно крупных частиц пыли (более 25—30 мкм) достигается степень улавливания 65—85%. Диаметр цилиндрической части мешков, устанавливаемых за доменными печами, достигает 10 м и более; высота цилиндрической части мешков приблизительно равна их диаметру. Гидравлическое сопротивление мешков составляет 150—390 Па (15—40 мм вод. ст.).

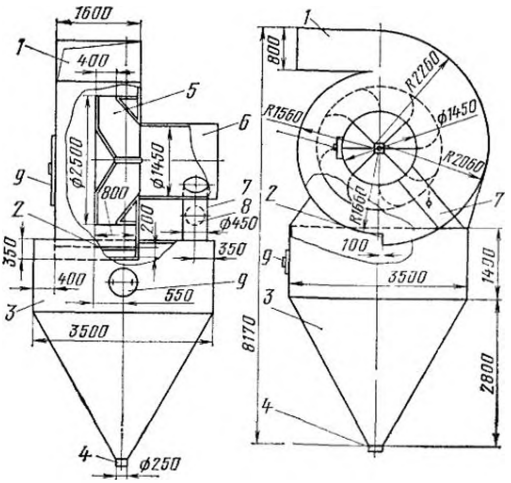


Рис. 2.2. Аппарат предварительного осаждения пыли

1 — входной патрубок; *2* — пылеотводящая щель между улиткой и бункером; *3* — бункер; *4* — патрубок для удаления пыли; *5* — раскручиватель потока; *6* — выходной патрубок; *7* — труба соединительная; *8* — регулирующая заслонка; *9* — смотровой люк

В цветной металлургии пылевые мешки применяются для предварительной очистки сравнительно небольших объемов газов с высокой концентрацией пыли (порядка нескольких сот граммов на 1 м³).

Инерционные пылеуловители вида, показанного на рис. 2.1,*з*, встраиваются в газоходы. Выпадение наиболее крупных частиц в бункер достигается при отклонении потока газов от прямолинейного направления.

В отечественной и зарубежной практике находят некоторое применение пылеуловители, получившие название аппаратов предварительного осаждения. Аппараты применяются как для защиты дымососов от абразивного износа, так и для осаждения основной массы пыли перед высокоэффективными пылеуловителями (рукавными фильтрами, скрубберами Вентури). Пример такого аппарата производительностью $(90 \div 100) \cdot 10^3$ м³/ч приведен на рис. 2.2. Пылевой концентрат, образующийся в улитке аппарата, через специальную щель поступает в бункер, а освободившийся от пыли газ удаляется из бункера через патрубок, соединяющий бункер с отводящим газоходом. Гидравлическое сопротивление аппарата не превышает 450 Па.

2.3. ЖАЛЮЗИЙНЫЕ ПЫЛЕ- И ЗОЛОУЛОВИТЕЛИ

Жалюзийные аппараты благодаря простоте конструкции, дешевизне и малому гидравлическому сопротивлению находили широкое применение как для очистки отходящих газов предприятий различных отраслей промышленности, так и в качестве золоуловителей для очистки дымовых газов электростанций и промышленных котельных. Различные варианты их конструкций и особенности работы подробно изложены в [2.5].

Жалюзийный пылеуловитель (рис. 2.3) состоит из жалюзийной решетки и пылеуловителя, обычно циклона (см. § 2.4). Назначение жалюзийной решетки — разделить газовый поток на две части: одну, в значительной мере освобожденную от пыли и составляющую 80—90% всего количества газа, и другую (10—20%), в которой сосредоточена основная масса содержащейся в газе пыли, улавливаемой затем в циклоне или в другом достаточно эффективном пылеуловителе. Очищенный в циклоне (или в другом способном выполнить эту операцию аппарате) газ возвращается в основной поток газов, очищенных с помощью жалюзийной решетки.

Движение газов через отсосный тракт происходит:

под действием перепада давления на жалюзийной решетке (рис. 2.4,*а*);

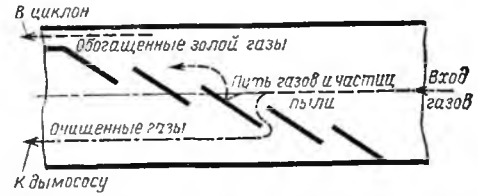


Рис. 2.3. Схемы работы жалюзийного аппарата

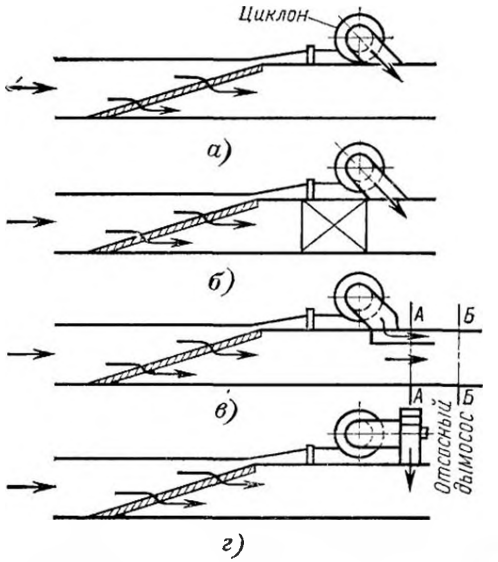


Рис. 2.4. Схема движения газов через пылеконцентратор

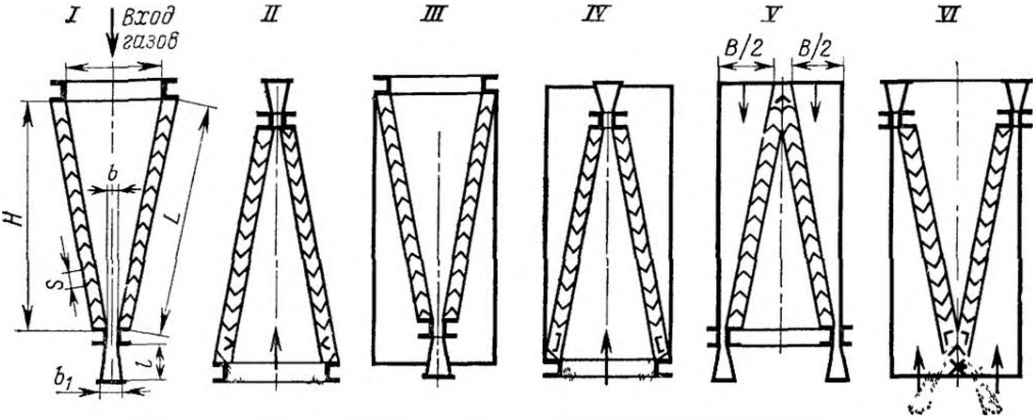


Рис 25 Варианты конструкционного выполнения жалюзийного золоуловителя ВТИ

под действием перепада давления из-за наличия местных сопротивлений основного газохода (если отводящий газоход включается в основной газоход после расположенного в нем местного сопротивления, рис 24,*б*);

под действием перепада давления, создаваемого эжектирующим действием основного потока газов (рис 24,*в*).

Для прососа газов через отсосный пылеуловитель может быть использован специальный вентилятор или дымосос, если по каким-либо причинам это является необходимым (рис 24,*г*)

Поскольку жалюзийный пылеуловитель состоит из жалюзийной решетки и отсосного пылеуловителя (циклона), эффективность улавливания в нем частиц зависит от эффективности самой решетки, эффективности отсосного пыле- или золоуловителя и доли отсасываемого в него газа Если обозначить через φ относительную долю газа, направляемого с пылевым концентратом, то степень очистки газа в жалюзийном пылеуловителе

$$\eta=\eta_ц[1-(1-\varphi)(1-\eta_р)], \qquad (28)$$

где $\eta_ц$ — степень очистки газов в отсосном циклоне (см § 24); $\eta_р$ — степень очистки газов в решетке

Необходимо учитывать, что выражение (28) справедливо при значениях φ не менее 0,1—0,2, так как при φ=0 степень очистки газов в жалюзийном аппарате также равна нулю

Для прикидочных расчетов коэффициента очистки газа в жалюзийном пылеуловителе можно использовать выражение $\eta=0{,}8\eta_р$.

Жалюзийные золоуловители ВТИ с решетками, набираемыми из стальных уголков по конструкционному оформлению и методам расчета основных эксплуатационных характеристик, являются наиболее отработанными аппаратами рассматриваемого типа.

Существует шесть вариантов жалюзийных золоуловителей ВТИ (рис. 25).

Число лопастей из уголка 40×40 мм в их решетках может составлять от 11 до 75, ширина входной камеры B=209÷1425 мм при высоте решетки H=595÷4038 мм Конструкции I, III и V могут устанавливаться в вертикальном газоходе котла при движении газов сверху вниз, а также в горизонтальном газоходе.

Конструкции II, IV, VI предназначены для установки только в вертикальном газоходе при движении газов снизу и имеют в нижней части решетки щели для вывода из камеры очищенных газов и выпавшей в ней пыли

В конструкциях I и II решетка не имеет металлической обшивки, и ее можно устанавливать в газоходах, размеры которых больше размеров входной камеры, или устанавливать в газоходе сдвоенные или строенные решетки Остальные конструкции имеют обшивку, и размеры входной камеры должны соответствовать размерам газохода.

Золоуловители I—IV выполнены с одной отсосной щелью, V, VI — с двумя

Срок службы решеток жалюзийных золоуловителей ВТИ при пылевидном сжигании угля составляет около 6 мес, причем снижение коэффициента очистки за счет их износа наблюдается на третий месяц эксплуатации Поэтому по мере роста требований к степени очистки газов и совершенствованию пылеуловителей других типов для вновь проектируемых газоочистных установок наблюдается тенденция к полно-

му отказу от использования жалюзийных пыле- и золоуловителей

В настоящее время жалюзийные золоуловители ВТИ находят некоторое применение, в основном для очистки дымовых газов от крупных фракций золы, для защиты хвостовых поверхностей нагрева котла (экономайзера, воздухоподогревателя) от истирания золой и для очистки от золы газов, образующихся при сжигании угля и торфа в небольших котлах на обычных колосниковых решетках в тех случаях, когда установка более эффективных золоуловителей невозможна из-за недостатка площади.

Для приближенной оценки возможностей жалюзийного золоуловителя ниже приводятся результаты сравнительных испытаний по улавливанию золы подмосковного угля:

Тип золоуловителя	Остаточная запыленность, г/м³
Слоевое сжигание топлива	
Батарейные циклоны	0,2—0,7
Циклон НИИОГаз	0,2—0,6
Жалюзийный золоуловитель ВТИ	1—2
Пылевидное сжигание топлива	
Батарейный циклон	2—3
Жалюзийный золоуловитель ВТИ	5—7

Гидравлическое сопротивление жалюзийных золоуловителей ВТИ в зависимости от вида топлива и способа сжигания можно принимать в соответствии со следующими данными:

Слоевое сжигание всех видов энергетических топлив

Расположение решеток в горизонтальных газоходах

$$\Delta p = 200 \div 500 \text{ Па};$$

расположение решеток в вертикальных газоходах

$$\Delta p = 100 \div 500 \text{ Па}.$$

Камерное сжигание

Каменные и бурые угли

$$\Delta p = 200 \text{ Па};$$

фрезерный торф

$$\Delta p = 250 \text{ Па};$$

сланцы

$$\Delta p = 100 \text{ Па}.$$

Приведенные данные для соответствующих случаев являются оптимальными, и увеличение Δp ведет к увеличению коэффициента очистки, уменьшению габарита и стоимости золоуловителя, однако при этом увеличивается износ решетки и расход энергии на тягу.

2.4. ЦИКЛОНЫ

Циклоны. В возвратно-поточных циклонах используется центробежная сила, развивающаяся при вращательно-поступательном движении газового потока (рис. 2.6). Под действием центробежной силы частицы золы или пыли подводятся к стенке циклона и вместе с частью газов попадают в бункер. Часть газов, попавших в бункер и освободившихся от пыли, возвращается в циклон через центральную часть пылеотводящего отверстия, давая начало внутреннему вихрю очищенного газа, покидающего аппарат. Отделение частиц от попавших в бункер газов происходит при перемене направления движения газов на 180° под действием сил инерции. По мере

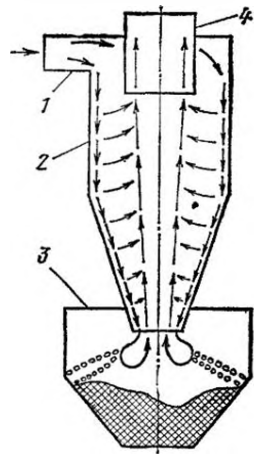


Рис. 2.6. Схема осевых и радиальных течений в корпусе и бункере циклона:

1 — входной патрубок; *2* — корпус циклона; *3* — пылевой бункер; *4* — отводящий патрубок

движения этой части газов в сторону выхлопной трубы к ним постепенно присоединяются порции газов, не попавших в бункер. Последнее не вызывает значительного увеличения выноса пыли в выхлопную трубу, так как распределенное по значительному отрезку длины циклона перетекание газов происходит со скоростью, недостаточной для противодействия движению частиц к периферии циклона. Несравненно большее влияние на полноту очистки газов оказывает их движение в области пылеотводящего отверстия навстречу выделяющейся пыли.

Из вышеизложенного следует: в принципе циклоны могут нормально работать при любом их положении в пространстве, но циклоны чрезвычайно чувствительны к присосам через бункер из-за увеличения объемов газов, движущихся навстречу пыли. Бункер участвует в газодинамике циклонного процесса, поэтому использование циклонов без бункера или с бункерами с уменьшенными против рекомендуемых размерами приводит к ухудшению эффективности работы аппаратов. Некоторое

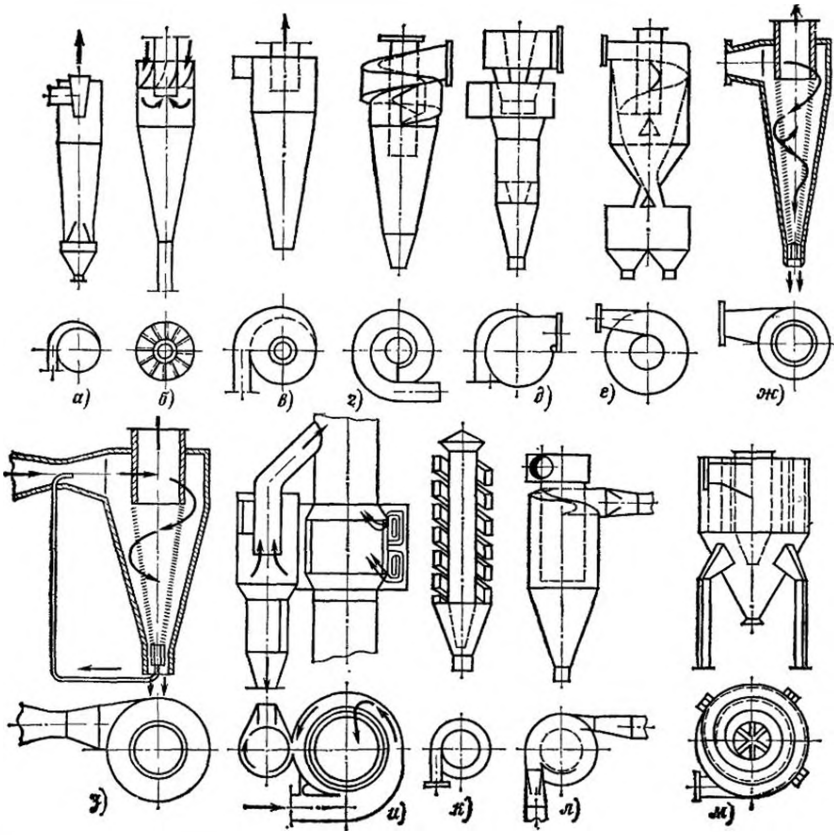


Рис. 2.7. Примеры конструкций циклонов (циклоны, конструкция которых более подробно рассмотрена далее, здесь не приведены):

а и *б* — циклоны ЧССР; *в* — циклон Мельстроя; *г* — циклон типа СВКЦН; *д* — циклон Давидсона; *е* — циклон с двойной стенкой; *ж* — циклон с перфорированной выхлопной трубой; *з* — циклон с рециркуляцией; *и* — двойной циклон; *к* — циклон Сыркина; *л* — циклон ЛИОТ; *м* — циклон Полизиуса

представление о разнообразии конструкционного оформления циклонов дает рис. 2.7.

Сравнительные испытания циклонов различного типа, выполненные НИИОГаз, Семибратовским филиалом НИИОГаз, ЛИОТ и НИИСТ, показали, что рекомендуемая к применению номенклатура циклонов рассматриваемого типа может быть ограничена цилиндрическими и коническими циклонами НИИОГаз.

Циклоны НИИОГаз. К цилиндрическим циклонам НИИОГаз в первую очередь относятся аппараты ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У и ЦН-24 (рис. 2.8 и табл. 2.1). Отличительной особенностью аппаратов является наличие удлиненной цилиндрической части корпуса, наклон крышки входного патрубка под углом 11°, 15° или 24°, а также одинаковое отношение диаметра выхлопной трубы к диаметру циклона. Циклоны ЦН-15У, отличаясь от других циклонов ЦН меньшей высотой, имеют несколько ухудшенные технико-экономические показатели. Поэтому их применение может быть оправдано только в тех случаях, когда имеются ограничения газоочистной установки по высоте.

Особое место среди цилиндрических циклонов НИИОГаз занимает аппарат ЦМС-27, специально разработанный для использования в малых котельных и в промышленных установках, работающих на естественной тяге дымовой трубы (рис. 2.9).

Циклоны ЦН могут применяться как в одиночном, так и в групповом исполнении. В группах циклоны компонуются в два ряда или имеют круговую компоновку в соответствии с рекомендациями, приведенными в табл. 2.2 (рис. 2.10).

К коническим циклонам НИИОГаз относятся аппараты СДК-ЦН-33 и СК-ЦН-34, с удлиненной конической частью, спиральным входным патрубком и малым отношением диаметра выхлопной трубы к диаметру цилиндрической части циклона, равным 0,33 и 0,34 (рис. 2.11 и табл. 2.3).

Таблица 2.1. **Соотношение размеров (в долях внутреннего диаметра) для циклонов ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24**

Наименование	Тип циклона			
	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	ЦН-11
Внутренний диаметр выхлопной трубы d	0,59 для всех типов			
Внутренний диаметр пылевыпускаемого отверстия d_1	0,3—0,4* для всех типов			
Ширина входного патрубка в циклоне (внутренний размер) b	0,2 для всех типов			
Ширина входного патрубка на входе (внутренний размер) b_1	0,26 для всех типов			
Длина входного патрубка l	0,6 для всех типов			
Диаметр средней линии циклона $D_{ср}$	0,8 для всех типов			
Высота установки фланца $h_{фл}$	0,1 для всех типов			
Угол наклона крышки и входного патрубка циклона α	15°	15°	24°	11°
Высота входного патрубка (внутренний диаметр) a	0,66	0,66	1,11	0,48
Высота выхлопной трубы $h_т$	1,74	1,5	2,11	1,56
Высота цилиндрической части циклона $H_ц$	2,26	1,51	2,11	2,06
Высота конуса циклона $H_к$	2,0	1,50	1,75	2,0
Высота внешней части выхлопной трубы $h_в$	0,3	0,3	0,4	0,3
Общая высота циклона H	4,56	3,31	4,26	4,38

* Больший размер принимается при малых D и большой запыленности.

Таблица 2.2. **Рекомендации по компоновке циклонов ЦН в группы**

Диаметр циклона, мм	Количество циклонов в группе, шт.						
	Группы прямоугольной компоновки				Группы круговой компоновки		
	2	4	6	8	10	12	14
200	П	П	П	П	—	—	—
300	О	О	О	О	—	—	—
400	П	П	П	П	—	—	—
500	О	О	О	О	—	—	—
600	П	П	П	П	П	П	П
700	О	О	О	О	—	—	—
800	П	П	П	П	П	П	П
900	П	П	П	П	—	—	—
1000	П	П	П	П	П	П	П
1200	П	П	—	—	—	—	—
1400	П	П	—	—	—	—	—
1600	П	П	—	—	—	—	—
1800	П	П	—	—	—	—	—

Примечание. П—группы, рекомендуемые для преимущественного применения; О—группы ограниченного применения (по возможности не применять).

Конические циклоны при равных производительностях с цилиндрическими отличаются от последних большим габаритом и поэтому обычно не применяются в групповом исполнении.

Применительно к установкам каталитического крекинга нефтепродуктов, дегидрирования бутана, а также производства сажи разработаны модернизированные конические циклоны СК-ЦН-34М. Эти циклоны применимы для улавливания пылей, обладающих высокой абразивностью частиц или их высокой слипаемостью. Однако потери давления в этих циклонах примерно в 2 раза больше, чем в конических циклонах СДК-ЦН-33 и СК-ЦН-34. Циклоны обеспечивают наибольшую эффективность пылеулавливания.

Циклоны могут выполняться как для «правого», так и для «левого» вращения газового потока. «Правым» принято называть вращение газового потока в циклоне по часовой стрелке, если смотреть со стороны выхлопной трубы, «левым» — вращение против часовой стрелки. Согласно ГОСТ 9617-67 для циклонов принят следующий ряд диаметров: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 и 3000 мм.

Для ограничения числа типоразмеров групповых циклонов, сборки из аппаратов с диаметрами 300, 500 и 700 мм рекомендуется по возможности не применять (см. табл. 2.2), а заменять их равноценными по производительности группами из циклонов других диаметров.

Для всех одиночных циклонов бункеры выполняются цилиндрической формы.

Таблица 2.3. **Соотношение размеров (в долях диаметра D) для циклонов СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М**

Наименование	Тип циклона		
	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
Внутренний диаметр цилиндрической части D	До 3600 мм		До 4000 мм
Высота цилиндрической части $H_ц$	0,535	0,515	0,4
Высота конической части $H_к$	3,0	2,110	2,6
Внутренний диаметр выхлопной трубы d	0,334	0,340	0,22
Внутренний диаметр пылевыпускного отверстия d_1	0,334	0,229	0,18
Ширина входного патрубка b	0,264	0,214	0,18
Высота внешней части выхлопной трубы $h_з$	0,2—0,3	0,2—0,3	0,3
Высота установки фланца $h_{фл}$	0,1	0,1	0,1
Высота входного патрубка a	0,535	0,515	0,4
Длина входного патрубка l	0,6	0,6	0,6
Высота заглубления выхлопной трубы $h_т$	0,535	0,515	0,4
Текущий радиус улитки ρ	$D/2+b\varphi/2\pi$	$D/2+b\varphi/\pi$	$D/2+b\varphi/\pi$

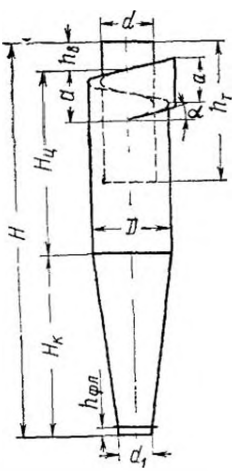


Рис. 2.8. Циклон типа ЦН

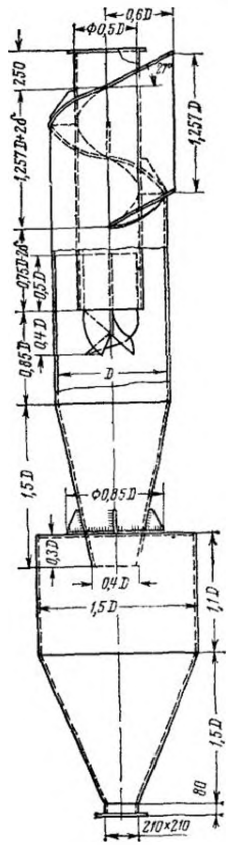


Рис 2.9. Циклон ЦМС-27

Рекомендуемые диаметры бункеров принимаются в соответствии с рядом диаметров по ГОСТ 9617-67 исходя из следующих соотношений:

$D_б=1,5D$ (для цилиндрического циклона); $D_б=1,1\div1,2D$ (для конического циклона).

Высота цилиндрической части бункера принимается $0,8D$, днище бункера выполняется по ГОСТ 1260-67 с углом стенок 60°.

В отдельных случаях (при отсутствии необходимой площади для размещения бункера) разрешается уменьшение диаметра бункера до $0,8D$ при обязательном сохранении расчетного объема.

Для установки на опорные конструкции бункеры снабжаются лапами по МН 5128-63.

Тип опорных лап выбирается в зависимости от массы аппарата с пылью и условий его установки. Плоские крышки цилиндрических бункеров должны быть снабжены ребрами жесткости, размеры которых определяются исходя из давления (разрежения) в аппарате и действующих нагрузок.

Для осмотра и очистки бункеров предусматриваются люки диаметром 250 или 500 мм.

Отверстия для выгрузки пыли $d_в$ приняты в зависимости от емкости бункеров и производительности циклонов 200, 300 и 500 мм.

В виде исключения для бункеров диаметром 300 и 500 мм приняты пылевыпускные отверстия соответственно 100 и 150 мм. Размеры фланца на штуцере выгрузки пыли должны соответствовать присоединительным размерам пылевых затворов.

Группы циклонов чаще всего составляют из циклонов основной серии ЦН (ЦН-24, ЦН-15У; ЦН-15, ЦН-11). Как правило, группы циклонов (рис. 2.10) имеют общие коллектор грязного газа, сборник очищенного газа и пылевой бункер. Пылевые бункеры циклонных групп могут иметь круглую либо прямоугольную форму. Для групп из двух и четырех циклонов применяются обе формы бункеров, а для групп из шести и восьми — только прямоуголь-

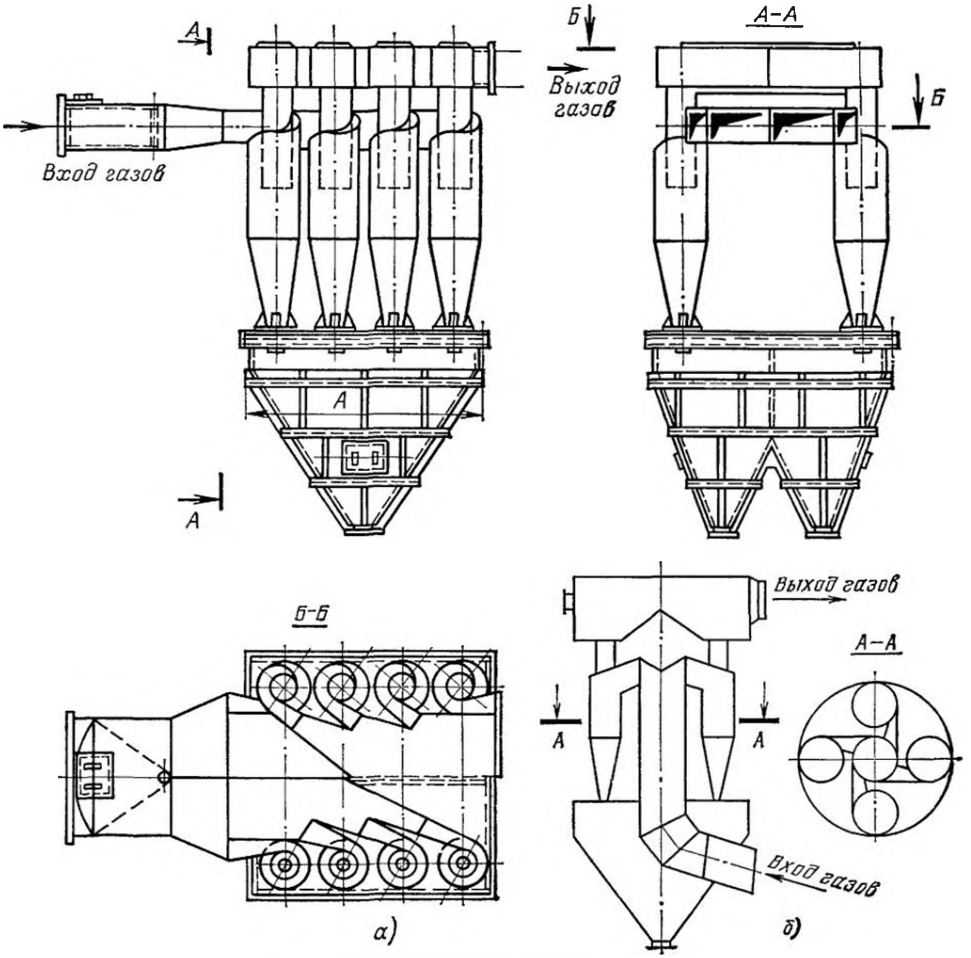


Рис. 2.10. Компоновки циклонных групп:
а — прямоугольная; *б* — круговая

ные. Необходимые объемы пылевых бункеров определяются их назначением. Объем бункера, оборудованного устройствами для непрерывной выгрузки пыли, может быть выбран меньшим, чем объем бункера, предназначенного для накопления и периодической выгрузки пыли. Минимальное расстояние от оси циклона до стенки бункера не должно быть меньше 0,4D, где D — диаметр циклона. Высота прямоугольной части бункера (или цилиндрической) должна быть не менее 0,5D. Угол наклона стенок бункера к горизонту принимается не менее 60°. Конусы циклонов опускаются в бункер на глубину, равную 0,8 диаметра отверстия в них. Для уменьшения общей высоты бункера при непрерывной выгрузке пыли допускается устанавливать в одной группе циклонов несколько бункеров.

Отвод очищенного газа от циклонов группы выполняется либо через улитки, устанавливаемые на каждом циклоне и объединяемые общим коллектором (рис. 2.12,*а*), либо непосредственно через общий коллектор группы (рис. 2.12,*в*). Применение выходных улиток уменьшает необходимую высоту группы. Схема присоединения к подводящему коллектору грязного газа показана на рис. 2.10.

Для осмотра бункеров и объединяющих циклоны коллекторов предусматриваются съемные люки диаметром 250 или 500 мм. В некоторых случаях съемные люки устанавливают на выходных улитках циклонов.

В [2.8] для снижения газодинамического сопротивления групп рекомендована установка кольцевых диффузоров на вы-

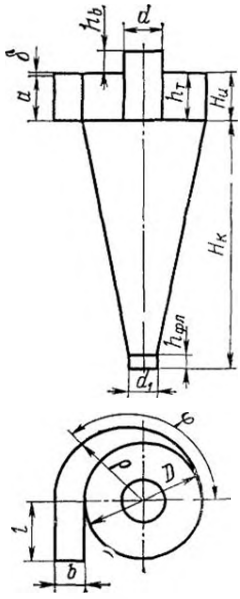


Рис. 2.11. Спирально-конический циклон ЦН

хлопные трубы циклонов. Кроме того, нормализованы размеры бункеров-пыленакопителей и исключены компоновки с отводом газов от циклонов через раскручивающие улитки. Это приводит к неоправданному увеличению металлоемкости групповых циклонов. Поэтому в дальнейшем НИИОГаз и институтом Гипрогазоочистка принято решение о компоновке групповых циклонов, рекомендуемой изданием Руководящих указаний 1961 г.

Таблица 2.4. Соотношение размеров (в долях диаметра D) для циклонов типа ВЦНИИОТ (рис. 2.13)

Наименование	Величина
Внутренний диаметр цилиндрической части D	До 1000 мм
Высота цилиндрической части $H_ц$	2,0
Высота конической части $H_к$	3,0
Внутренний диаметр выхлопной трубы d	0,5
Диаметр нижней части конуса D_1	1,6
Диаметр внутреннего конуса D_2	1,4
Диаметр отверстия внутреннего конуса d_1	0,1
Высота внутреннего конуса $h_к$	0,68
Высота заглубления выхлопной трубы h	2,1
Полная высота циклона H	5,2
Длина входного патрубка l	0,6
Высота входного патрубка a	1,0
Ширина входного патрубка b	0,25
Текущий радиус улитки r	$D/2+b\varphi/\pi$

Примечание. Размеры бункеров $H_б$, $h_б$, $D_в$ не нормализованы. Допускается применение бункеров, пылевыгрузных устройств и опорных конструкций, рекомендуемых для аппаратов ЦН.

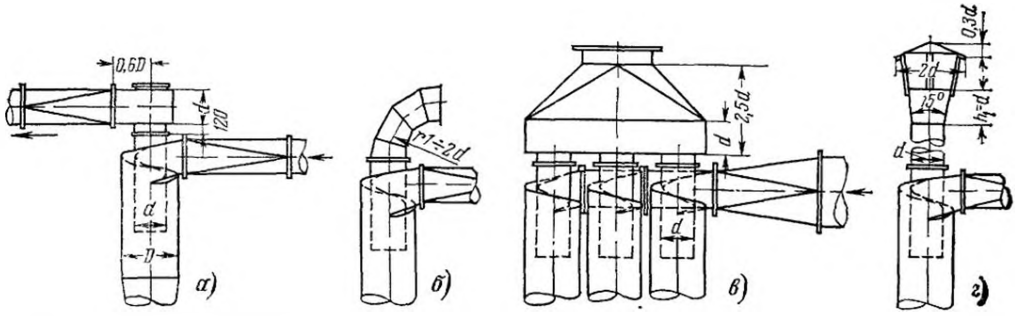


Рис. 2.12. Варианты конструкционного оформления отвода газов от циклонов: *а* — улитка, *б* — колено; *в* — общий сборник группы циклонов; *г* — выхлопная труба в атмосферу

Циклоны ВЦНИИОТ и СИОТ. Наряду с циклонами НИИОГаз в отдельных отраслях промышленности находят применение и циклоны других конструкций. Последнее объясняется главным образом тем, что некоторые проектные организации имеют рабочие чертежи таких циклонов, а предприятия — технологическую оснастку для их изготовления.

На многих предприятиях машиностроения и легкой промышленности установлены циклоны ВЦНИИОТ (рис. 2.13, табл. 2.4), разработанные Всесоюзным центральным научно-исследовательским институтом охраны труда, а также циклоны СИОТ

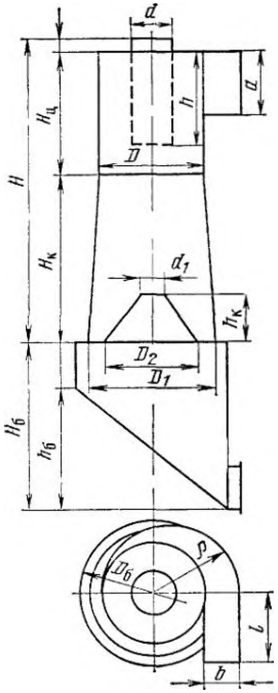


Рис. 2.13 Циклон ВЦНИИОТ

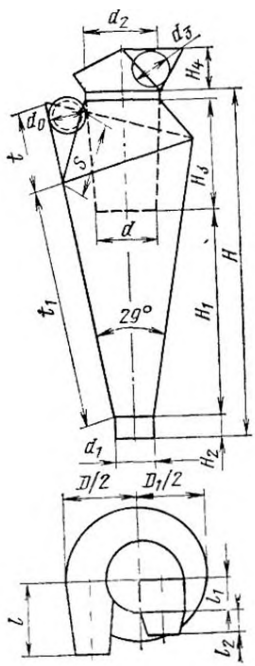


Рис. 2.14. Циклон СИОТ

(рис. 2.14, табл. 2.5), разработанные Свердловским филиалом этого института. Правила построения довольно сложных разверток элементов циклона СИОТ приводятся в [2.9].

Таблица 2.5. Соотношение размеров (в долях диаметра $D_у$) для циклона СИОТ

Наименование	Величина
Условный диаметр циклона $D=D_у$	До 2000 мм
Диаметр входного патрубка d_0	0,230
Диаметр выходного патрубка улитки d_3	0,230
Диаметр выхлопной трубы в нижней ее части d	0,392
То же в верхней части d_2	0,438
Диаметр отверстия конуса d_1	0,092
Габаритный размер конуса $D_1/2$	0,454
Размеры сторон:	
входного патрубка t	0,306
треугольной формы S	0,361
Длина образующей конуса t_1	1,610
Высота цилиндрического патрубка H_2	0,184
Высота свободной части конуса H_1	1,200
Глубина погружения выхлопной трубы H_3	0,490
Полная высота циклона H	1,910
Высота раскручивания H_4	0,254
Длина входного патрубка l	0,468
Длина треугольной части выходного патрубка l_1	0,280
Длина перехода с треугольного патрубка на круг l_2	0,334

Примечания: 1. Развертки фасонных частей — корпуса циклона, входного и выходного патрубков, раскручивателя потока приводятся в [2.9].

2. Условный диаметр циклона $D_у$ принят равным размеру D_1.

Основная особенность циклонов ВЦНИИОТ связана со способом транспортировки отсепарированной пыли из корпуса в сборный бункер. Поток газа вместе с пылью проходит в бункер через кольцевую щель, образованную двумя соосными конусными поверхностями

Освободившийся от пыли газ возвращается обратно в корпус циклона через центральное отверстие внутреннего конуса. Такая конструкция отвода пыли в бункер позволяет применять этот аппарат для улавливания пылей с повышенными абразивными свойствами.

Циклоны СИОТ характеризуются треугольной формой входного и отводящего

Таблица 2.6. **Соотношение размеров (в долях диаметра D) циклона типа ОЭКДМ („Клайпеда")**

Наименование	Величина
Диаметр циклона D	До 3400 мм
Диаметр пылевыпускного патрубка D_1	0,2
Диаметр цилиндрической части выхлопной трубы D_2	0,59
Диаметр расширенной части выхлопной трубы D_3	0,90
Диаметр раскручивателя потока D_4	0,46
Диаметр водосборного конуса D_5	0,59
Диаметр отверстия подвижного конуса D_6	0,228
Диаметр подвижного конуса D_7	0,85
Полная высота циклона A	2,95
Высота циклона без водосборного устройства $Б$	2,00
Высота цилиндрической части циклона $Ж$	0,71
Высота конической части $Г$	1,23
Высота конической верхней крышки $З$	0,14
Полная высота водосборника $В$	0,97
Высота входного патрубка $а$	0,25
Ширина входного патрубка $б$	0,195

патрубков, что не оказывает влияния на процесс очистки газов и не приводит к каким-либо преимуществам по сравнению с циклонами ЦН. Циклоны не приспособлены для улавливания пылей с повышенными абразивными свойствами.

Циклоны ВЦНИОТ и СИОТ плохо компонуются в группы, и в подавляющем большинстве случаев устанавливаются аппараты с раздельными бункерами.

Циклоны ОЭКДМ и Ц. Типовые проекты пылеулавливающих установок деревообрабатывающих производств предусматривают установку циклонов ОЭКДМ (другое название «Клайпеда»), а также Ц (Меркушева) (рис. 2.15 и 2.16, табл. 2.6 и 2.7).

В отличие от циклонов, рассмотренных ранее, не все конструкционные размеры циклонов «Клайпеда» и Ц могут быть выражены в долях от диаметра аппарата. Поэтому изготовление аппаратов указанных типов следует вести по рабочим чертежам, приведенным в [2.10].

Особенности циклонов «Клайпеда» и Ц связаны со способом отвода потока из корпуса в выхлопную трубу. В выхлопные трубы циклонов поступают два потока газа (показано стрелками на рис. 2.15), при этом в циклоне «Клайпеда» дополнительный поток газа входит в зазор между выхлопной трубой и ее нижней конусной частью, не изменяя направления вращения, а в циклоне типа Ц лопастной сепаратор (конструкция показана на рис. 2.16 в уве-

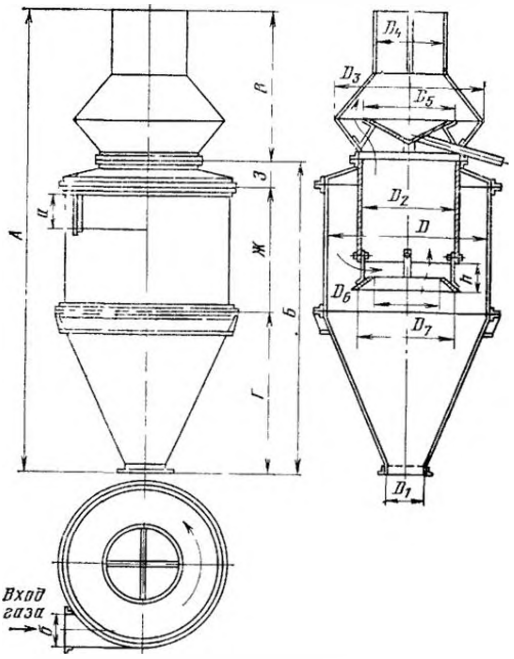


Рис. 2.15. Циклон ОЭКДМ (Клайпеда)

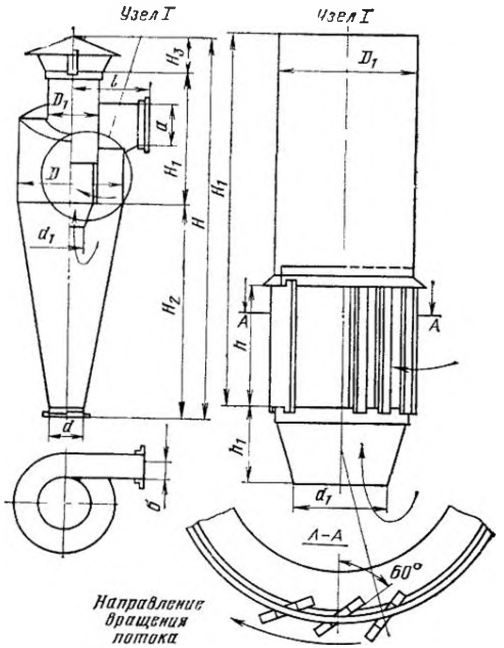


Рис. 2.16. Циклон типа Ц (Меркушева)

Таблица 2.7. **Соотношение размеров (в долях диаметра D) циклона типа Ц (Меркушева)**

Наименование	Величина
Диаметр циклона D	До 1600 мм
Диаметр отверстия конуса d	0,367
Диаметр отверстия конуса выхлопной трубы d_1	0,36
Диаметр выхлопной трубы D_1	0,6
Высота сепаратора h	0,6
Высота конуса под сепаратором h_1	0,3
Высота выхлопной трубы H_1	1,7
Высота конуса H_2	2,42
Полная высота циклона H	4,62
Высота входного патрубка a	0,5
Ширина входного патрубка $б$	0,25
Длина входного патрубка l	0,75
Высота дождевого козырька H_3	0,21

Примечание. Бункеры циклона не нормализованы. Размеры деталей сепаратора (лопасти и их крепления) изменяются не в прямой пропорции к диаметру циклона.

личенном масштабе) изменяет направление вращения этого потока на противоположное.

Циклоны «Клайпеда» и Ц, как правило, устанавливаются на нагнетательном тракте вентиляторов и снабжены устройствами, защищающими аппараты от попадания в них атмосферных осадков.

Давление в бункерах циклонов типа Ц доходит до 500—1000 Па, а «Клайпеда» — до 150 Па.

Циклоны типа Ц не рекомендуется применять для улавливания древесной стружки, так как стружка забивает их внутренние сепараторы.

При работе на древесной пыли циклоны и бункеры заземляются.

Объединение нескольких циклонов «Клайпеда» на одном пылесборном бункере (обычно 4—5 циклонов), предусматриваемое типовыми решениями [2.10], только условно можно называть группами. В такие группы включаются циклоны различной производительности по газу (различных диаметров) с нерегламентированными направлениями вращения потоков в соседних аппаратах. Для выравнивания отметок осей входных патрубков циклонов по высоте между циклонами меньшего диаметра и бункерами устанавливаются переходные патрубки, диаметры которых равны диаметрам нижних пылевыпускных отверстий циклонов. Все отмеченные особенности таких групп при различных давлениях, создаваемых вентиляторами, неизбежно приводят к перетокам воздуха между циклонами, ухудшающим эффективность очистки.

Из-за этого на ряде установок наблюдались существенно пониженные значения эффективностей пылеулавливания. На указанном основании типовые решения, приведенные в [2.10], не могут быть рекомендованы к применению.

Расчет циклонов

Для расчетов циклонов необходимы следующие исходные данные:

количество очищаемого газа при рабочих условиях $Q_р$, м³/с;

плотность газа при рабочих условиях $\rho_г$, кг/м³;

динамическая вязкость газа при рабочей температуре $\mu_г$, Па·с;

дисперсный состав пыли, задаваемый двумя параметрами d_m, мкм, и $\lg \sigma_ч$;

запыленность газа $c_{вх}$, г/м³;

плотность частиц $\rho_ч$, кг/м³;

требуемая эффективность очистки газа η.

Расчеты могут показать, что при заданных условиях невозможно обеспечить

Таблица 2.8. **Параметры, определяющие эффективность циклонов НИИОГАЗ**

Параметры	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
$d^{т}_{50}$, мкм	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13
$\lg \sigma^{т}_{\eta}$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340
$w_{опт}$, м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0

Примечания: 1. Значения $d^{т}_{50}$, приведенные в таблице, соответствуют следующим условиям работы циклонов: средняя скорость газа в циклоне $w_{опт}=3,5$ м/с; диаметр циклона $D_г=0,6$ м; плотность частиц $\rho_{ч.т}=1930$ кг/м³; динамическая вязкость газа $\mu_т=22,2\cdot10^{-6}$ Па·с.

2. Для циклона типа ЦМС параметры не определялись.

3. В некоторых справочных материалах, например в [2.11, 2.12], ошибочно указаны другие значения оптимальных скоростей в циклонах НИИОГаз. Для циклонов СК-ЦН-34, например, рекомендуется принимать оптимальную скорость 2,5 м/с. При этом гидравлическое сопротивление циклона резко возрастает, а эффективность пылеулавливания либо незначительно увеличивается либо уменьшается. Характер влияния повышенных скоростей потока на эффективность пылеулавливания зависит от производительности установки и свойств пыли. Степень эксплуатационной надежности работы циклона на режиме с повышенными скоростями чаще всего понижается.

Таблица 2.9. Параметры, определяющие эффективность циклонов конструкции ВЦНИИОТ и Гипродревпром

Параметр	Марка циклона			
	СИОТ	ВЦНИИОТ	Ц	„Клайпеда"
$d^{т}_{50}$, мкм	2,6	8,6	4,12	3,1
$\lg \sigma^{т}_{\eta}$	0,28	0,32	0,34	0,25
$w_{опт}$, м/с	1,00	4,00	3,3	1,1
ξ	1400	75	210	1300

Примечания: 1. Значения $d^{т}_{50}$, приведенные в таблице, соответствуют следующим условиям работы циклонов: средняя скорость газа в циклоне $w_{опт}$; диаметр циклона $D_{т}=0{,}6$ м; плотность частиц $\rho_{ч,т}=1930$ кг/м³; динамическая вязкость газа $\mu_{т}=22{,}2\times10^{-6}$ Па·с.

2. Значение коэффициента гидравлического сопротивления циклона „Клайпеда" относится к нижнему положению подвижного конуса под выхлопной трубой.

требуемое значение коэффициента очистки газов или для этого необходимы чрезмерные потери давления. В последнем случае только экономический расчет различных схем пылеулавливания может определить оптимальные аппараты.

Расчет циклонов проводится методом последовательных приближений в следующем порядке.

1. Задавшись типом циклона, по табл. 2.8 или 2.9 определяют оптимальную скорость газа в аппарат $w_{опт}$.

2. Определяют необходимую площадь сечения циклонов, м²:

$$F=\frac{Q_{р}}{w_{опт}}. \qquad (2.9)$$

3. Определяют диаметр циклона, задаваясь количеством циклонов N:

$$D=\sqrt{\frac{F}{0{,}785N}}. \qquad (2.10)$$

Диаметр циклона округляют до величины, рекомендуемой табл. 2.2.

4. Вычисляют действительную скорость газа в циклоне, м/с:

$$w=\frac{Q_{р}}{0{,}785ND^{2}}. \qquad (2.11)$$

Скорость газа в циклоне не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15%.

5. Принимают по табл. 2.9 или 2.10 коэффициент гидравлического сопротивления, соответствующий заданному типу циклона. Для циклонов НИИОГаз (одиночных или групп) вводят уточняющие поправки по формуле

$$\zeta=K_{1}K_{2}\zeta^{с,п}_{ц\,500}+K_{3}, \qquad (2.12)$$

Таблица 2.10. Значения коэффициентов сопротивления циклонов (D=500 мм, $w_{т}$=3 м/с)

Марка циклона	d/D	Без дополнительных устройств		С выходной улиткой	С отводом 90° R/d=1,5	
		$\zeta^{с}_{ц\,500}$	$\zeta^{п}_{ц\,500}$	$\zeta^{с}_{ц\,500}$	l/d=0÷12, $\zeta^{с}_{ц\,500}$	l/d>12, $\zeta^{с}_{ц\,500}$
ЦН-11	0,59	245	250	235	245	250
ЦН-15	—	155	163	150	155	160
ЦН-15У	—	165	170	158	165	170
ЦН-24	—	75	80	73	15	80
СДК-ЦН-33	0,33	520	600	500	—	560
СК-ЦН-34	0,34	1050	1150	—	—	—
СК-ЦН-34М	0,22	—	2800	—	—	—

где $\zeta^{с,п}_{ц\,500}$ — коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм, принимаемый по табл. 2.10. Индекс «с» означает, что циклон работает в гидравлической сети, а «п» — без сети, т. е. прямо на выхлоп в атмосферу; K_{1} — поправочный коэффициент на диаметр циклона, определяемый по табл. 2.11; K_{2} — поправочный коэффициент на запыленность газа, определяемый по табл. 2.12; K_{3} — коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу, определяемый по табл. 2.13.

Таблица 2.11. Поправочный коэффициент K_{2} на влияние диаметра циклона

D, мм	Марка циклона		
	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М
150	0,94	0,85	1,0
200	0,95	0,90	1,0
300	0,96	0,93	1,0
450	0,99	1,0	1,0
500	1,0	1,0	1,0

Таблица 2.12. Значения поправочных коэффициентов K_{2} на запыленность газов (D=500 мм)

Марка циклона	Запыленность 10³ кг/м³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15У	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,85
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,95	—	—	—

Таблица 2.13. **Значения поправочных коэффициентов K_3 для групп циклонов ЦН**

Характеристика группового циклона	K_3
Круговая компоновка, нижний организованный подвод	60
Прямоугольная компоновка, циклонные элементы расположены в одной плоскости. Отвод из общей камеры чистого газа	35
То же, но улиточный отвод из циклонных элементов	28
Прямоугольная компоновка. Свободный подвод потока в общую камеру	60

Для одиночных циклонов $K_3=0$.

Для одиночных циклонов других конструкций (табл. 2.9) поправки не разработаны.

6. Определяют потери давления в циклоне

$$\Delta p=\zeta\frac{\rho w^2}{2}. \qquad (2.13)$$

Если потери давления Δp оказались приемлемыми, переходят к расчету полного коэффициента очистки газа в циклоне. При этом принимается, что коэффициент очистки газов в одиночном циклоне и в группе циклонов одинаков. В действительности коэффициент очистки газов в группе циклонов может оказаться несколько ниже, чем в одиночном циклоне. Это объясняется возможностью возникновения перетоков газа через общий бункер, снижающих коэффициент очистки газов в группе циклонов.

7. Приняв по табл. 2.8 или 2.9 два параметра ($d^{\text{т}}_{50}$ и $\lg\sigma^{\text{т}}_{\eta}$), характеризующих эффективность выбранного типа циклона, определяют значение параметра d_{50} при рабочих условиях (диаметр циклона, скорость потока, плотность пыли, динамическая вязкость газа) по уравнению

$$d_{50}=d^{\text{т}}_{50}\sqrt{(D/D_{\text{т}})\,\rho_{\text{ч.т}}/\rho_{\text{ч}}\,(\mu/\mu_{\text{т}})\,w_{\text{т}}/w}. \qquad (2.14)$$

8. Определяют параметр x по формуле

$$x=\frac{\lg d_m/d_{50}}{\sqrt{\lg^2\sigma_{\eta}+\lg^2\sigma_{\text{ч}}}}.$$

9. Определяют по табл. 1.11 значение $\Phi(x)$, представляющее собой полный коэффициент очистки газа, выраженный в долях.

По окончании расчета полученное значение η сопоставляется с требуемым. Если η окажется меньше требуемого, необходимо выбрать другой тип циклона с большим значением коэффициента гидравлического сопротивления. Для ориентировочных расчетов необходимого значения $\zeta_{\text{ц}}$ рекомендуется следующая зависимость:

$$\zeta_{\text{ц}_2}=\zeta_{\text{ц}_1}\left(\frac{100-\eta_{\text{п}}}{100-\eta}\right)^2\frac{w_1}{w_2}\,\frac{D_2}{D_1}, \qquad (2.15)$$

где индекс 1 относится к расчетным, а индекс 2 — к требуемым значениям параметров циклона.

Расчет установки нескольких циклонов

Коэффициент очистки газов в установке, состоящей из двух или более последовательно установленных циклонов, удобно определять по графикам парциальных проскоков через каждый из циклонов, нанесенным на вероятностно-логарифмическую систему координат (см. § 1.3). Расчет ведется в следующей последовательности.

1. Определяют значения d_{50} согласно п. 7 расчета для каждого из последовательно установленных циклонов.

2. Определяют значения $d_{15,9}$ для каждого из циклонов по уравнению

$$\lg d_{15,9}=\lg\sigma_{\eta}+\lg d_{50}. \qquad (2.16)$$

3. В вероятностно-логарифмической системе координат (ординаты сетки должны быть представлены в относительных долях) наносят точки d_{50} и $d_{15,9}$ каждого из циклонов. Точки d_{50} и $d_{15,9}$ соединяют прямыми парциальных проскоков через циклоны.

4. Определяют общий парциальный проскок через систему из двух последовательно установленных циклонов по уравнению

$$\varepsilon_{1=2}=\varepsilon_1\varepsilon_2, \qquad (2.17)$$

где $\varepsilon_{1=2}$ — общий парциальный проскок; ε_1 — парциальный проскок для первого циклона; ε_2 — для второго.

Кривую $\varepsilon_{1=2}$ наносят на тот же график.

5. Проводят прямую линию, аппроксимирующую кривую $\varepsilon_{1=2}$, и находят значения d_{50} и $\lg\sigma_{\eta}$, характеризующие эту прямую.

6. Определяют η по уравнению (1.54) и по табл. 1.11.

2.5. ПРЯМОТОЧНЫЕ ЦИКЛОНЫ

Прямоточные циклоны. Попытки снизить гидравлическое сопротивление циклонных пылеуловителей при одновременном уменьшении габарита и получении целого ряда других преимуществ привели к разработке прямоточных циклонов.

Как правило, при учете всех технико-экономических показателей, принимаемых во внимание в процессе выбора пылеулавливающего аппарата, прямоточные циклоны не выдерживают сравнения с обычными

циклонами из-за меньшей эффективности улавливания. Тем не менее в ряде специальных случаев их применение оказывается оправданным. На прямоточные циклоны большого диаметра удобно наносить футеровку, и они имеют малое гидравлическое сопротивление, поэтому циклоны можно использовать в качестве износостойких пылеуловителей для отделения крупных, вы-

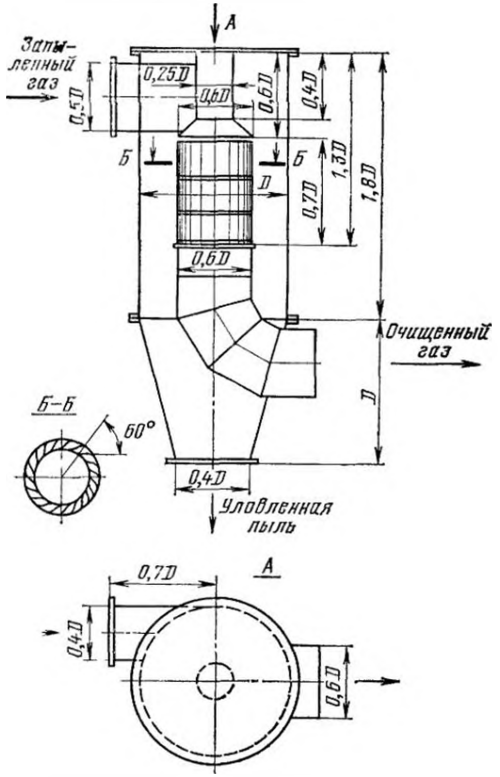


Рис. 2.17. Прямоточный циклон ЦКТИ

зывающих ее разрушение частиц высокоабразивной золы или пыли, устанавливая их перед эффективными, но чувствительными к износу аппаратами Если в дисперсном составе пыли благодаря тем или иным особенностям технологического процесса содержание мелких частиц невелико, то прямоточные циклоны могут использоваться в качестве самостоятельных пылеуловителей.

Для ряда систем золоулавливания в качестве первой ступени очистки ЦКТИ рекомендовано применение вертикальных футерованных прямоточных циклонов (рис. 2.17). Футеровка циклонов выполняется из термокислотоупорной керамической плитки ТК 230×113×50

По данным Е Ф Кирпичева, коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к полному сечению аппарата, равен 47.

Нанесение в вероятностно-логарифмической системе координат значений парциальных коэффициентов очистки дымовых газов от сланцевой золы, экспериментально полученных Е. Ф. Кирпичевым в прямоточном циклоне ЦКТИ, показало, что через соответствующие точки можно провести прямую линию. Последнее позволяет записать зависимость $\eta = f(d_ч)$ двумя параметрами логарифмически-нормального распределения $d_{50} = 20$ мкм; $\lg \sigma_\eta = 0{,}242$ при средней скорости потока в аппарате 5,7 м/с и температуре газа около 140 °С.

Ориентировочное значение скорости газового потока в прямоточном циклоне, при которой коэффициент очистки приобретает величину, близкую к максимально допустимой, составляет 8 м/с. Используя приведенные данные, полный коэффициент очистки газов в прямоточном циклоне ЦКТИ можно определить, применяя ту же схему расчета, которая дана для обычных циклонов в § 2.4.

2.6. БАТАРЕЙНЫЕ ЦИКЛОНЫ

Батарейные циклоны представляют собой пылеулавливающие аппараты, составленные из большого количества параллельно установленных циклонных элементов, объединенных в одном корпусе и имеющих общие подвод и отвод газов, а также сборный бункер.

Корпус батарейного циклона, как правило, выполняется секционированным для сохранения оптимальной скорости движения газов в циклонных элементах при переменных нагрузках путем отключения соответствующих секций. Кроме того, секционирование уменьшает возможность ухудшения степени очистки газов за счет их перетока из одних элементов в другие через пылевой бункер, связанного с неодинаковым гидравлическим сопротивлением отдельных элементов (неодинаковостью их изготовления и неравномерным распределением газа по отдельным элементам), неодинаковой «пылевой нагрузкой» на элементы.

Батарейные циклоны могут быть составлены из возвратнопоточных и прямоточных циклонных элементов [2.13].

Для закрутки газов в возвратнопоточных циклонных элементах отечественных конструкций ранее применялись либо направляющие аппараты типа «винт» с двумя винтовыми лопастями, наклоненными под углом 25°, либо аппараты типа «розетка» с восемью лопатками, наклоненными под углом 25 или 30° (рис. 2.18).

Направляющий аппарат типа «винт» менее склонен к забиванию золой или пылью, имеет меньший коэффициент гид-

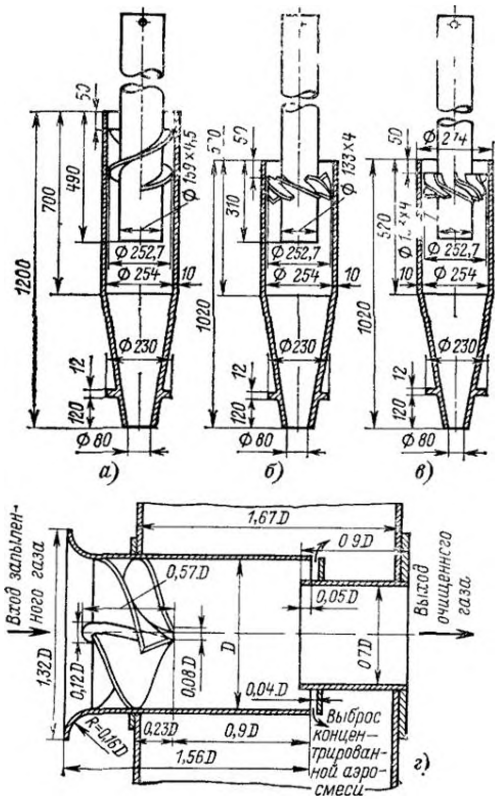


Рис. 2 18. Циклонные элементы батарейных циклонов с осевым направляющим аппаратом:

а — с направляющим аппаратом типа «винт»; *б* — с направляющим аппаратом типа «розетка»; *в* — с направляющим аппаратом типа «розетка» с безударным входом; *г* — циклонный элемент прямоточного батарейного циклона ЦКТИ

равлического сопротивления, но одновременно обеспечивает и меньшую степень очистки, чем аппарат типа «розетка». Аппарат типа «розетка» с безударным входом обеспечивает ту же степень очистки, что и обычный аппарат типа «розетка», при меньшем коэффициенте гидравлического сопротивления

Угол наклона лопаток 25° способствует более высокому коэффициенту очистки газа, но увеличивает гидравлическое сопротивление элемента по сравнению с сопротивлением при угле наклона 30°.

Степень очистки газов в рассмотренных элементах батарейных циклонов несколько ниже той, которая может быть достигнута в эквивалентных по диаметру циклонах. Считается, что при одинаковых потерях давления примерно равной эффективностью обладают одиночные циклоны типа ЦН-15 вдвое большего диаметра, чем элементы батарейного циклона. Это объясняется тем, что между направляющим аппаратом и корпусом элемента батарейного циклона всегда имеются зазоры, через которые происходит обратное перетекание газа из элемента во входную камеру. Переток газа ухудшает эффективность улавливания частиц. В настоящее время батарейные циклоны с закручивателями типа «винт» не изготовляются, но еще продолжают эксплуатироваться на ряде предприятий и электростанций. Батарейные циклоны с закручивателями типа «розетка» продолжают выпускаться несколькими предприятиями (например, циклоны БЦ-2 — Кусинским машиностроительным заводом и циклоны ЦБ-254Р — Семибратовским заводом газоочистной аппаратуры).

Отмеченные недостатки элементов батарейных циклонов с направляющими аппаратами типа «винт» и «розетка» привели к созданию батарейных циклонов с полуулиточным подводом газа к элементам (рис. 2 19). Такие циклоны практически не отличаются по эффективности от одиночных циклонов соответствующего диаметра (§ 2 4), и степень очистки газов, достигаемая в них при одинаковых диаметре и гидравлическом сопротивлении, выше, чем у циклонов с «розетками».

Диаметр пылевыпускного отверстия конуса циклонного элемента «Энергоуголь» больше диаметра выхлопной трубы Последнее связано с применением рассматриваемого типа батарейного циклона для

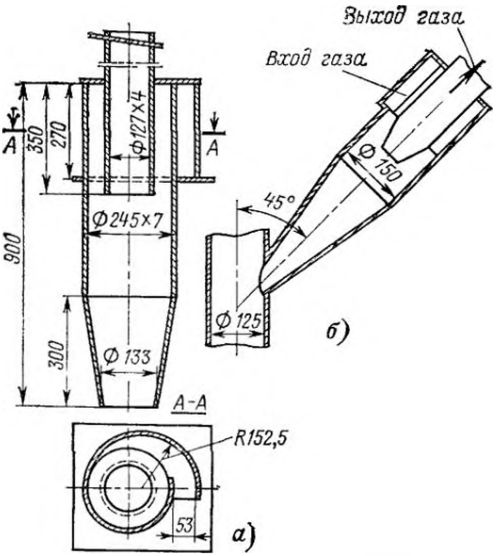
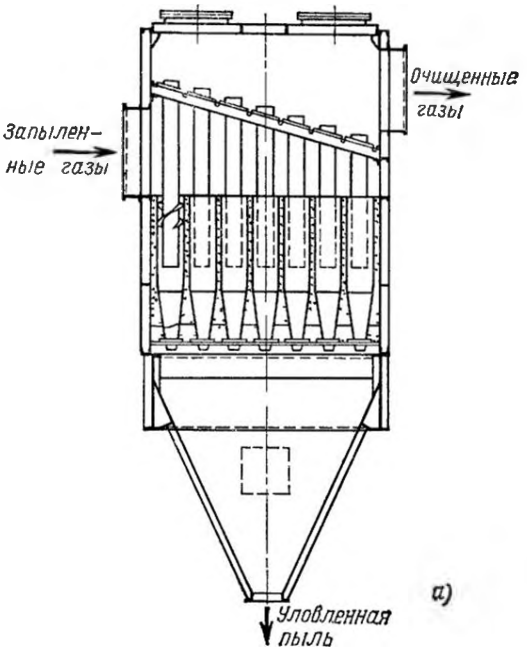


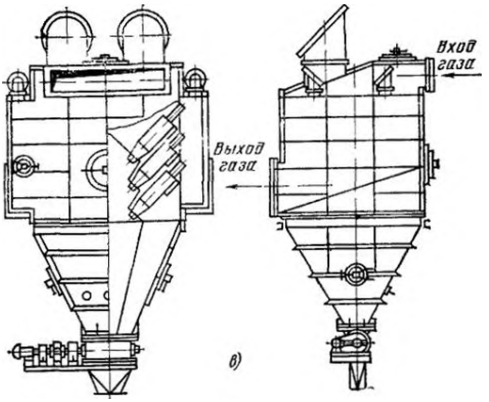
Рис 2 19 Элементы батарейных циклонов с полуулиточным подводом газа:

а — циклон «Энергоуголь»; *б* — циклон Семибратовского филиала НИИОгаз

улавливания летучей золы с большим содержанием недожога топлива Увеличение диаметра пылевыпускного отверстия уменьшает опасность забивания конуса пылью и интенсивность его абразивного истирания Однако чрезмерное увеличение диаметра отверстия в конусе элемента может снизить коэффициент очистки газа Поэтому батарейные циклоны «Энергоуголь» иногда снабжаются системой отсоса концентрата золы из сборного бункера Зола с большим содержанием недожога транспортируется обратно в топку котла

Из прямоточных циклонных элементов наиболее известна конструкция, разработанная ЦКТИ (см рис 2 18,*г*).





Примеры конструкционного выполнения батарейных циклонов с возвратнопоточными циклонными элементами показаны на рис 2 20

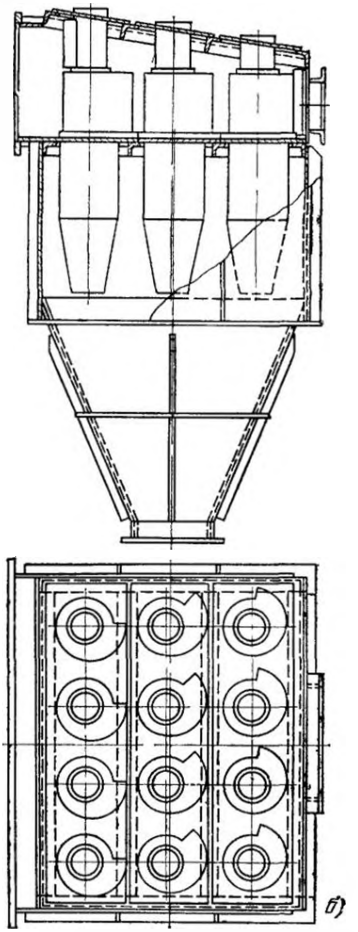
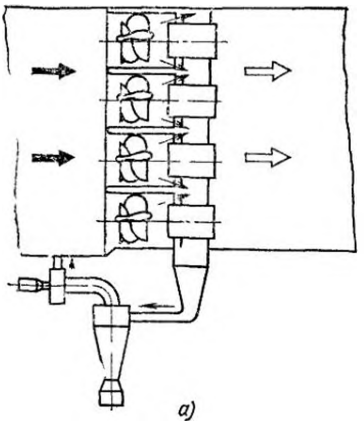


Рис 2 20 Примеры конструкционного выполнения батарейных циклонов с возвратнопоточными элементами

а — элементы с розеточными закручивателями потока, клиновидные камеры подвода и отвода газов, перегородка, разделяющая камеры одновременно служит опорной решеткой для крепления выхлопных труб элементов корпуса циклонных элементов крепятся на нижней опорной решетке, лежащей на опорном поясе секции (БЦ 2 Кусинского машиностроительного завода и ЦБ 2×4Р Семибратовского завода газоочистной аппаратуры), *б* — элементы с полуулиточными закручивателями потока, клиновидные камеры подвода и отвода газов опорная решетка элементов лежащая на опорном поясе составляется из прямоугольных пластин (см рис 2 19 *а*), показано расположение плоскостей входных патрубков элементов (батарейные циклоны БЦУ 12М тип I а также ЦБ 231У) *в* — элементы с полуулиточными закручивателями потока, сдвоенные пылевые камеры подвода очищаемых газов, боковые карманы отвода очищенных газов наклонное расположение циклонных элементов предохранительные клапаны (БЦУ 12М, тип III, а также ПБЦ Карагандинского машиностроительного завода № 2)



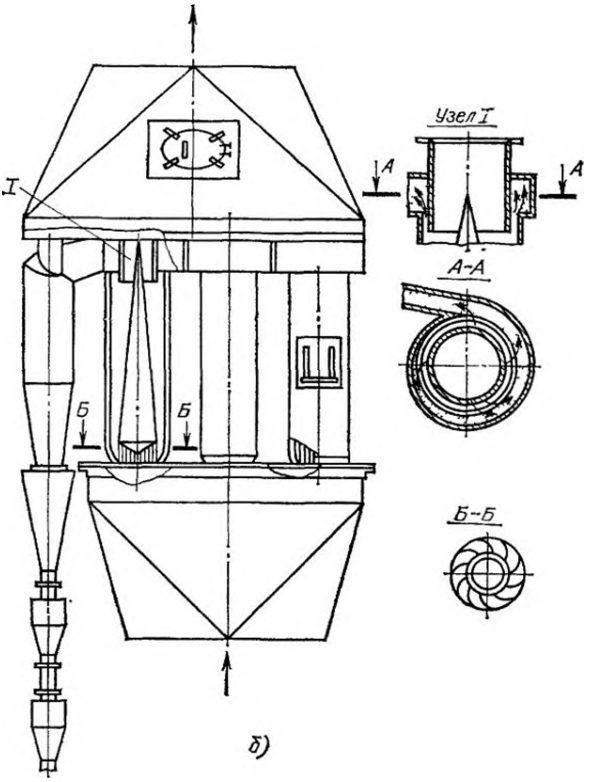


Рис. 2.21. Примеры конструкционного выполнения батарейных циклонов с прямоточными элементами:

а — аппарат ЦКТИ; *б* — аппарат института Гипромашуглеобогащение

В этих аппаратах запыленный газ поступает во входную камеру и распределяется по циклонным элементам. Уловленная пыль поступает в общий бункер, а очищенный газ покидает батарейный циклон через выходную камеру. Конструкционные особенности крепления корпусов элементов определяются количеством элементов в каждой секции, их пространственным расположением и типом закручивающего устройства.

Батарейные циклоны. Батарейные циклоны с прямоточными циклонными элементами из-за пониженной эффективности пылеулавливания получили ограниченное применение и серийно не изготовляются. В рамках ограниченного применения наиболее удачными являются конструкции ЦКТИ и института Гипромашуглеобогащение (рис. 2.21,*а* и *б*).

В циклоне ЦКТИ предусмотрен отдельный дымосос тракта рециркуляции газа, что позволяет получить более высокую эффективность пылеулавливания, а в циклоне института Гипромашуглеобогащение движение газа через циклон происходит за счет разности давлений между корпусами элементов и камерой очищенного газа. Последний вариант циклона представляется менее удачным, так как требует сужения выхлопных патрубков или неоправданно высоких скоростей течения в элементах.

Батарейные циклоны с прямоточными элементами применяются для предварительной очистки газов перед такими высокоэффективными аппаратами, как электрофильтры, рукавные фильтры и т. п.

Прямоточные батарейные циклоны при этом встраиваются в форкамеру соответствующего аппарата, образуя единую конструкцию двухступенчатого пыле- или золоуловителя. В случае установки прямоточного циклона для предочистки газов перед электрофильтром прямоточный циклон обеспечивает равномерность газораспределения в его активной зоне.

Батарейные циклоны с возвратнопоточными элементами находят широкое применение в качестве золоулавливающих установок для очистки дымовых газов котельных, сжигающих малозольные топлива, рециркуляционных газов котлов от золы, сушильных газов систем пылеприготовления от невзрывоопасной угольной пыли, а также для очистки газов от многих других промышленных пылей.

ВТИ совместно с управлением Центрэнергоуголь [2.14] для энергетических установок разработаны три типа батарейных циклонов (БЦУ-М), охватывающих диапа-

Таблица 2.13а. **Характеристика циклонов БЦУ-М**

Наименование	Тип I	Тип II	Тип III
Размещение элементов	Вертикальное	Под углом 45°	Под углом 45°
Подвод газа к элементам	В клиновидную камеру	В пылеосадительную камеру	В пылеосадительную камеру, образуемую 2 секциями
Отвод газа от элементов	В клиновидную камеру	Боковой	Боковой
Количество элементов:			
по глубине	10	12	14
по ширине	7—15	7—15	15—24

Примечание. К моменту выпуска настоящего справочника завод-изготовитель этого оборудования не определен. Замена батарейных циклонов устаревших конструкций на аппараты БЦУ-М производится силами электростанций и предприятий.

зон расходов газа от 47 000 до 860 000 м³/ч с элементами, показанными на рис. 2.21,*а* (табл. 2.13а).

Предварительное осаждение крупных частиц в пылевых камерах упрощенного типа, примененных в циклонах БЦУ-М (типа II, III), позволяет без нарушения равномерности распределения потоков газа и пыли по элементам увеличить количество элементов в одной секции по сравнению с аппаратом типа I. В циклонах БЦУ-М всех типов передние по ходу газа элементы секции повернуты вокруг своей оси таким образом, что плоскости входа закручивателей направлены параллельно скорости потока, а последующие ряды элементов по глубине секции установлены с постепенным поворотом входных плоскостей навстречу потоку (рис. 2.20,*б*).

В батарейных циклонах общепромышленного назначения в той или иной степени применяются конструкционные решения, характерные для циклонов энергетических установок. Так, в аппаратах ЦБ-231У, раз-

Таблица 2.14. **Технические характеристики батарейных циклонов серийного изготовления и намечаемых к производству**

Тип циклона, завод-изготовитель, ОСТ или ТУ	Число элементов в секции, шт.	Оптимальная скорость газа в элементе, м/с	Производительность по газу одной секции, м³/с	Коэффициент сопротивления	Области промышленного применения
ЦБ-254Р, Семибратовский завод газоочистительной аппаратуры, ОСТ 26-14-2002-77, ОСТ 26-14-2003-77	25; 30; 40; 50; 60; 80	4,5	5,6—16,2	90	Очистка газа при температуре до 400 °С
ЦБ-231У, намечается производство на Семибратовском заводе газоочистной аппаратуры, ОСТ 26-14-2002-77	12; 16; 20; 25; 30; 42; 56; 63	4,5	2,2—11,7	110	То же
ЦБ-2, Кусинский машиностроительный завод, ОСТ 108-033 взамен ОСТ 24-03-001	20; 25; 30; 36; 42; 56	4,5	4,84—13,6	70	Очистка газа при температуре до 150 °С Аппараты выпускаются во взрывобезопасном исполнении
ПБЦ, Карагандинский машиностроительный завод № 2, ТУ 12-44-21-038-75	24; 36; 48; 96	3,5	4,2—16,7	150	Очистка газа при температуре до 120 °С Аппараты выпускаются во взрывобезопасном исполнении

работанных Запорожским филиалом института Гипрогазоочистка, с элементами, подобными показанному на рис. 2.19, с диаметром 231 мм использован тот же поворот плоскостей входа в закручиватели элементов, что и в циклонах БЦУ-М.

В батарейных циклонах с элементами «розетка» ∅ 254 мм (циклоны ЦБ-254Р и БЦ-2) применяются вертикальные установки элементов, а также клиновидные входные и выходные камеры. Циклоны ПБЦ разработаны институтом Гипромашуглеобогащение (рис. 2.20,*в*) с размещением циклонных элементов ∅ 250 мм под углом 45° в вертикальных камерах для предварительного осаждения пыли.

Технические характеристики батарейных циклонов [2.11] приводятся в табл. 2.14.

Расчет батарейного циклона

Расчет батарейного циклона рекомендуется производить в следующей последовательности.

1. Определяется расход газов, м³/с, при котором обеспечиваются оптимальные условия работы циклонного элемента:

$$q_{опт}=0{,}785D^2w_{опт}, \qquad (2.18)$$

где $w_{опт}$ — оптимальная скорость потока в элементе, м/с (см. табл. 2.14); D — внутренний диаметр элемента, м.

2. Число циклонных элементов, необходимое для оптимальных условий работы батарейного циклона,

$$n_{опт}=Q/q_{опт}, \qquad (2.19)$$

где Q — общий расход газа, м³/с.

3. По табл. 2.14 подбирают батарейный циклон с ближайшим к $n_{опт}$ количеством циклонных элементов n. Число элементов выбранного батарейного циклона n желательно выбрать таким, чтобы не более чем на 10% отличалось от $n_{опт}$.

Далее определяют действительную скорость потока в элементе w, м/с:

$$w=\frac{Q}{n\,0{,}785D^2}. \qquad (2.20)$$

4. Потери давления в батарейном циклоне, Па:

$$\Delta p=\zeta\frac{\rho_г w^2}{2}.$$

Коэффициенты гидравлического сопротивления батарейных циклонов приведены в табл. 2.14.

5. Коэффициент очистки газа в элементе возвратнопоточного батарейного циклона определяют, пользуясь схемой расчета, приведенной в § 2.4 для обычных циклонов. Необходимые для этого значения $d^{т}_{50}$ и $\lg\sigma_\eta$ приведены в табл. 2.15.

Таблица 2.15. **Параметры, определяющие эффективность батарейных циклонов**

Параметры, определяющие эффективность	Тип элемента циклона				
	„розетка", $\alpha=25°$, $D=250$ мм	„розетка", $\alpha=30°$, $D=250$ мм	„Энергоуголь" $D=250$ мм	„Энергоуголь" $D=230$ мм	прямоточный ЦКТИ, $D=250$ мм
$d^{т}_{50}$, мкм	3,85	5,0	3,0	2,87	4,0
$\lg\sigma_\eta$	0,46	0,46	0,325	0,325	0,525

Примечания: 1. Данные, относящиеся к циклонным элементам типа „розетка" и „Энергоуголь", соответствуют следующим условиям их работы: средняя скорость потока в элементе $w_т=4{,}5$ м/с; динамическая вязкость газов $\mu_т=23{,}7\cdot10^{-6}$ Па·с; плотность частиц $\rho_{ч.\,т}=2200$ кг/м³.

2. Параметры, определяющие эффективность прямоточного элемента ЦКТИ, относятся к скорости потока $w_т=12$ м/с; динамической вязкости газа $\mu_т=18{,}8\times10^{-6}$ Па·с; плотности частиц $\rho_{ч.\,т}=2200$ кг/м³; расходу газов в линии рециркуляции, составляющему примерно 10% расхода очищаемого газа.

Коэффициент очистки газов в батарее, состоящей из прямоточных элементов, снижается примерно на 10% по сравнению с эффективностью одиночного элемента и зависит при этом от эффективности отсосного циклона. Все это учитывается формулой

$$\eta_{бат}=\frac{0{,}9\eta_ц\eta}{1-0{,}9\eta\,(1-\eta_ц)}, \qquad (2.21)$$

где $\eta_ц$ — коэффициент очистки газов в циклоне отсосной линии; η — коэффициент очистки в одиночном циклонном элементе.

В последней формуле значения коэффициентов очистки газов выражают в долях единицы.

2.7. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ РОТАЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ

Центробежные пылеуловители ротационного действия состоят из рабочего колеса и кожуха (пылеприемника). Пылегазовая смесь приводится во вращательное движение рабочим колесом, при этом под действием развивающихся сил (центробежной силы и силы Кориолиса) из очищаемого газа выделяется пыль.

Все известные конструкции ротационных пылеотделителей можно разделить на две группы [2 15]

В пылеосадителях первой группы (рис 2 22) отделяемые частицы двигаются в направлении подачи газа Очищаемый газ поступает в центральную часть колеса, вращающегося в спиралеобразном кожухе

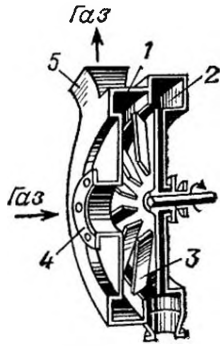


Рис 2 22 Центробежный пылеотделитель (сепаратор)

1 — корпус вентилятора *2* — сборник пыли, *3* — колесо вентилятора, *4*, *5* — патрубки

Частицы под действием развивающихся центробежных сил и сил Кориолиса попадают на периферию диска и одновременно перемещаются поперек ротора в пылесборник, а очищаемый газ выходит из пылеотделителя через патрубок чистого газа Для некоторых видов ротационных пылеуловителей этой группы эффективность процесса отделения пыли в значительной степени определяется углом наклона лопастей вентилятора к диску ротора.

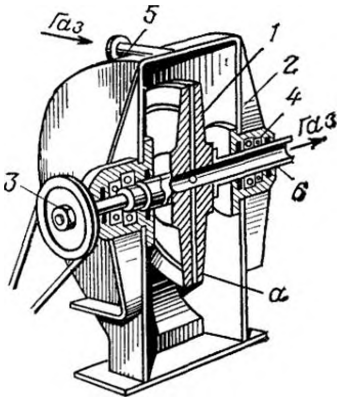


Рис 2 23 Центробежный пылеотделитель **ЦРП:**

1 — ротор, *2* — корпус, *3* — шкив, *4* — опора *5* — патрубок, *6* — полый вал, *а* — радиальный канал

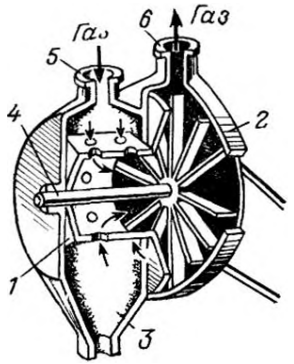


Рис 2 24 Центробежный пылеотделитель конструкции Розенкранца и Пречистенского:

1 — перфорированный барабан *2* — вентилятор; *3* — корпус, *4* — вал, *5*, *6* — патрубки

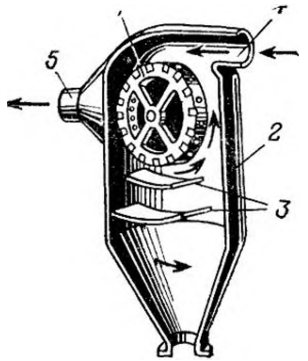


Рис 2 25 Центробежный пылеотделитель конструкции Якимова

1 — перфорированный барабан *2* — корпус *3* — полки, *4*, *5* — патрубки

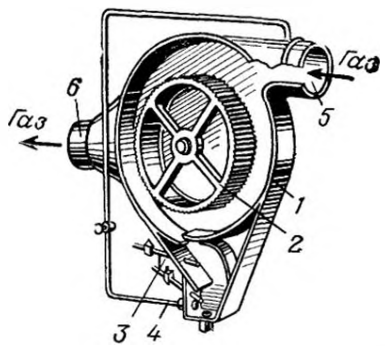


Рис 2 26 Центробежный пылеотделитель конструкции Харченко

1 — корпус, *2* — барабан *3* — трубки для подачи воды, *4* — отсосная линия, *5*, *6* — патрубки

Таблица 2.16. **Основные технические данные и результаты испытаний центробежных пылеотделителей ротационного действия**

Вид пылеотделителя	Производительность, м³/ч	Развиваемый напор, Па	Частота вращения ротора, об/мин	Диаметр ротора или фильтрующего элемента, м	Диаметр радиального канала, м	Количество радиальных каналов	Скорость газа в радиальном канале, м/с	Вид пыли	Массовая доля отдельных фракций частиц, %			Концентрация пыли, г/м³		Степень очистки, %	Расход электроэнергии на очистку 1000 м³ газа, кВт·ч
									от 0 до 5 мкм	от 5 до 20 мкм	> 20 мкм	на входе	на выходе		
Сепаратор (рис. 2.22)	870	2460	3000	0,4	—	—	—	Летучая зола	10	32	58	28	5,0	80	1,60
	720	2310	3000	0,4	—	—	—		10	32	58	24	4,0	84	1,56
	570	2310	3000	0,4	—	—	—		10	32	58	6	0,1	78	1,44
	870	2460	3000	0,4	—	—	—		10	32	58	140	20,0	82	1,60
Тип ЦРП (рис. 2.23)	1,46	300	1920	0,2	0,01	4	1,3	Тонко размолотое стекло	—	—	—	—	—	70	—
	1,46	800	3800	0,2	0,01	4	1,3	То же	—	—	—	—	—	99	—
	0,68	800	3800	0,2	0,01	4	0,6	Кварцевая пыль от перфораторного бурения	—	—	—	4	0,001	99	—
	1,36	800	3800	0,2	0,01	4	1,2	Угольный порошок	—	—	—	—	—	99	—
	4,40	300	1920	0,2	0,01	4	3,9	Тальк	—	—	—	—	—	99	—
Конструкция Розенкранца и Пречистенского (рис. 2.24)	363	—	3000	0,38	0,011	672	1,5	Мышьяковистый ангидрид белого мышьяка	—	—	—	10,0	0,0025	99	—
	725	—	3000	0,38	0,011	672	3,0	То же	—	—	—	12,0	0,1420	98	—
	275	500	3000	0,38	Прямоугольное сечение	—	—	Пыль гранулированного суперфосфата	1,4	70	28,6	1,4—4,3	0,003—0,160	85—98	—
	550	500	3000	0,38	То же	—	3,0	Огарковая пыль	—	—	—	1,5—50,0	0,001—0,10	85—99	0,50—0,85
Конструкция Якимова (рис. 2.25)	2000	—	730	0,272	0,006	10000	1,9	Зола	—	—	—	—	—	84	—
	2000	—	730	0,272	0,006	1000	1,9	Алебастр	—	—	—	—	—	96	—
Конструкция Харченко (рис. 2.26)[1]	40	—	—	—	—	—	0,5	Зола	35	50	15	60	3	95	—
	60	—	—	—	—	—	4,0		35	50	15	15	3	80	—
	40	—	—	—	—	—	0,5	Алебастр	6	47	47	60	2	98	—
	60	—	—	—	—	—	4,0		6	47	47	15	3	80	—
Конструкция Грищенко (рис. 2.27)	65	810	2800	0,198	Кольцевая щель	21	2,75 (на роторе)	Асбест	—	—	—	29	19	50	—

В ротационных пылеуловителях второй группы (типа ЦРП, рис. 2.23) улавливаемые частицы перемещаются в направлении, обратном движению газа. Очищаемый газ всасывается во вращающийся барабан через отверстия, расположенные на его боковой поверхности. В пограничном слое скорость вращения пылегазового потока достигает окружной скорости вращения барабана; благодаря этому частицы пыли, преодолевая силы газодинамического сопротивления, выделяются из потока очищаемых газов.

Основные технические характеристики и результаты испытаний центробежных пылеуловителей ротационного действия, показанных на рис. 2.22—2.27, приведены в табл. 2.16.

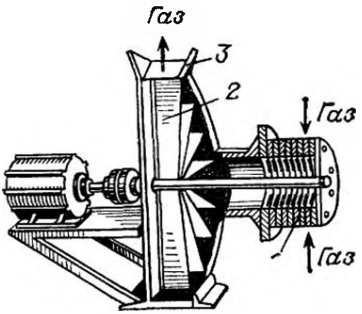


Рис. 2.27 Центробежный пылеотделитель конструкции Грищенко:

1 — барабан; *2* — вентилятор, *3* — патрубок

2.8. ДЫМОСОСЫ-ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

Дымососы пылеуловители На рис. 2.28 показана конструкция дымососа-пылеуловителя Семибратовского филиала НИИОГаз. Запыленный газ поступает в улитку и под действием центробежных сил частицы перемещаются к ее стенке. Очищенный газ через патрубок и рабочее колесо поступает в выхлопную трубу, пылевой концентрат через патрубок уходит в контур рециркуляции газа. Контур рециркуляции газа включает в себя циклон ЦН-15 и крыльчатку, размещенную в улитке.

На внутренних боковых поверхностях улитки установлены защитные козырьки (на рис. 2.28 не показаны), уменьшающие абразивное истирание корпуса и облегчающие образование пылевого концентрата.

Аппараты ДП могут работать при температуре газа до 400 °С Частота вращения ротора во всех конструкциях 980 об/мин Технические характеристики ДП, созданных на базе серийных дымососов, приводятся в табл. 2.17.

Основным недостатком аппаратов рассматриваемого типа является относительно быстрый износ улитки и элементов контура рециркуляции газа при работе на абразивных пылях.

Коэффициент очистки газов в дымососе-пылеуловителе может быть определен по приближенной формуле

$$\eta = \frac{\eta_ц \eta_{ул}}{1 - \eta_{ул}(1 - \eta_ц)}, \qquad (2.22)$$

где $\eta_ц$ — коэффициент очистки газа в циклоне; $\eta_{ул}$ — коэффициент очистки газа в улитке Значения $\eta_ц$ и $\eta_{ул}$ принимаются в долях единицы.

Последняя зависимость справедлива при условии, если доля рециркулирующего газа φ составляет не менее 15%. Тогда $\eta_{ул}$ практически не зависит от φ. Если $\eta_ц \gg \eta_{ул}$, что почти всегда имеет место, можно приближенно принять $\eta = \eta_{ул}$.

Кривые парциальных коэффициентов очистки газа в дымососах-пылеуловителях [2 15] после нанесения их на вероятностно-логарифмическую систему координат приобрели вид прямых линий, что позволило записать эти зависимости в виде двух па

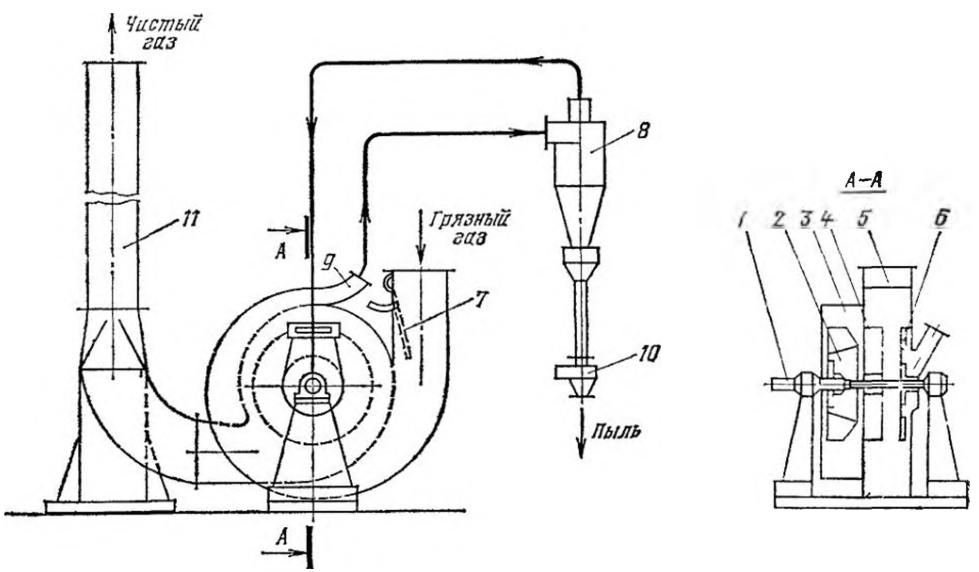


Рис 2 28 Схема дымососа-пылеуловителя·

1 — приводной вал; *2* — колесо, *3* — улитка чистого газа, *4* — патрубок, *5* — входная улитка *6* — дополнительная крыльчатка, *7* — регулирующая заслонка, *8* — циклон, *9* — патрубок, *10* — пылевой затвор; *11* — выхлопная труба

Таблица 2.17. **Технические характеристики дымососов-пылеуловителей**

Наименование	Марка аппарата			
	ДП-8	ДП-10	ДП-12	ДП-13,5
Диаметр рабочего колеса, мм	800	1000	1200	1350
Производительность, м³/ч	8000—10 000	14 000—20 000	22 000—35 000	35 000—55 000
Полное давление при $t = 20$ °С, Па	1650—1400	2500 -2100	3600 -3000	4700—3400
Допустимая запыленность газов, г/м³	100	100	150	200
Диаметр циклона (ЦН-15у), мм	300	450	650	800
Потери давления в циклоне при $t = 20$ °С, Па	800	800	1000	1000

Примечание. При максимальной нагрузке дымососа-пылеуловителя расход газа в контуре рециркуляции составляет 10% основного.

раметров логарифмически-нормального распределения (для $\mu=26\cdot10^{-6}$ Па·с; $\rho_ч=1800$ кг/м³; $w_{ул}=20$ мс):

Марка дымососа	Параметры
ДП-8	$d_{50}=5,5$ мкм; $\lg\sigma_\eta=0,375$
ДП-12	$d_{50}=6,2$ мкм; $\lg\sigma_\eta=0,420$

Для расчетов эффективности дымососов-золоуловителей при других условиях их работы (другой вязкости газов, плотности частиц и скорости газов на входе в улитку) можно с приемлемой точностью пользоваться соответствующей частью схемы расчета и формулами, приведенными в § 2.4 для циклонов.

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ
ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗОВ

3.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Наиболее эффективные пыле- и газоулавливающие аппараты нормально функционируют при температуре газов до 200—300 °С. Поэтому газы, подлежащие очистке, часто приходится подвергать предварительному охлаждению в поверхностных теплообменниках или охлаждению смешением путем непосредственного ввода охлаждающей среды в газовый поток. Выбор способа охлаждения определяется условиями технологического процесса, применяемым способом очистки, количеством и химическим составом газов, количеством и свойствами содержащейся в газах пыли.

Поверхностное охлаждение обычно осуществляется в теплообменниках рекуперативного типа: котлах-утилизаторах, радиационных воздухоподогревателях и поверхностных (газовых) холодильниках (кулерах).

Значительно реже в системах пылеулавливания устанавливаются кожухотрубчатые теплообменники, которые подбираются по ГОСТ 15122-79 и 14246-79 на основании данных по тепловой нагрузке и параметров охлаждаемой и охлаждающей сред. Подробный тепловой и гидравлический расчет поверхностных теплообменников приводится в [3.1, 3.2].

Регенеративные теплообменники почти не применяются в газоочистной технике. В [3.3] приводится пример использования регенеративного теплообменника для охлаждения газов, выделяющихся из электродуговых печей. Регенеративный теплообменник представляет собой башню, заполненную насадкой из огнеупорных кирпичей. Кирпичи поглощают теплоту газов, значительно снижая их температуру. Когда в рабочем цикле печи не предусмотрено охлаждение аккумулятора, устанавливают аппарат с двумя газовыми трактами. В один из них в направлении, противоположном направлению движения газов, поступает атмосферный воздух, который охлаждает насадку, по другому движутся охлаждаемые газы

Подобный способ охлаждения особенно эффективен при последующей очистке газов в тканевых фильтрах, когда не требуется их увлажнение, причем наилучшие условия для регенеративного охлаждения