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

газов возникают при периодической работе технологических агрегатов, являющихся источником тепловыделения, или при наличии пиковых нагрузок. Основное достоинство этого вида охлаждения — отсутствие увеличения объемных расходов газов за счет испарения воды, а недостаток — возможность образования отложений пыли на поверхности насадки. Метод расчета регенеративных теплообменников приведен в [3.1].

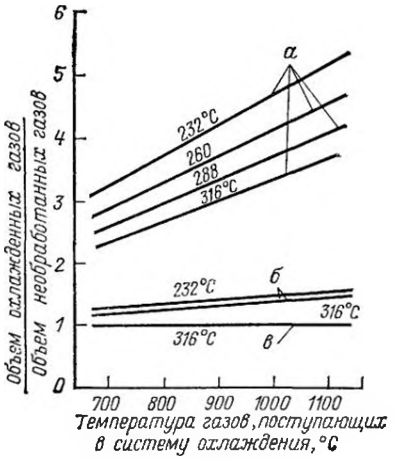


Рис. 3.1. Изменение объема отходящих газов (приведенного к нормальным условиям) для различных температур их охлаждения в зависимости от начальной температуры:

Линии заданных температур охлаждения газов добавлением воздуха (*а*); впрыскиванием воды (*б*); при помощи котла-утилизатора (*в*)

Большое распространение в системах очистки в качестве газоохладителей получили аппараты смешения, в которых два тепловых агента непосредственно контактируют друг с другом. Теплообменники могут быть подразделены на два вида: аппараты, в которых в качестве тепловоспринимающего агента используется атмосферный воздух (реже — какой-нибудь другой газ), и аппараты, в которых технологические газы контактируют с жидкостью. К аппаратам второго вида (контактным теплообменникам) относится большинство мокрых пылеуловителей.

На рис. 3.1 представлена диаграмма, которая показывает зависимость объемного расхода отходящих газов от способа охлаждения. Из диаграммы следует, что отношение объемного расхода газов, подвергнутых охлаждению добавлением атмосферного воздуха и непосредственным впрыскиванием воды в поверхностном теплообменнике, составляет 4 : 1, 1,5 : 1. Таким образом, система газоочистки с подсосом воздуха должна иметь наибольшие габаритные размеры и, как следствие, более высокие эксплуатационные расходы.

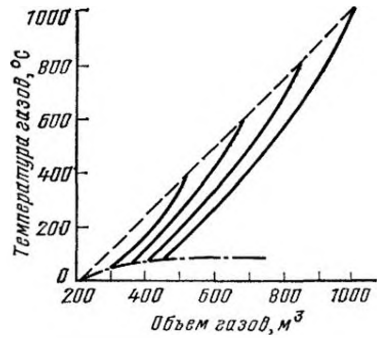


Рис. 3.2. Изменение величины объема газов с температурой при испарительном охлаждении:

— — — — — кривая уменьшения объема сухих газов при поверхностном охлаждении; ——— — кривые уменьшения объема при испарительном охлаждении; —.—.—.— линия насыщения газов

Применение теплообменников смешения с впрыскиванием жидкости (обычно воды) также приводит к некоторому увеличению объемного расхода очищаемых газов за счет испарения части жидкости. Однако это увеличение, как следует из рис. 3.2, не столь велико. К тому же увлажнение газов способствует повышению эффективности при электрической и мокрой очистке газов.

Поэтому при относительно малом объемном расходе отходящих газов при условии их дальнейшей очистки в электрических или мокрых пылеуловителях целесообразно осуществлять их охлаждение непосредственным впрыскиванием воды. При большом же количестве отсасываемых газов более выгодно (по крайней мере на первой стадии) применение поверхностных теплообменников (прежде всего котлов-утилизаторов), которые в этом случае обеспечивают получение значительного количества водяного пара для промышленных нужд.

Иногда применяют комбинированное охлаждение и увлажнение с использованием нескольких теплообменных аппаратов. Так, например, отходящие газы некоторых плавильных печей, имеющие высокую температуру, сначала охлаждают в поверхностных холодильниках (до 150—200 °С), а затем доохлаждают разбавлением атмосферным воздухом (до 90—120 °С) для возможности проведения очистки в рукавных фильтрах. Существуют и другие схемы комбинированного охлаждения и увлажнения газов перед газоочистными установками.

3.2. ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

Котлы-утилизаторы применяются, когда имеется возможность рентабельно использовать теплоту охлаждаемых газов для получения пара. Как правило, котлы-утилизаторы являются частью энергетической системы предприятия, предназначены для охлаждения запыленных газовых потоков с начальной концентрацией пыли до 100 г/м³ и оборудуются устройствами для очистки поверхности труб от осевшей пыли.

Котлы-утилизаторы устанавливаются за нагревательными, обжиговыми, мартеновскими печами, конвертерами, для охлаждения газов сернокислотного и сажевого производств. Номенклатура котлов-утилизаторов, выпускаемых отечественной промышленностью, приведена в [3 2].

Воздухоподогреватели (обычно радиационного типа) устанавливаются в тех случаях, когда подогретый воздух необходим для технологических целей, чаще всего это связано с интенсификацией процессов горения (вагранки, циклонные реакторы огневой переработки отходов и др.). Подогретый воздух находит приме-

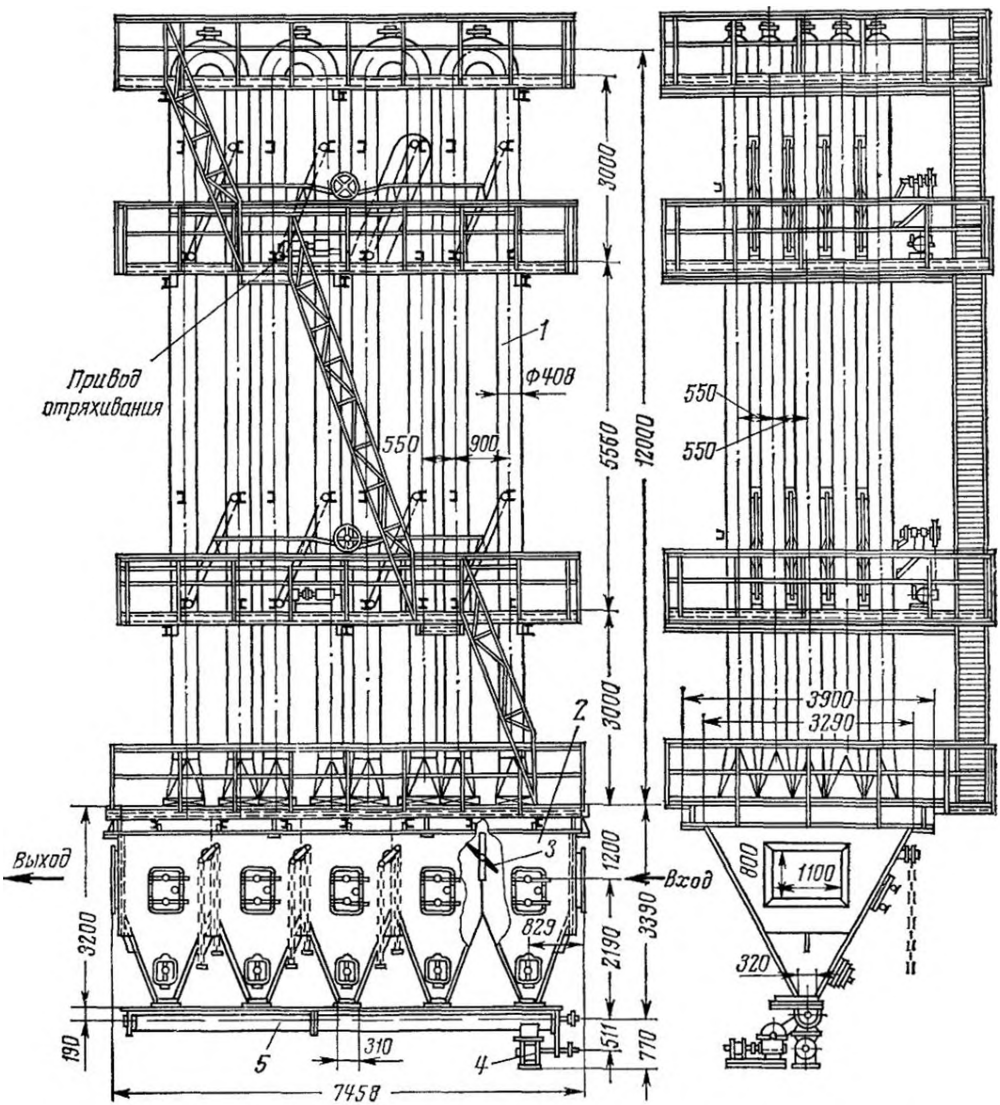


Рис 3.3. Общий вид поверхностного холодильника института Гипроцветмет

нение и непосредственно в системах газоочистки для подсушки газов за мокрыми пылеуловителями (см. § 4.14). Подробный расчет воздухоподогревателей приведен в [3.4].

Поверхностные (газовые) холодильники. Обычно поверхностные теплообменники, применяемые в газоочистных установках, выполняются в виде батареи вертикально установленных на открытом воздухе труб-газоходов большого диаметра; верхние концы труб попарно соединены U-образными переходами, а нижние концы опущены в бункер, разделенный на отсеки для каждой пары труб. Для выгрузки выпавшей пыли бункер снабжается пылеудаляющим устройством.

Регулирование отдачи теплоты в зависимости от температуры окружающего воздуха осуществляется за счет отключения заслонками части витков газоходов. Для предупреждения зарастания внутренней поверхности пылью в газоходах устанавливаются вибраторы или предусматриваются обстукивающие устройства.

Поверхностный теплообменник института Гипроцветмет показан на рис. 3.3. Поверхность охлаждения аппарата *1* изготовлена из труб диаметром 400 мм. Бункер аппарата *2* разделен на отсеки для каждого витка труб. Для выгрузки осевшей в трубах и бункере пыли под бункером установлен шнек *5*. Установка шлюзовых затворов *4* предупреждает подсос воздуха в аппарат или выброс газов в атмосферу. Задвижка *3* позволяет регулировать общее количество секций, через которые последовательно пропускаются охлаждаемые газы

По данным института Гипроцветмет оптимальная высота витков H определяется по уравнению

$$H = 20\sqrt{d}, \qquad (3.1)$$

где d — диаметр газохода, м.

Необходимая площадь рабочей поверхности теплообмена, м², составляет:

$$F = Q/(k\Delta t), \qquad (3.2)$$

где Q — тепловая нагрузка аппарата, Вт; k—коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); Δt — среднелогарифмическая разность температур, °С.

Среднелогарифмическая разность температур определяется по формуле

$$\Delta t = \frac{t'_г - t''_г}{\ln (t'_г - t_в)/(t''_г - t_в)}, \qquad (3.3)$$

где $t'_г$, $t''_г$ — соответственно начальная и конечная температура газов, °С; $t_в$ — температура окружающего воздуха, °С.

Согласно [3.5] при средней скорости газов 6—9 м/с и температуре 400—800 °С коэффициент теплопередачи в воздушных поверхностных холодильниках составляет 3,5—11,6 Вт/(м²·К).

Коэффициент теплопередачи сильно снижается при загрязнении внутренних стенок труб осевшей пылью. Поверхностные (газовые) теплообменники целесообразно применять при начальной температуре очищаемых газов выше 300—500 °С. При температурах газов более 700 °С возникает необходимость использования легированных сталей для поверхностей теплообмена.

Конструкция поверхностных (газовых) теплообменников проста, что является их главным преимуществом. Основной их недостаток состоит в громоздкости (значительном расходе металла) из-за относительно невысокой интенсивности теплопередачи. Кроме того, при содержании в газах агрессивных компонентов трубы теплообменников имеют короткий срок службы.

Гидравлическое сопротивление поверхностных теплообменников при нормальной работе не превышает 200—250 Па, но при забивании труб пылью повышается.

3.3. ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗОВ РАЗБАВЛЕНИЕМ АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДУХОМ

При охлаждении газов за счет разбавления (подсоса) атмосферным воздухом происходит значительное увеличение объемного расхода газов. Обычно этот способ находит применение в тех случаях, когда нежелательно увлажнение газов в скрубберах из-за повышения точки росы, а также когда необходимо доохладить газы после поверхностных теплообменников, например перед поступлением в тканевые фильтры.

Расчет необходимого количества воздуха и температуры газов после смешения проводится по уравнению

$$(G_г + G_в)c_{см}t_{см} = G_г c_г t'_г + G_в c_в t'_в, \qquad (3.4)$$

где $G_г$, $G_в$ — массовый расход охлаждаемых газов и вводимого воздуха, кг/с; $c_{см}$, $c_г$ и $c_в$ — удельная массовая теплоемкость смеси газов и воздуха, Дж/(кг·К); $t_{см}$ — конечная температура охлаждения, соответствующая температуре смеси газов и воздуха, °С; $t'_г$, $t'_в$ — начальная температура газов и воздуха, °С.

Если принять, что удельные массовые теплоемкости технологических газов и воздуха одинаковы, то температура смеси составит:

$$t_{см} = \frac{G_г t'_г + G_в t'_в}{G_г + G_в}. \qquad (3.5)$$

Регулирование подсоса воздуха для поддержания необходимой температуры перед пылеуловителями может осуществляться как вручную, так и автоматически дроссельным устройством. При принудительном вдувании количество поступающего на охлаждение воздуха определяется производительностью вентилятора.

Несмотря на свою относительную неэффективность как метода охлаждения, подсос атмосферного воздуха получил широкое распространение при отводе газов от технологических агрегатов, особенно в черной и цветной металлургии (конвертерное производство стали, рудовосстановительные, электродуговые и плавильные печи и др.). Причина подсоса воздуха в этих случаях объясняется не столько необходимостью охлаждения газов, сколько наличием в них значительного количества окиси углерода, т. е. их взрывоопасностью и токсичностью.

ским агрегатом обычно устанавливают устройство в виде зонта (колпака).

На рис. 3.4 приведены некоторые типы зонтов, применяемых в промышленности. Для предотвращения отложений пыли на внутренней поверхности зонта необходимо, чтобы скорость газов во входном сечении зонта была достаточно высокой. Рекомендации по выбору скорости газов в зонтовых устройствах для ряда технологических производств приводятся в табл. 3.1 [3.6].

Над технологическим агрегатом при отводе газов с дожиганием CO чаще всего устанавливают зонт, периметр которого ра-

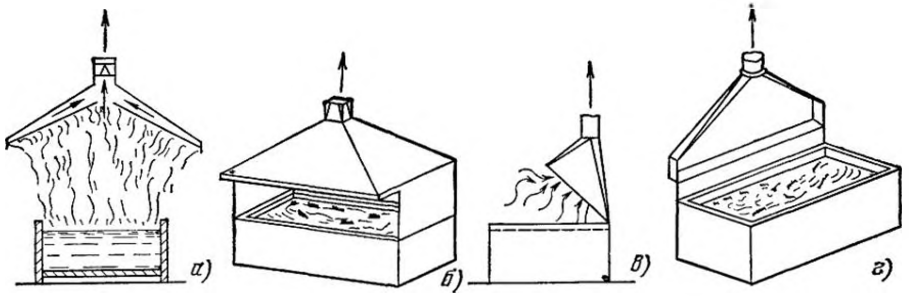


Рис. 3.4. Устройства для отвода газов:
а — двойной зонт; *б* — навес, открытый с одной стороны; *в* — полунавес; *г* — щелевой зонт

Кислород воздуха благодаря высокой температуре отходящих газов вступает в реакцию с окисью углерода, в результате чего образуется двуокись углерода CO_2, и газовая смесь становится взрывобезопасной и нетоксичной. Поскольку реакция горения CO сопровождается значительным выделением теплоты, то количество подсасываемого воздуха в идеальном случае должно рассчитываться как с учетом процесса горения CO, так и последующего охлаждения газов.

В случае отвода газов с разбавлением атмосферным воздухом над технологиче-

вен периметру агрегата или несколько больше него. Поскольку под зонтом происходит дожигание CO, расстояние между нижним краем зонта и верхним уровнем агрегата должно быть достаточным для прохода необходимого количества воздуха. Скорость подвода воздуха должна быть не ниже 1 м/с. Кроме того, необходимо, чтобы зонт имел достаточную глубину, обеспечивающую полное сгорание CO и охлаждение газов подсасываемым воздухом. В противном случае возможно коробление зонтового устройства под воздействием высоких температур газового потока. Это

Таблица 3.1. **Скорость газов в зонтовых устройствах**

Технологический процесс	Тип отводного устройства	Скорость газов, м/с
Протравочная ванна	Навесной зонт	1,3—1,6
Паяльная ванна	Колпак, открытый с одной стороны	0,8—1,0
Бак для производства лака	Навес	1,3—1,6
	Щелевой зонт (ширина 50 мм)	10,0
Пыль мукомольного производства, стружка	Навес	2,5—3,0
	Щелевой отвод (ширина 50—100 мм)	10,0
Электролизеры для выплавки алюминия	Колпак, открытый с одной стороны	0,8—1,0
	Навес	1,0—1,3
Медеплавильные печи	Колпак, открытый с одной стороны	1,0—1,3
	Навес	1,3—1,6

обстоятельство, а также необходимость обеспечения нормальных условий работы обслуживающего персонала заставляет устанавливать зонты на большом расстоянии от верхнего уровня агрегата.

Это приводит к значительному увеличению общего количества отсасываемых газов, в связи с чем получили широкое распространение различные устройства и приспособления, позволяющие уменьшить количество подсасываемого воздуха. Так, на

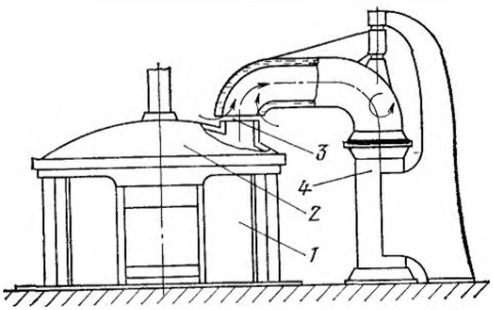


Рис. 3.5. Схема отсоса газов от сталеплавильной печи:

1 — сталеплавильная печь; *2* — свод; *3* — зазор в газоотводящем патрубке; *4* — подвижное соединение

прямоугольных рудовосстановительных печах зонт на торцовых участках непосредственно примыкает к корпусу печи и подсос воздуха осуществляется только с двух сторон прямоугольного сечения зонта. Иногда к нижней части зонта, периметр которого выступает за колошник печи, крепятся цепные завесы или щиты, которые касаются рабочей площадки, снижая количество подсасываемого воздуха и защищая обслуживающий персонал от прямого теплового излучения.

Газы из зонтов поступают в аппараты газоочистки или при их отсутствии отводятся непосредственно в дымовую трубу. Значительное количество подсасываемого воздуха, особенно в агрегатах большой мощности, требует установки мощных дымососов и громоздких аппаратов, что практически исключает возможность применения высокоэффективных систем очистки газов. Поэтому отвод газов с помощью зонтовых устройств может быть допустим с точки зрения очистки газов только в агрегатах малой мощности, где образуется незначительное количество газов.

Пример системы с так называемым непосредственным отсосом газов от сталеплавильной печи показан на рис. 3.5. Подсос воздуха для дожигания CO осуществляется в этом случае через зазор в футерованном или водоохлаждаемом газоходе. При различных режимах работы печи количество отходящих газов меняется и соответственно изменяется количество воздуха, которое необходимо для дожигания CO и охлаждения газов. Регулировка количества подсасываемого воздуха осуществляется с помощью подвижного патрубка (рис. 3.6), при перемещении которого изменяется величина зазора [3.7].

Для предотвращения образования отложений пыли в патрубке скорость газов в нем поддерживается 30 м/с.

Количество подсасываемого воздуха выбирается из условий обеспечения безопасности, т. е. с избытком по отношению к тому количеству, которое необходимо для полного сжигания CO. Так, например, полная безопасность работы газоочистки сталеплавильной печи обеспечивается при коэффициенте избытка воздуха около 2,15; коэффициент подсоса воздуха в конвертерном производстве равен примерно 5. Подсос такого количества воздуха позволяет не только перевести CO в CO_2, но и охладить газы до 800—1200 °С. Дальнейшее охлаждение газов осуществляется в котлах-утилизаторах и форсуночных скрубберах *.

Таблица 3.2. **Физические параметры воды [теплоемкость воды $c_ж = 4187$ Дж/(кг·К)]**

Температура, °С	Скрытая теплота парообразования, Дж/кг	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Динамический коэффициент вязкости $\mu_ж \cdot 10^6$, Па·с	Кинематический коэффициент вязкости $\nu_ж \cdot 10^6$, м²/с	Число Прандтля Pr	Поверхностное натяжение $\sigma \cdot 10^3$, Н/м
0	250	0,550	178,5	1,790	13,7	75,7
10	247	0,575	130	1,300	9,56	74,2
20	245	0,600	100	1,000	7,06	72,5
30	242	0,617	80	0,805	5,5	71,2
40	240	0,634	64,6	0,659	4,3	69,6
50	238	0,648	54,8	0,556	3,56	67,9
60	236	0,658	47,0	0,479	3,00	66,2
70	233	0,667	40,5	0,415	2,56	64,4
80	231	0,675	35,5	0,366	2,23	62,6
90	228	0,680	31,4	0,326	1,95	60,7

Хотя системы с дожиганием CO широко используются в промышленности, более перспективны системы очистки газов без дожигания, которые позволяют значительно уменьшить габарит и стоимость оборудования для охлаждения и очистки газов, а также использовать отводимые газы в качестве топлива или сырья для химической промышленности.

При эксплуатации систем отвода газов без дожигания CO большое значение имеет обеспечение их взрывобезопасности. На

* Исследования показали [3.3], что при впрыскивании воды в газовый поток с температурой до 1000—1200°С возможная диссоциация паров воды на H_2 и O_2 не создает опасности взрыва.

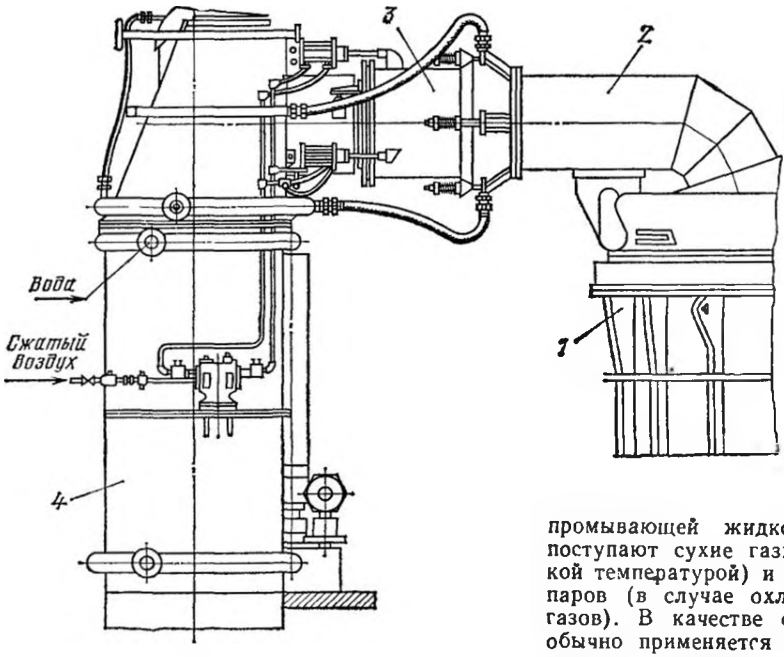


Рис. 3.6. Схема установки подвижного патрубка:

1 — электропечь; 2 — неподвижный патрубок; 3 — подвижный патрубок; 4 — форсуночная камера

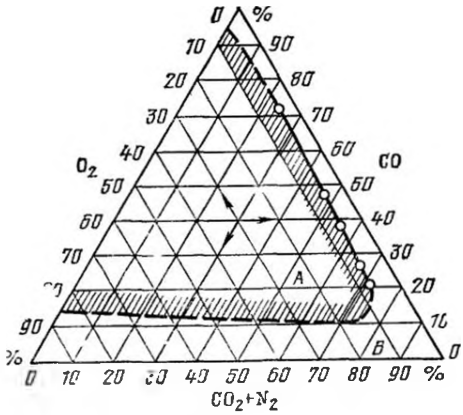


Рис. 3.7. Диаграмма пределов взрываемости газовой смеси $CO—O_2—(CO_2+N_2)$:

А — область взрывоопасных концентраций; *В* — область взрывобезопасных концентраций

рис. 3 7 приведена диаграмма [3.8] взрывоопасных концентраций газовой смеси $CO—O_2—(CO_2+N_2)$.

3.4. ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗОВ В КОНТАКТНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

Стадии процесса охлаждения газов орошающей жидкостью

При охлаждении газов в контактных теплообменниках снижение температуры газов обычно сопровождается испарением промывающей жидкости (на охлаждение поступают сухие газы с достаточно высокой температурой) и конденсацией водяных паров (в случае охлаждения насыщенных газов). В качестве охлаждающего агента обычно применяется вода, основные физические параметры которой приведены в табл. 3.2.

Если температура орошающей жидкости ниже, чем точка росы водяных паров в газах, то взаимодействие газов с орошающей жидкостью условно можно разбить на три стадии.

1 стадия. Процесс конденсации пара на каплях и пленках и их нагрев с одновременным понижением температуры газов и концентрации пара в них. На этой стадии переносом теплоты за счет диффузии можно пренебречь, так как движущей силой процессов теплопередачи является разность температур между газами и жидкостью, которая вначале достаточно велика, а процессов диффузии — разность парциальных давлений пара в газах и насыщенного пара над холодной поверхностью капель и пленок, которая мала. Первая стадия завершается при равенстве средней температуры капель и пленок точке росы газов.

В случае, когда температуры жидкости выше температуры точки росы, процесс теплообмена начинается со второй стадии.

2 стадия. Процесс испарения капель и пленок жидкости с одновременным повышением их температуры. Приток теплоты к поверхности капель и пленок продолжает осуществляться за счет теплопередачи (движущая сила процесса — разность температур газов и жидкости — еще значительна), причем часть этой теплоты идет на испарение жидкости, а часть на ее нагрев. С повышением температуры жидкости поток теплоты за счет теплопроводности по-

нижается, а за счет диффузии Q_D быстро увеличивается, так как температура капель и пленок связана с парциальным давлением над ними экспоненциальной зависимостью. Отношение $Q_т/Q_D$ уменьшается по мере понижения температуры газов. Завершение второй стадии наступает при равенстве $Q_т=Q_D$.

После этого дальнейший нагрев жидкости становится невозможным, так как вся теплота, получаемая жидкостью от газов за счет теплопередачи, будет возвращаться газам за счет диффузии. Температура жидкости, соответствующая этому процессу, называется температурой мокрого термометра $t_м$. Температура мокрого термометра является пределом нагрева жидкости при ее соприкосновении с горячими газами.

Возможен вариант, когда температура орошающей жидкости выше температуры мокрого термометра (при подаче на орошение жидкости с высокой температурой). Тогда на этой стадии происходит охлаждение жидкости до температуры мокрого термометра, сопровождаемое испарением части жидкости.

3 стадия. Процесс охлаждения газов за счет испарения жидкости. Этот процесс продолжается при постоянной температуре $t_м$ до тех пор, пока вся жидкость не испарится или температура газов не станет равной точке росы.

Пренебрегая потерями теплоты в окружающую среду, уравнение теплового баланса при испарительном и конденсационном охлаждении можно записать в виде

$$Q=G_г(c_г t'_г+d'i'_п)+G_ж c_ж t'_ж=$$
$$=G_г(c_г t''_г+d''i''_п)+$$
$$+[G_ж-G_г(d''-d')]c_ж t''_ж, \qquad (3.6)$$

где $G_г$ — массовый расход сухих газов, кг/с; d', d'' — начальное и конечное влагосодержание сухих газов, кг/кг; $i'_п$, $i''_п$ — начальная и конечная энтальпия пара, Дж/кг.

Конструкции контактных аппаратов для охлаждения газов

К теплообменникам смешения относятся газоочистные аппараты, полые скрубберы, насадочные скрубберы, барботажные и тарельчатые колонны, скрубберы с подвижным слоем шаровой насадки, трубы Вентури.

В полых скрубберах и трубах Вентури жидкая фаза представлена в виде капель, в насадочных аппаратах — в виде пленок, стекающих по поверхности насадки, а в тарельчатых колоннах и в аппаратах с подвижным слоем шаровой насадки при взаимодействии газов и жидкости образуется слой турбулизированной пены, которая состоит из пленок жидкости, ограничивающих газовые пузыри.

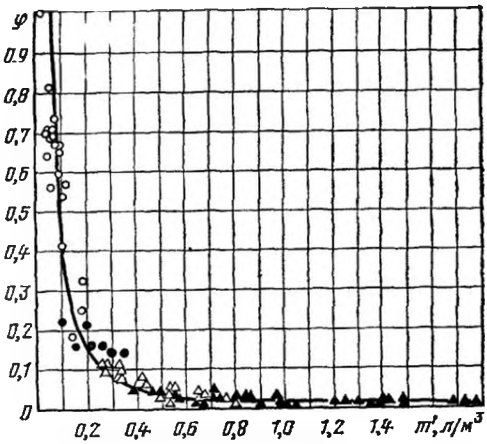


Рис. 3.8. Зависимость коэффициента испарения φ от удельного орошения m' при температуре газов на входе в аппарат 150—450 °С:

○ — скруббер с конфузорным подводом газов; ● — полый форсуночный скруббер; △ — скруббер с подвижной шаровой насадкой; ▲ — аппарат с провальными тарелками

Подробно о конструкции и гидродинамических параметрах этих аппаратов см. в разд. 4.

Аппараты для испарительного охлаждения газов. Процесс теплопередачи в таких аппаратах заключается в охлаждении газов за счет испарения орошающей жидкости до температуры, превышающей точку росы газов или равной ей. Частным, но исключительно важным для техники пылеулавливания случаем подобного теплообмена является охлаждение газов с полным испарением орошающей жидкости.

Контактные охладители газов, работающие в режиме полного испарения жидкости и обеспечивающие снижение температуры газов до температуры, значительно превышающей их точку росы, устанавливаются перед аппаратами сухой очистки газов (электрофильтрами или тканевыми фильтрами).

Для случая испарительного охлаждения газов уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$Q_г=G_г[c_г(t'_г-t''_г)+$$
$$+d'(i'_п-i''_п)]=G_ж[\varphi(i''_п-$$
$$-c_ж t''_ж)+c_ж(t''_ж-t'_ж)], \qquad (3.7)$$

где φ — коэффициент испарения, представляющий собой отношение количества испарившейся жидкости к общему количеству жидкости, поступающей на орошение аппарата.

Коэффициент испарения φ является параметром, характеризующим интенсивность процесса испарения в контактных теплооб-

менниках, и зависит от большого числа факторов и прежде всего от температуры газов, их начального влагосодержания и гидродинамической обстановки протекания процесса охлаждения. Экспериментальные и промышленные исследования показали, что влияние последнего фактора может быть выражено через величину удельного орошения (в расчете на объем газов в условиях входа в аппарат) m'.

На рис. 3.8 показана зависимость φ от m', полученная при исследовании четырех различных контактных теплообменников [3.9].

Кривая, представленная на рис. 3.8, аппроксимируется эмпирическим уравнением

$$\varphi = \frac{1{,}914\cdot 10^{-6}}{(m' - 3\cdot 10^{-5})^{1,3}}, \qquad (3.8)$$

где m' — удельное орошение (в условиях входа в аппарат), м³/м³.

Уравнение (3.8) может быть использовано для расчета коэффициента φ в случае охлаждения в контактных теплообменниках ненасыщенных газов с начальной температурой 150—450 °С и начальным влагосодержанием до 70 г/м³ сухих газов.

Другим важным параметром для расчета контактных теплообменников является конечное влагосодержание, достигаемое в аппарате. В [3.10] приводится уравнение, позволяющее рассчитать конечное влагосодержание газов в зависимости от начальной энтальпии смеси газ — жидкость:

$$d'' = 0{,}89\cdot 10^{-7} i_{см}^{1,072}, \qquad (3.9)$$

где $i_{см}$ — начальная энтальпия системы газ — жидкость, отнесенная к 1 кг сухих газов, Дж/кг сухих газов, рассчитывается по формуле

$$i_{см} = i'_{пг} \pm \Delta i_ж m_G, \qquad (3.10)$$

где $i'_{пг}$ — энтальпия парогазовой смеси при начальных условиях, Дж/кг сухих газов; $\Delta i_ж$ — изменение энтальпии жидкости при нагреве или охлаждении* ее от начальной температуры до конечной или до температуры мокрого термометра, Дж/кг сухих газов; m_G — отношение массового расхода жидкости к массовому расходу газов, кг/кг сухих газов.

Нагревание или охлаждение жидкости при испарительном охлаждении газов происходит только до температуры мокрого термометра $t_м$, после чего охлаждение газов протекает исключительно за счет испарения орошающей жидкости. Чем скорее жидкость достигнет температуры мокрого термометра, тем эффективнее будет протекать процесс испарительного охлаждения. Отсюда целесообразно принимать значение $t''_ж = t_м$.

Температуру мокрого термометра можно рассчитать методом последовательных приближений по уравнению

$$c_г t_м + i_м d_м = c_г t'_г + i'_п d' + c_ж t_м (d_м - d') \qquad (3.11)$$

или по формуле

$$i''_{пг} = i'_{пг} + c_ж t_м (d_м - d'), \qquad (3.12)$$

где $i_м$ — энтальпия водяных паров при $t_м$, Дж/кг; $d_м$ — влагосодержание насыщенного газа при температуре $t_м$, отнесенное к 1 кг сухих газов, кг/кг; $i''_{пг}$ — конечная энтальпия парогазовой смеси, отнесенная к 1 кг сухих газов, Дж/кг.

При расчете $t_м$ методом последовательных приближений находят по таблицам термодинамического состояния или расчетным путем парциальное давление насыщенного пара при этой температуре и рассчитывают содержание пара в газах;

$$d_м = \frac{M_п}{M_г (p_{пг} - p_н)}, \qquad (3.13)$$

где $M_п$, $M_г$ — масса 1 кмоля соответственно пара и газов, кг/кмоль; $p_{пг}$ — абсолютное давление парогазовой смеси, Па; $p_н$ — парциальное давление насыщенного пара, Па.

Значения температуры мокрого термометра для некоторых характерных условий приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Температура мокрого термометра, °С, для газов с разной температурой и влажностью

Начальная влажность газов, г/м³	Начальная температура горячих газов, °С						
	100	200	300	400	500	750	1000
25	38,5	49,5	57,0	62,0	65,5	72,5	77,5
50	44,0	53,5	59,5	64,0	67,5	74,0	78,5
100	52,5	59,0	63,5	68,0	70,5	76,5	80,5
200	61,0	66,5	70,0	72,5	75,5	79,5	—
300	68,0	71,5	74,0	78,5	—	—	—

Возможен и строго математический расчет температуры мокрого термометра, который базируется на математической интерпретации данных таблицы термодинамического состояния газов [3.11]:

$$d = 4{,}564\cdot 10^{-3} \exp(0{,}059 t_г). \qquad (3.14)$$

Подставив выражение (3.14) в уравнение (3.11), получим:

$$10^{-3}(c_г + c_ж d') t_м + 11{,}378 \exp(0{,}059 t_м) - 0{,}01011 t_м \exp(0{,}059 t_м) - [10^{-3} c_г t'_г + (2493 + 1{,}97 t'_г) d'] = 0. \qquad (3.15)$$

* Охлаждение жидкости имеет место в том случае, когда ее начальная температура выше температуры мокрого термометра. По этой же причине в выражении (3.10) знак плюс меняется на минус.

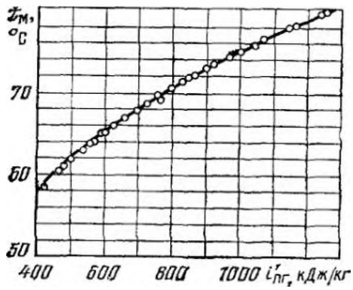


Рис. 3.9. Зависимость температуры мокрого термометра от начальной энтальпии парогазовой смеси

При известных начальных параметрах парогазовой смеси по уравнению (3.15) может быть определена $t_м$ как корень трансцендентного уравнения численным методом на ЭВМ.

На базе формулы (3.15) построена графическая зависимость $t_м$ от начальной энтальпии парогазовой смеси $i'_{пг}$ (рис. 3.9), которая может быть использована при начальной температуре газов от 350 до 600 °C и начальном влагосодержании от 0,015 до 0,4 кг/кг сухих газов.

Можно выделить случаи работы контактных аппаратов в режиме испарительного охлаждения: полное испарение орошающей жидкости ($\varphi=1$), частичное испарение орошающей жидкости и относительно минимальное испарение орошающей жидкости. Последний случай характерен для контактных теплообменников, режим работы которых связан с достаточно большим удельным орошением. Согласно рис. 3.8 относительно минимальное испарение ($\varphi\leqslant0{,}05$) наблюдается при $m'\geqslant0{,}4$ л/м³. К таким аппаратам можно отнести практически все контактные теплообменники, в которых поверхность теплообмена представляет собой поверхность пузырей или пленку жидкости — тарельчатый скруббер, аппарат с подвижной насадкой, насадочный скруббер и др.

При работе аппарата в режиме полного испарения ($\varphi=1$) уравнение (3.7) упрощается:

$$Q=G_г[c_г(t'_г-t''_г)+d'(i'_п-i''_п)]=$$
$$=G_ж(i''_п-t'_ж c_ж). \qquad (3.16)$$

При проведении расчетов испарительного охлаждения известны исходные параметры газов ($G_г$; $t'_г$; d'), начальная температура орошающей жидкости $t'_ж$, а также физические свойства газов и жидкости. Заданной величиной является и конечная температура газов $t''_г$.

При работе аппарата в режиме полного испарения вышеприведенные величины дают возможность по уравнению (3.16) рассчитать требуемый расход орошающей жидкости $G_ж$. Значение $i''_п$, Дж/кг, соответствующее $t''_г$, в этом случае находится в справочных теплотехнических таблицах или с достаточной для практики точностью по эмпирической формуле

$$i_п=10^3(2493+1{,}97t_г). \qquad (3.17)$$

При испарительном охлаждении газов в аппаратах с большим удельным орошением ($m'\geqslant0{,}4$ л/м³) величину φ с достаточной для практики точностью можно принять равной 0. Тогда уравнение теплового баланса (3.7) примет вид:

$$Q=G_г[c_г(t'_г-t''_г)+d'(i'_п-i''_п)]=$$
$$=G_ж c_ж(t''_ж-t'_ж). \qquad (3.18)$$

Для определения расхода орошающей жидкости $G_ж$ при тех же исходных параметрах необходимо будет либо задаться $t''_ж$ (при условии $t''_ж<t_м$), либо принять ее равной температуре мокрого термометра $t_м$.

Наиболее сложным для проведения теплотехнических расчетов представляется случай, когда частичным испарением орошающей жидкости в аппарате пренебречь нельзя. Это связано с определением трех неизвестных величин: $G_ж$, φ и $t''_ж$. При оптимальных условиях протекания процесса испарительного охлаждения ($t''_ж=t_м$) величина $t''_ж$ из расчета выпадает. В этом случае для нахождения двух оставшихся неизвестными величин $G_ж$ и φ необходимо совместное решение двух уравнений — теплового баланса (3.7) и (3.9), которые целесообразно представить в более удобном для расчетов виде:

$$c_г(t'_г-t''_г)+d'(i'_п-i''_п)=$$
$$=m_G[\varphi(i''_п-c_ж t_м)+$$
$$+c_ж(t_м-t'_ж)]; \qquad (3.19)$$

$$d'+m_G\varphi=0{,}89\cdot10^{-7}[i'_{пг}-$$
$$-c_ж m_G(t_м-t'_ж)]^{1{,}072}, \qquad (3.20)$$

где $m_G=G_ж/G_г$, кг/кг сухих газов.

Вышеприведенная система нелинейных уравнений с двумя неизвестными m_G и φ имеет одно решение, которое может быть получено любым численным методом.

Поскольку процесс испарения (как всякий диффузионный процесс) протекает во времени, для его осуществления необходим аппарат определенной длины или высоты H. Величина H определяется временем испарения капель, расчет которого представляет наибольшие трудности при выборе геометрических параметров испарительных скрубберов.

Обычно в качестве контактных теплообменников, работающих с полным или значительным испарением орошающей жидкости, применяются прямоточные полые скрубберы с направлением движения газов и орошающей жидкости сверху вниз. Возможно и противоположное движение газов

Таблица 3.4. **Коэффициенты теплопередачи и испарения в полых скрубберах (практические данные)**

Газ	Температура, °С		Форсунка			Объемный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³·К)	Коэффициент испарения воды φ
	на входе	на выходе	Тип	Диаметр сопла, мм	Давление воды, МПа		
Генераторный	600	90	Кертинга	4	0,4—0,5	146	—
Из сажекоптильных генераторов	1150	320	Кертинга	4	0,2—0,3	396	1,0
Из ватержакетных печей	240	120	Григорьева — Полякова	1 2	2 2	257 257	1,0 1,0
Из отражательных печей	300	60	Григорьева — Полякова	2	1,5	—	0,75
Печной от сжигания серы	900—1000	210—250	Кертинга	4	—	66—103	-
От обезвоживания сульфатных щелоков	123—172	41—52	Центробежная	—	—	192—228	0,18—0,3
Доменный	260	90	Эвольвентная	—	0,5	235—580	0,8

и жидкости, но в этом случае первичные размеры капель должны иметь скорость витания ниже скорости восходящего газового потока (чтобы не происходило их выпадение на днище аппарата). При охлаждении больших объемов газов перспективно использование обычных газоходов, скорость газов в которых составляет 15—20 м/с. Необходимо только, чтобы капли, распыливаемые форсунками, не достигали внутренних стенок газохода, т. е. диаметр газохода не должен быть слишком мал.

Испарительное охлаждение дымовых газов ТЭС осуществлено в газоходе перед электрофильтром [3.12] с помощью пневматического распыливающего устройства (см. § 4.11).

Полые испарительные скрубберы. Ориентировочный расчет полого испарительного скруббера может быть проведен на основании данных об объемном коэффициенте теплопередачи, полученных в результате экспериментальных исследований аналогичных аппаратов

В этом случае рабочий объем скруббера V, м³, рассчитывается по формуле

$$V=Q/(k_0\Delta t), \qquad (3.21)$$

где k_0 — объемный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³·К); Δt — температурный напор, К.

Тепловая нагрузка аппарата Q рассчитывается по формуле (3.7), а температурный напор — по выражению

$$\Delta t = \frac{t'_г - t''_г}{\ln\dfrac{t'_г - t_м}{t''_г - t_м}} \qquad (3.22)$$

Данный расчет Δt является не совсем точным, так как часть теплоты отнимается водой от газов (если начальная температура воды ниже температуры мокрого термометра) при повышении ее температуры до $t_м$. Однако, так как эта часть теплоты в испарительных скрубберах незначительна по отношению к основному количеству теплоты, расходуемому на испарение при постоянной температуре $t_м$, усложнять расчет нецелесообразно.

Для приближенных расчетов величину K_0 можно определить по эмпирической формуле [3.13]:

$$K_0 = x\left(116{,}5 + 525\,\frac{G_ж}{G_г}\right)\left(1 + \frac{t_{ср}}{1000}\right), \qquad (3.23)$$

где x — коэффициент пропорциональности (при противотоке $x=1$; при прямотоке $x=2$); $t_{ср}$ — средняя температура газов, °С.

Значения K_0, полученные при производственных испытаниях полых скрубберов, представлены в табл. 3.4 [3.14].

При ориентировочном расчете диаметр полого скруббера D, м, определяют из условия, что скорость газов $w''_г$ на выходе из него не должна превышать 1,0—1,2 м/с с целью уменьшения брызгоуноса капель неиспарившейся жидкости:

$$D = \sqrt{\frac{G_г(1 + d'')}{\rho''_г w''_г \cdot 0{,}785}}, \qquad (3.24)$$

где $\rho''_г$ — плотность газов при условиях на выходе из аппарата, кг/м³.

Полезную высоту скруббера рассчитывают по формуле

$$H=V/(0{,}785D^2). \qquad (3.25)$$

Оптимальным соотношением между диаметром и высотой является $H/D \approx 2{,}5$.

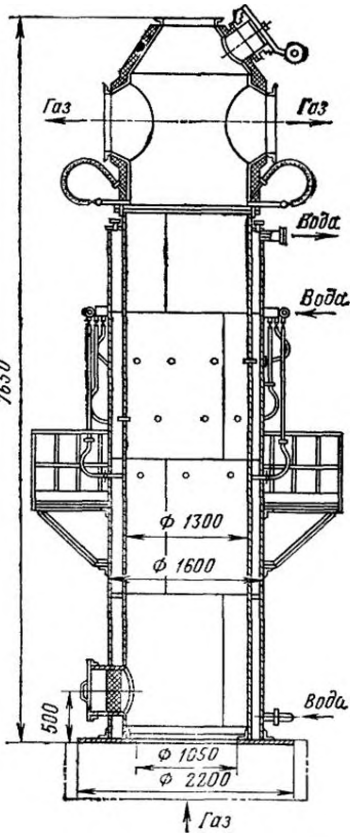


Рис. 3.10. Испарительный скруббер с дополнительным наружным водяным охлаждением

Метод точного аналитического расчета полого испарительного скруббера с использованием ЭВМ приведен в [3.15].

При создании скрубберов, работающих в режиме полного испарения, важно обеспечить тонкий распыл жидкости, так как продолжительность испарения капель жидкости пропорциональна квадрату их диаметра. Поэтому в случае применения для распыла жидкости механических форсунок давление перед распылителями составляет от 1,5 до 4,5 МПа. Для их надежной работы из-за небольших отверстий истечения необходима особо чистая вода. Важное значение для эксплуатации испарительных скрубберов имеет регулировка расхода воды. Уменьшить расходы воды на механическую форсунку нельзя из-за ухудшения качества распыла, поэтому в случае необходимости отключается часть форсунок или применяются специальные форсунки с рециркуляцией воды (см. разд. 4). Бо́льшая полнота испарения может быть достигнута при подаче на орошение скруббера воды, имеющей температуру мокрого термометра.

Полые скрубберы с водяной рубашкой. В ряде отраслей промышленности нашли применение полые скрубберы с наружной водяной рубашкой (рис. 3.10). Вода в скруббер подается в нижнюю часть рубашки и после нагрева может быть использована, например, для теплофикации. Коэффициент теплопередачи через поверхность водяной рубашки может быть принят равным 22—26 Вт/(м²·К).

Устройство наружного водяного охлаждения корпуса аппарата позволяет применять его для охлаждения газов с температурой более 1000 °С, причем корпус аппарата выполняется из обычной углеродистой стали. Газы в подобном испарительном скруббере обычно охлаждаются до 200—250°С.

Исходными данными для расчета скруббера являются количество охлаждающих сухих газов $G_г$, начальная и конечная температуры газов $t'_г$ и $t''_г$, начальная влажность газов d', физические параметры газов, начальная температура жидкости, поступающей на испарение, $t'_ж$, и начальная и конечная температуры воды, поступающей в рубашку, $t'_п$ и $t''_п$.

1. Расход воды, подаваемой на испарение, определяют из уравнения теплового баланса

$$G_г[c_г(t'_г-t''_г)+d'(i'_п-i''_п)]=$$
$$=G'_ж(i''_п-t'_ж c_ж)+$$
$$+G''_ж(t''_п-t'_п)c_ж, \qquad (3.26)$$

где $G'_ж$, $G''_ж$ — массовый расход жидкости через форсунки и через рубашку, кг/с.

2. Рассчитывают тепловую нагрузку аппарата за счет испарительного охлаж-

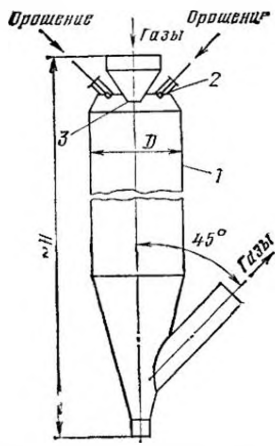


Рис. 3.11. Скруббер с конфузорным подводом газов (типа СПВПК):

1 — корпус, 2 — щелевая форсунка, 3 — конфузорный насадок

дения:

$$Q = G_г[c_г(t'_г - t''_г) + d'(i'_п - i''_п)] - G''_ж(t''_п - t'_п)c_ж. \qquad (3.27)$$

3. Дальнейший расчет аппарата, включающий определение его полезного объема V, проводят аналогично расчету обычного полого скруббера.

Скрубберы с конфузорным подводом газов. Для того чтобы избежать применения легко забивающихся форсунок тонкого распыла, была разработана конструкция полого скруббера с конфузорным подводом газов (рис. 3.11). В этом аппарате [3.16] для дробления жидкости используется энергия самого газового потока, подводимого в скруббер через насадку, представляющую собой бездиффузорную трубу Вентури. Орошение аппарата осуществляется щелевыми форсунками, которые располагаются в крышке скруббера по обе стороны от насадка При смешении газов, скорость которых на выходе из насадка составляет 40—70 м/с, с двумя перекрещивающимися факелами жидкости образуется общий, несколько сжатый факел, состоящий из весьма мелких капель (туман), который перемещается вдоль оси скруббера, не касаясь его стенок.

Щелевые форсунки устанавливаются в скруббере таким образом, чтобы факелы жидкости проходили под ближней кромкой сопла и составляли с плоскостью выходного сечения угол, равный 45°. В этом случае средняя скорость газов в вытекающей из насадка газовой струе будет оставаться постоянной вплоть до пересечения с факелами жидкости и зависеть только от скорости истечения из сопла.

Расчеты, проведенные с использованием (3.16), показывают, что при начальной температуре газов 250 °С и точке росы от 20 до 50 °С скруббер с конфузорным подводом газов обеспечивает полное испарение орошающей жидкости при $m_G \leqslant$ $\leqslant$0,045 кг/кг сухих газов, а при начальной температуре газов 450 °С (и аналогичных значениях точки росы) — при $m_G \leqslant$ $\leqslant$0,055 кг/кг сухого газа.

Унифицированный ряд скрубберов СПВПК с конфузорным подводом газов разработан НИИОГАЗ и институтом Гипрогазоочистка на производительность от 13 000 до 200 000 м³/ч [3.16] и включает пять типоразмеров, каждый из которых имеет два типоразмера конфузорного насадка Аппараты могут обеспечивать охлаждение газов с 250—400 до 155—200 °С

В табл 3.5 приведены основные параметры скрубберов СПВПК с конфузорным подводом газов

Применительно к аппаратам разработана принципиальная схема регулирования расхода орошающей жидкости, которая может быть применена в случае изменения входных параметров газового потока (расхода, температуры, влажности).

Скрубберы Вентури. Орошающая жидкость в скруббере Вентури (кон-

Таблица 3.5. **Основные технические и геометрические параметры скрубберов СПВПК**

Наименование	Марка скрубберов									
	СПВПК15-400	СПВПК25-400	СПВПК40-400	СПВПК50-400	СПВПК70-400	СПВПК85-400	СПВПК100-400	СПВПК120-400	СПВПК150-400	СПВПК175-400
Производительность, м³/ч:										
мин	13 000	21 000	34 000	43 000	60 000	70 000	86 000	100 000	125 000	146 000
макс	18 000	29 000	48 000	60 000	85 000	85 000	120 000	140 000	175 000	200 000
Температура газов, °С:										
на входе	250—400									
на выходе	155—200									
Разрежение, Па	6000									
Гидравлическое сопротивление, Па	До 2000									
Размер выходного сечения конфузора, мм	110×614	160×704	210×904	240×1004	280×1200	300×1300	340×1400	370×1600	430×1600	450×1800
Расход жидкости на орошение, м³/ч	0,4—0,9	0,63—1,45	1,0—2,4	1,3—3,0	1,8—4,25	2,1—4,9	2,6—6,0	3,0—7,0	3,75—8,75	4,4—10,0
Давление орошающей жидкости, Па	25 000—100 000									
Температура орошающей жидкости, °С	20—50									
Количество форсунок, шт.	2	2	4	4	4	4	4	4	6	6
Диаметр D, мм	1200		1600		2000		2400		2800	
Высота H, мм	8070		11 070	11 130	12 830	12 900	14 275	14 425	16 410	16 565
Масса скруббера (ориентировочно), кг	1730	1740	3230	3260	5700	5740	7740	7850	10 520	10 640

струкционные параметры аппарата приведены в разд. 4), как и в скруббере с конфузорным подводом газов, впрыскивается в зону более высоких скоростей газов. Однако в отличие от последнего практически всегда наблюдается осаждение части капель на стенках и стекание жидкости в виде тонкой пленки, что сопровождается некоторым уменьшением поверхности теплопередачи и исключает возможность полного испарения орошающей жидкости. После образования пленки жидкости толщина ее при заданной скорости движения газов будет вполне определенной, а при утолщении пленки жидкость вновь будет срываться со стенок и дробиться газовым потоком.

Исследования [3.17] показали, что скруббер Вентури является наиболее интенсивным контактным теплообменником. Так, измерения позволили установить, что при подаче орошения в горловину трубы Вентури температура поверхности на расстоянии 2—5 см от места подачи падает с 250 до 55—60 °С, приближаясь к точке росы.

При охлаждении в трубе Вентури водой ненасыщенных газов их конечная температура может быть рассчитана [3.18] по эмпирическому уравнению

$$t''_г = (0{,}133 - 41m'')\,t'_г + 35, \qquad (3.28)$$

где m'' — удельное орошение (по условиям на выходе из аппарата), м³/м³.

Уравнение (3.28) справедливо при скорости газов в горловине 50—150 м/с, начальной температуре газов 100—900 °С и удельном орошении $0{,}6 \cdot 10^{-3} - 1{,}3 \times 10^{-3}$ м³/м³.

В уравнение (3.28) не входит начальное влагосодержание газов, что, очевидно, ограничивает область его применения практически сухими газами.

В [3.19] показано, что при скорости газов в горловине трубы Вентури (по условиям выхода) $w''_г > 70$ м/с и удельном орошении $m'' > 1$ л/м³ конечная температура жидкости с достаточной для практических расчетов точностью может быть принята равной конечной температуре газов, т. е. $t''_г = t''_ж$. Поэтому, принимая указанные условия по скорости газов и удельному орошению, для расчета температуры газа на выходе из скруббера Вентури при заданных $t'_г$, d' и $t'_ж$ можно воспользоваться уравнением (3.18), которое в данном случае с учетом формулы (3.17) примет вид:

$$c_г (t'_г - t''_г) + d' [i'_п - 10^3 (2493 + 1{,}97 t_г'')] = m'' \frac{\rho_ж}{\rho''_г} c_ж (t''_г - t'_ж). \qquad (3.29)$$

Очевидно, уравнение (3.29) может быть использовано и для определения необходимого удельного орошения m'' при заданной конечной температуре газов, которое не должно быть ниже их точки росы. Диаметр горловины рассчитывают по (3.24).

С удлинением горловины наблюдается некоторая интенсификация процесса охлаждения газов, однако незначительная, и поэтому не следует использовать трубы Вентури с горловиной длиной более $3d_э$ ($d_э$ — эквивалентный диаметр горловины, м).

Барботажные и тарельчатые аппараты. Помимо контактных теплообменников, в которые орошающая жидкость подается в виде капель, в газоочистных установках (хотя и значительно реже) находят применение теплообменные аппараты, в которых орошающая жидкость при взаимодействии с газовым потоком образует пузырьки [3.20]. Среди этих аппаратов можно выделить барботажные и тарельчатые, а также аппараты с подвижной шаровой насадкой. Температура газов на входе в них обычно не превышает 300—400 °С, а испарительное охлаждение газов осуществляется до точки росы или до температуры, близкой к ней.

Барботажные аппараты, в которых газовый поток в виде пузырьков проходит через слой жидкости (так называемые барботеры), в настоящее время практически потеряли промышленное значение из-за малой скорости газов В [3.5] указывается, что барботаж через слой жидкости толщиной 100 мм обеспечивает охлаждение газов практически до температуры жидкости.

Более широкое применение получили тарельчатые аппараты, в которых имеет место барботаж газов через слой жидкости при высоких скоростях потока. В этом случае на тарелке при взаимодействии газов и жидкости образуется развитый турбулизированный слой подвижной пены, способствующий увеличению поверхности фазового контакта.

В рассмотренных аппаратах применяются два принципиально различных вида тарелок — переливные (с организованным сливом жидкости) [3.21] и провальные [3.22], причем в газоочистке преимущество отдается последним.

При испарительном охлаждении газов с начальной температурой 200—300 °С обычно достаточно одной тарелки.

Наибольшие трудности при расчете теплообмена в тарельчатых аппаратах связаны с определением поверхности фазового контакта. Поэтому коэффициенты теплопередачи обычно относят к рабочей площади тарелки. В результате такого подхода определяется не истинный коэффициент теплопередачи k, а произведение kA, где A — поверхность контакта фаз, развиваемая на 1 м² площади тарелки, м²/м².

При испарительном охлаждении газов в аппарате с провальными тарелками при барботажном, пенном и волновом режимах взаимодействия газов и жидкости коэффициент теплопередачи в расчете на площадь

тарелки может быть определен [3.23] по формуле

$$Nu'=0{,}52Re_г^{0,87}, \qquad (3.30)$$

где $Nu'=kAl/\lambda_г$ — модифицированное число Нуссельта; $Re_г=w_г l/\nu_г S_0$ — число Рейнольдса; S_0 — свободное сечение тарелки, м²/м²; $l=\sqrt{\sigma/\rho_ж g}$ — линейный параметр, м; σ — поверхностное натяжение жидкости, Н/м Значения параметров $w_г$, $\lambda_г$ и $\nu_г$ выбираются в соответствии с условиями на входе в аппарат, т е. $w'_г$, $\lambda'_г$ и $\nu'_г$.

Формула (3 30) может быть применима для расчета коэффициента теплопередачи при охлаждении ненасыщенных газов с начальной температурой 250—300 °С в аппаратах с дырчатыми и щелевыми тарелками со свободным сечением 0,14—0,41 м²/м², диаметром отверстий (для дырчатых тарелок) 3,0—6,0 мм и шириной щели (для щелевых) 3,0—4,0 мм, а также в аппаратах с трубчатыми тарелками со свободным сечением 0,3—0,5 м²/м². Скорость газов в свободном сечении аппарата может изменяться в пределах от 1,0 до 4,5 м/с, плотность орошения — от 1,7 до 8,5 кг/(м²·с).

Коэффициент φ при испарительном охлаждении газов в тарельчатом аппарате невелик, и при оценочных расчетах его можно принять равным 0 Тогда расход орошающей жидкости может быть определен из уравнения (3 18).

Ниже приводится подробный метод расчета тарельчатого теплообменника, который может быть осуществлен с помощью ЭВМ [3 24].

Исходные данные для расчета: количество охлаждаемых сухих газов $G_г$, начальное влагосодержание газов d', начальные температуры газов и жидкости $t'_г$ и $t'_ж$, физические параметры газов и жидкости.

Задача заключается в определении геометрических и режимных параметров аппарата, необходимых для достижения заданной температуры газов на выходе из аппарата $t''_г$.

Расчет проводится в следующей последовательности

1. Рассчитывают тепловую нагрузку тарелки Q по формуле (3 18)

2. Определяют температуру мокрого термометра $t_м$.

3 Рассчитывают движущую силу процесса, принимая $t''_ж=t_м$:

$$\Delta t=\frac{(t'_г-t_м)-(t''_г-t'_ж)}{\ln(t'_г-t_м)/(t''_г-t'_ж)}. \qquad (3.31)$$

4 Находят удельное орошение m' и коэффициент испарения φ Для этого проводят совместное решение уравнений (3 8) и

$$m'=\frac{\rho_г' Q}{\rho_ж G_г[\varphi(t''_п-c_ж t_м)+(t_м-t'_ж)c_ж]}, \qquad (3.32)$$

где $\rho'_г$ — плотность газов в условиях на входе в аппарат, кг/м³

5. Определяют скорость газов в свободном сечении аппарата (в условиях входа в аппарат) $w'_г$ и свободное сечение тарелки S_0.

Исходя из положения, что оптимальный тепловой режим в аппарате достигается при скорости газов, близкой к скорости «захлебывания» аппарата, считают скорость газов на входе в аппарат, м/с, по следующей зависимости:

$$w'_г=0{,}95A_1A_2, \qquad (3.33)$$

где

$$A_1=\frac{0{,}52\lambda'_г G_г \Delta t}{\rho'_г Q\sqrt{\sigma/(\rho_ж g)}}; \qquad (3.34)$$

$$A_2=\left\{\frac{\sqrt{\sigma/(\rho_ж g)}\times\left[0{,}416\sqrt{\frac{\rho_ж-\rho'_г}{\rho'_г}}(1-\psi)\right]}{\nu'_г}\right\}^{0,87}; \qquad (3.35)$$

здесь

$$\psi=\frac{\sqrt[3]{(m'\rho_ж/\rho'_г)^2\,[\rho'_г/(0{,}58\rho_ж)]}}{1+\sqrt[3]{\left(\frac{m'\rho_ж}{\rho'_г}\right)^2\frac{\rho'_г}{0{,}58\rho_ж}}}.$$

Значение удельного свободного сечения тарелки S_0 определяется по формуле

$$S_0=\frac{w'_г}{0{,}416\sqrt{\frac{\rho_ж-\rho'_г}{\rho'_г}}(1-\psi)}. \qquad (3.36)$$

Скорость газов $w'_г$ должна лежать в определенных пределах $1{,}0\leqslant w'_г\leqslant 4{,}5$ м/с, а свободное сечение тарелки — $0{,}15\leqslant S_0\leqslant 0{,}4$ м²/м².

6. Рассчитывают площадь свободного сечения аппарата S из выражения

$$S=\frac{G_г(1+d')}{\rho'_г w'_г}. \qquad (3.37)$$

Аппараты с подвижной шаровой насадкой Достоинством аппаратов являются высокие скорости газов (до 6—7 м/с) по сравнению с обычными насадочными аппаратами и незабиваемость насадки частицами пыли и смолами.

Коэффициент теплопередачи аппаратов с подвижной шаровой насадкой в расчете на единицу площади тарелки kA при охлаждении ненасыщенных газов с начальной температурой 200—250 °С можно найти из критериального уравнения [3 25], подобного уравнению (3 30)

$$Nu'=2{,}62\,Re_г^{0,79}\left(\frac{H_{ст}}{d_ш}\right)^{0,3}, \qquad (3.38)$$

где $Re_г = \frac{w'_г \sqrt{\sigma/(\rho_ж g)}}{\nu'_г}$ — число Рейнольдса для газов; $H_{ст}$ — высота статического слоя шаровой насадки, м; $d_ш$ — диаметр шаровой насадки, м. (Параметры, входящие в критерии Nu' и $Re_г$, принимаются по условиям на входе в аппарат.)

Уравнение (3 38) получено при массовой нагрузке аппарата по жидкости $W_ж \geqslant 3$ кг/(м²·с) и соблюдении следующих условий: аппарат работает в режиме полного псевдоожижения (см. разд. 4); отношение $H_{ст}/d_ш$ — 5÷16.

Расчет скруббера с подвижной шаровой насадкой при охлаждении ненасыщенных газов ведется аналогично расчету аппаратов с провальными тарелками. При этом скорость газов в свободном сечении аппарата выбирается таким образом, чтобы процесс охлаждения газов протекал в режиме полного псевдоожижения, и может быть рассчитана по формуле

$$w'_г = 2{,}76 S_0^{0,4} \left[\frac{G_ж \rho'_г}{\rho_ж G_г (1 + d')}\right]^{-0,15}, \quad (3.39)$$

где S_0 — свободное сечение опорной тарелки, обычно принимается равным 0,4 м²/м².

Аппараты для конденсационного охлаждения газов. В тех случаях, когда необходимо охладить газы ниже точки росы, их охлаждение сопровождается конденсацией водяных паров.

Количество теплоты, которое необходимо отнять от газов в этом случае, или, другими словами, тепловая нагрузка аппаратов конденсационного охлаждения, рассчитывается по уравнению

$$Q = G_г c_г (t'_г - t''_г) + G_г (d' i'_п - d'' i''_п) - G_г (d' - d'') c_ж t''_ж \quad (3.40)$$

расходов воды на орошение — по формуле

$$G_ж = \frac{Q}{c_ж (t''_ж - t'_ж)}. \quad (3.41)$$

Для осуществления процесса конденсационного охлаждения практически используются те же аппараты, что и для испарительного охлаждения, причем при конденсационном охлаждении газов аппараты с развитой поверхностью фазового контакта, насадочные скрубберы, тарельчатые аппараты имеют определенные преимущества по сравнению с обычными полыми скрубберами за счет более высоких значений объемных коэффициентов теплопередачи. Однако специфические условия пылегазового потока (возможность образования отложений и т п) часто вынуждают использовать для конденсационного охлаждения обычные полые скрубберы

Полые скрубберы В применяемых для охлаждения газов до точки росы и ниже полых скрубберах могут устанавливаться форсунки грубого распыла, что позволяет работать на оборотной воде, содержащей некоторое количество взвеси. Газовый поток в таком скруббере обычно направляется снизу вверх, вода распыливается форсунками, размещенными таким образом, чтобы все поперечное сечение скруббера было перекрыто факелами разбрызгиваемой жидкости. При большом расчетном расходе подаваемой воды форсунки могут устанавливаться в несколько ярусов

Для снижения температуры газов до 20—30 °С необходимо, чтобы вода подавалась с температурой на 5—10 °С ниже Наиболее низкие температуры (8—12 °С) имеет вода из артезианских скважин

Для расчета противоточного конденсационного скруббера обычно располагают следующими исходными данными: количеством охлаждаемых сухих газов $G_г$, физическими параметрами газов, начальным влагосодержанием d', начальной и конечной температурами газов $t'_г$ и $t''_г$, начальной и конечной температурами орошающей жидкости $t'_ж$ и $t''_ж$. Расчет рекомендуется проводить в следующем порядке

1. Находят по таблицам термодинамических свойств газов или по формуле (3.14) значение d'', соответствующее насыщенному газу при $t''_г$, и рассчитывают тепловую нагрузку аппарата Q по выражению (3.40).

2 Определяют расход воды на орошение по формуле (3 41).

3. Температурный напор Δt рассчитывают по формуле

$$\Delta t = \frac{(t'_г - t''_ж) - (t''_г - t'_ж)}{\ln (t'_г - t''_ж)/(t''_г - t'_ж)}. \quad (3.42)$$

4 Определяют полезный рабочий объем скруббера из выражения (3.21).

Надежных данных по расчету коэффициентов теплопередачи в подобных форсуночных скрубберах до настоящего времени не имеется Поэтому приходится пользоваться при расчетах коэффициентами теплопередачи, полученными экспериментальным путем при исследовании промышленных установок.

При охлаждении в полых скрубберах доменного газа [3 26] рекомендуется пользоваться формулой

$$k_0 = \left(417 + 112 \lg \frac{w_ж}{\rho_ж}\right) \rho_г w_г, \quad (3.43)$$

где $W_ж$ — плотность орошения аппарата, кг/(м²·с)

Выражение (3 43) получено при изменении скорости газов в пределах от 0,49 до 2,16 м/с и плотности орошения — от 1,0 до 8,5 кг/(м²·с) Орошение скрубберов доменной газоочистки осуществляется эвольвентными форсунками с диаметром сопла 15—25 мм, устанавливаемыми в несколько рядов.

Значение объемного коэффициента теплопередачи $k_0 \approx 235$ Вт/(м³·К), близкое

к значениям, получаемым по формуле (3.43), рекомендуют Гордон и Пейсахов [3.5] при плотности орошения примерно 0,8 кг/(м²·с).

Для оценочного расчета рабочего объема скруббера при скорости в нем газов 4,0—9,0 м/с и начальной температуре газов 50—70 °С можно воспользоваться выражением

$$V = 1{,}32\cdot 10^4 \frac{Q d_{\text{к}}^2}{\Delta t \lambda_{\text{г}}} \left(\frac{\nu_{\text{г}}}{w_{\text{о.г}} d_{\text{к}}} \right)^{1{,}58}, \quad (3.44)$$

где $d_{\text{к}}$ — средний диаметр капель, распыливаемых форсунками, м; $w_{\text{о.г}}$ — скорость движения капель относительно газов, м/с (расчет $d_{\text{к}}$ и $w_{\text{о.г}}$ приведен в разд. 4).

5. Рассчитывают диаметр аппарата с учетом принятой скорости газов по формуле (3.24).

Тарельчатые аппараты. При исследовании конденсационного охлаждения газов с начальной температурой 50—70 °С в тарельчатых аппаратах [3.27] получена критериальная зависимость для расчета коэффициента теплопередачи, аналогичная формуле (3.30):

$$\text{Nu}' = 66{,}2\ \text{Re}_{\text{г}}^{0{,}54}. \quad (3.45)$$

Все физические параметры, входящие в критерии Nu′ и $\text{Re}_{\text{г}}$, выбираются по условию на входе в аппарат.

Критериальное уравнение (3.45) получено при исследовании аппаратов с дырчатыми, щелевыми и трубчатыми провальными тарелками, работающих как в пенном, так и волновом режимах взаимодействия газов и жидкости (скорость газов в свободном сечении аппарата изменялась в пределах от 1,45 до 5,0 м/с). Из представленной зависимости следует, что в диапазоне температур насыщенных газов до 75 °С как начальное влагосодержание, так и перепад влагосодержаний в процессе охлаждения не оказывают существенного влияния на интенсивность процесса охлаждения.

Практика показала, что для охлаждения насыщенных газов с точкой росы 70—85 °С до 20—30 °С необходимо устанавливать в аппарате 3—4 тарелки.

При охлаждении в скруббере с уголковыми тарелками насыщенных газов с точкой росы 80—85 °С (скорость газов порядка 2 м/с) объемный коэффициент теплопередачи составил $k_0 \approx 8600$ Вт/(м³·К) [3.28].

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ
АППАРАТЫ МОКРОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

4.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Процесс пыле- или золоулавливания в мокрых газоочистных аппаратах сопровождается процессами абсорбции и охлаждения газов. Многие аппараты этого класса поэтому могут применяться не только для очистки газов от пыли и капель жидкости, но и для очистки от газообразных составляющих, а также для охлаждения газов. В ряде случаев их целесообразно использовать для одновременного пылеулавливания, абсорбции и охлаждения газов. Конденсация паров жидкости, содержащихся в газах, при их охлаждении способствует росту эффективности мокрых пылеуловителей.

Мокрые газоочистные аппараты широко применяются для предварительной очистки и соответствующей подготовки (кондиционирования) газов, поступающих в газоочистные аппараты других типов, в том числе и сухие (например, в электрофильтры, рукавные фильтры). В качестве орошающей жидкости в мокрых газоочистных аппаратах чаще всего применяется вода; при совместном решении вопросов пылеулавливания и химической очистки газов выбор орошающей жидкости (абсорбента) обусловливается процессом абсорбции.

Для уменьшения количества отработанной жидкости при работе мокрых аппаратов применяется ее частичная рециркуляция, а иногда и замкнутая система орошения.

Единой общепризнанной классификации мокрых газоочистных аппаратов до настоящего времени не имеется.

В справочнике мокрые аппараты разделены на следующие группы: полые газопромыватели, насадочные газопромыватели, тарельчатые газопромыватели (барботажные и пенные аппараты), газопромыватели с подвижной насадкой, мокрые аппараты ударно-инерционного действия (ротоклоны), мокрые аппараты центробежного действия, механические газопромыватели (механические и динамические скрубберы), скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури), эжекторные скрубберы.

К мокрым пылеуловителям могут быть отнесены и другие пылеулавливающие аппараты: конденсационные [4.1], орошаемые волокнистые фильтры и мокрые электрофильтры. Что касается первых, то они не получили широкого применения в промышленности, а два последних типа аппаратов рассматриваются в разделах, посвященных фильтрации и электрической очистке газов.

В мокрых пылеуловителях осаждение

взвешенных частиц происходит на каплях или пленках жидкости. Доминирующим механизмом осаждения является инерционный, поэтому независимо от поверхности осаждения эффективность мокрых пылеуловителей может быть найдена в функции числа Стокса, Stk, (см. § 1.3) или от так называемого инерционного параметра ψ, отличающегося от числа Стокса тем, что в инерционный параметр входит числовой коэффициент 1/18 и поправка Кенингема

$$\psi = \frac{d^2_ч \rho_ч w_{о.г} C}{18 \mu_г l},$$

где $w_{о.г}$ — скорость газов относительно поверхности осаждения, м/с; C — поправка Кенингема; l — определяющий линейный параметр, м.

Поправка Кенингема приобретает существенное значение при диаметре частиц пыли меньше 1 мкм [4.2]. Ниже приведены значения поправок C (для воздуха при нормальных условиях):

$d_ч$, мкм	0,003	0,01	0,03	0,1
C	90	24,5	7,9	2,9
$d_ч$, мкм	0,3	1,0	3,0	10,0
C	1,57	1,16	1,03	1,0

Наличие коэффициента и поправки Кенингема придает инерционному параметру определенный физический смысл — это отношение длины пробега частиц от некоторой начальной скорости до полной остановки в неподвижной газовой среде к характерному для рассматриваемого процесса газоочистки геометрическому размеру l: диаметру капли, газового пузырька, аппарата (для мокрых циклонов), сопла (для аппаратов ударно-инерционного действия).

Инерционный параметр теряет свое значение в тех случаях, когда становятся значительными другие механизмы осаждения, например диффузионные при интенсивной конденсации водяных паров в мокром пылеуловителе или электростатические в так называемых электростатических скрубберах (см. § 4.14).

Преобладание инерционного механизма осаждения взвешенных частиц в абсолютном большинстве типов мокрых пылеуловителей позволяет выражать коэффициенты парциальной эффективности аппаратов (при определенном гидродинамическом режиме их работы) в виде зависимостей от диаметра улавливаемых частиц, причем установлено, что практически все зависимости удовлетворительно могут быть обобщены уравнением интеграла вероятности. В связи с этим расчет эффективности мокрых пылеуловителей может быть осуществлен с помощью интеграла вероятности по формуле (1.54) или по номограмме рис. 1.31 на основании значений d_{50} и $\lg \sigma_\eta$.

В настоящем разделе все значения d_{50}

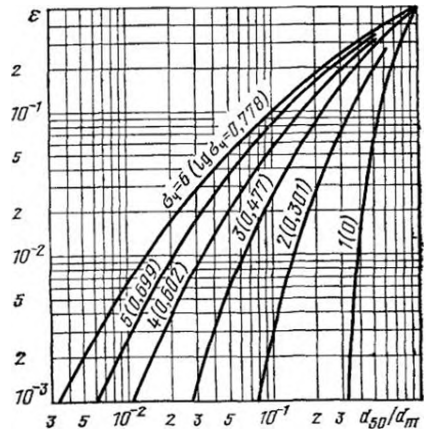


Рис. 4.1. Номограмма для определения коэффициентов проскока частиц для полых, тарельчатых и насадочных скрубберов, а также скруббера Вентури при $0{,}5 \leqslant \psi \leqslant 5{,}0$

приведены для стоксовских размеров частиц плотностью ($\rho_ч$=1000 кг/м³), взвешенных в воздухе с температурой 20 °С при нормальном давлении.

Вероятностный метод расчета лежит и в основе номограммы, представленной на рис. 4.1 [4.3]. Номограммой можно пользоваться для определения коэффициента проскока $\varepsilon = 1 - \eta$ в полых, насадочных, тарельчатых скрубберах, а также в скрубберах Вентури при $0{,}5 \leqslant \psi \leqslant 5{,}0$.

Преобладающее влияние инерционного механизма осаждения в мокрых пылеуловителях лежит в основе и другого метода расчета, получившего название «энергетического» [4.2]. Согласно этому методу, при улавливании определенного вида пыли эффективность аппарата пропорциональна удельному расходу энергии и не зависит от размера и конструкции пылеуловителя. Необходимо только, чтобы конструкция мокрого пылеуловителя и условия его эксплуатации были оптимальны с точки зрения аэродинамики потока и подачи орошающей жидкости (подробнее об энергетическом методе расчета см. в § 4.13).

С учетом зависимости эффективности пылеулавливания от энергозатрат мокрые пылеуловители подразделяются на низконапорные (до 1500 Па), среднеинапорные (от 1500 до 4500 Па) и высоконапорные (свыше 4500 Па).

4.2. ПОЛЫЕ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛИ

В полых газопромывателях запыленные газы пропускаются через завесу распыленной жидкости. При этом частицы пыли захватываются каплями жидкости и осажда-

ются вместе с ними, а очищенные газы удаляются из аппарата.

Орошаемые газоходы. Наиболее простым полым газопромывателем является орошаемый газоход, когда ряд форсунок или брызгал встраиваются в газоход или дымовую трубу для создания водяных завес на пути запыленного газового потока (рис. 4.2). Во избежание значительного брызгоуноса скорость газов в орошаемом газоходе принимают не более 3 м/с. Расход воды принимают в пределах от 0,1 до 0,3 л/м³. В большинстве случаев после орошаемых газоходов необходимо устанавливать каплеуловители и снабжать газопроводы дренажными устройствами для отвода оседающей жидкости.

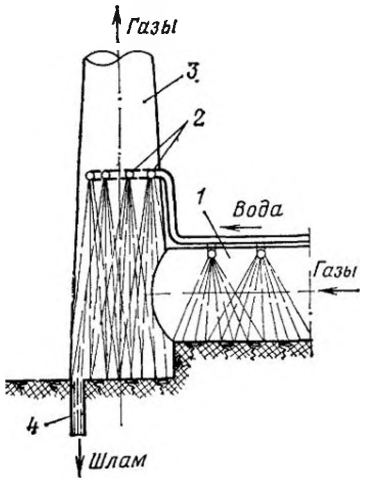


Рис. 4.2. Оросительное устройство:
1 — газоход; 2 — форсунки; 3 — дымовая труба; 4 — шламовая труба

Промывание камеры (рис. 4.3) сооружаются из металла, железобетона или кирпича Внутри камеры в несколько рядов, чаще всего в шахматном порядке, размещают форсунки.

Для повышения эффективности очистки иногда на пути движения газов в промывной камере устанавливают отбойные пластины, перфорированные листы или сетки. В конце промывной камеры устанавливают брызгоуловитель (см. § 4.12).

Размеры промывных камер выбираются так, чтобы скорость движения газов в них составляла от 1,5 до 2,5 м/с, а время пребывания газов в камере — не менее 3 с. Расход воды на промывку газов составляет от 0,2 до 1,0 л/м³. Промывные камеры чаще всего применяются для очистки от пыли и увлажнения воздуха в вентиляционных установках и установках кондиционирования воздуха. Гидравлическое сопротивление промывных камер вместе

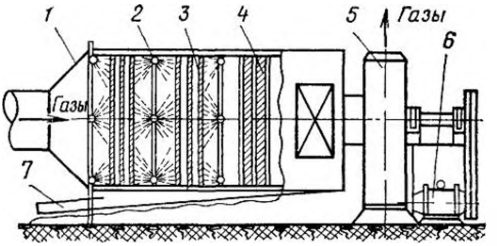


Рис 4.3 Промывная камера:
1 — корпус; 2 — форсунки; 3 — перфорированные перегородки; 4 — брызгоуловитель, 5 — вентилятор; 6 — электродвигатель; 7 — шламовая труба

с брызгоуловителями не превышает 300—500 Па.

Полые форсуночные скрубберы (рис. 4.4) представляют собой колонну круглого или прямоугольного сечения, в которой осуществляется контакт между очищаемыми газами и каплями жидкости, распыливаемой форсунками. По направлению движения газов и жидкости полые скрубберы делятся на противоточные, прямоточные и с поперечным подводом жидкости. Обычно применяются аппараты с противонаправленным движением газов и жидкости и реже с поперечным подводом жидкости, в которых жидкость вводится под прямым углом к направлению газового потока.

В противоточном скруббере капли из форсунок падают навстречу запыленному потоку газов и должны быть достаточно крупными, чтобы не быть унесенными га-

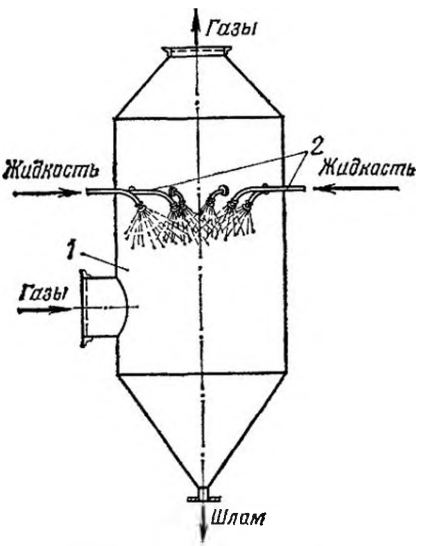


Рис 4.4 Полый скруббер:
1 — корпус; 2 — форсунки

зовым потоком, скорость которого обычно составляет от 0,6 до 1,2 м/с.

В последнее время применяются скоростные скрубберы с линейной скоростью газов 5—8 м/с [4.4]. В этом случае после скруббера необходима установка каплеуловителя. Форсунки устанавливаются в аппарате в одном или нескольких сечениях — иногда ярусами (до 14—16 в сечении), иногда только по оси аппарата. Схема расположения форсунок в аппарате показана на рис. 4.5.

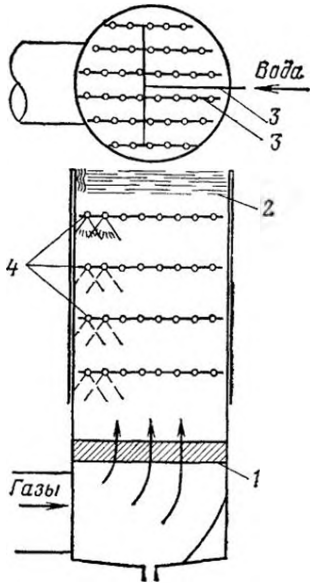


Рис. 4.5. Схема расположения форсунок в полом скруббере:

1 — газораспределительная решетка, *2* — каплеуловитель; *3* — водяной коллектор, *4* — форсунки

При расположении форсунок в несколько ярусов возможна комбинированная установка распылителей: часть факелов направлена по ходу газов, другая часть — наоборот. Для лучшего распределения газов по сечению аппарата в нижней части скруббера устанавливается газораспределительная решетка.

Максимальная эффективность при инерционном осаждении улавливаемых частиц на каплях, падающих под действием силы тяжести в неподвижном воздухе (вне зависимости от размера частиц), согласно расчетам [4.5] достигается при $d_к = 0{,}6 \div 1{,}0$ мм. В полых газопромывателях обычно устанавливают центробежные форсунки грубого распыла, работающие под давлением от 0,3 до 0,4 мПа и создающие капли требуемого размера. Применение таких форсунок позволяет работать на оборотной воде, содержащей взвеси. Форсунки просты в изготовлении и мало подвержены износу.

Полые форсуночные скрубберы обеспечивают высокую степень очистки при улавливании частиц $d_ч > 10$ мкм и малоэффективны при улавливании частиц $d_ч < 5$ мкм.

Расчет полого газопромывателя. Расчет проводится в следующей последовательности. Исходные данные: расход очищаемых газов $Q_г$, плотность газов $\rho_г$, плотность частиц улавливаемой пыли $\rho_ч$ и ее дисперсный состав.

1. Определяется площадь сечения скруббера, м²:

$$S = Q_г / w_г, \qquad (4.1)$$

причем скорость $w_г$ принимается около 1 м/с (при условиях на выходе газов из аппарата). При большей скорости газов наблюдается интенсивный брызгоунос, в связи с чем возникает необходимость установки каплеуловителей.

Противоточные скрубберы обычно представляют собой цилиндрическую колонну, в то время как аппараты с поперечным орошением имеют прямоугольное или квадратное сечение.

Высота противоточного скруббера выбирается из условия $H \approx 2{,}5D$.

2. Определяется удельный расход жидкости. Величину m выбирают в пределах от 0,5 до 8 л/м³ газов. При больших концентрациях пыли на входе (10—12 г/м³) m принимают равной 6—8 л/м³. Отсюда общий расход жидкости, подаваемой на орошение аппарата,

$$Q_ж = mQ_г. \qquad (4.2)$$

3. Гидравлическое сопротивление полого скруббера при отсутствии встроенного каплеуловителя и газораспределительной тарелки обычно не превышает 250 Па.

4. При расчете для конкретных случаев применения полых скрубберов предложены [4.2] следующие уравнения, связывающие значения $\eta_п$ со значениями отдельных факторов, влияющих на работу рассматриваемых аппаратов:

для противоточного скруббера

$$\eta_п = 1 - \exp\left[-\frac{3Q_ж \eta_з (w_г + w_к) H}{2Q_г d_к w_к}\right], \qquad (4.3)$$

для скруббера с поперечным орошением

$$\eta_п = 1 - \exp\left[-\frac{3Q_ж H \eta_з}{2Q_г d_к}\right], \qquad (4.4)$$

где $\eta_з$ — эффективность захвата каплями частиц определенного диаметра; $w_к$ — скорость осаждения капли, м/с; $d_к$ — диаметр капли, м; H — высота скруббера, м.

В скруббере устанавливаются форсунки грубого распыла, обеспечивающие оптимальный для рассматриваемого процесса пылеулавливания диаметр капель $d_к \approx 0{,}6 \div 1{,}0$ мм. Скорость осаждения капель $w_к$

можно определить по диаграмме на рис. 4.6.

Коэффициент η_3 при $m<2$ л/м³ определяют по следующему уравнению [4.3]:

$$\eta_3 = \frac{\psi^2}{(\psi + 0{,}35)^2}. \qquad (4.5)$$

Вместо вычислений по уравнению (4.5) можно воспользоваться графиком на рис. 4.7. При значениях удельного орошения 2 л/м³ и более можно [4.6] воспользоваться уравнением

$$\eta_3 = 1 - 0{,}15\psi^{-1{,}24}. \qquad (4.6)$$

Выражение (4.6) действительно при $1 \leqslant \psi \leqslant 170$; при $\psi > 170$ величина η_3 может быть принята практически равной 1,0. Значения η_3 при больших удельных орошениях можно также найти по графику на рис. 4.7.

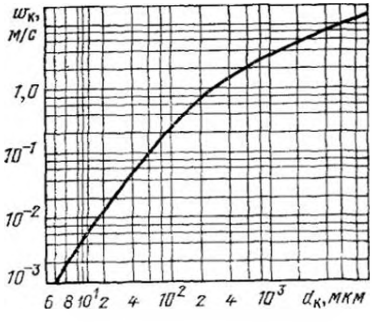


Рис. 4.6. Диаграмма для определения скорости осаждения капель в воздухе (при температуре воздуха 15 °С)

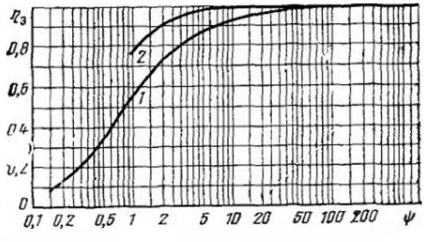


Рис. 4.7. Эффективность инерционного осаждения частиц на шаре (капле):

1 — кривая, полученная на основании формулы (4.5); *2* — при больших удельных орошениях, формула (4.6)

Значения диаметра частиц, осаждаемых в скрубберах обоих типов с эффективностью 50%, рассчитанные на основании формул (4.3) и (4.4) для некоторых режимов работы аппаратов, приведены на рис. 4.8 и 4.9.

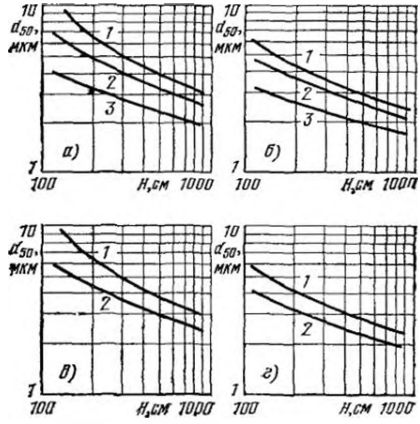


Рис. 4.8. Значения d_{50} для противоточного скруббера:

а — $m=0{,}5$ л/м³ и $w_г=0{,}6$ м/с; *б* — $m=1$ л/м³ и $w_г=0{,}6$ м/с, *в* — $m=0{,}5$ л/м³ и $w_г=0{,}9$ м/с; *г* — $m=1$ л/м³ и $w_г=0{,}9$ м/с; *1* — $d_к=1000$ мкм; *2* — $d_к=500$ мкм; *3* — $d_к=200$ мкм

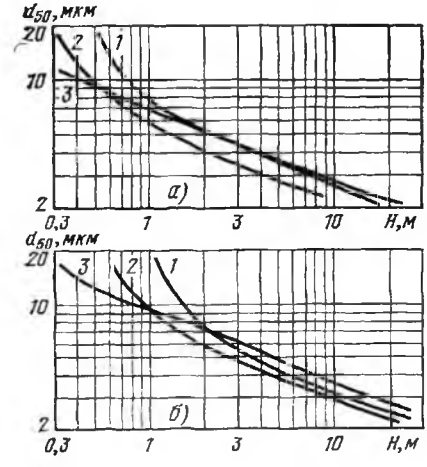


Рис. 4.9 Значения d_{50} для скруббера с поперечным орошением:

а — $m=1$ л/м³, *б* — $m=0{,}5$ л/м³; *1* — $d_к=1000$ мкм; *2* — $d_к=500$ мкм; *3* — $d_к=200$ мкм

4.3. НАСАДОЧНЫЕ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛИ

Насадочные газопромыватели представляют собой колонны, заполненные телами различной формы (рис. 4.10), засыпаемыми в колонну на опорную решетку в беспорядке или укладываемыми правильными рядами (регулярная насадка).

Из-за частого забивания насадки при обработке запыленных газов насадочные скрубберы (рис. 4.11 и 4.12) в настоящее

время мало применяются для очистки газов от пыли. Скрубберы находят применение при улавливании туманов, хорошо растворимой пыли, а также используются при совместном протекании процессов пылеулавливания, охлаждения газов и абсорбции насадочных газопромывателей, см. [4.2, 4.7—4.10].

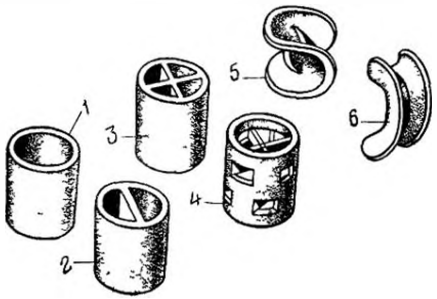


Рис 4 10 Типы насадок:

1 — кольцо Рашига; *2* — кольцо с перегородками; *3* — кольцо с крестообразной перегородкой, *4* — кольцо Палля; *5* — седло Берля; *6* — седло «Италлокс»

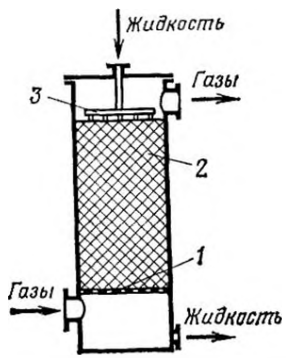


Рис. 4.11. Противоточный насадочный скруббер·

1 — опорная решетка; *2* — насадка; *3* — оросительное устройство

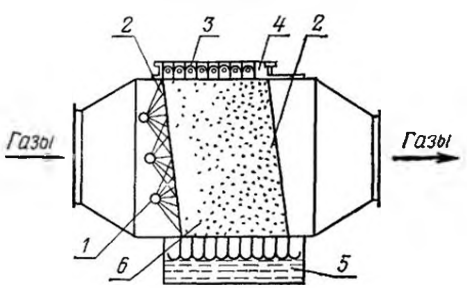


Рис. 4 12. Насадочный скруббер с поперечным орошением:

1 — форсунки; *2* — опорные решетки; *3* — оросительное устройство; *4* — неорошаемый слой насадки (брызгоуловитель); *5* — шламосборник; *6* — насадка

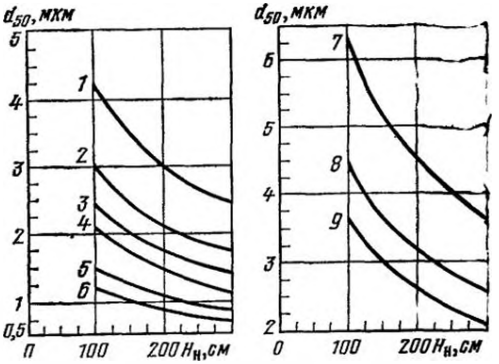


Рис 4.13 Значения d_{50} для насадочного газопромывателя в зависимости от высоты слоя насадки $H_н$ при свободном объеме насадки 0,75 м³/м³:

1 — диаметр насадки $d_н$=2,5 см и $w_г$=4,5 м/с; *2* — $d_н$=2,5 см и $w_г$=3,0 м/с; *3* — $d_н$=2,5 см и $w_г$=1,5 м/с; *4* — $d_н$=5,0 см и $w_г$=4,5 м/с; *5* — $d_н$=5,0 см и $w_г$=3,0 м/с; *6* — $d_н$=5,0 см и $w_г$=1,5 м/с; *7* — $d_н$=7,5 см и $w_г$=4,5 м/с; *8* — $d_н$=7,5 см и $w_г$=3,0 м/с; *9* — $d_н$=7,5 см и $w_г$=1,5 м/с

Расход орошающей жидкости в противоточных насадочных скрубберах принимают в пределах от 1,3 до 2,6 л/м³. В насадочных газопромывателях с поперечным орошением для обеспечения лучшего смачивания поверхности насадка слой насадка обычно наклонен на 7—10° в направлении газового потока. Расход жидкости в аппаратах этого типа обычно выбирают в пределах 0,15—0,5 л/м³, эффективность при улавливании частиц размером $d_ч \geqslant 2$ мкм превышает 90%.

На рис. 4.13 приведены значения d_{50} для насадочных газопромывателей в зависимости от различных конструктивных и режимных параметров, которые могут быть использованы при расчете эффективности насадочных аппаратов с помощью номограммы, приведенной на рис. 4.1.

4.4. ТАРЕЛЬЧАТЫЕ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛИ (БАРБОТАЖНЫЕ И ПЕННЫЕ АППАРАТЫ)

Барботеры. Очищаемые газы в барботажных аппаратах проходят через слой жидкости в виде пузырьков, на поверхности которых и происходит осаждение частиц пыли. Эффективность аппаратов достаточно велика только при улавливании частиц размером $d_ч > 5$ мкм. Вследствие невысокой производительности в настоящее время барботажные пылеуловители (в обычном пони-

мании этого термина) не имеют промышленного значения.

Пенные аппараты. Впервые пенный способ очистки запыленных газов предложен и подробно исследован М. Е. Позиным [4.4, 4.11, 4.12]. Аппарат (рис. 4.14) может работать со свободным сливом пены или с подпором пены сливной перегородкой (второй режим предпочтительнее).

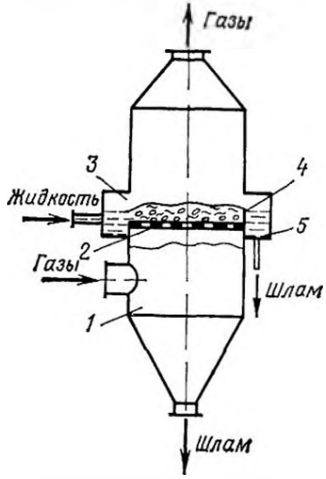


Рис. 4.14. Пенный пылеуловитель с переливной тарелкой:

1 — корпус; *2* — тарелка; *3* — приемная коробка; *4* — порог; *5* — сливная коробка

Пенный аппарат с дырчатыми тарелками. В аппарате обычно устанавливаются дырчатые тарелки с диаметром отверстий 3—8 мм и свободным сечением от 0,15 до 0,25 м²/м². Геометрические размеры тарелок приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Геометрические размеры тарелок с круглыми отверстиями

Шаг отверстий, мм	Диаметр отверстий, мм	Свободное сечение, м²/м²	Шаг отверстий, мм	Диаметр отверстий, мм	Свободное сечение, м²/м²
6	6	0,226	12	5	0,157
8	4	0,226	13	5	0,134
9	4	0,179	13	6	0,193
10	5	0,226	13	7	0,263
10	5,5	0,272	14	6	0,167
11	5	0,187	16	7	0,174
11	6	0,271	18	8	0,179

Для уменьшения вероятности забивания отверстий тарелки пылью разработаны аппараты с провальными тарелками [4.2, 4.4], в которых подвод газов в зону контакта с жидкостью и отвод последней из этой зоны

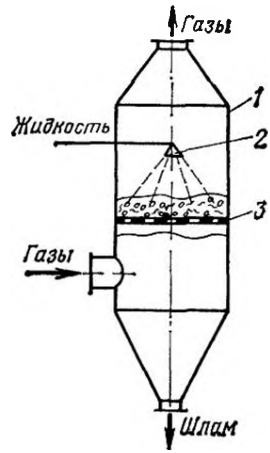


Рис. 4.15 Мокрый пылеуловитель с провальной тарелкой:

1 — корпус; *2* — оросительное устройство; *3* — тарелка

осуществляется через одни и те же дырчатые или щелевые отверстия (рис. 4.15)

Для очистки газов применяются два основных вида провальных тарелок: дырчатые и щелевые (рис. 4.16).

Щелевые тарелки подразделяются на решетчатые, трубчатые и колосниковые. Трубчатые и колосниковые щелевые тарелки изготовляются сварными из трубок, пластин или прутков.

Оптимальная толщина тарелки с точки зрения гидравлического сопротивления должна составлять 4—6 мм.

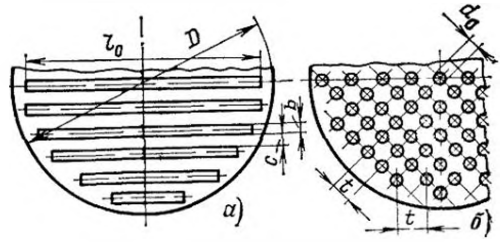


Рис. 4.16. Конструкции провальных тарелок:

а — щелевая; *б* — дырчатая

Диаметр отверстий d_0 в тарелках пылеулавливающего аппарата составляет от 4 до 8 мм, ширина щели $b = 4 \div 5$ мм, а свободное сечение колеблется от 0,2 до 0,25 м²/м². В теплообменных аппаратах ширина щели может быть увеличена от 5 до 8 мм, а свободное сечение — от 0,4 до 0,5 м²/м².

Необходимое число щелей на тарелке n может быть определено [4.9] из приведенных ниже данных:

n	X	n	X	n	X
1	0,000	11	8,042	21	15,015
2	0,866	12	8,832	22	16,713
3	1,688	13	9,620	23	17,500
4	2,498	14	10,411	24	18,287
5	3,296	15	11,200	25	19,074
6	4,093	16	11,982	26	19,860
7	4,887	17	12,776	27	20,648
8	5,679	18	13,564	28	21,432
9	6,471	19	14,352	29	22,219
10	7,257	20	15,138	30	23,005

Параметр X определяется из выражения

$$X=0{,}785D^2S_0/(l_0b), \qquad (4.7)$$

где D — диаметр аппарата, м; S_0 — свободное сечение тарелки, м²/м²; l_0 — длина самой длинной щели, расположенной по диаметру тарелки и равной $D-0{,}01$ м.

Общая длина всех щелей

$$\Sigma l=0{,}785D^2S_0/b, \qquad (4.8)$$

а шаг между щелями

$$t=l_0/n=c+b, \qquad (4.9)$$

где c — ширина промежутка между соседними щелями, м; b — ширина щели, м.

Исходными данными для расчета аппарата являются расход очищаемых газов $Q_г$, плотность частиц улавливаемой пыли $\rho_ч$ и ее дисперсный состав

Дырчатые тарелки (см. табл. 4.1) имеют ромбическую разметку (по равностороннему треугольнику), при которой шаг, м, определяется из выражения

$$t=d_0\sqrt{0{,}91/S_0}. \qquad (4.10)$$

Удельное орошение при очистке газов (без необходимости охлаждения) составляет от 0,4 до 0,6 л/м³ газов.

Плотность орошения, кг/(м²·с), находят из выражения

$$W_ж=mw_г\rho_ж, \qquad (4.11)$$

где m — удельное орошение, м³/м³ газов.

Минимальная линейная скорость газов, при которой образуется пенный режим в указанных пределах плотности орошения, может быть принята равной от 1,0 до 1,2 м/с.

Расчет максимальной скорости газов при пенном режиме $w_{кр}$, м/с, ведется методом последовательных приближений по эмпирическому уравнению [4.13]

$$\lg w_{кр}=1350\,\frac{S_0^2d_э}{A}+0{,}154, \qquad (4.12)$$

где $d_э$ — эквивалентный диаметр отверстий тарелки, м: для дырчатых тарелок $d_э=d_0$, для щелевых $d_э=2b$; A — коэффициент, определяемый из выражения

$$A=38{,}8(W_ж/W_{ст})^{-0{,}57}m^{0{,}7}\times$$
$$\times(\rho_ж/\rho_г)^{0{,}35}, \qquad (4.13)$$

где $W_{ст}$ — стандартная плотность орошения, равная 1 кг/(м²·с).

При расчете предварительно задаются линейной скоростью газов в аппарате $w_г$, принимая равной от 2 до 2,3 м/с, и по уравнению (4.11) определяют $W_ж$.

Рабочая скорость газов $w_г$ в аппарате (на входе в слой пены) должна составлять от 0,9 до $0{,}95w_{кр}$. Если $w_{кр}$ окажется по расчету меньше принятой $w_г$ или больше, чем $1{,}1w_г$, то расчет повторяют с внесением соответствующих поправок в принятое значение $w_г$.

Диаметр аппарата, м,

$$D=\sqrt{Q_г/(0{,}785w_г)}. \qquad (4.14)$$

Если диаметр аппарата оказывается большим ($D>2{,}5$ м), то следует устанавливать несколько параллельных аппаратов. Большое внимание в этом случае следует уделять равномерному распределению газов по всей площади сечения аппарата. Поэтому в аппаратах большого сечения иногда устанавливают вместо одной две тарелки, полагая, что первая из них (по ходу газов) обеспечивает равномерное газораспределение

Полное гидравлическое сопротивление аппарата, Па, определяется по уравнению

$$\Delta p=\Delta p_{вх}+\Delta p_т+$$
$$+\Delta p_{вых}+\Delta p_{кап}, \qquad (4.15)$$

где $\Delta p_{вх}$ — гидравлические потери при входе газов в аппарате, Па; $\Delta p_{вых}$ — гидравлические потери при выходе газов из аппарата, Па; $\Delta p_т$ — полное гидравлическое сопротивление одной или нескольких тарелок (в случае многополочного аппарата) со слоем пены, Па; $\Delta p_{кап}$ — гидравлическое сопротивление каплеуловителя, встроенного в аппарат, Па.

Значения $\Delta p_{вх}$, $\Delta p_{вых}$ невелики и составляют 50—100 Па, более точно могут быть рассчитаны по [4.14].

Полное гидравлическое сопротивление тарелки, Па, определяют по формуле

$$\Delta p_т=A^2\,\frac{w_г^2\rho_г}{2S_0^2}+\Delta p_\sigma, \qquad (4.16)$$

где Δp_σ — гидравлическое сопротивление за счет сил поверхностного натяжения, Па.

При пенном режиме взаимодействия газов и жидкости коэффициент A рассчитывается из выражения (4.13).

Для щелевых тарелок Δp_σ рассчитывают по уравнению

$$\Delta p_\sigma=2\sigma/b, \qquad (4.17)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела фаз газ — жидкость, Н/м.

Для расчета Δp_σ дырчатых тарелок рекомендуется формула

$$\Delta p_\sigma = \frac{4\sigma}{1{,}3d_0 + 0{,}08d^2_0} \qquad (4.18)$$

Гидродинамический расчет пенных аппаратов с провальными тарелками может быть проведен по номограмме, приведенной на рис 4 17. С помощью номограммы может быть определен один из четырех параметров ($w_г$, m, d_0, S_0) при трех других заданных, гидравлическое сопротивление тарелки $\Delta p_т$, а также высота слоя пены на тарелке $H_п$ Номограмма может быть применена при скоростях газов от 0,8 до 2,0 м/с, т е в пределах протекания пенного режима

Для уменьшения уноса брызг верхняя тарелка пенного пылеуловителя должна быть удалена от места отвода газов из аппарата на расстояние не менее 1,0 м.

Общая эффективность пылеулавливания пенных аппаратов как с переливными, так и с провальными тарелками рассчитывается по формуле (1 54) при d_{50}= =0,85 мкм и $\lg \sigma_\eta = 0{,}769$. Эти значения d_{50} и $\lg \sigma_\eta$ получены для условий скорость газов в аппарате $w_г$=2 м/с и высота слоя пены на тарелке $H_п$=0,09 м Поэтому в случае необходимости для аппаратов с другими параметрами значения η могут быть уточнены по формуле

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{w_г}{2}\right)^{0\,036} \left(\frac{H_п}{0{,}09}\right)^{0{,}032}, \qquad (4.19)$$

где η_0 — эффективность при $w_г$=2 м/с и $H_п$=0,09 м

При очистке газов с большой начальной запыленностью ($c_{вх}$>15÷20 г/м³) целесообразно применять двухполочные аппараты

Если аппарат с провальными тарелками используется для кондиционирования газов (охлаждения, увлажнения и предварительной очистки) или устанавливается перед другим мокрым пылеуловителем, он может работать при $w_г > w_{кр}$, но ниже точки захлебывания

Скорость газов в аппарате с провальными тарелками, соответствующая точке захлебывания $w_з$, м/с, может быть определена [4.15] из эмпирического выражения

$$w_з = 0{,}416 \sqrt{\frac{\rho_ж - \rho_г}{\rho_г}}\, S_0 \varphi. \qquad (4\ 20)$$

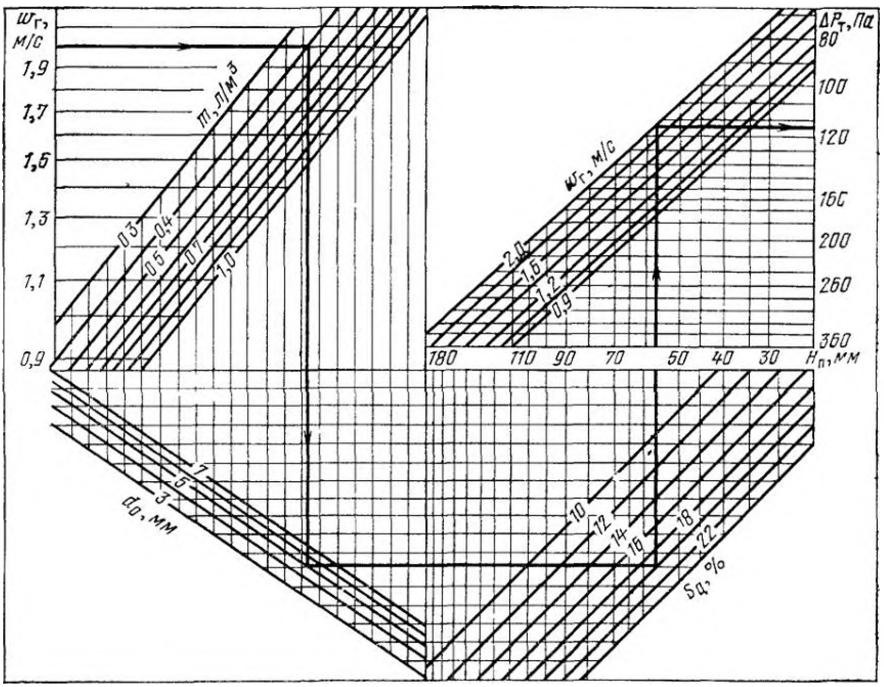


Рис 4 17 Номограмма для гидродинамического расчета пенных аппаратов с провальными тарелками

Ключ $w_г \to m \to d_0 \to S_0 \nearrow w_г \to \Delta p_т$, $\searrow H_п$

Таблица 4.2. Формулы для расчета коэффициента A для провальных тарелок различного типа

Тип тарелки	Свободное сечение тарелки, м²/м²	Скорость газов в свободном сечении аппарата, м/с	Формулы для расчета
Дырчатые и щелевые	0,15 — 0,25	$w_г > w_{кр}$	$54{,}8\left(\frac{W_ж}{W_{ст}}\right)^{-0{,}43} m^{0{,}55}\left(\frac{\rho_ж}{\rho_г}\right)^{0{,}28}$ (4.22)
То же	0,3 — 0,4	$w_г = 0{,}8 \div 5{,}0$	$90{,}6 m^{1{,}2}\left(\frac{\rho_ж}{\rho_г}\right)^{0{,}6}$ (4.23)
Трубчатые	0,3 — 0,4	$w_г = 1{,}0 \div 3{,}5$	$53{,}43\left(\frac{W_ж}{W_{ст}}\right)^{-0{,}56} m^{0{,}92}\left(\frac{\rho_ж}{\rho_г}\right)^{0{,}46}$ (4.24)

Доля свободного сечения тарелки φ, занятая газом, рассчитывается по формуле

$$\varphi = 1 - \frac{1{,}37\sqrt[3]{m^2\rho_ж/(\rho_г\zeta_{сух})}}{1 + 1{,}37\sqrt[3]{m^2\rho_ж/(\rho_г\zeta_{сух})}}, \qquad (4.21)$$

где $\zeta_{сух}$ — коэффициент гидравлического сопротивления сухой тарелки, для обычно применяемых в пенных пылеуловителях дырчатых и щелевых тарелок толщиной 4—6 мм $\zeta_{сух} \approx 1{,}6 \div 1{,}7$ Значения $\zeta_{сух}$ для различных типов тарелок приведены в [4 14].

Гидравлическое сопротивление провальных тарелок со свободным сечением $S_0 \leqslant 0{,}25$ м²/м² при $w_г > w_{кр}$, а также провальных тарелок с большим свободным сечением рассчитывается также по формуле (4.16) с подставлением соответствующих коэффициентов A (табл. 4 2).

Пенный аппарат со стабилизатором пенного слоя (ПАСС). Газопромыватель разработан ЛТИ совместно с институтом Проектпромвентиляция [4.12, 4.16]. Отличие аппарата от газопромывателя с провальной тарелкой заключается в установке непосредственно на тарелке стабилизатора, представляющего собой сотовую решетку из вертикально расположенных пластин, разделяющих сечение аппарата и пенный слой на небольшие ячейки (рис 4 18).

Стабилизатор пены предотвращает возникновение волнового режима на тарелке вплоть до скорости газов 4,0 м/с, т. е. существенно расширяет скоростной интервал пенного режима. Благодаря стабилизатору происходит значительное накопление жидкости на тарелке и, следовательно, увеличение высоты пены по сравнению с провальной тарелкой без стабилизатора. Применение стабилизатора позволяет существенно сократить расход воды на орошение аппарата.

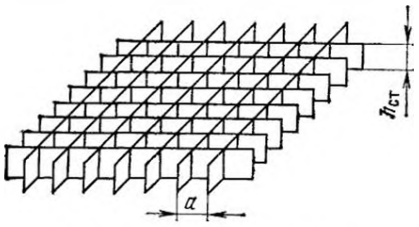


Рис 4 18 Стабилизатор

Рекомендуются следующие размеры стабилизатора: высота пластин 60 мм; размер ячеек — от 35×35 до 40×40 мм

Оптимальными условиями работы аппарата являются $w_1 = 2{,}5 \div 3{,}5$ м/с и $m = 0{,}05 \div 0{,}1$ л/м³. В аппарате устанавливаются дырчатые провальные тарелки с $d_0 = 3 \div 6$ мм и $S_0 = 0{,}14 \div 0{,}22$ м²/м² и щелевые (трубчатые) провальные тарелки с $b = 3 \div 6$ мм и $S_0 = 0{,}12 \div 0{,}18$ м²/м². Диаметр труб в трубчатых тарелках $d_{тр} = c = 20 \div 32$ мм

Высоту слоя пены $H_п$, образующейся на дырчатых тарелках, определяют по номограмме на рис 4 19,*а*, образующейся на трубчатой тарелке — по номограмме на рис. 4 19,*б*

Гидравлическое сопротивление газопромывателя ПАСС рассчитывается по формуле (4 15), причем $\Delta p_т$ находится из выражения

$$\Delta p_г = \frac{\zeta_{сух}\rho_г w^2_г}{2S^2_0\varphi^2} + \Delta p_п + \Delta p_о. \qquad (4\ 25)$$

Гидравлическое сопротивление пенного слоя $\Delta p_п$, Па, находится по номограмме, приведенной на рис 4 20

Эффективность улавливания пыли в газопромывателе ПАСС может быть определена на основании значений d_{50} и $\lg \sigma_\eta$ для пенных аппаратов с учетом поправки по уравнению (4 19).

Типоразмерный ряд газопромывателей ПАСС типа ПВПР (рис 4 21) на произ-

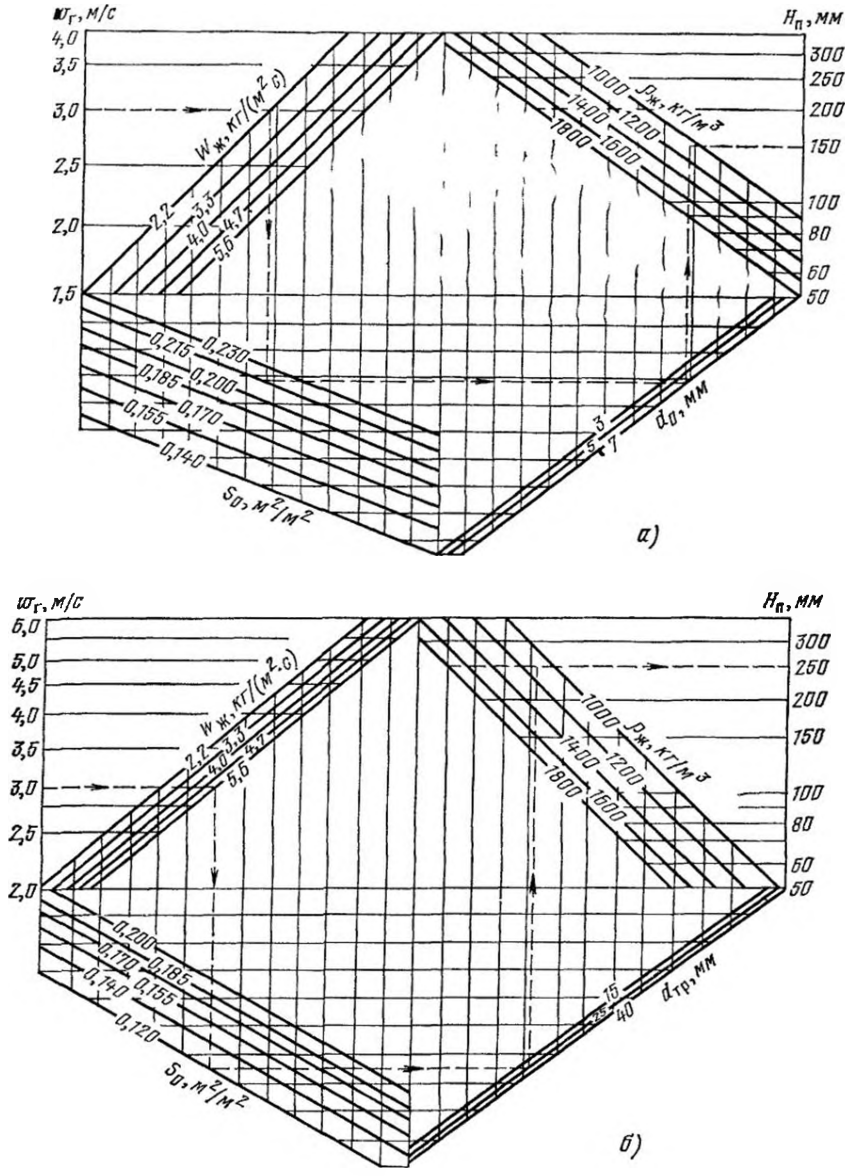


Рис 4 19. Номограмма для определения высоты пенного слоя·
а — на дырчатых тарелках (ключ $w_г \to W_ж \to S_0 \to d_0 \to \rho_ж \to H_п$), *б* — на трубчатых тарелках (ключ: $w_г \to W_ж \to S_0 \to d_{тр} \to \rho_ж \to H_п$)

водительность по газу от 3000 до 90 000 м³/ч, состоящий из 12 типоразмеров разработан институтом Ленгипрогазоочистка. Корпус аппарата круглого сечения собирается из секций, что позволяет производить компоновку с одной или двумя тарелками Предусмотрено применение тарелок двух типов· дырчатой с S_0=0,18 м²/м² или трубчатой с S_0=0,167 м²/м². В верхней части скруббера установлен центробежный каплеуловитель с цилиндрическим завихрителем (см § 4.12). Максимальная температура газов на входе в аппарат 100°С, максимальное разрежение 5 кПа.

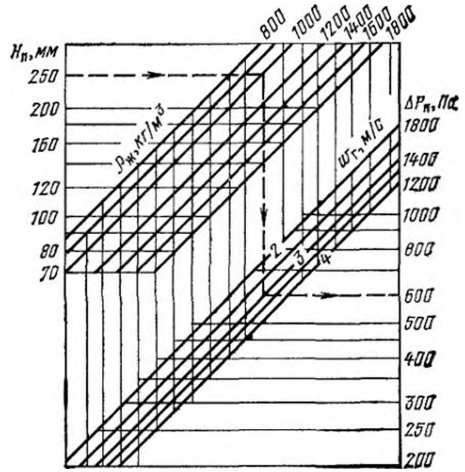


Рис. 4.20. Номограмма для определения гидравлического сопротивления пенного слоя у аппарата типа ПАСС:
Ключ: $H_п \to \rho_ж \to w_г \to \Delta p_п$

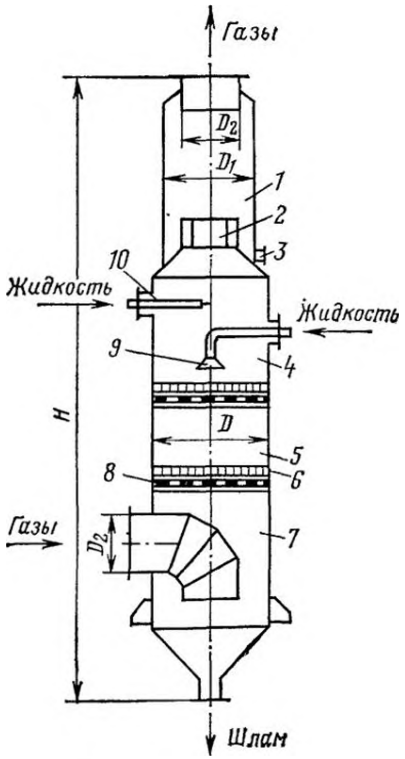


Рис. 4.21. Газопромыватель типа ПВПР:
1 — брызгоуловитель; 2 — центробежный завихритель; 3 — патрубок для отвода жидкости из брызгоуловителя; 4 — верхняя секция; 5 — средняя секция; 6 — стабилизатор; 7 — нижняя секция; 8 — тарелка; 9 — оросигель; 10 — форсунка для периодического орошения завихрителя

Технические характеристики газопромывателей ПВПР приведены в табл 4.3.

Гидродинамический пылеуловитель ГДП (рис. 4.22) разработан НИПИОТСТРОМ [4.16] и предназначен для очистки аспирационного воздуха и газов от пыли, не схватывающейся в воде. Он является аппаратом непрерывного дей-

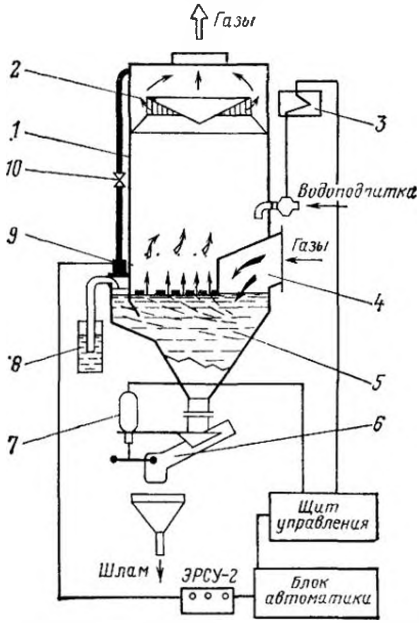


Рис. 4.22. Газопромыватель типа ГДП-М:
1 — корпус; 2 — центробежный каплеуловитель; 3 — реле управления водоподпиткой; 4 — патрубок для входа газов; 5 — тарелка; 6 — разгрузочное устройство; 7 — электромагнитный клапан; 8 — гидрозатвор; 9 — регулятор уровня жидкости; 10 — электромагнитный вентиль

ствия с внутренней циркуляцией жидкости и периодической разгрузкой уловленных продуктов в виде шлама или растворов. Это позволяет эксплуатировать аппарат с очень низким удельным орошением.

Запыленный газ сначала поступает в подрешеточное пространство, захватывает часть жидкости, а затем, пройдя отверстия решетки (тарелки, в которых скорость газа составляет 10—12 м/с), контактирует со слоем турбулизированной пены. Для обеспечения равномерного распределения газа в свободном сечении решетки ее отверстия выполнены с увеличением диаметра по мере удаления отверстий от входного патрубка.

Очищенный от пыли газ проходит через каплеотделитель и через выходной патрубок отводится в атмосферу. Уловленная пыль в виде шлама осаждается в бункерной части и через разгрузочное устройство периодически выводится из аппарата.

Таблица 4.3. Технические характеристики газопромывателей типа ПВПР

Наименование	Марка аппарата											
	ПВПР-3	ПВПР-4	ПВПР-5	ПВПР-7	ПВПР-9	ПВПР-12	ПВПР-17	ПВПР-22	ПВПР-30	ПВПР-41	ПВПР-55	ПВПР-80
Производительность по газу, м³/ч	2500—3100	3400—4500	4500—6200	6200—7500	7500—10 000	10 000—15 000	15 000—18 700	18 700—24 000	24 000—32 600	32 600—45 700	45 700—64 000	64 000—90 000
Основные размеры, мм (рис. 4.21):												
D	600	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2200	2600	3000
D_1	500	600	700	700	800	1000	1200	1400	1600	1800	2200	2400
D_2	300	350	400	500	500	600	600	600	800	1000	1200	1200
H/H^*	3800/3100	4245/3645	4550/3950	5125/4525	5685/5085	6835/5835	7380/6380	7855/6855	9330/8330	10 990/9790	12 100/10 900	13 520/12 320
Масса, кг	725	915	1120	1335	1570	2640	3200	3810	6440	8370	11 340	13 090

H^* — высота аппарата с одной тарелкой (без средней секции).

Таблица 4.4. Технические характеристики газопромывателей типа ГДП-М

Наименование	Марка аппарата		
	ГДП-5М	ГДП-7М	ГДП-10М
Производительность по газу, м³/ч	5000	7000	10 000
Максимальная температура газа на входе, °С	250		
Максимальное гидравлическое сопротивление, Па	1800		
Запыленность газов на входе, г/м³	До 30		
Удельное орошение, л/м³	0,015—0,05		
Диаметр аппарата, м	1,0	1,25	1,5
Высота аппарата, м	2,9	3,2	3,65
Масса в рабочем состоянии, кг	1000	1560	2200

Аппарат обеспечивает высокую эффективность при улавливании частиц пыли крупнее 5 мкм.

Разработан типоразмерный ряд газопромывателей типа ГДП-М, технические характеристики которого приведены в табл. 4.4.

4.5. ГАЗОПРОМЫВАТЕЛИ С ПОДВИЖНОЙ НАСАДКОЙ

Газопромыватели с подвижной шаровой насадкой. Принципиальная схема газопромывателя с подвижной шаровой насадкой приведена на рис. 4.23. В корпусе аппарата между нижней опорно-распределительной тарелкой *1* и верхней ограничительной тарелкой *3* помещается слой шаров из полимерных материалов, стекла или пористой резины [4.17]. В качестве насадок возможно использование тел и другой формы, например колец [4.18]. Для обеспечения свободного перемещения насадки в газожидкостной смеси плотность шаров $\rho_ш$ не должна превышать плотности жидкости ($\rho_ш \leq \rho_ж$).

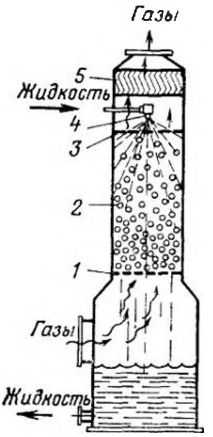


Рис. 4.23. Скруббер с подвижной шаровой насадкой:

1 — опорная тарелка; *2* — шаровая насадка; *3* — ограничительная решетка; *4* — оросительное устройство, *5* — брызгоуловитель

Оптимальным гидродинамическим режимом работы газопромывателя при пылеулавливании считается режим полного (развитого) псевдоожижения [4.2]. Скорость газов $w'_г$, м/с, рассчитанная по площади полного сечения аппарата, соответ-

ствующая началу режима полного псевдоожижения, определяется из выражения

$$\frac{(w'_г)^2}{d_ш} = cS_0 \exp\left[-12{,}6\left(\frac{Q_ж}{Q_г}\right)^{0,25}\right], \quad (4.26)$$

где $d_ш$ — диаметр шаровой насадки, м; c — коэффициент (при ширине щели в опорной тарелке $b=2$ мм $c=2{,}8\cdot10^4$, при $b>2$ мм $c=4{,}5\cdot10^4$).

Предельно допустимая скорость газов $w''_г$, также рассчитанная по площади полного сечения аппарата, не зависит от ширины щели и определяется по эмпирической формуле

$$w''_г = 2{,}9S_0^{0,4}\left(\frac{Q_ж}{Q_г}\right)^{-0,15}. \quad (4.27)$$

Скорость газов рекомендуется [4.18] принимать в пределах 5—6 м/с, а удельное орошение 0,5—0,7 л/м³. Свободное сечение опорной тарелки S_0 принимается равным 0,4 м²/м² при ширине щелей 4—6 мм. При очистке газов, содержащих смолистые вещества, а также пыль, склонную к образованию отложений, применяются щелевые тарелки с большей долей свободного сечения (0,5—0,6 м²/м²). Свободное сечение ограничительной тарелки составляет 0,8—0,9 м²/м².

При выборе диаметра шаров необходимо соблюдать соотношение $D/d_ш \geqslant 10$. Оптимальными являются шары диаметром 20—40 мм и насыпной плотностью 200—300 кг/м³ [4.4].

Минимальная статическая высота слоя насадки $H_{ст}$ составляет 5—8 диаметров шаров, а максимальная определяется из соотношения $H_{ст}/D \leqslant 1$.

Высота секции (расстояние между тарелками) $H_{секц}$ определяется из выражения

$$H_{секц} = H_{дин} + H_{сеп}, \quad (4.28)$$

где $H_{дин}$ — динамическая высота слоя псевдоожиженной шаровой насадки, м; $H_{сеп}$ — высота сепарационной зоны, м.

Динамическая высота $H_{дин}$ может быть определена по уравнению [4.19]

$$H_{дин} = 0{,}118W_ж^{0,3}H_{ст}^{0,6}\left(\frac{w_г}{S_0}\right)^{0,93}, \quad (4.29)$$

а высота сепарационной зоны $H_{сеп}$ может быть принята равной $(0{,}1—0{,}2)H_{дин}$.

Общее гидравлическое сопротивление аппарата рассчитывается по уравнению

$$\Delta p = \Delta p_{вх} + \Delta p_{вых} + \Delta p_т + \Delta p_ш + \Delta p_{ж.н} + \Delta p'_т, \quad (4.30)$$

где $\Delta p_т$ — гидравлическое сопротивление опорной тарелки со слоем удерживаемой ею жидкости, Па; $\Delta p_ш$ — гидравлическое сопротивление слоя сухой насадки, Па; $\Delta p_{ж.н}$ — гидравлическое сопротивление слоя жидкости, удерживаемого слоем насадки, Па; $\Delta p'_т$ — гидравлическое сопротивление ограничительной тарелки, Па.

По формуле для провальных тарелок с большим свободным сечением может быть определена $\Delta p_т$, также определяется и $\Delta p'_т$, если ороситель установлен выше тарелки. Если же ороситель расположен ниже тарелки, то $\Delta p'_т$ не превышает 20—25 Па.

Находят $\Delta p_ш$ из выражения

$$\Delta p_ш = \rho_ш H_{ст}(1-\varepsilon_0), \quad (4.31)$$

где $\rho_ш$ — насыпная плотность шаров, кг/м³; ε_0 — порозность неподвижного слоя сухой шаровой насадки, принимается равной 0,4.

Определяют $\Delta p_{ж.н}$ по формуле [4.20]

$$\Delta p_{ж.н} = 1254w_г^{0,24}w_ж^{0,17}H_{ст}^{0,92}\rho_ш^{-0,1}, \quad (4.32)$$

где $w_ж$ — скорость орошающей жидкости в расчете на свободное сечение аппарата, м/с.

Из-за аналогии процессов, протекающих в пенных аппаратах и аппаратах с псевдоожиженным слоем шаровой насадки, эффективность пылеулавливания в последних может быть определена по формуле (1.54) с помощью значений d_{50} и $\lg\sigma_\eta$, полученных для пенных аппаратов (см. § 4.4), а затем скорректирована по выражению

$$\eta = \eta_0(H_{дин}/0{,}09)^{0,075}, \quad (4.33)$$

где η_0 — эффективность пенного аппарата.

Скрубберы с подвижной шаровой насадкой конической формы (КСШ). Для обеспечения стабильности работы в широком диапазоне скоростей газа, улучшения распределения жидкости и уменьшения уноса брызг предложены аппараты с подвижной шаровой насадкой конической формы [4.21]. Разработано два варианта таких аппаратов: форсуночный (рис. 4.24,*а*) и эжекционный (рис. 4.24,*б*).

В аппаратах рекомендуется применять полиэтиленовые шары диаметром 34—40 мм насыпной плотностью 110—120 кг/м³. Статическая высота слоя шаров составляет 650 мм. Скорость газов на входе в слой колеблется в пределах 6—10 м/с и уменьшается на выходе до 1—2 м/с. Высота конической части в обоих вариантах принята 1 м. Угол раскрытия конической части зависит от производительности аппаратов и может составлять от 10 до 60°.

Для улавливания брызг в цилиндрической части аппаратов размещается неорошаемый слой шаров высотой 150 мм.

В форсуночный скруббер орошающая жидкость подается в количестве 4—6 л/м³ газов.

В эжекционном варианте орошение шаров осуществляется жидкостью, которая всасывается из сосуда с постоянным уровнем, газами, подлежащими очистке.

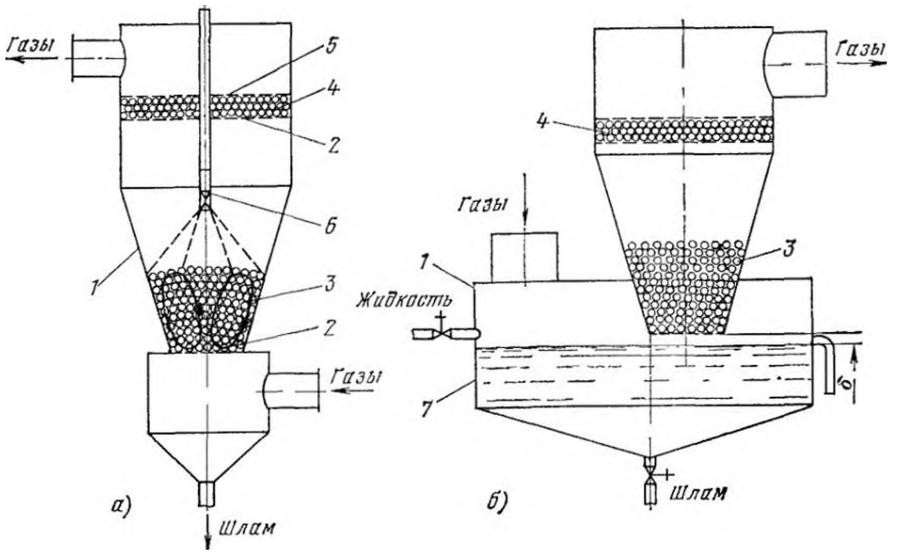


Рис. 4.24. Конический скруббер с подвижной шаровой насадкой:

а — форсуночный, *б* — эжекционный, *1* — корпус; *2* — опорная тарелка; *3* — орошаемый слой шаров; *4* — брызгоулавливающий слой шаров; *5* — ограничительная тарелка; *6* — форсунка; *7* — емкость с постоянным уровнем жидкости

Зазор δ между нижним основанием конуса и уровнем жидкости зависит от производительности аппарата (рис. 4.25). Гидравлическое сопротивление форсуночного варианта составляет от 900 до 1400 Па, а эжекционного — от 800 до 1400 Па.

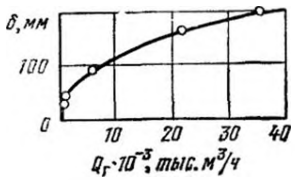


Рис. 4.25. Зависимость величины зазора δ от производительности по газам

В настоящее время применяются конические скрубберы с подвижной насадкой производительностью по газам от 3000 до 40 000 м³/ч

4.6. ГАЗОПРОМЫВАТЕЛИ УДАРНО-ИНЕРЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ

К аппаратам ударно-инерционного действия относится большая группа пылеуловителей, в которых контакт газов с жидкостью осуществляется за счет удара газового потока о поверхность жидкости с последующим пропусканием газожидкостной взвеси через отверстия различной конфигурации или непосредственным отводом газожидкостной взвеси в сепаратор жидкой фазы. В результате такого взаимодействия образуются капли диаметром 300—400 мкм. Особенностью аппаратов ударного действия является полное отсутствие средств перемещения жидкости, и поэтому вся энергия, необходимая для со-

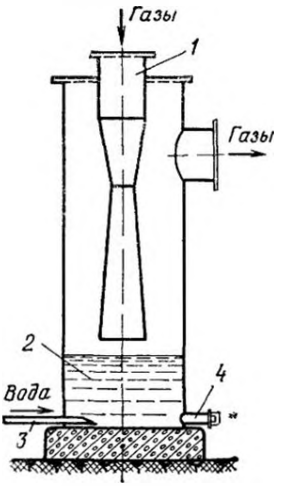


Рис. 4.26. Мокрый пылеуловитель ударно-инерционного действия:

1 — входной патрубок; *2* — резервуар с жидкостью; *3* — смывное сопло, *4* — труба для удаления шлама

здания поверхности контакта, подводится через газовый поток. В связи с этим газопромыватели ударно-инерционного типа иногда называются аппаратами с внутренней циркуляцией жидкости.

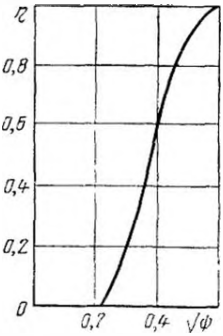


Рис. 4.27. Эффективность ударного осаждения частиц.

Газопромыватель ударного действия. Наиболее простой по конструкции пылеуловитель ударно-инерционного действия показан на рис. 4.26 и представляет собой вертикальную колонну, в нижней части которой находится слой жидкости.

Запыленные газы по газопроводу (обычно круглого сечения или выполненного в виде трубы Вентури) с большой скоростью направляются на поверхность жидкости. При резком повороте газового потока на 180° происходит инерционное осаждение частиц пыли на каплях жидкости. Шлам из аппарата может удаляться через гидрозатвор периодически или непрерывно. Для удаления уплотненного осадка со дна следует применять смывные сопла.

При периодическом отводе шлама постоянная подпитка воды производится

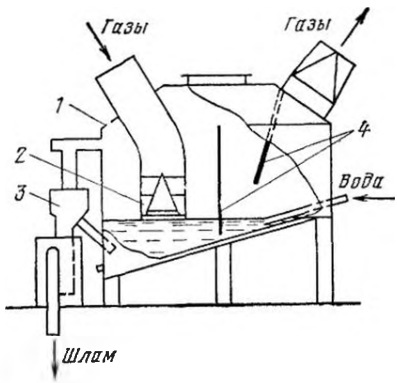


Рис 4 28. Скруббер Дойля:

1 — корпус; *2* — сопло-ускоритель; *3* — сливное устройство; *4* — брызгоотбойник

только для компенсации ее потерь за счет испарения. Поэтому аппараты ударно-инерционного действия целесообразно устанавливать для очистки холодных или предварительно охлажденных газов

В основе процесса осаждения частиц пыли в мокром пылеуловителе ударно-инерционного действия лежит так называемый «механизм удара» [4 2]. Эффективность подобного осаждения определяется инерционным параметром ψ при $l=d_э$ (где $d_э$ — эквивалентный диаметр отверстия истечения, м) и $w_{0\,г}$, равной скорости истечения газового потока из отверстия Важное значение для эффективности аппарата имеет расстояние от отверстия истечения до поверхности осаждения h. С уменьшением h возрастает как эффективность пылеуловителя, так и его гидравлическое сопротивление, и наоборот, с увеличением значения h оба эти показателя снижаются. Поэтому поддержание оптимального уровня жидкости в аппаратах этого типа является определяющим условием их нормальной эксплуатации. Обычно зависимость η от ψ для аппаратов ударно-инерционного действия рассматривается при определенных значениях отношения $h/d_э$. Так, например, для оценки эффективности ударно-инерционных аппаратов при $h/d_э \approx 1 \div 3$ может быть использована кривая, приведенная на рис 4 27.

Скруббер Дойля В аппарате (рис. 4.28) газовый поток поступает через трубы, в нижней части которых установлены конусы, увеличивающие скорость газов в свободном сечении трубы Скорость газов непосредственно в щели на выходе из трубы составляет 35—55 м/с, и газовый поток с достаточно высокой скоростью ударяется о поверхность жидкости, создавая завесу из капель. Уровень жидкости в скруббере (в статическом состоянии) на 2—3 мм ниже кромки трубы. Гидравлическое сопротивление газопромывателя в зависимости от скорости истечения и h составляет 500—4000 Па.

Скруббер ударного действия (СУД) разработан Гинцветмет [4.22] и по принципу действия аналогичен скрубберу Дойля, однако в отличие от него высокая скорость газов на выходе из сопла (рис. 4.29) создается не за счет вставки, а благодаря сужению подводящей газовый поток трубы. Сопло может иметь щелевое, круглое или квадратное сечение, скорость газов в сопле рекомендуется поддерживать на уровне 35—50 м/с. Аппарат обеспечивает эффективную очистку газов от частиц пыли крупнее 4 мкм. Расстояние от сопла до зеркала жидкости рекомендуется поддерживать на уровне 45 мм При производительности по газам до 15 000 м³/ч достаточна установка одного сопла При использовании в качестве каплеуловителя встроенного центробежного за-

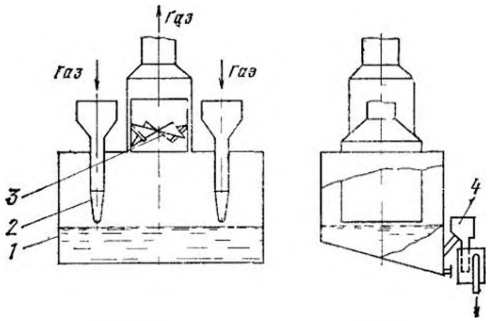


Рис. 4.29. Газопромыватель СУД:
1 — корпус; 2 — сопло-ускоритель; 3 — каплеуловитель; 4 — сливное устройство

вихрителя общее гидравлическое сопротивление аппарата составляет 2500 Па

Ротоклон типа N является другим типичным представителем газопромывателей ударно-инерционного действия (рис. 4.30). В аппарате установлены один или несколько изогнутых щелевых каналов (импеллеров), нижняя часть которых затоплена жидкостью. Газовый поток, ударяясь о поверхность жидкости, захватывает часть жидкости и заставляет ее двигаться вдоль нижней направляющей канала. Затем жидкость отбрасывается к верхней направляющей и при выходе из щели падает в виде сплошной водяной завесы. Для предотвращения уноса капель газы после канала проходят через систему каплеотбойных устройств. Скорость газов в канале обычно не превышает 15 м/с.

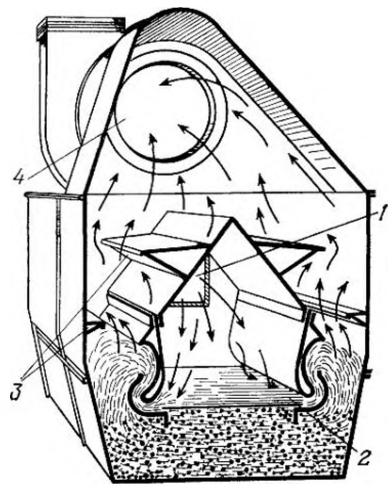


Рис. 4.30. Ротоклон (тип N):
1 — устройство для подвода газов; 2 — направляющие лопатки; 3 — каплеотбойник, 4 — устройство для вывода газов

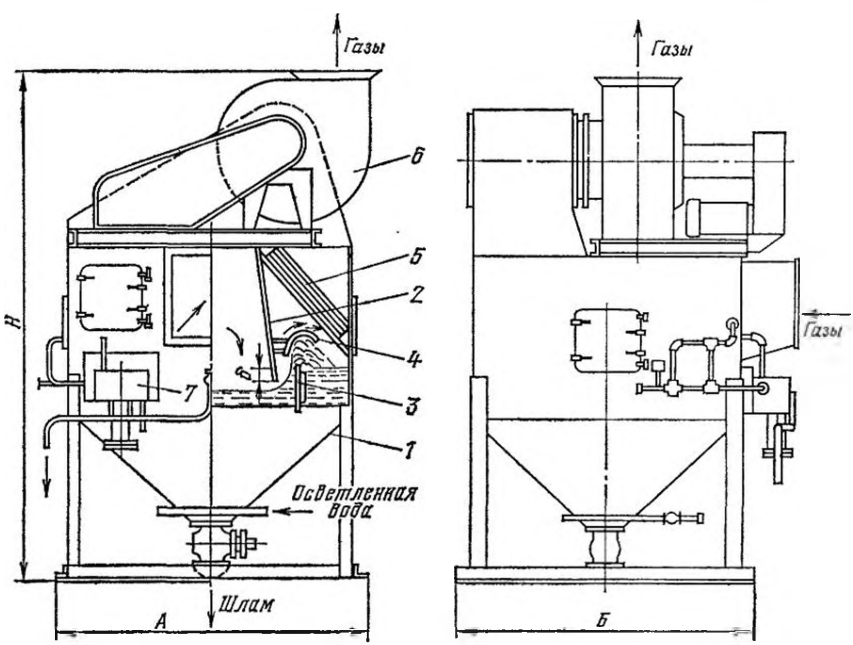


Рис. 4.31. Газопромыватель типа ПВМ:
1 — корпус; 2, 3 — перегородки, 4 — водоотбойник, 5 — каплеуловитель; 6 — вентилятор, 7 — регулятор уровня жидкости

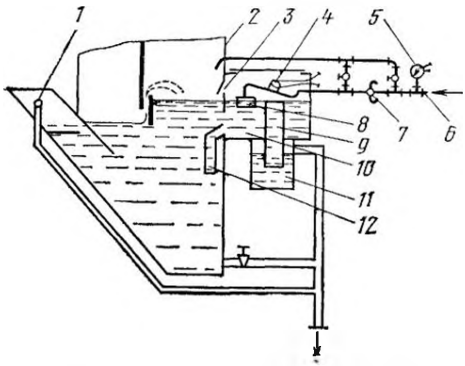


Рис. 4.32. Устройство для автоматической водоподпитки и поддержания уровня жидкости:

1 — аварийная переливная труба; *2* — стенка корпуса пылеуловителя; *3* — отверстие, *4* — датчик уровня; *5* — реле давления; *6* — подводящий патрубок осветленной воды; *7* — электромагнитный клапан; *8* — поплавковый клапан; *9* — переливная труба, *10* — бак; *11* — сифон; *12* — трубка

В некоторых модификациях ротоклонов вентилятор, просасывающий газы через аппарат, устанавливается непосредственно в его корпусе.

Газопромыватель типа ПВМ (пылеуловитель вентиляционный мокрый) (рис. 4.31) разработан ЦНИИпромзданий и отличается от ротоклона типа N более простым по конфигурации каналом [4.23].

Запыленные газы поступают через отверстие в боковой стенке. При включении вентилятора уровень воды в среднем отсеке пылеуловителя между двумя симметричными перегородками *2* устанавливается ниже, чем за перегородками *3*. В результате этого между поверхностью воды и каждой перегородкой *2* образуется щель, через которую газовый поток устремляется с большой скоростью в виде плоской струи, частично увлекая за собой воду. Встречая на своем пути перегородку *3*, струя отклоняется вверх, причем на поверхность перегородки, смоченную увлеченной водой, осаждаются сепарирующиеся из струи частицы пыли. Вода, увлеченная газовым потоком, перетекает вверх по перегородке *3*, отклоняется водоотбойником и сливается в крайний отсек. Газы проходят через каплеуловитель и выбрасываются наружу вентилятором.

Согласно [4.23] эффективность пылеуловителя определяется условиями течения воды и газов в промежутке между перегородками *2* и *3*. Вода, увлеченная газовым потоком, образует на перегородке *3*

Таблица 4.5. Технические показатели пылеуловителей типа ПВМ

Наименование	Типоразмер пылеуловителя				
	3С / 3К	5С / 5К	10С / 10К	20С / 20К	40С / —
Номинальная производительность по воздуху, тыс. м³/ч	3	5	10	20	40
Марка вентилятора	Ц-13-50, № 3, 2	ЦП7-40, № 5	ЦП7-40, № 6	ЦП7-40, № 8	Ц4-76, № 10
Объем воды в бункере пылеуловителя, м³	0,45 / 1	0,65 / 1,75	1,45 / 2,3	2,2 / 3,5	5,5 / —
Масса пылеуловителя без воды и электродвигателя, кг	754 / 1680	1208 / 2210	1998 / 2800	3050 / 3750	4737 / —
Габаритные размеры, мм:					
ширина *А*	1300 / 1320	1359 / 1420	1514 / 1660	2314 / 2445	2416 / —
длина *Б*	1250 / 2694	1650 / 3080	2500 / 3504	2510 / 3755	4750 / —
высота *Н*	2848 / 3228	3080 / 3563	3412 / 3912	3680 / 4380	4110 / —
Длина перегородки (общая), м	0,8	1,21	2,0	4,0	8,0
Число перегородок, шт.	1	1	1	2	2

Примечание. В числителе даны показатели для пылеуловителей со сливом шлама, а в знаменателе — со скребковыми механизмами. Конструкция пылеуловителя номинальной производительностью 40 тыс. м³/ч разработана только в сливном исполнении и с раздельной установкой вентилятора.

пленку, толщина которой зависит от скорости газов в щели и уровня воды в ванне.

Надлежащим выбором этих параметров можно обеспечить необходимую толщину пленки воды, что важно для предупреждения отскока от перегородки крупных частиц, скорость которых в месте контакта может превышать 30—40 м/с.

Пылеуловители типа ПВМ имеют две модификации — со сливом шламовой воды (ПВМС) и механизированным скребковым удалением шлама (ПВМК). Вентиляторы устанавливаются либо на крышках корпусов либо отдельно.

Для предупреждения закупорки сливного отверстия шламом в нижнюю часть корпуса по соплам, расположенным внутри бункера, через коллектор подается водопроводная или осветленная вода. Аппарат оборудован также устройством для автоматической водоподпитки и поддержания уровня воды в ванне (рис. 4.32).

Устройство состоит из бака, соединенного с пылеуловителем отверстием и трубкой, служащими для выравнивания давлений и подачи воды в пылеуловитель. Для предупреждения попадания грязной воды в бак трубка опущена в воду. Поплавковый клапан автоматически регулирует подачу воды. Для поддержания заданного уровня воды и предотвращения подсоса воздуха из системы слива или из атмосферы служит переливная труба с сифоном.

Основные технические показатели газопромывателей типа ПВМ приведены в табл. 4.5.

Гидравлическое сопротивление пылеуловителя Δp, Па, определяется по формуле

$$\Delta p = 10^{-2}\delta + 880\sqrt{Q'_г}, \qquad (4.34)$$

где δ — высота верхнего уровня воды от нижней кромки верхней перегородки, м; $Q'_г$ — расход газов на 1 м длины перегородки, м³/с. При улавливании среднедисперсных пылей значение δ принимают в пределах от 20 до 60 мм, мелкодисперсных — от 60 до 200 мм и более.

Расход газов на 1 м длины перегородки принимается в пределах от 2000 до 7500 м³/ч и более.

Эффективность пылеулавливания аппаратов ПВМ в зависимости от размера частиц при различных уровнях воды может быть определена по формуле (1.54) на основании приведенных ниже значений d_{50} и $\lg \sigma_\eta$:

δ, мм	d_{50}, мкм	$\lg \sigma_\eta$
40	1,5	0,3
80	1,5	0,24
200	1,5	0,17

Ротоклон типа РПА разработан НИИОГаз [4.24, 4.25] и отличается от обычных ротоклонов тем, что щелевой контактный канал смонтирован в стенках плавающей камеры, которая одновременно служит камерой грязного газа (рис. 4.33). Отношение количеств жидкости и газов, проходящих через контактный канал, изменяется в зависимости от скорости газов в сечении канала и от статической высоты столба жидкости над нижним порогом канала.

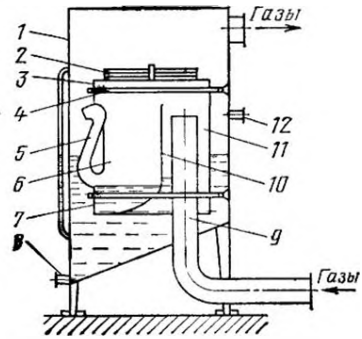


Рис. 4.33. Ротоклон типа РПА:

1 — корпус; *2* — балластировочный груз; *3* — плавающая камера; *4* — тяги; *5* — контактный канал (импеллер); *6* — импеллерный отсек; *7* — окно для прохода промывной жидкости; *8* — штуцер для слива жидкости; *9* — газоход для подвода газов в аппарат; *10* — перегородка; *11* — газоходный отсек, *12* — штуцер для заливки жидкости и подпитки

В отличие от обычных ротоклонов, у которых с изменением соотношения газ — жидкость в зоне контакта происходит изменение гидравлического сопротивления аппарата, газопромыватель типа РПА обеспечивает при изменении расхода газов автоматическое поддержание гидравлического сопротивления на постоянном уровне в широком диапазоне —до ±30% номинального. Функции регулирующего органа выполняет при этом плавающая камера. Гидравлическое сопротивление контактного канала (импеллера) определяется массой плавающей камеры, которая может изменяться. Это позволяет откорректировать гидравлическое сопротивление и довести его до необходимого уровня в период наладки аппарата, после чего оно будет поддерживаться автоматически весь период эксплуатации. Гидравлическое сопротивление газопромывателя калеблется в зависимости от массы балласта в пределах от 2500 до 3500 Па. Автоматическое поддержание необходимого гидравлического сопротивления является важным достоинством газопромывателя, однако громоздкость плавающей камеры, с одной стороны, увеличивает металлоемкость аппарата, с другой стороны, ограничивает его возможности по производительности.

НИИОГаз разработан типоразмерный ряд ротоклонов типа РПА, оборудованных

Таблица 4.6. Технические показатели ротоклонов типа РПА

Наименование	Марка пылеуловителя			
	РПА1-0,04	РПА1-0,07	РПА2-0,08	РПА2-0,14
Номинальная производительность, м³/ч	3000	5000	6000	10 000
Допустимые пределы по производительности, м³/ч	2000—3600	3750—6000	4400—7200	7500—12 000
Площадь условного поперечного сечения импеллеров, м²	0,04	0,07	0,08	0,14
Количество импеллеров, шт.	1	1	2	2
Суммарная длина щелей импеллеров, мм	550	910	1100	1820
Диаметр циклона-каплеуловителя, мм	500	600	700	900
Габаритные размеры, мм:				
длина	2040	2490	2240	2800
ширина	1575	1575	2284	2284
высота	3365	3500	3950	4925
Масса ротоклона, кг	965	1170	1325	1740

прямоточным циклоном-каплеуловителем (см. § 4.12) на производительность от 2000 до 12 000 м³/ч (табл 4.6).

Эффективность ротоклонов типа РПА при общем (с учетом каплеуловителя) максимально возможном гидравлическом сопротивлении 4300 Па может быть рассчитана по формуле (1.54) при d_{50}=1,247 мкм и $\lg \sigma_\eta$ = 0,176. При снижении гидравлического сопротивления за счет уменьшения массы балласта эффективность аппарата будет падать.

Гидродинамический пылеуловитель ПВ-2 разработан Специальным проектно-конструкторским институтом (СПКИ, г. Одесса) [4.26].

Принцип работы аппарата (рис. 4.34) состоит в том, что запыленные газы поступают в камеру *2* и увлекают жидкость в канал (импеллер) между наклонными лопатками *3* Часть капель из образующейся газожидкостной смеси прижимается воздухом к вогнутой части пластин *7* и отбрасывается затем на перегородки *4*, остальная часть увлекается воздухом через зазоры между этими пластинами в верхнюю часть камеры, где окончательно отклоняется V-образной направляющей *6*. Очищенные газы, пройдя каплеуловитель *5*, выбрасываются в атмосферу, а вода вмес-

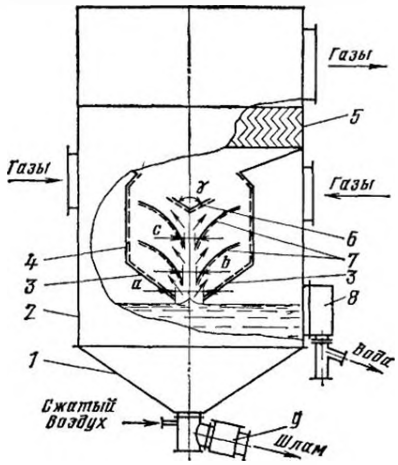


Рис 4.34. Гидродинамический пылеуловитель ПВ-2

Таблица 4.7. Технические характеристики пылеуловителей ПВ-2

Наименование	Номера пылеуловителей					
	1	2	3	4	5	6
Производительность, м³/ч	5000	10 000	15 000	20 000	30 000	40 000
Объем воды в бункере, м³	0,70	1,35	1,95	2,75	4,60	6,45
Габаритные размеры, мм:						
ширина	1590	1690	1790	1890	2114	2214
длина	690	1090	1590	2090	3114	4114
высота	4130	4135	4235	4235	4235	4355
Масса пылеуловителя, кг:						
без воды	930	1120	1530	1710	1930	2150
с водой и шламом	1900	3100	4500	5700	8300	11 000

те с уловленной пылью стекает в ванну *1*, откуда выводится шлам через устройство *9*. Необходимый уровень жидкости в аппарате поддерживается регулятором *8*

Гидравлическое сопротивление газопромывателя может изменяться в пределах 400—3000 Па в зависимости от устанавливаемого уровня жидкости.

Исследованиями определены оптимальные значения некоторых геометрических параметров аппарата: $a=250$ мм, $b=60$ мм, $c=40$ мм, $\gamma=45°$. Оптимальная газовая нагрузка на 1 м длины импеллера составляет 5000 м³/ч.

При улавливании частиц пыли крупнее 3—4 мкм эффективность газопромывателя ПВ-2 составляет 98—99%

СПКИ разработан типоразмерный ряд пылеуловителей ПВ-2 производительностью от 5000 до 40 000 м³/ч (табл. 4.7).

4.7. ГАЗОПРОМЫВАТЕЛИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДЕЙСТВИЯ

Наиболее распространенные центробежные скрубберы можно разделить по конструкционному признаку на два вида: аппараты, в которых закрутка газового потока осуществляется с помощью центрального лопастного закручивающего устройства (рис. 4 35) и аппараты с боковым тангенциальным или улиточным подводом газов (рис. 4.36).

Орошение аппаратов второго типа может осуществляться форсунками, устанавливаемыми в центральной части аппарата (рис. 4.37) или вдоль его стенок (рис. 4.38),

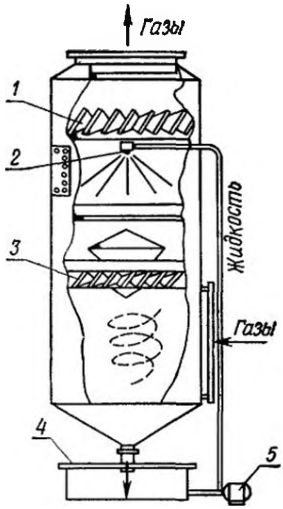


Рис. 4 35. Центробежный скруббер с внутренними завихрителями

1 — раскручиватель для выравнивания потока; *2* — оросритель; *3* — завихритель; *4* — сосуд для сбора жидкости; *5* — насос

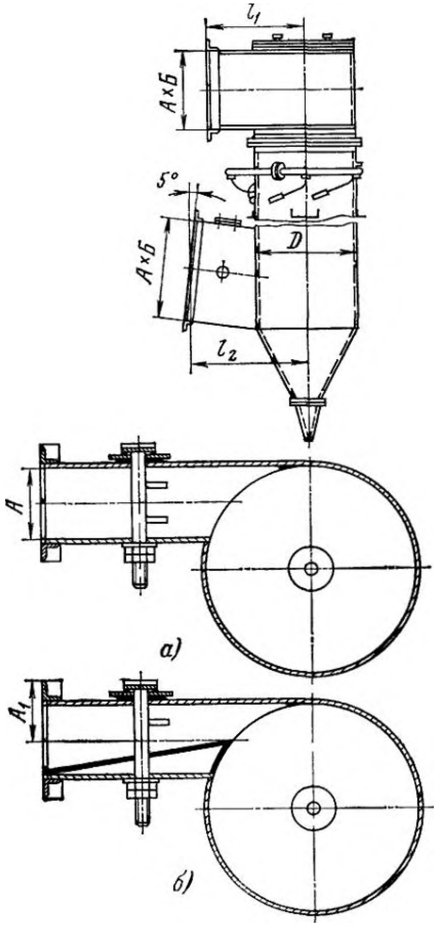


Рис. 4.36. Циклон с водяной пленкой (ЦВП):

а — основное исполнение, *б* — вариант с повышенной скоростью воздуха на входе в циклон

с кинжальным направлением факелов распыла и в виде пленки, стекающей по внутренней стенке аппарата.

Над форсунками предусматривается свободная от подачи орошения зона, которая дает возможность каплям достигнуть стенок скруббера, прежде чем газовый поток покинет аппарат.

Большинство отечественных конструкций центробежных скрубберов имеют тангенциальный подвод газов и пленочное орошение.

Циклон с водяной пленкой (ЦВП) рассчитан на очистку запыленного вентиляционного воздуха (рис 4.36) от любых видов нецементирующейся пыли. По внутренней поверхности стенки циклона непрерывно стекает пленка воды, которая тангенциально вводится в аппарат через ряд трубок, расположенных в его

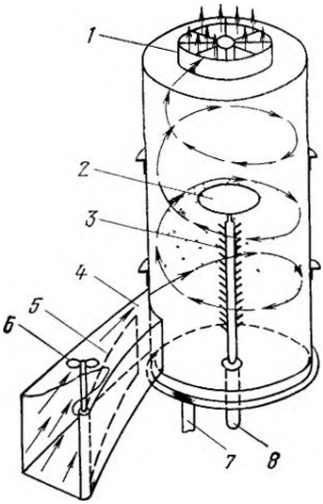


Рис. 4.37. Центробежный скруббер с центральным подводом орошения:

1 — лопатки для выравнивания потока; *2* — центральный диск; *3* — система орошения, *4* — устройство для ввода газов; *5* — вращающаяся заслонка на входе; *6* — шток; *7* — выходное отверстие для шлама; *8* — входное отверстие для орошающей жидкости

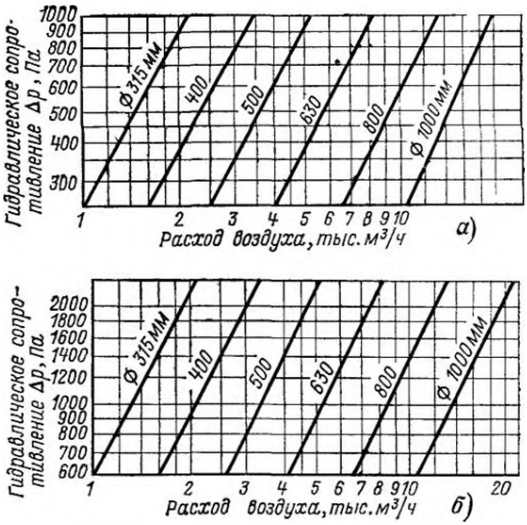


Рис. 4.39. Номограммы для определения гидравлического сопротивления аппаратов ЦВП:

а — основная конструкция; *б* — вариант с повышенной скоростью воздуха на входе в циклон

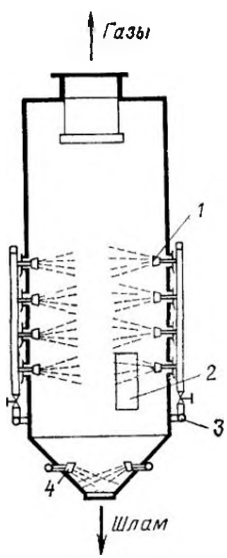


Рис. 4.38. Центробежный скруббер с боковым расположением форсунок:

1 — форсунка; *2* — устройство для ввода газов; *3* — водяной коллектор, *4* — форсунка для орошения стенок бункера

верхней части. Типовые чертежи аппарата [4.27, 4.28] разработаны институтом Проектпромвентиляция.

Выбор циклонов осуществляется по заданному расходу воздуха и допустимому гидравлическому сопротивлению. По площади входного отверстия в корпусе циклоны могут иметь два исполнения: основное (рис. 4.36,*а*, размер *A*) и с вдвое умень-

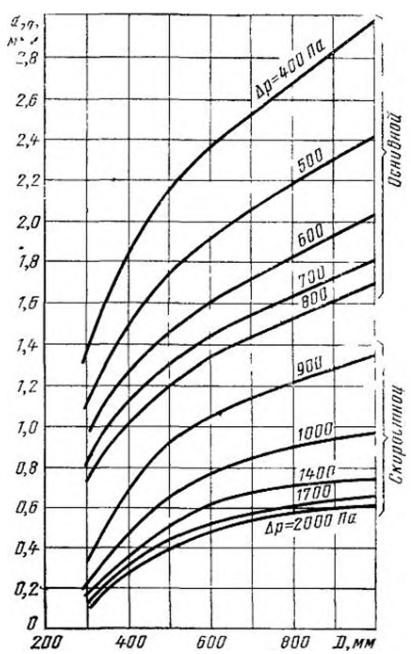


Рис. 4.40. Зависимость диаметра частиц, улавливаемых на 50%, от диаметра корпуса циклона ЦВП

Таблица 4.8. **Основные характеристики циклонов ЦВП с водяной пленкой**

Марка циклона	Основные размеры, мм					Расход воды на орошение стенок циклона, л/с	Расход воды на периодическое орошение стенок входного патрубка, л/с	Масса, кг
	D	H	l_1	l_2	$A \times Б$			
ЦВП-3	315	2434	283	445	110×195	0,14	1,1	63,9
ЦВП-4	400	3014	360	505	140×250	0,17	1,2	106,7
ЦВП-5	500	3684	450	640	175×310	0,21	1,4	161,0
ЦВП-6	530	4554	565	765	220×390	0,27	1,6	237,0
ЦВП-8	800	5699	720	1025	280×495	0,35	2,0	369,7
ЦВП-10	1000	7044	900	1335	350×620	0,43	2,4	569,5

шенной площадью входа путем установки во входном патрубке перегородки (рис. 4.36,*б*, размер A_1).

Коэффициенты гидравлического сопротивления циклонов, отнесенные к скорости воздуха в горизонтальном сечении, соответственно равны: для первого исполнения $\zeta=30$, для второго $\zeta=74$. Основные технические характеристики ЦВП приведены в табл. 4.8.

Диаметр аппарата в зависимости от допустимого аэродинамического сопротивления и требуемого расхода воздуха подбирается по номограммам, приведенным на рис. 4.39.

Для расчета эффективности аппарата необходимо по графику на рис. 4.40 определить d_{50}, а затем произвести вычисления по формуле (1.54) при $\lg \sigma_\eta = 0{,}838$.

При содержании пыли, превышающем 2 г/м³, до циклона с водяной пленкой рекомендуется устанавливать первую ступень очистки в виде сухого циклона или другого инерционного пылеотделителя.

Циклоны ЦВП не следует применять для очистки агрессивных газов

Скоростной промыватель СИОТ (рис. 4.41) разработан Свердловским институтом охраны труда [4.28, 4.29].

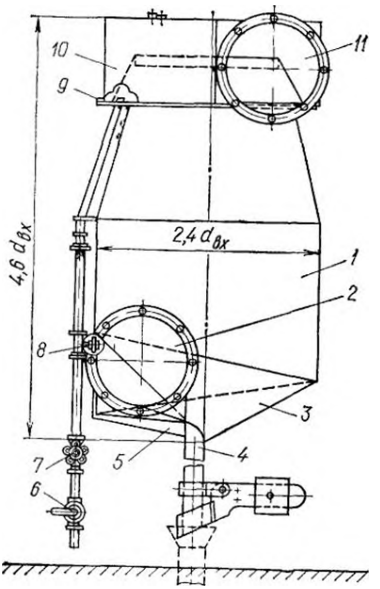


Рис. 4.41. Скоростной промыватель СИОТ:
1 — корпус; *2* — патрубок для подвода газов; *3* — коническое днище; *4* — сливной патрубок; *5* — Г-образная пластина, образующая уступ снизу и сверху; *6* — пробковый кран; *7* — регулировочный вентиль; *8* — нижнее сопло; *9* — верхнее сопло; *10* — спиральный раскручиватель; *11* — патрубок для отвода газов

Таблица 4.9. **Технические показатели газопромывателей СИОТ**

Наименование	Номер пылеуловителя								
	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Производительность, тыс. м³/ч, при входной скорости:									
14 м/с	12,5	17,5	25	35	50	75	100	140	200
20 м/с	17,5	25	35	50	75	100	140	200	280
Диаметр входного патрубка, мм	560	665	790	940	1120	1330	1580	1880	2240
Внутренний диаметр аппарата, мм	1344	1596	1896	2256	2688	3192	3792	4512	5400
Расход воды (максимальный), м³/ч	2,0	2,8	3,9	5,5	7,7	11,0	15,5	22	31

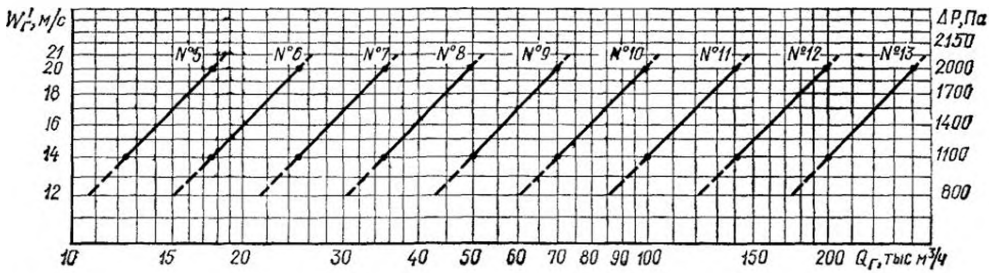


Рис. 4.42. Номограмма для определения скорости воздуха и гидравлического сопротивления скоростных промывателей СИОТ

Газопромыватель СИОТ рекомендуется применять в аспирационных установках для улавливания смачиваемой пыли (за исключением волокнистой и цементирующейся) при начальной концентрации до 5 г/м³. Технические характеристики ряда газопромывателей СИОТ приведены в табл. 4.9.

Рекомендуемые скорости воздуха в круглом сечении входного патрубка аппарата находятся в пределах от 14 до 20 м/с. На рис. 4.42 сплошной линией показана область рекомендуемой работы газопромывателей, пунктирной — область допустимой. Гидравлическое сопротивление Δp газопромывателя СИОТ, Па, может быть рассчитано по эмпирической формуле

$$\Delta p = 147\, w'_г - 980, \qquad (4.35)$$

где $w'_г$ — скорость воздуха в круглом сечении входного патрубка, м/с.

Расчет эффективности аппаратов СИОТ проводится аналогично расчету аппаратов ЦВП, d_{50} определяют по графику

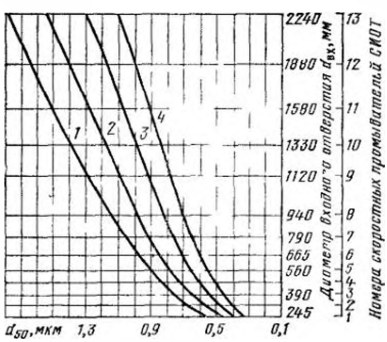


Рис. 4.43. Зависимость диаметра частиц, улавливаемых на 50%, от гидравлического сопротивления $\Delta p_{ап}$ и номера промывателя СИОТ:

1 — $\Delta p_{ап}$=900 Па; *2* — $\Delta p_{ап}$=1100 Па; *3* — $\Delta p_{ап}$=1400 Па; *4* — $\Delta p_{ап}$=2000 Па

на рис. 4.43 в зависимости от номера аппарата и гидравлического сопротивления. Общая эффективность очистки воздуха от пыли находится по формуле (1.54) при $\lg \sigma_\eta = 0{,}716$.

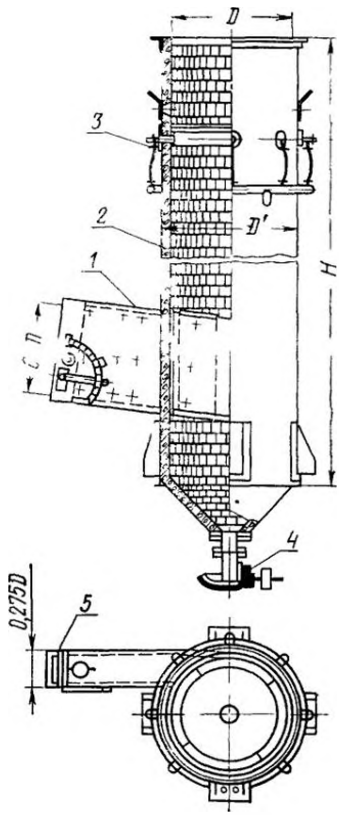


Рис. 4.44. Центробежный скруббер ВТИ:

1 — входной патрубок; *2* — корпус; *3* — оросительное сопло; *4* — золосмывной аппарат типа ковш-мигалка; *5* — смывные сопла

Центробежный скруббер ЦС-ВТИ (рис. 4.44) разработан для очистки дымовых газов от золы за котлами паропроизводительностью менее 100 т/ч [4.2, 4.30]. Одно время аппарат широко применялся в энергетике. Недостаточные энергозатраты, реализуемые в аппарате, не позволяли достигнуть в нем высокой степени очистки газов от пыли даже с учетом различных усовершенствований.

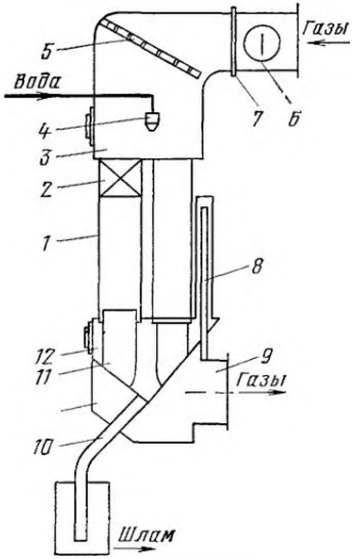


Рис. 4.45. Центробежный скруббер СЦВБ-20

Центробежный скруббер батарейного типа СЦВБ-20 разработан НИИОГаз для очистки от пыли вентиляционных выбросов литейных производств. Скруббер (рис. 4 45) состоит из четырех рабочих элементов *1*, представляющих собой трубу, в верхней части которой находится контактный элемент (двухлопастной завихритель) *2*, а в нижней — кольцевой зазор. Верхние концы рабочих элементов входят в камеру грязного газа *3*, в которой установлены для подачи орошающей жидкости цельнофакельная форсунка *4* и газораспределительное устройство *5*.

Перед камерой грязного газа для улавливания крупных предметов (мусора, бумаги, волокнистых материалов и др.) монтируется сетка *7*, а также имеется люк *6* для периодической очистки сетки.

Нижние концы рабочих элементов входят в шламовую камеру *12*, а соединительных труб *11* — в камеру чистого газа *9*. Камеры чистого газа и шламовая соединены устройством для выравнивания давления *8*.

Запыленный воздух подается через входной патрубок в камеру грязного газа, орошается водой, после чего газоводяная смесь закручивается в завихрителях. Возникающие при этом центробежные силы отбрасывают капли воды с осевшими на них частицами пыли на стенки рабочих элементов. Вода вместе с уловленной пылью стекает в кольцевой зазор и попадает в шламовую камеру, из которой по сливному патрубку *10* стекает в гидрозатвор. Очищенный воздух по соединительным трубам поступает в камеру чистого газа и далее вентилятором выбрасывается в атмосферу.

Аппарат рассчитан на производительность по газу 20 000 м³/ч. При очистке больших объемов газов скрубберы компонуются в группу из двух и более аппаратов Скорость газов в свободном сечении завихрителя 20 м/с, удельный расход орошающей жидкости (подаваемой под давлением до 150 кПа) 0,3—0,5 л/м³. Гидравлическое сопротивление аппарата при расчетной производительности по газу составляет 1650 Па. Скруббер СЦВБ-20 рекомендуется устанавливать для очистки вентиляционных выбросов с содержанием пыли до 10 г/м³ при температуре газов до 60°С.

Эффективность улавливания пыли в аппарате может быть рассчитана по формуле (1.54) при d_{50}=1,5 мкм и $\lg \sigma_\eta = 0{,}426$.

4.8. МЕХАНИЧЕСКИЕ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛИ

Характерной особенностью механических газопромывателей является наличие вращающегося устройства (ротора, диска и т. п.), которое обеспечивает разбрызгивание и перемешивание жидкости или вращение газового потока В зависимости от того, к чему подводится механическая энергия, аппараты этого типа подразделяются на две группы.

К первой из них, получившей собственно название механических скрубберов, относятся газопромыватели, в которых очищаемые газы приводятся в соприкосновение с жидкостью, разбрызгиваемой с помощью вращающегося тела (весла с лопастями, перфорированного барабана, дисков и т п.). Аппараты этого типа, подробно рассмотренные в [4.2, 4.8], в настоящее время для очистки газов от пыли практически не применяются

Ко второй группе газопромывателей относятся центробежные механические пылеуловители, в которых для вращения газового потока и перемешивания его с жидкостью используется крыльчатка. Аппараты получили название динамических газопромывателей.

Динамические газопромыватели отличаются от сухих ротационных пылеулови-

телей (см разд 2) только подводом (обычно на входе в аппарат) орошающей жидкости, которая способствует росту их эффективности

Динамические газопромыватели [4 2] из-за сложности конструкции не получили широкого распространения в промышленности

Наиболее эффективным аппаратом этого типа является дезинтегратор Дезинтегратор представляет собой мокрый пылеуловитель-вентилятор, состоящий из статора и ротора, каждый из которых снабжен направляющими лопатками Через сопла внутрь вращающегося ротора подается жидкость Газовый поток, движущийся между кольцами ротора и статора со скоростью от 60 до 90 м/с, обеспечивает интенсивное дробление жидкости на мелкие капли, хороший контакт газов и улавливаемых частиц с жидкостью Направление потока газов в дезинтеграторах не играет существенной роли, так как центробежные силы, развивающиеся при его работе, во много раз превышают силу тяжести Поэтому дезинтеграторы выпускаются в горизонтальном и вертикальном исполнении. В последнем случае распыливающее жидкость сопло устанавливается в нижней части аппарата

На рис 4 46 показана одна из возможных конструкций дезинтегратора В улиткообразном кожухе *1* вращается горизонтальный ротор, представляющий собой вал *3*, на котором имеется распределительный конус *4* с отверстиями и литой стальной диск *10* На диске ротора через определенные промежутки закреплены по трем-четырем концентрическим окружностям горизонтальные круглые стержни—била *5*, соединенные с другой стороны кольцами из полосовой стали При вращении ротора била проходят в промежутки между билами статора *6*, которые укреплены неподвижно между литыми кольцами *2* в кожухе аппарата По внешней окружности диска *10* расположены лопатки *14*, при помощи которых производится промывка и отделение газов от воды, и лопасти *13*, создающие напор газов для дальнейшей их транспортировки Очищаемые газы поступают в центральную часть ротора через приемные коробки *9*, вода подается через сифонные трубы *12* и выбрасывается в отверстия конуса

Смесь газов и воды попадает между вращающимися и неподвижными стержнями —билами и отбрасывается лопастями к стенкам кожуха Вода при этом распыляется и, соприкасаясь с газами, смачивает содержащуюся в них пыль Образующийся осадок через сливной канал *11* уходит по трубам *7*, а газы нагнетаются лопастями *13* в газоход через канал *8*

Производительность дезинтеграторов достигает 80 000 м³/ч при развиваемом

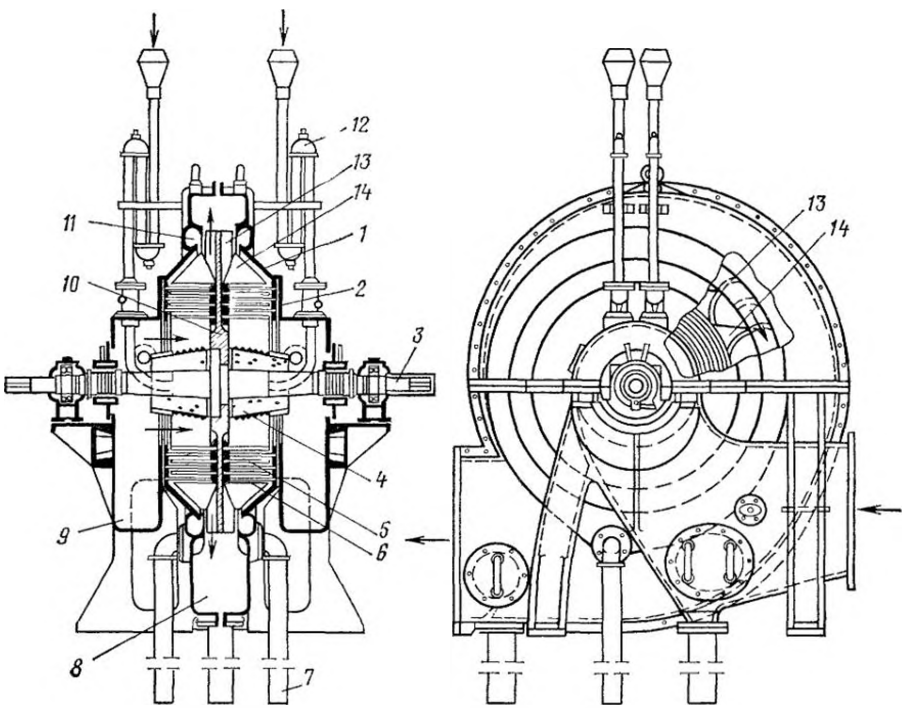


Рис. 4 46. Дезинтегратор

давлении до 5 кПа Расход воды в дезинтеграторах составляет от 0,5 до 1,5 л/м³ газов, удельный расход электроэнергии — от 18 до 22 МДж (5—6 кВт·ч) на 1000 м³ газов. Для очистки газов до содержания в них пыли не более 0,03—0,05 г/м³ в дезинтегратор необходимо подавать охлажденные газы с температурой 50—60°С и содержанием пыли не более 2 г/м³ После дезинтеграторов газы обычно содержат туман и брызги жидкости и поэтому должны пропускаться через каплеуловители

Эффективность дезинтеграторов составляет примерно 70% при улавливании частиц размером 0,5 мкм и от 90 до 95% при улавливании частиц размером 1 мкм Эффективность растет с увеличением удельного орошения и числа направляющих лопаток ротора и статора

Несмотря на сложность изготовления и эксплуатации дезинтеграторы продолжают использоваться, например, для очистки ваграночных газов, в черной металлургии [4.31]

4.9. СКОРОСТНЫЕ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛИ (СКРУББЕРЫ ВЕНТУРИ)

Скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури) объединяют большую группу аппаратов, общим для которых является наличие трубы-распылителя, в которой осуществляется интенсивное дробление газовым потоком, движущимся с высокой скоростью (порядка 40—150 м/с), орошающей его жидкости и установленного за ней каплеуловителя Первоначально в качестве трубы-распылителя использовалась труба Вентури в ее чистом виде, откуда и появилось название газопромывателей подобного типа

Действие трубы распылителя аналогично работе пневмофорсунки и применение трубы Вентури обеспечивало минимальные (не связанные с распылом) гидравлические потери при прохождении газом распыливающего устройства Однако по конструкционным соображениям довольно часто приходится отказываться от строгого выполнения трубы-распылителя в виде трубы Вентури, а в некоторых случаях ее конструкция практически ничем не напоминает трубу Вентури Тем не менее название этой группы мокрых пылеуловителей— скрубберы Вентури — прочно закрепилось в технической литературе

Скрубберы Вентури — наиболее эффективные из аппаратов мокрой очистки газов Осаждению частиц на каплях орошающей жидкости способствуют высокие относительные скорости между ним в трубах-распылителях

Гидравлическое сопротивление и эффективность скрубберов Вентури

Гидравлическое сопротивление скрубберов Вентури складывается из гидравлических сопротивлений трубы-распылителя и каплеуловителя, причем основная часть потерь энергии приходится на трубу Вентури

Гидравлическое сопротивление трубы-распылителя, Па, при подаче в нее орошающей жидкости удобно рассматривать как сумму слагаемых:

$$\Delta p = \Delta p_г + \Delta p_ж, \qquad (4\ 36)$$

где Δp — гидравлическое сопротивление трубы-распылителя, Па, $\Delta p_г$ — гидравлическое сопротивление трубы-распылителя, обусловленное движением газов (без подачи орошения), Па, $\Delta p_ж$ — гидравлическое сопротивление трубы-распылителя, обусловленное вводом орошающей жидкости, Па

Гидравлическое сопротивление сухой трубы-распылителя, Па, определяется по формуле

$$\Delta p_г = \zeta_{сух}\, w^2_г \rho_г / 2, \qquad (4\ 37)$$

где $\zeta_{сух}$ — коэффициент гидравлического сопротивления сухой трубы распылителя, $w_г$ — скорость газов в горловине при условиях по температуре и давлению на выходе из трубы-распылителя, м/с, $\rho_г$—плотность газов при тех же условиях, кг/м³

Коэффициент гидравлического сопротивления сухой трубы-распылителя с круглой и прямоугольной горловиной длиной 0,15 $d_э$ ($d_э$ — эквивалентный диаметр горловины, м) принимается в пределах от 0,12 до 0,15 Для труб-распылителей прямоугольного и круглого сечения с длиной горловины $10d_э \geqslant l_г \geqslant 0{,}15 d_э$ этот коэффициент может быть рассчитан из выражения [4 34]

$$\zeta_{сух} = 0{,}165 + 0{,}034 \frac{l_г}{d_э} \times \left[0{,}06 + 0{,}028 \frac{l_г}{d_э}\right] M, \qquad (4\ 38)$$

где $M = w_г / w_{зв}$ — число Маха, $w_{зв}$ — скорость звука, м/с

Выражение (4 38) справедливо при скорости газов в горловине до 150 м/с, причем обе скорости ($w_г$ и $w_{зв}$) принимаются при условиях по температуре и давлению на выходе из трубы-распылителя

Гидравлическое сопротивление труб-распылителей, Па, обусловленное вводом орошающей жидкости, рассчитывается по формуле

$$\Delta p_ж = \zeta_ж \frac{w^2_г \rho_ж}{2} m, \qquad (4.39)$$

где $\zeta_ж$ — коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий ввод в трубу-распылитель орошающей жидкости, m — удельный расход орошающей жидкости м³/м³ газов, $\rho_ж$ — плотность орошающей жидкости, кг/м³

Таблица 4.10. Значения коэффициентов A и $1+B$ в формуле (4.40)

Способ подвода орошения в трубу распылитель	Скорость газов в горловине, м/с	Длина горловины трубы распылителя $l_г$, м	Коэффициент	
			A	$1+B$
Центральный и пленочный подвод орошения	>80	$(0,15—12,0)\,d_э$	$1,68\,(l_г/d_э)^{0,29}$	$1—1,12\,(l_г/d_э)^{-0,045}$
	<80		$3,49\,(l_г/d_э)^{0,205}$	$1—0,98\,(l_г/d_э)^{0,82}$
Центральный подвод перед конфузором или орошение площади над батареей труб-распылителей	40—150	$0,15\,d_э$	0,215	—0,54
Периферийный подвод в конфузор	>80	$0,15\,d_э$	13,4	0,024
	<80		1,4	—0,316
Центральный подвод орошения в конфузор трубы оптимальной конфигурации (трубы Вентури)	40—150	$0,15\,d_э$	0,63	—0,3

Коэффициент $\zeta_ж$ определяется из выражения

$$\zeta_ж = A\,\zeta_{сух}\,m^{1+B}, \qquad (4\,40)$$

где A, B — эмпирические коэффициенты, значения которых для некоторых типов труб распылителей приведены в табл. 4 10 [4 32]

Гидравлическое сопротивление скруббера Вентури при подаче орошения непосредственно в горловину под прямым углом к потоку газов может быть оценено по номограмме, приведенной на рис 4 47

Эффективность пылеулавливания в скрубберах Вентури Наибольшее влияние на эффективность улавливания оказывают скорость газов в горловине трубы Вентури и удельное орошение Оптимальное соотношение между скоростью газов в горловине трубы распылителя и удельным орошением специфично для каждой пыли и в значительной мере зависит от ее дисперсного состава Обычно удельное орошение колеблется в пределах от 0,5 до 1,5 л/м³ газов

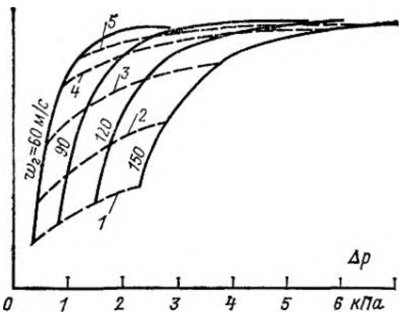


Рис 4 47 Номограмма для определения гидравлического сопротивления трубы-распылителя при подводе жидкости под прямым углом в горловину при различных удельных расходах жидкости m (л/м³).
1 — 0,08; 2 — 0,16; 3 — 0,32; 4 — 0,64; 5 — 0,96

Оценка эффективности скруббера Вентури может быть проведена с помощью формулы (4 5) при небольших значениях удельного орошения и по формуле (4 6) при $m \approx 2,0$ л/м³ [4 6] При расчетах по формулам (4 5) и (4 6) скорость газов относительно капли $w_{о.г}$ принимается равной скорости газов в горловине трубы-распылителя, диаметр капли рассчитывается по формуле Таназавы — Нукиямы, характеризующей средний диаметр капель, образующихся при распыле жидкости пневматической форсункой [4 2]

$$d_к = \frac{585\ 10^{-3}\sqrt{\sigma}}{w_{о.г}\sqrt{\rho_ж}} + 53,4\left(\frac{\mu_ж}{\sqrt{\rho_ж \sigma}}\right)^{0,45}\left(\frac{Q_ж}{Q_г}\right)^{1,5}. \qquad (4.41)$$

Так как отношение $Q_ж/Q_г$ обычно мало, величина $d_к$ практически определяется первой частью уравнения, т е почти не зависит от вязкости жидкости Считается [4 35], что при скорости газов в горловине трубы-распылителя выше 60 м/с точность формулы (4 41) весьма высока Ошибка становится значительной при скорости газов ниже 30 м/с

Предлагаются и более точные методы определения эффективности скрубберов Вентури [4 36], однако они достаточно сложны и не всегда обеспечивают совпадения расчетных значений с реально достигаемыми в пределах, оправдывающих практическую целесообразность проведения таких расчетов Поэтому более целесообразно при расчете эффективности скрубберов Вентури пользоваться энергетическим методом расчета (см § 4 13)

Конструкции скрубберов Вентури

В связи с непрерывно возрастающими требованиями к глубине очистки газовоздушных выбросов промышленных предприятий скрубберы Вентури постепенно становятся доминирующим видом мокрых пылеуловителей. Основные элементы скруббера, труба-распылитель и каплеуловитель, могут монтироваться как раздельно (рис. 4.48), так и в одном корпусе (рис. 4.49).

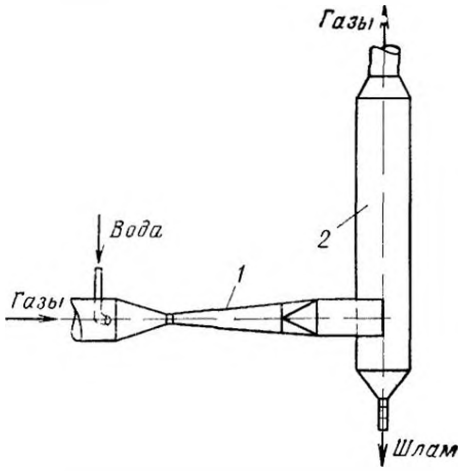


Рис. 4.48. Скруббер Вентури с выносным каплеуловителем:

1 — труба-распылитель; *2* — циклон-каплеуловитель

Трубы Вентури по конфигурации поперечного сечения подразделяются на круглые, щелевые и кольцевые Круглые трубы Вентури имеют преимущественное распространение при малых объемах очищаемых газов При больших объемах газов целесообразно применять трубы Вентури с кольцевой горловиной с центральным подводом орошения или щелевые с пленочным орошением

Иногда при больших объемах очищаемых газов применяются батарейные или групповые компоновки скрубберов Вентури

Достоинством батарейной и групповой компоновок является возможность отключения части труб при переменных расходах газов, т. е ступенчатого регулирования. Однако вопрос регулирования может решаться также с помощью труб с переменным сечением горловины, байпасированием части газов и изменением удельного орошения.

Регулировка производится в соответствии с существующей зависимостью между степенью очистки газов и гидравлическим сопротивлением трубы Вентури, согласно которой при постоянном гидравлическом сопротивлении степень очистки газов остается практически неизменной (см. § 4.13). Поэтому при изменении количества очищаемых газов важно поддерживать постоянное гидравлическое сопротивление. Это возможно либо путем сохранения постоянной скорости газов в горловине трубы либо путем изменения величины удельного орошения.

Второй способ регулирования менее удобен, так как Δp пропорционально удельному орошению в первой степени, а скорости газов в горловине — в квадрате.

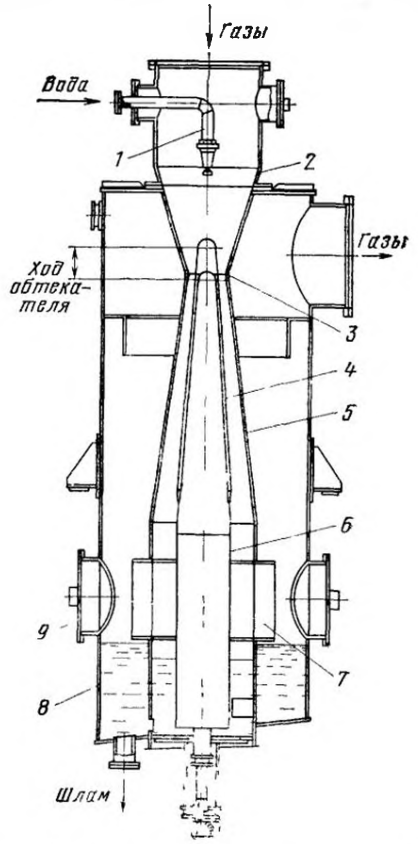


Рис. 4.49. Скруббер Вентури в одном корпусе (с регулируемым сечением кольцевой горловины):

1 — форсунка; *2* — конфузор; *3* — горловина; *4* — регулирующий конус; *5* — диффузор; *6* — направляющий шток; *7* — центробежный завихритель; *8* — корпус каплеуловителя; *9* — люк

Наибольшее распространение получили два способа регулирования, при которых скорость газов в горловине остается постоянной величиной: возврат части очищенных газов в систему очистки и изменение площади сечения горловины трубы Вентури. Первый способ более прост, но менее экономичен.

Регулирование сечения горловины трубы-распылителя производится по гид-

равлическому сопротивлению скруббера или по мощности, потребляемой дымососом или вентилятором Исполнительные механизмы регуляторов сечения выполняются в виде механических или пневматических передач.

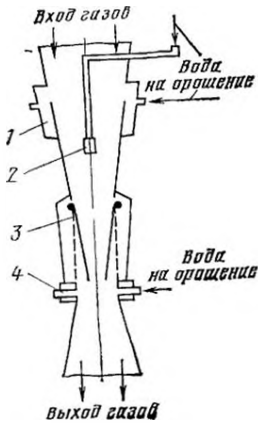


Рис 4 50 Труба-распылитель с регулируемым сечением щелевой горловины:

1 — карман пленочного орошения; *2* — форсунка; *3* — регулирующие лопасти, *4* — форсунки нижнего яруса

В настоящее время разработано несколько десятков конструкций скрубберов Вентури с регулируемым сечением горловины трубы-распылителя Промышленное применение имеют практически две конструкции [4 32]: труба-распылитель щелевого сечения, в которой изменение площади сечения горловины осуществляется с помощью поворотных заслонок (рис 4 50), и труба-распылитель кольцевого сечения (рис 4 49), в которой площадь сечения горловины изменяется благодаря перемещению вдоль оси обтекателя. Вторая конструкция с точки зрения эксплуатации представляется более надежной

По гидродинамическим характеристикам скрубберы Вентури можно условно подразделить на высоконапорные и низконапорные Первые применяются для тонкой очистки газов от микронной и субмикронной пыли и характеризуются высоким гидравлическим сопротивлением (до 20 000—30 000 Па), вторые используются главным образом для подготовки (кондиционирования) газов перед другими пылеулавливающими аппаратами и для очистки аспирационного воздуха; их гидравлическое сопротивление не превышает 3000—5000 Па Для работы в низконапорном режиме иногда используются трубы Вентури с удлиненными горловинами (В этом случае более глубоко протекают процессы охлаждения газов)

В зависимости от способа подвода орошающей жидкости (рис. 4 51) можно выделить следующие основные типы аппаратов: с центральным (форсуночным) подводом жидкости в конфузор (или перед ним), с периферийным орошением (в конфузоре или в горловине), с пленочным орошением, с подводом жидкости за счет энергии газового потока; с комбинированным орошением

С аэродинамической точки зрения оптимальной является конфигурация трубы Вентури (рис 4 52) со следующими соотношениями размеров ее элементов:

Конфузор:

диаметр входного сечения . . . . . d_1, м

угол сужения . $\alpha_1 = 25 \div 28°$

длина . . . . . $l_1 = (d_1 - d_г)/2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}$, м

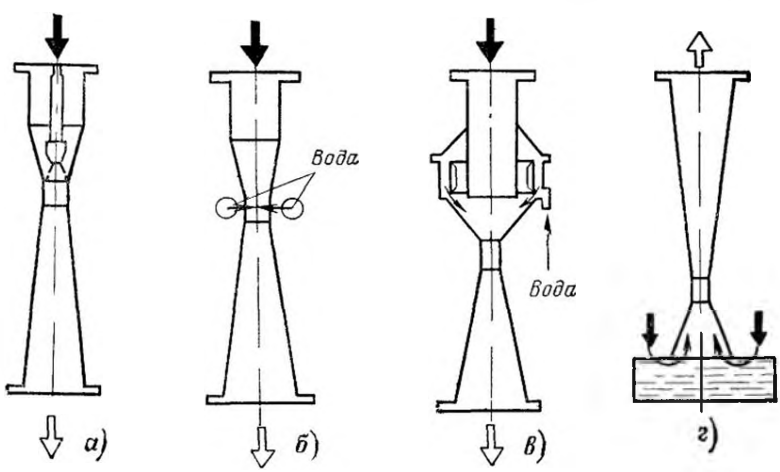


Рис 4.51 Конструкция труб-распылителей

а — центральный (форсуночный) подвод орошения *б* — периферийное орошение, *в* — пленочное орошение, *г* — бесфорсуночное орошение

Горловина:
диаметр . . . . . $d_г$, м
длина . . . . . $l_г = 0,15\,d_г$, м
Диффузор:
диаметр выходного сечения . . . . . d_2, м
угол раскрытия . . $\alpha_2 = 6 \div 7°$
длина . . . . . $l_2 = (d_2 - d_г)/2\,\mathrm{tg}\,\frac{\alpha_2}{2}$, м

Однако по конструкционным соображениям применяются также трубы с размерами, отличными от оптимальных. Например, при компоновке батарейных скрубберов Вентури используются трубы Вентури с углом сужения конфузора 63° и с укороченным диффузором В ряде установок применяются трубы Вентури с удли-

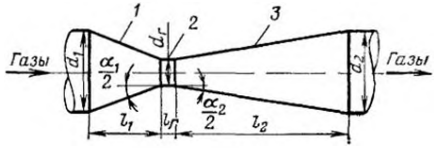


Рис 4 52 Труба Вентури
1 — конфузор, *2* — горловина, *3* — диффузор

ненными горловинами $l_г = (3 \div 5)\,d_э$, где $d_э$ — эквивалентный диаметр горловины, м

Важное значение для надежной работы скрубберов Вентури имеет обеспечение равномерного и полного перекрытия сечения горловины трубы-распылителя орошающей жидкостью Поэтому выбор способа орошения оказывает наибольшее влияние на конструктивные признаки скруббера Вентури, и соответственно классификация газопромывателей строится обычно по этому принципу.

Скрубберы Вентури с центральным (форсуночным) орошением (рис. 4 51,*а*). В скрубберах подобного типа подача орошающей жидкости осуществляется форсунками, установленными перед конфузором или непосредственно в нем Давление нагнетания перед форсунками обычно составляет от 0,2 до 0,3 МПа В основном применяются центробежные (механические эвольвентные, цельнофакельные и др.) форсунки (см § 4 11)

При угле распыла $\alpha_ф$ максимально возможное расстояние форсунки от верхней кромки конфузора $l_ф$ составляет $\frac{d_1}{2}\,\mathrm{ctg}\,\frac{\alpha_ф}{2}$.

Скрубберы Вентури с периферийным орошением (рис 4 51,*б*) Периферийная подача орошающей жидкости используется при подаче орошения в конфузор или горловину.

В трубах-распылителях круглого сечения сливные отверстия обычно располагаются по периметру конфузора или горловины (рис. 4.53), а в трубах прямоугольного сечения — с двух противоположных сторон, причем наиболее равномерное распределение орошающей жидкости достигается при шахматном расположении сливных отверстий.

Подача жидкости может быть осуществлена с помощью двух коллекторов, монтируемых на противоположных стенках конфузора или горловины и имеющих отверстия или прорези по всей длине.

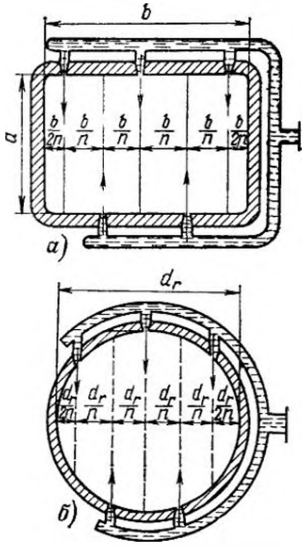


Рис 4 53 Схема периферийной подачи жидкости в трубу-распылитель
а — горловина прямоугольного сечения, *б* — горловина круглого сечения

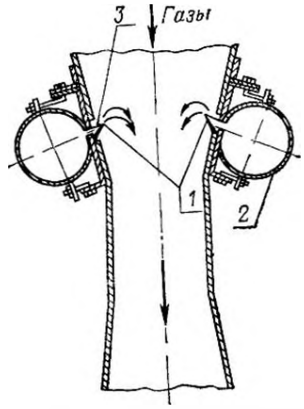


Рис 4 54 Подача орошающей жидкости через коллектор с пластинами
1 — отражательная пластина, *2* — коллектор, *3* — отверстие

Струи или завеса из жидкости истекают в рабочий объем аппарата под избыточным давлением 50—150 кПа Вариант такого устройства показан на рис 4 54

Струи жидкости, вытекающие из отверстий коллектора, частично срезаются о край отражательных пластин и становятся плоскими, благодаря этому доля площади сечения горловины, перекрываемая одной струей, увеличивается в несколько раз. Такие орошающие устройства могут эффективно применяться при ширине горловины до 0,25—0,3 м, т е для прямоугольных труб распылителей большой единичной производительности

Скрубберы Вентури с пленочным орошением Для предотвращения образования отложений на стенках конфузора и диффузора и возможности орошения трубы сильно загрязненной оборотной жидкостью предложена пленочная подача жидкости (рис 4 51,*в*) Пленочная подача может применяться как совместно с подачей через форсунку или периферийной так и самостоятельно, главным образом в щелевых трубах-распылителях

Для обеспечения лучшего контакта газов с жидкостью по периметру горловины трубы с пленочным орошением рекомендуется выполнять уступ Для труб-распылителей с пленочным орошением большое значение имеет диаметр или ширина горловины Размер максимально возможного диаметра или ширины горловины зависит от скорости газов, однако не рекомендуется принимать его больше 100 мм

Скрубберы Вентури с подводом жидкости за счет энергии газового потока (бесфорсуночные скрубберы Вентури) применяются в качестве абсорберов, но могут применяться и для пылеулавливания, особенно при орошении оборотной жидкостью с большим количеством взвеси

Газы, подаваемые на очистку, контактируют с поверхностью жидкости, находящейся в приемной чаше или другой емкости, захватывают и увлекают за собой жидкость в виде брызг и капель в трубу-распылитель (см рис 4 51,*г*)

Гидравлическое сопротивление аппарата растет с возрастанием удельного орошения, которое может быть увеличено как за счет повышения скорости газа (при постоянном уровне жидкости), так и за счет повышения уровня жидкости (при постоянной скорости газа) Так, например, при скорости газов в горловине трубы-распылителя 50—60 м/с увеличение удельного орошения с 0,8 до 3,3 л/м³ приводит к росту гидравлического сопротивления аппарата с 700 до 3000 Па [4 33] Гидравлическое сопротивление бесфорсуночной трубы распылителя ниже, чем трубы-распылителя с форсуночным или периферийным орошением, при одних и тех же значениях удельного расхода орошающей жидкости и скорости газов в горловине Это объясняется худшим дроблением капель в этом аппарате и приводит в свою очередь к его более низкой пылеулавливающей способности

Таблица 4 11 **Технические показатели типоразмерного ряда высоконапорных труб Вентури**

Марка трубы Вентури	Производительность (условия входа), м³/ч	Диаметр горловины трубы Вентури, мм	Расход орошаемой жидкости, м³/ч	Давление жидкости перед форсункой, кПа	Габаритные размеры, мм	Масса изделия, не более, кг
ГВПВ-0,010-400	3100—6500	115	2,16—5,00	80—410	540×610×2500	117,0
			5,00—12,60	63—400	540×685×2500	120,0
ГВПВ-0,014 400	4140—8400	135	2,90—5,00	80—410	575×700×2940	148,0
			5,00—7,00	60—700	575×740×2940	150,0
ГВПВ-0,019-400	5590—11 340	155	3,90—12,80	80—980	645×785×3140	174,0
			13,00—22,70	420—710	645×795×3140	175,0
ГВПВ-0,025-400	7490—15 120	180	5,20—13,00	150—980	775×925×3790	244,0
			13,00—30,00	80—450	775×985×3790	257,0
ГВПВ-0,30-400	9320—18 900	200	6,50—13,00	60—250	790×1325×4025	305,0
			13,00—38,00	100—910	790×1355×4025	310,0
ГВПВ-0,045-400	13 800—28 000	240	9,75—30,00	60—570	880×1420×4620	400,0
			30,00—56,00	110—390		420,0
ГВПВ-0,060-400	18 630—37 800	280	13,00—30,00	100—570	1075×1630×5420	535,0
			30,00—75,60	110—710		560,0
ГВПВ-0,080-400	23 460—47 600	320	16,80—45,00	75—570	1545×1480×5940	645,0
			45,00—95,20	110—500		675,0
ГВПВ-0,100-400	32 430—65 800	370	22,60—45,00	80—320	1835×1835×7240	935,0
			45,00—131,60	63—540	1860×1860×7240	975,0
ГВПВ-0,140-400	41 400—84 000	420	28,80—45,00	130—320	2015×2015×8140	1160,0
			45,00—168,00	63—880	2060×2060×8140	1200,0

Промышленные конструкции скрубберов Вентури

Типоразмерный ряд ГВПВ высоконапорных труб Вентури разработан НИИОГаз на базе оптимальной конфигурации трубы Вентури (см рис 4 52) В качестве каплеуловителя используется малогабаритный прямоточный циклон (см § 4 12) Для подачи орошения в трубы Вентури применяются цельнофа-

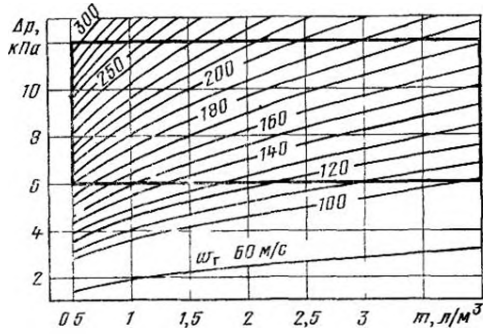


Рис 4 55 Регулировочная характеристика скруббера Вентури с коническим обтекателем

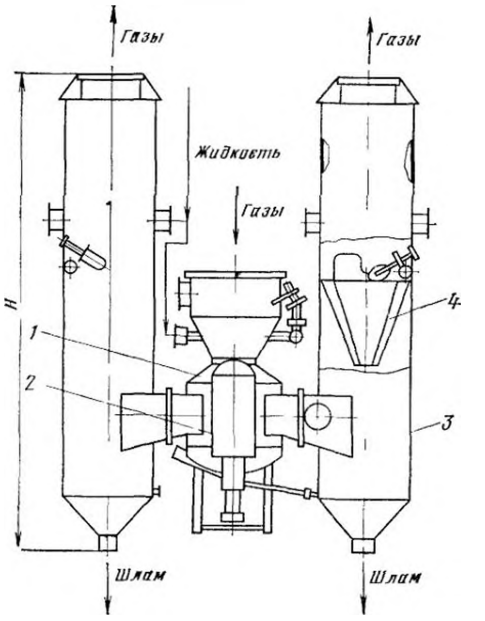


Рис 4 56 Скруббер Вентури с эллиптическим обтекателем

1 — труба распылитель *2* — регулируемая вставка с эллиптическим обтекателем *3* — циклон каплеуловитель, *4* — конический центробежный завихритель

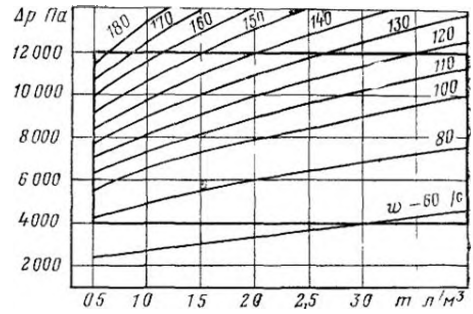


Рис 4 57 Регулировочная характеристика скруббера Вентури с эллиптическим обтекателем

кельные форсунки (см § 4 11), устанавливаемые над конфузором под углом к оси трубы, равным 60°

Типоразмерный ряд труб Вентури предназначен для очистки газов с температурой до 400°С и начальной концентрацией пыли до 30 г/м³, содержание взвеси в оборотной воде, подаваемой на орошение, не должно превышать 500 мг/л Основные технические характеристики аппаратов ряда приведены в табл 4 11

Гидравлическое сопротивление трубы Вентури из типоразмерного ряда определяется в зависимости от производительности по газам и расхода орошающей жидкости по вышеприведенным формулам при следующих условиях $\zeta_{сух}=0{,}15$, $A=0{,}63$, $1+B=-0\ 3$

Унифицированный ряд скрубберов Вентури с кольцевым сечением горловины разработан НИИОГаз и институтом Гипрогазоочистка Технические требования к очищаемым газам и орошающей жидкости, поступающим в аппараты ряда, аналогичны требованиям к типоразмерному ряду высоконапорных труб Вентури Унифицированный ряд объединяет скрубберы Вентури двух модификаций

Первая модификация скрубберов Вентури охватывает производительность по газам от 2000 до 50 000 м³/ч и включает четыре типоразмера скрубберов (см рис 4 49) В аппаратах этой модификации предусмотрена регулировка сечения горловины с помощью конического обтекателя с углом раскрытия 7° Труба-распылитель устанавливается внутри центробежного каплеуловителя (на диффузоре трубы закреплена центробежная розетка)

В трубах-распылителях с коническим обтекателем максимальное сечение горловины имеет место при нижнем положении обтекателя, при котором горизонтальная ось головки обтекателя совпадает с нижней кромкой горловины трубы Подача оро-

щающей жидкости производится в конфузор трубы Вентури через форсунку с рассекающим конусом, установленную на уровне верхней кромки конфузора по оси трубы-распылителя

Требуемый уровень гидравлического сопротивления обеспечивается за счет изменения значений удельного орошения от 0 5 до 3,5 л/м³ и скоростей газов в горловине трубы Регулировочная характеристика скруббера Вентури с коническим обтекателем приведена на рис 4 55

Вторая модификация скрубберов Вентури рассчитана на производительность по газам от 50 000 до 500 000 м³/ч Для регулирования сечения горловины установлен эллиптический (плоский) обтекатель Скруббер Вентури компонуется из трубы-распылителя с регулируемым сечением горловины и отдельно стоящих (двух или одного) каплеуловителей

На рис 4 56 показан скруббер Вентури с двумя каплеуловителями В качестве каплеуловителя используется циклон с нижним подводом газа и концентрически расположенным в нижней части коническим центробежным завихрителем

В аппаратах второй модификации гидравлическое сопротивление (в пределах от 400 до 1200 Па) также обеспечивается регулировкой скорости газа в кольцевом сечении горловины и величиной удельного орошения Регулировочная характеристика скрубберов Вентури с эллиптическим обтекателем приведена на рис 4 57 Минимальное сечение горловины имеет место при верхнем положении обтекателя

Подача орошающей жидкости в конфузор трубы-распылителя производится с помощью эвольвентных форсунок, равномерно распределенных по периметру конфузора, с цилиндрической насадкой Сливное отверстие насадки располагается на уровне верхней кромки конфузора

Основные технические показатели аппаратов ряда приведены в табл 4 12

Газопромыватель типа КМП разработан Ленинградским институтом Промстройпроект [4 28], представляет собой скруббер Вентури, предназначенный в основном для очистки вентиляционных выбросов с начальной запыленностью воздуха до 30 г/м³ и состоит из двух основных частей (рис 4 58) — трубы-распылителя и циклона-каплеуловителя типа ЦВП (с периодическим орошением) Подача воды в трубу-распылитель осуществляется через сопло с отбойником (рис 4 59), устанавливаемое по оси трубы в зоне конфузора Диаметр сопла d_c, м, рассчитывается [4 37] по формуле

$$d_c = 1{,}06\sqrt{Q_ж/\sqrt{p_ж}}, \qquad (4.42)$$

где $p_ж$—давление воды перед соплом, Па

Для предотвращения образования отложений на границе раздела сухой и мок-

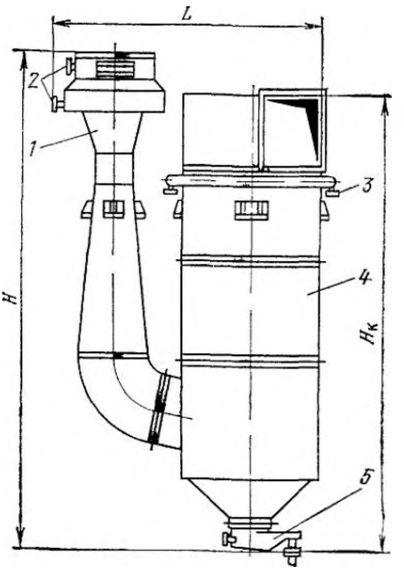


Рис 4 58 Газопромыватель типа КМП

1 — труба-распылитель *2* — подвод воды *3* — подвод воды в каплеуловитель *4* — циклон каплеуловитель, *5* — гидрозатвор для отвода шлама

рой поверхностей корпуса предусмотрена дополнительная подача воды — в виде пленки, равномерно стекающей из камеры над конфузором На орошение аппарата обычно подается оборотная вода с содержанием твердого до 0,5 г/л

Типоразмерный ряд газопромывателей типа КМП охватывает диапазон по производительности от 7000 до 140 000 м³/ч (табл 4 13)

Зависимости между гидравлическими сопротивлениями газопромывателей КМП, удельными расходами воды на орошение, производительностью по очищаемому воз-

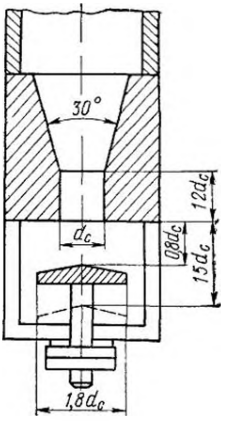


Рис 4 59 Центральное сопло с отбойником

Таблица 4.12. Технические показатели скрубберов Вентури с кольцевой горловиной

Наименование	Марка скруббера									
	СВ150/90-800	СВ210/120-1200	СВ300/180-1600	СВ400/250-2200	СВ900/820-1600	СВ1020/920-2000	СВ1150/1020-2400	СВ1380/1220-2000	СВ1620/1420-2400	СВ1860/1620-2800
Производительность, тыс. м³/ч:										
максимальная	7	15	30	50	80	120	180	240	340	500
минимальная	2	7	15	30	50	80	120	160	240	340
Высота скруббера H, мм	4095	4980	6205	7400	9160	11 060	13 165	11 060	13 165	14 880
Размеры трубы-распылителя, мм:										
диаметр горловины	150	210	300	400	900	1020	1150	1380	1620	1860
диаметр обтекателя	90	120	180	250	820	920	1020	1220	1420	1620
ход обтекателя	250	250	350	350	150	185	212	245	350	400
Число каплеуловителей, шт.	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Диаметр каплеуловителя, мм	800	1200	1600	2200	1600	2000	2400	2000	2400	2800
Скорость газов в свободном сечении каплеуловителя, м/с:										
максимальная	5,0	5,0	5,0	5,0	11,0	10,6	11,0	10,6	10,4	11,3
минимальная	1,4	2,3	2,5	3,0	6,9	7,1	7,4	7,1	7,4	7,7
Масса, т	1,14	1,90	3,70	6,63	8,06	10,73	14,17	19,96	27,00	34,47

духу представлены на номограммах рис 4 60.

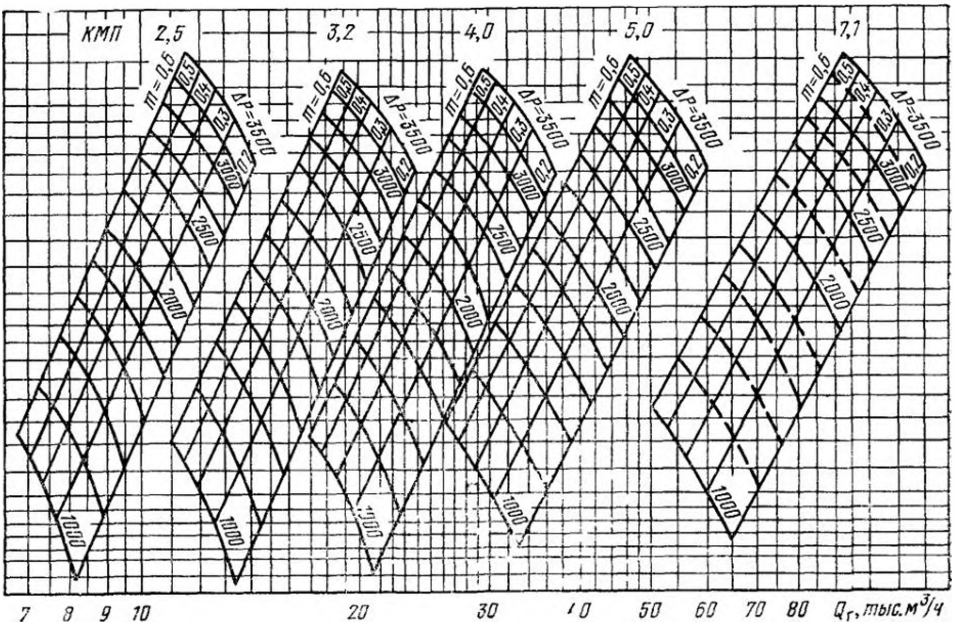
Расчет эффективности газопромывателей для ряда пылей приведен в [4 28].

Мокрые скоростные золоуловители МС-ВТИ разработаны для замены ранее применявшихся мокрых золоуловителей МП-ВТИ [4 30]. Газопромыватели МС-ВТИ предназначены для очистки газов на энергоблоках мощностью до 200 МВт [4.38]

Скоростной золоуловитель состоит из трубы-распылителя и центробежного скруббера (рис. 4.61). Внутренняя поверхность трубы-распылителя и центробежного скруббера футерованы кислотоупорной керамической плиткой по слою шпаклевки из диабазовой замазки Углы раскрытия диффузора и конфузора трубы-распылителя равны соответственно 12° и 60°. Орошающие форсунки размещены таким образом, чтобы границы сухих и орошаемых участков не выходили за пределы стенок конфузора. Перед конфузором устанавливается участок длиной 0,8 м несколько суженного сечения по сравнению с подводящим газо-

Таблица 4.13. Основные технические показатели аппаратов типа КМП

Наименование	Марка пылеуловителя						
	КМП-2,5	КМП-3,2	КМП-4,0	КМП-5,0	КМП-6,3	КМП-7,1	КМП-8,0
Производительность, м³/ч	7000—14 000	12 000—20 000	18 000—35 000	28 000—55 000	45 000—86 000	58 000—110 000	70 000—140 000
Диаметр горловины, мм	250	320	400	500	630	710	800
Габаритные размеры, мм (см. рис. 4.58):							
длина L	2300	2800	3540	3980	4480	5240	5720
ширина B	1415	1845	2240	2705	3190	3695	4105
высота H	3350	4990	5630	7645	8360	9290	10 060
Масса, т	1,060	1,260	1,848	4,010	5,310	7,308	10,477



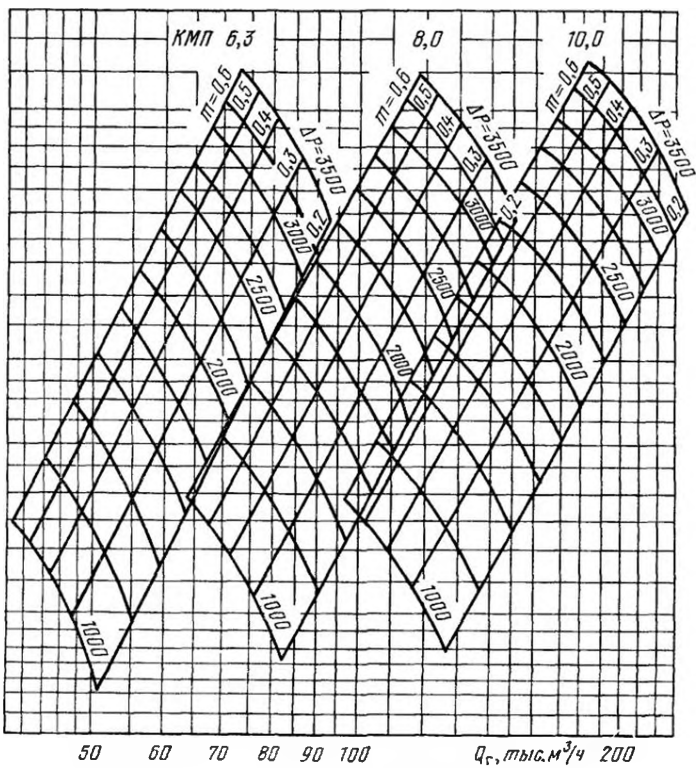


Рис. 4.60. Номограмма, характеризующая зависимость гидравлического сопротивления аппарата $\Delta p_{ап}$ от расхода воздуха $Q_г$ и удельного орошения m

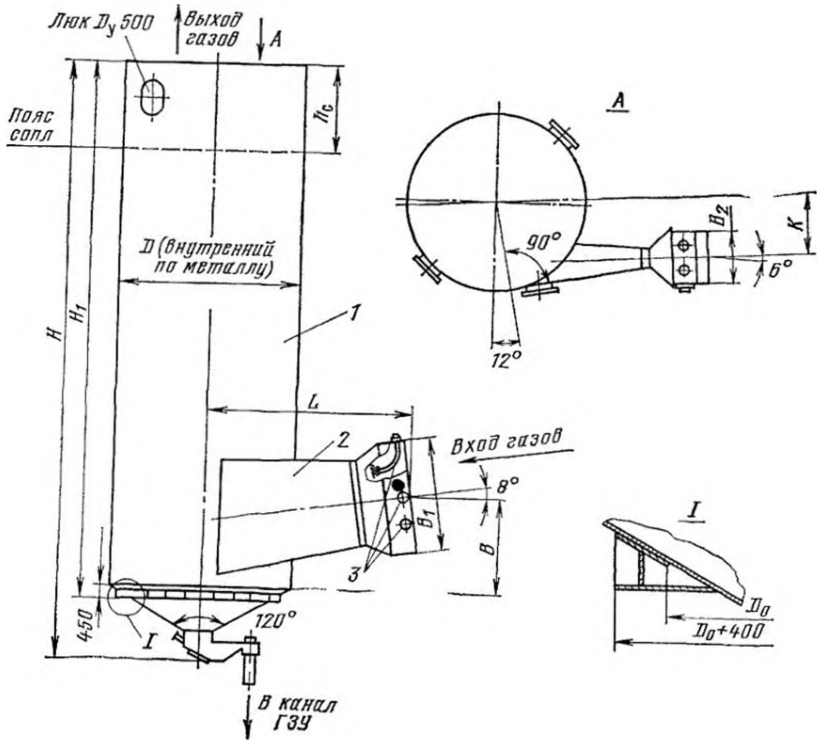


Рис. 4.61. **Принципиальная схема скоростного золоуловителя МС-ВТИ:**
1 — каплеуловитель; *2* — труба-распылитель, *3* — форсунки

ходом При скорости газов на этом участке 20 м/с обеспечивается эффективное ударное разрушение граничных отложений Обычная установка трубы-распылителя под углом 8° к горизонту обеспечивает нормальный сток воды в корпус центробежного скруббера.

Ряд скоростных золоуловителей, включающий шесть типоразмеров (табл 4.14), разработан ВТИ. На орошение золоуловителя подается смесь оборотной и технической воды, причем расход технической воды, предназначенной для компенсации потерь на испарение, составляет примерно

Таблица 4.14. **Технические показатели ряда мокрых скоростных золоуловителей МС-ВТИ**

Наименование	Марка золоуловителя					
	МС-ВТИ 2800	МС-ВТИ-3000	МС-ВТИ-3200	МС-ВТИ-3800	МС-ВТИ-4000	МС-ВТИ-4500
Производительность, тыс. м³/ч	90	108	125	180	200	250
Расход воды на орошение корпуса аппарата, т/ч	4,4	4,7	5,0	5,7	6,3	70
Размеры, мм (см. рис. 4,61):						
D	2800	3000	3200	3800	4000	4500
H	9660	10 320	10 980	12 290	13 610	15 250
H_1	8850	9450	10 050	11 250	12 450	13 950
B	1550	1680	1750	2040	2260	2490
b_1	1620	1790	1935	2365	2640	3000
b_2	842	930	1005	1020	1135	1295
K	930	980	1040	1230	1380	1550
h_c	1400	1500	1600	1800	2000	2250
Масса, т	15,3	17,2	20,1	24,6	29,9	37,8

15%. Удельное орошение трубы-распылителя составляет 0,12—0,18 л/м³, гидравлическое сопротивление аппарата — 800 — 1100 Па.

Установлено, что при общей щелочности осветленной воды менее 10 мг·экв/л не наблюдается интенсивного образования отложений карбоната кальция в орошающих устройствах, если для осветленной воды pH≤9—9,5. Это условие выполняется для тех топлив, для которых произведение приведенной зольности $A_{пр}$, %, на содержание в золе свободной окиси кальция $CaO_{своб}$ меньше 6,0. Содержание $CaO_{своб}$ может быть определено из соотношения $CaO_{своб}=0{,}074\ CaO_{2общ}$ (где $CaO_{общ}$ — общее содержание CaO в воде). При $A_{пр}\cdot CaO_{своб}>6{,}0$ на орошение золоуловителя следует подавать техническую воду и лишь в отдельных случаях осветленную (когда при небольших затратах возможна ее частичная нейтрализация до pH=9÷9,5).

Мокрые скоростные золоуловители обеспечивают эффективность очистки газов от золы, равную 95—97% При этом удельный расход электроэнергии на очистку составляет 1,2—1,5 МДж на 1000 м³/ч газов.

4.10. ЭЖЕКТОРНЫЕ СКРУББЕРЫ

В эжекторных скрубберах (рис. 4.62) затрачиваемая на очистку газов энергия подводится к орошающей жидкости, которая подается в трубу-распылитель через расположенную в конфузоре форсунку под давлением 600—1200 кПа, т. е. по принципу работы эжекторный скруббер аналогичен водоструйному насосу. Так как в эжекторной трубе-распылителе газы транспортируются капельной жидкостью и создается положительный напор, общее гидравлическое сопротивление газоочистной установки (с учетом каплеуловителя) может быть равно нулю. Поэтому подобные аппараты целесообразно применять, когда имеются трудности с установкой вентилятора или дымососа (например, при очистке взрывоопасных газов или газов, содержащих радиоактивную пыль).

К недостаткам эжекторных скрубберов следует отнести невысокую эффективность при улавливании высокодисперсной пыли (с размером частиц крупнее 2—3 мкм), а также низкий КПД использования энергии.

Сечения конфузора и горловины (камеры смешения) подбираются таким образом, чтобы создавать условия для эжекции газов потоком жидкости. Скорость газового потока в сечении камеры смешения рекомендуется выбирать в пределах от 10 до 12 м/с, а длину камеры смешения — около трех ее диаметров. Удельный расход жидкости на орошение эжекторного скруббера составляет от 7 до 10 л/м³, скорость истечения жидкости из форсунки — от 15 до 30 м/с. Гидродинамическая характеристика эжекторного скруббера приведена на рис. 4.63.

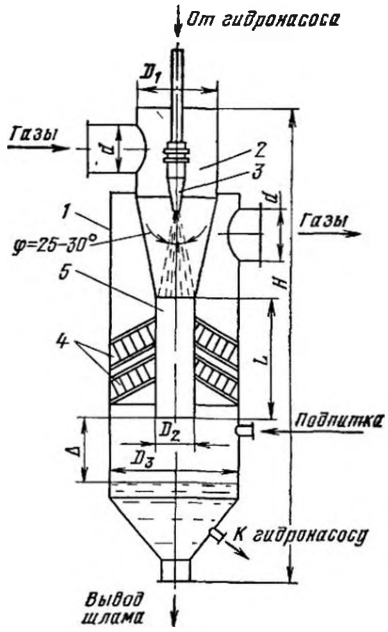


Рис. 4.62. Эжекторный скруббер (типа СЭЖ):

1 — корпус и бак-репульпатор; *2* — камера всасывания; *3* — форсунка; *4* — сетчатый каплеуловитель; *5* — камера смешения

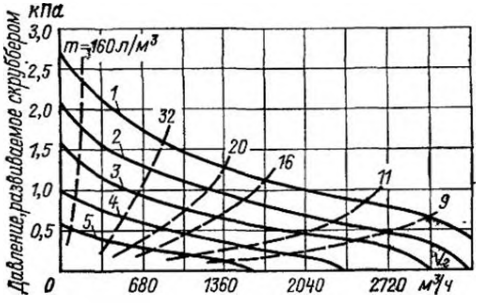


Рис. 4.63. Гидродинамическая характеристика эжекторного скруббера при различных давлениях нагнетания (кПа):

1 — 700; *2* — 560; *3* — 420; *4* — 280; *5* — 140

Типоразмерный ряд эжекторных скрубберов (типа СЭЖ) включает шесть типоразмеров (табл. 4.15) на производительность по газам от 50 до

Таблица 4.15 **Основные технические показатели аппаратов типа СЭЖ**

Наименование	Марка пылеуловителя					
	СЭЖ 200	СЭЖ-300	СЭЖ 700	СЭЖ 1500	СЭЖ 3000	СЭЖ-5000
Производительность, м³/ч	50—200	200—340	340—750	750—1500	1500—3000	3000—5000
Расход орошающей жидкости, м³/ч	1,6	2,1	5,25	10,5	21,0	35,0
Размеры, мм (см. рис 4.62).						
H	1100	1500	2000	2700	3600	4500
D_1	120	180	280	400	560	710
D_2	70	100	150	200	280	370
D_3	200	315	450	630	900	1120
d	90	110	160	250	320	450
L	350	400	450	600	840	1100
Диаметр сопла форсунки, мм	4,0	4,6	7,2	10,2	14,4	18,6

5000 м³/ч [4 39] В качестве базовой конструкции ряда принят эжекторный скруббер, показанный на рис 4 62

Рабочая жидкость подается в аппараты под давлением 0,6—0,8 МПа и распыливается форсункой (подобной форсунке Кертинга, см § 4 11) с коэффициентом расхода ξ=0,8÷0,9 и углом распыла 25—30°. В форсунке применен винтовой завихритель с углом подъема винтовой линии 68°. Удельный расход жидкости составляет 8—10 л/м³

В аппаратах применен сетчатый каплеуловитель, состоящий из двух слоев гофрированной сетки (см разд 5), собранных в единый кассетный блок Толщина каждого слоя 100—150 мм, расстояние между слоями 60—80 мм Каплеуловитель устанавливается под углом 25—30° к оси аппарата на расстоянии 1,0—1,5 D_2 от среза камеры смешения

Регулирование производительности аппаратов в пределах от 0 до максимально возможной для данного типоразмера осуществляется изменением уровня жидкости в баке-репульпаторе относительно камеры смешения (Δ в пределах от 0 до 300 мм). Максимально возможное разрежение, обеспечиваемое при транспортировке газов через аппарат, составляет 600 Па

4.11. ОРГАНИЗАЦИЯ ПОДВОДА ОРОШАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

Организация подвода орошения в пылеуловителях в значительной степени определяет эксплуатационную надежность и эффективность их работы

Для подвода орошения в мокрых пылеуловителях применяются два вида распыливающих устройств Первую группу составляют форсунки, которые применяются в полых (центробежных и эжекторных) скрубберах, скрубберах Вентури Ко второй группе относятся оросители для равномерного распределения орошающей жидкости по сечению, главным образом, насадочных и тарельчатых скрубберов

Основные характеристики форсунок

По принципу действия форсунки делятся на три основных вида механического, пневматического и электрического действия (рис 4 64).

В мокрых пылеуловителях применяются центробежные и струйные механические форсунки, реже — форсунки пневматического действия Сведения о конструкциях форсунок других типов подробно изложены в [4 40—4 42]

Объемный расход жидкости $Q_ж$, м³/с, распыливаемой форсункой, определяется по формуле

$$Q_ж = \frac{\pi d_c^2}{4} \xi \sqrt{2p_ж/\rho_ж}, \qquad (4.43)$$

где d_c — диаметр сопла форсунки, м; ξ — коэффициент расхода жидкости, $p_ж$ — напор, давление жидкости перед форсункой, Па, $\rho_ж$ — плотность жидкости, кг/м³.

Наибольшие значения коэффициента расхода характерны для струйных форсунок (0,75—0,98), наименьшие — для центробежных (0,2—0,3)

Скорость истечения жидкости из сопла форсунки $w_{ист}$, м/с, составляет

$$w_{ист} = 4\, Q_ж / (\pi\, d_c^2\, \varphi), \qquad (4\,44)$$

где φ — коэффициент заполнения сопла

Коэффициент заполнения сопла также зависит от конструкций форсунки Для большинства форсунок φ<1,0, это объясняется сжатием струи при истечении жидкости для струйных форсунок и образованием воздушного вихря для центробежных. Для центробежно-струйных форсунок значение φ приближается к 1,0

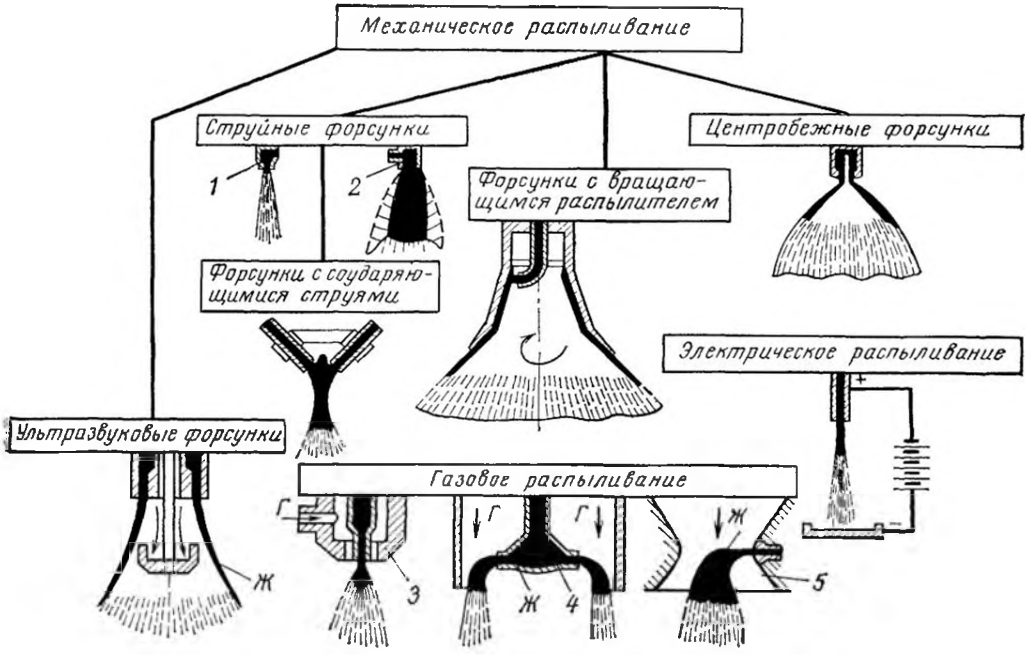


Рис 4 64 Классификация форсунок:

1 — цилиндрическое сопло; *2* — щелевое сопло; *3* — распылитель при соосных потоках жидкости и газов; *4* и *5* — распылители при подаче жидкости под прямым углом к воздушному потоку; *Г* — газы; *Ж* — жидкость

Механические форсунки имеют достаточно большой диапазон изменения угла конусности струи α — от 8 до 180°. Наименьший угол конусности достигается для струйной форсунки с одиночным отверстием.

Механические форсунки различаются по характеру заполнения факела. При общей для большинства форсунок конической форме факела в зависимости от типа форсунки может быть либо полым с кольцевым распределением капель в секущей плоскости (рис 4 65,*а*) либо полностью заполненным с круговым распределением капель (рис 4 65,*б*). Иногда применяются форсунки с плоским или веерным факелом (рис. 4.65,*в*).

Равномерность заполнения факела распыла зависит от типа форсунки. Максимальную равномерность распределения жидкости по сечению обеспечивают центробежно-струйные форсунки. Для струйных форсунок и форсунок с соударяющимися струями плотность орошения резко убывает от оси факела к его периферии. Центробежные форсунки образуют факел, сечение которого представляет собой довольно тонкое кольцо.

Средний диаметр капель $d_к$, образующихся при распыле жидкости центробежными форсунками, может быть в первом приближении рассчитан по формуле [4 43]

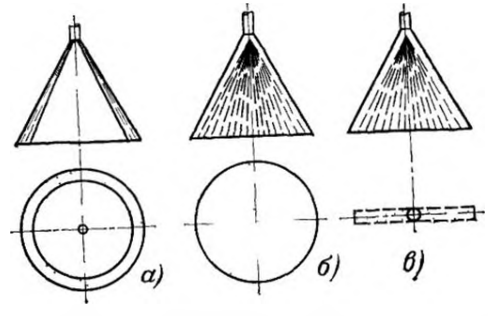


Рис. 4 65. Различные формы факела форсунок:

а — полый; *б* — заполненный; *в* — плоский

$$d_к/d_э = 18{,}3/\mathrm{Re}_э^{0{,}59}, \qquad (4\ 45)$$

где $d_э$ — эквивалентный диаметр сопла, м; $\mathrm{Re}_э = w_э d_э/\nu_ж$ — число Рейнольдса, рассчитанное по условной скорости движения жидкости в сопле: $w_э = \sqrt{2p_ж/\rho_ж}$, м/с.

Формула (4 49) действительна в интервале значений $2280 < \mathrm{Re}_э < 18\ 280$ и по-

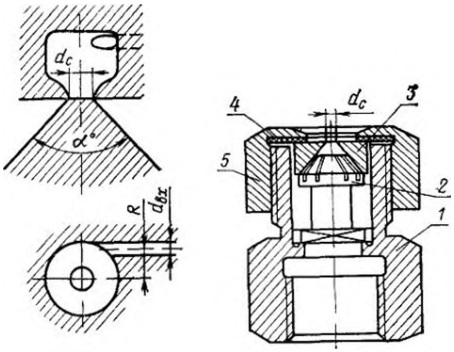


Рис. 4.66. Схема центробежной форсунки

Рис 4 67 Форсунка Григорьева — Поляка: *1* — корпус, *2* — грибок, *3* — распылитель, *4* — прокладка, *5* — накидная гайка

казывает независимость среднего диаметра капель от конструкции форсунки Исследования показали, что при $Re_э \geqslant 20\ 000$ увеличение скорости истечения и уменьшение вязкости жидкости практически не приводят к улучшению качества распыливания. Отношение $d_к/d_э$ в этом случае может быть ~0,06, а улучшение качества распыливания возможно только за счет

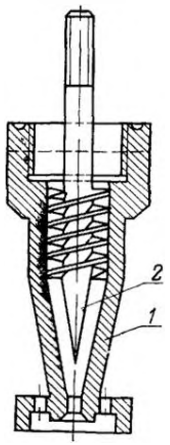


Рис 4 68 Форсунка Кертинга
1 — корпус; *2* — винтовой завихритель

уменьшения площади сечения сопла, т. е. уменьшения абсолютных размеров форсунки.

А. Форсунки с полым факелом. В этих форсунках жидкость подается в вихревую камеру либо через тангенциальные каналы (рис. 4.66) либо по центру через помещенную во входном канале спираль (рис. 4 67). Струя покидает форсунку в виде полого вращающегося конуса, который под действием центробежных сил распадается на отдельные капли. Большими достоинствами центробежных форсунок являются про-

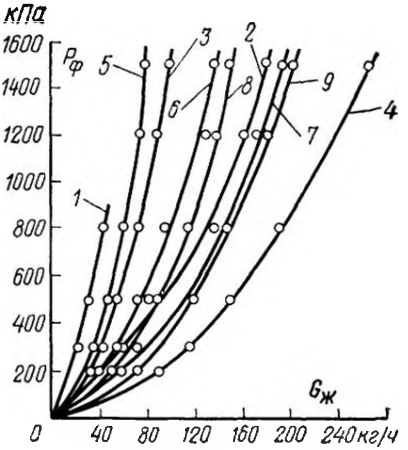


Рис 4 69 Зависимость производительности форсунок от давления (число у кривой соответствует номеру форсунки, см. табл 4 16)

стота конструкции, возможность широкой регулировки расхода жидкости и угла распыла, высокая эксплуатационная надежность

Форсунка Григорьева — Поляка (рис 4 67) применяется для небольших расходов жидкости и состоит из корпуса *1*, в который вставляется грибок *2*. На корпусе грибка имеется от шести до восьми винтовых канавок Площадь сечения всех винтовых канавок должна в 2—2,4 раза превышать площадь выходного сопла.

Форсунка Кертинга (рис 4 68) также применяется для небольших расходов жидкости, состоит из корпуса и винтовой вставки Жидкость, двигаясь по винтовым каналам, завихряется и распыляется через сопло, диаметр которого изменяется в пределах от 1 до 4 мм Изменение угла наклона винтовой линии и угла конусности наконечника позволяет получать более короткий или более длинный факел

На рис. 4 69 приведена зависимость от давления производительности форсунок Григорьева — Поляка и Кертинга Характеристики форсунок Григорьева — Поляка и Кертинга приведены в табл. 4.16 [4 44]

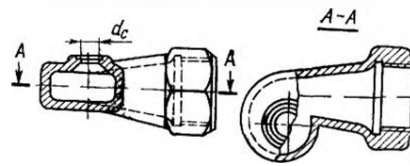


Рис. 4.70 Эвольвентная форсунка (d_c — диаметр сопла)

Таблица 4.16. Характеристики механических форсунок

Наименование	Номер кривой на рис. 4 69	Вариант устройства	Диаметр выходного отверстия, мм	Угол факела, °	Длина факела, м	Качественная характеристика распыла
Форсунка Григорьева—Полякова	1	Грибок с 6 канавками сечением 0,8×0,5 мм	1	85—87	0,6—0,8	Очень мелкий
	2		2	85—87	0,6—0,8	Мелкий
	3	Грибок с 6 канавками сечением 0,9×1,4 мм	1	55—80	0,6—1,0	Очень мелкий
	4		2	55—80	0,6—1,0	Мелкий
	5	Грибок с 8 канавками сечением 0,7×1,4 мм	1	60—90	0,6—1,0	Очень мелкий
	6		1,5	60—90	0,6—1,0	Мелкий
	7		2	60—90	0,6—1,0	Мелкий
Форсунка Кертинга	8	—	1	55—90	1,3—1,8	Мелкий
	9	—	1,5	55—90	1,3—1,8	Мелкий и средний
	—	—	2	55—90	1,3—1,8	Средний
	—	—	3,5	55—90	1,3—1,8	Средний
	—	—	4	55—90	1,3—1,8	Средний

Эвольвентная форсунка (рис. 4.70) обычно используется в градирнях и в мокрых пылеуловителях при необходимости обеспечения грубого распыла жидкости. Большой диаметр выходного отверстия (от 12 до 25 мм) обеспечивает высокую производительность и надежность работы на оборотной воде. Зависимость производительности эвольвентных форсунок, длины факела $H_ф$ и диаметра факела $d_ф$ от давления приведена на рис. 4.71.

Недостаток эвольвентных форсунок заключается в их способе производства (литье).

Тангенциальная форсунка (рис. 4.66) также проста по конструкции, как и эвольвентная, но может быть изготовлена обычным механическим способом. В отличие от вышеприведенных механических форсунок, надежных методов расчета которых не разработано, тангенциальная форсунка может быть рассчитана по предложенному Г. Н. Абрамовичем [4.40] методу, который обеспечивает хорошее совпадение экспериментально найденных характеристик с рассчитанными в самом широком диапазоне изменения основных конструкционных параметров.

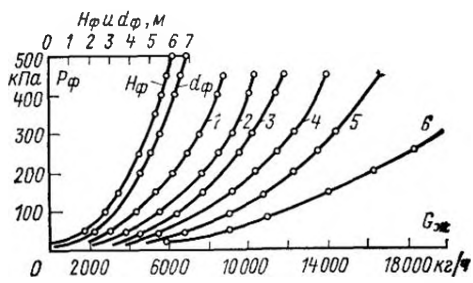


Рис. 4 71. Зависимость производительности и параметров факела распыла эвольвентных форсунок от давления при различных диаметрах сопла:

1 — 12 мм; *2* — 15 мм; *3* — 16 мм; *4* — 18 мм; *5* — 20 мм; *6* — 25 мм

Исходными данными для расчета форсунки с тангенциальным подводом жидкости являются производительность $Q_ж$, давление жидкости перед форсункой $p_ж$ и плотность жидкости $\rho_ж$.

1. Выбирают по конструкционным соображениям угол факела распыла α и на-

ходят из графика на рис 4.72 соответствующие значения коэффициентов расхода ξ и заполнения сопла φ и геометрическую характеристику форсунки A.

2 Находят после подстановки найденного значения ξ в выражение (4 43) диаметр выходного отверстия (сопла) форсунки d_c.

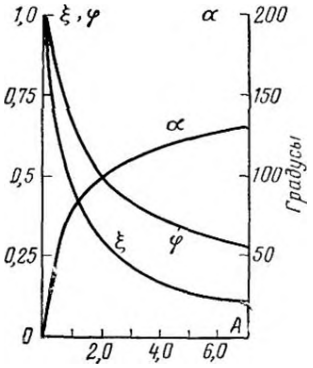


Рис 4 72 Зависимость параметров центробежной форсунки ξ, α и φ от геометрической характеристики A

3 Рассчитывают скорость истечения жидкости из сопла форсунки, м/с, по формуле (4 44)

4 Выбирают диаметр входного патрубка (канала) $d_{вх}$ и определяют площадь сечения $S_{вх}$, после чего рассчитывают эксцентриситет, м:

$$R=2An\,S_{вх}/(\pi\,d_c), \qquad (4\,46)$$

где n — число входных патрубков (каналов), обычно принимается в пределах от 1 до 4 .

5 Для данной конструкции форсунки определяющими являются поперечные размеры, осевые существенной роли не играют. Габаритные размеры форсунки зависят от выбора угла распыла α и диаметра входного патрубка $d_{вх}$, причем с уменьшением диаметра входного патрубка резко уменьшается диаметр форсунки (камеры закручивания). Внутренний диаметр камеры закручивания D, м, находят из соотношения

$$D=2\,R+d_{вх}, \qquad (4.47)$$

а длину входных, м, патрубков (каналов) принимают в пределах

$$l_{вх}=(2\div3)\,d_{вх}. \qquad (4.48)$$

6 Выбирают высоту камеры закручивания H на ее периферии близкой к диаметру входных каналов $H\approx1{,}2\,d_{вх}$, м. Относительная длина сопла принимается в пределах $l_c/d_c=0{,}1\div0{,}2$, а оптимальный угол конусности на входе в сопло должен составлять от 90 до 120°.

Б. Форсунки со сплошным факелом распыла. Для получения сплошного конуса распыла используют центробежные форсунки, в которых помимо вращающейся струи создается и осевая струя (рис 4 73). Для получения равномерного распределения жидкости в факеле необходимо соблюдать правильное соотношение между количест-

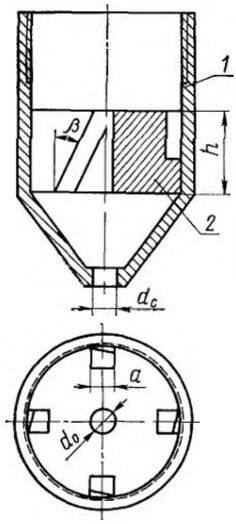


Рис 4 73 Форсунка с плоским вкладышем и периферийными винтовыми каналами

1 — корпус, 2 — вкладыш

вом вращающейся жидкости и жидкости, подаваемой в центральную струю. Обычно на осевую струю подается меньшая часть жидкости, причем жидкость может подводиться автономно Необходимо отметить, что при двойной подаче жидкости значительно увеличивается диаметр капель

Форсунки с плоским вкладышем и периферийными винтовыми каналами прямоугольного сечения (рис. 4.73) [4.42]. Исходными данными для расчета являются производительность $Q_ж$, давление жидкости перед форсункой $p_ж$, плотность жидкости $\rho_ж$ и угол факела распыла α, выбираемый в пределах от 20 до 100°.

1. Принимают значение коэффициента расхода $\xi=0{,}75$ и по уравнению (4 43) определяют диаметр соплового отверстия d_c.

2 Находят расчетное значение ξ по формуле

$$\xi=0{,}9\,(0{,}676-24{,}0\,d_c)^{0{,}13}. \qquad (4.49)$$

Если полученное расчетным путем значение ξ намного отличается от принятого, то расчет повторяют, изменяя производительность на одну форсунку $Q_ж$ или давление распыла $p_ж$

3. При значениях $d_c>14$ мм диаметр вкладыша может быть найден из соотношения $D=1{,}925\ d_c$, при $d_c\leqslant14$ мм D принимается постоянным и равным 27 мм

4. Оптимальное отношение площадей сечений центрального канала вкладыша

и сопла S_0/S_c определяется по формуле

$$S_0/S_c = 0{,}676 - 24{,}0\, d_c, \qquad (4.50)$$

диаметр центрального канала — из соотношение $d_0 = d_c\sqrt{S_0/S_c}$, м.

5. Суммарная площадь сечений периферийных каналов определяется из соотношения $\Sigma S_к = 4{,}3\pi d_0^2$, м², угол наклона винтовых каналов вставки β—по формуле

$$\lg\beta = \frac{a}{1750 d_c + 40{,}2} + 0{,}32. \qquad (4.51)$$

6. Размер периферийных каналов находится из соотношения $a = \sqrt{\Sigma S_к/(n\cos\beta)}$, причем число периферийных каналов принимается постоянным ($n=6$).

Метод надежен в диапазоне изменения основных параметров: $d_0 = 2 \div 17$ мм; $p_ж$ до 1 МПа; $\beta = 6{,}0 \div 45{,}0°$.

Форсунка ВТИ. Размер выходного отверстия форсунки является определяющим, в зависимости от него при конструировании форсунки принимаются все остальные размеры (рис. 4.74).

Значение диаметра выходного сопла форсунки d_c, м, определяется по формуле

$$d_c = \sqrt{\frac{4Q_ж}{\xi\pi\sqrt{2p_ж/\rho_ж}}}, \qquad (4.52)$$

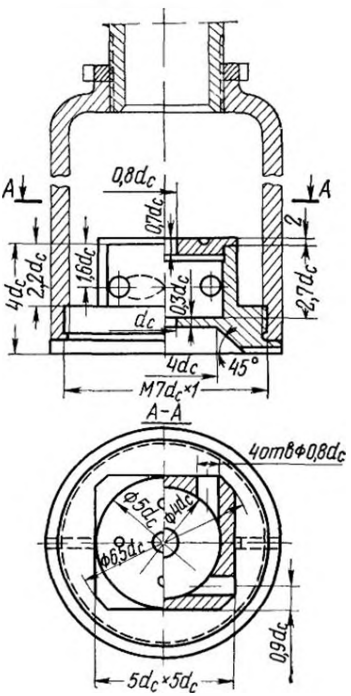


Рис 4 74. Форсунка ВТИ

где ξ — коэффициент расхода, ориентировочное значение которого (при $d_c = 3 \div 8$ мм) равно 0,73; $p_ж$ — давление воды перед форсункой, должно составлять не менее 150 кПа.

Пользуясь соотношениями, указанными на рис. 4.74, можно найти остальные размеры форсунки. Максимальный диаметр зоны орошения одной форсунки не должен превышать 500 мм.

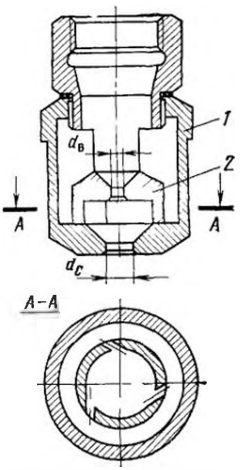


Рис. 4.75. Форсунка с цилиндрическим вкладышем и горизонтальными каналами:

1 — корпус; *2* — вкладыш

Форсунка с цилиндрическим вкладышем и горизонтальными каналами. Характерной особенностью форсунки (рис. 4.75) является наличие во вкладыше трех тангенциально расположенных горизонтальных каналов, обеспечивающих закрутку части потока жидкости.

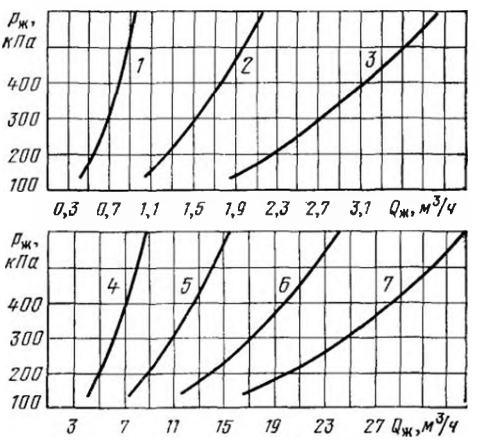


Рис. 4 76. Зависимость производительности форсунки с цилиндрическим вкладышем от давления распыливания при различных диаметрах сопла:

1 — 4 мм; *2* — 6 мм; *3* — 8 мм; *4* — 12 мм; *5* — 16 мм; *6* — 20 мм; *7* — 24 мм

Коэффициент расхода форсунки $\xi=0{,}62$ На рис 4 76 приводятся зависимости расхода жидкости от давления для форсунок с различным диаметром сопла

Плоскофакельная форсунка (рис 4 77) находит широкое применение в газоочистных аппаратах (мокрых пластинчатых электрофильтрах скрубберах с конфузорным подводом газов, щелевых трубах Вентури и др) Достоинством форсунки является отсутствие каналов и вставок, что уменьшает возможность ее забивания взвесями, содержащимися в орошающей жидкости Оригинальная конструкция плоскофакельной форсунки разработана НИИОГаз [4 45]

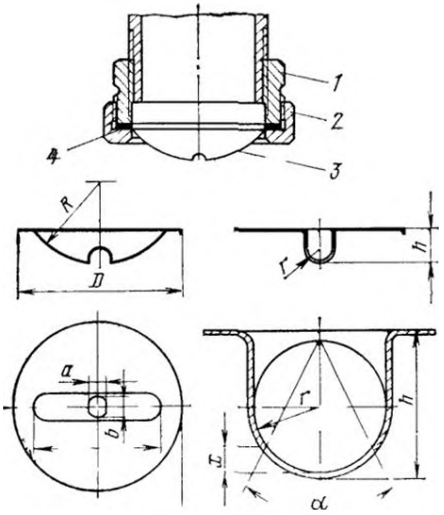


Рис 4 77 Плоскофакельная (щелевая) форсунка

1 — корпус, *2* — прижимная гайка *3* — плоскофакельный распылитель *4* — прокладка

Распылитель изготавливается из тонкой пластины (рис 4 77), в которой методом давления (или штамповкой) получают профилированную канавку В центре канавки просверливается сопло овальной или прямоугольной формы Угол конусности факела плоскофакельной форсунки зависит только от радиуса закругления профиля канавки r, м, и параметра x

Исходными данными для расчета плоскофакельной форсунки этого типа являются производительность $Q_ж$ давление жидкости $p_ж$ и угол конусности α При расчете принимают $\xi=0{,}7$ и находят одну из сторон выходного отверстия b м лежащую в плоскости факела распыла, по формуле

$$b = 28\ 10^{-4}\sqrt{\frac{Q_ж}{\xi\sqrt{p_ж}}}\cdot \qquad (4.53)$$

Определяют r при $\alpha\leqslant 90°$ из соотношения $r=b/(2\sin\alpha)$ При $\alpha>90°$, как видно из рис 4 77, $b=2r$ В этих случаях параметр x рассчитывают из выражения

$$x = r\left(2 - \operatorname{ctg}\frac{\alpha}{2}\right) \qquad (4\ 54)$$

Остальные геометрические параметры форсунки, м, принимаются

$R=(8-10)\,r$, $h=(3\div 5)\,r$, $a=0{,}76b$, $L=2\sqrt{R^2-(R-h)^2}$, $D=L+(4\div 10)\times 10^{-3}$

Благодаря поверхностному натяжению кромки факела плоскофакельной форсунки обычно ограничены слошными струйками, что особенно заметно при работе малых форсунок и углах распыления более 50° Эти струйки могут содержать от 0,25 до 0,5 общего количества распыливаемой жидкости и распадаются на бо́льшие капли, чем центральная часть пленки

НИИОГаз разработаны РД РТМ 26-14 13 78 включающие распылители на производительность от 0,03 до 4,5 м³/ч при давлении распыливаемой жидкости от 0,3 до 1 0 МПа и углах раскрытия факела распыла от 30 до 120° Ряд распылителей состоит из пяти типоразмерных групп корпусов, определяемых размером подводящего трубопровода (рис 4 78)

В Форсунки с регулируемым расходом жидкости применяются для обеспечения постоянства качества распыла при изменении производительности Конструкция форсунки разработана НИИОГаз [4 46] и представляет собой распылитель центробежного типа (рис 4 79), у которого часть жидкости из камеры закрутки отводится через перепускной канал обратно во всасывающую линию насоса, подающего жидкость на распыливание Количество отводимой жидкости может регулироваться автоматически дроссельным устройством

Форсунки обеспечивают изменение расхода в 8 раз, т е степень регулирования $K=Q'_ж/Q_р$ (где $Q'_ж$ — объемный расход жидкости на входе в форсунку, м³/с, $Q_р$ — объемный расход распыливаемой жидкости, м³/с) может изменяться в пределах от 1 до 8

Угол конусности распыла форсунок колеблется от 60° (при $K=1$) до 120° (при $K=8$) Коэффициент расхода жидкости при $K=1$ составляет 0 35

Диаметр сопла форсунки $d_с$ определяется из формулы (4 43) при значениях $\xi=0{,}35$ ($K=1$) и $Q_ж=Q'_ж$, диаметр отводного канала $d_к$ — из соотношения $d_к=K\,d_с$

Основные размеры форсунки находятся из следующих соотношений $R_{вх}=(1{,}5-2{,}5)\,d_с$, $d_{вх}=\sqrt{\dfrac{Q'_ж}{0{,}785\,(1{,}0\div 1{,}5)}}$;

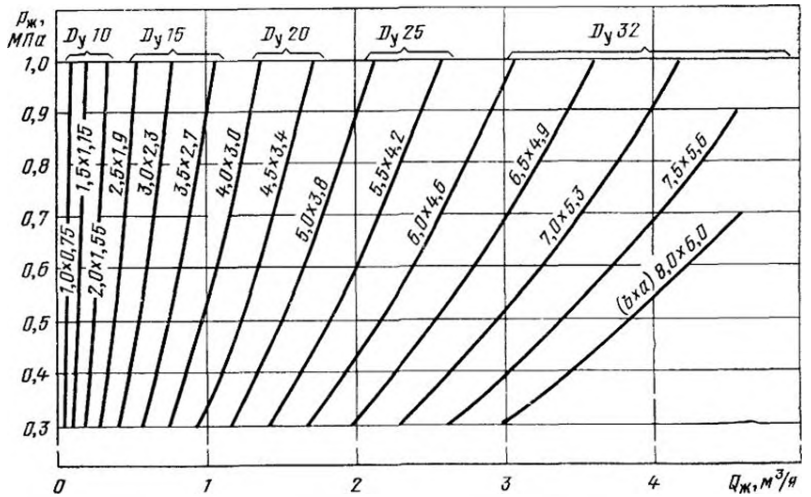


Рис. 4.78. Типоразмерный ряд плоскофакельных форсунок:

$D_у$10 соответствует диаметру подводящего трубопровода 1/4"; $D_у$15 — 1/2"; $D_у$20 — 3/4", $D_у$25 — 1", $D_у$30 — 1 1/4"

$D_к = 2R_{вх} + d_{вх}$; $h_к = (1{,}0 \div 1{,}5)\, d_{вх}$; $L_{вх} = (1{,}5 \div 3)\, d_{вх}$; $h_1 = (1{,}0 \div 1{,}5)\, d_к$; $h_2 \approx 0{,}2 d_с$.

Геометрические параметры типоразмерного ряда форсунок этого типа (ЦР8) на производительность от 0,27 до 5,0 м³/ч, разработанных НИИОГаз в соответствии с РД РТМ 26-14-25-82, приводятся в табл. 4.17.

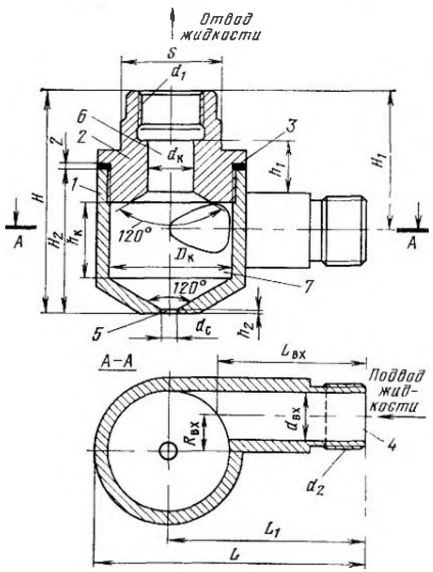


Рис. 4.79. Форсунка с регулируемым расходом жидкости (тип ЦР8):

1 — корпус; 2 — вставка; 3 — прокладка; 4 — подводящий канал; 5 — выходное сопло; 6 — отводной канал; 7 — камера крутки

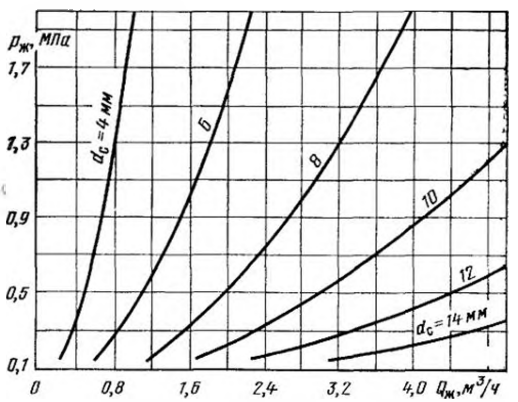


Рис. 4.80. Номограмма для определения типоразмера форсунок типа ЦР8

Диаметр образующихся при распыливании капель для всех типоразмеров форсунок 100—800 мкм. Для выбора типоразмера форсунки (величины $d_с$) в зависимости от давления распыливания $p_ж$ и производительности $Q'_ж$ можно воспользоваться номограммой, приведенной на рис. 4.80.

Испытания форсунок показали, что при снижении доли жидкости, поступающей на распыл, диаметр образующихся капель уменьшается. Особенно интенсивно уменьшение среднего диаметра капель проис-

Таблица 4.17 **Геометрические параметры форсунок ЦР8**

Марка форсунки	Размеры, мм																	Масса, кг
	$d_с$	$d_к$	$d_{вх}$	d^*_1	d^*_2	$D_к$	$R_{вх}$	H	H_1	H_2	$h_к$	h_1	h_2	L	L_1	$L_{вх}$	S	
ЦР8 4	4	12	16	1/2''	1/2''	33	10	70	45	49	25	17	1	88	63	48	36	0,85
ЦР8 6	6	18	20	3/4''	3/4''	50	15	89	57	58	30	25	1	110	80	60	41	1,00
ЦР8 8	8	24	26	1''	1''	66	20	108	66	72	40	28	2	144	104	78	46	1,80
ЦР8 10	10	30	26	1 1/4''	1''	76	25	116	72	75	40	30	2	152	107	78	55	2,80
ЦР8-12	12	36	36	1 1/4''	1 1/4''	96	30	142	80	96	55	35	2	200	145	108	55	3,70
ЦР8 14	14	42	40	1 1/2''	1 1/2''	110	35	160,5	92	104,5	60	45	3	225	162,5	120	65	5,70

* Размеры в дюймах

ходит в интервале значения K от 2 до 5 Так, при $K=2$ диаметр капель уменьшается почти в 2 раза, а при $K=5$—приблизительно в 10 раз

Г. Форсунки с пневматическим распыливанием жидкости Поток жидкости в пневматических форсунках дробится за счет смешения с высокоскоростным потоком газов или пара, жидкость подается в пневматические форсунки под небольшим давлением обычно не выше 4 10^5 Па, либо засасывается за счет инжектирующего действия газового потока Смешение потоков может осуществляться как в камере форсунки, так и вне ее Форма факела распыла зависит от конфигурации выходного отверстия (при смешении потоков внутри камеры) и от расхода газов (при внешнем смешении)

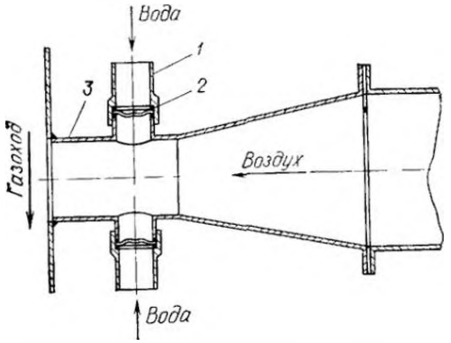


Рис 4 81 Орошающее устройство (пневмофорсунка)

Сравнительные исследования по распылу воздухом струй воды, подаваемых параллельно и нормально к воздушному потоку, показали, что наилучшие результаты получаются при параллельной подаче жидкости в месте наибольшей скорости газов

Пневматические форсунки не получили широкого распространения в мокрых пылеуловителях, что объясняется повышенными энергозатратами, связанными с подачей воздуха (или пара) под давлением, и усложнением системы подвода орошения

Более тонкий распыл жидкости, обеспечиваемый в пневматических форсунках, по сравнению с механическими делает целесообразным их применение для увлажнения газов Подобное орошающее устройство на базе пневматической форсунки разработано для испарительного охлаждения газов в газоходе [4 47]

Орошающее устройство (рис 4 81) представляет собой бездиффузорную трубу распылитель с горловиной прямоугольного сечения Жидкость через патрубок *1* и элемент плоскофакельной форсунки *2* (см выше) в виде пленки подается в горловину *3*, где дробится потоком воздуха, перпендикулярным по отношению к пленке Отношение массовых расходов жидкости и распыливающего воздуха не превышает 0,3, скорость воздуха в выходном сечении устройства составляет 60—90 м/с, гидравлическое сопротивление трубы распылителя — до 5000 Па Давление и угол раскрытия факела жидкости соответственно равны 90—100 кПа и 90°.

НИИОГаз разработано два типоразмера устройств устройство УР 1-4 с пятью плоскофакельными форсунками производительностью по воде 1,0—1,5 м³/ч и устройство УР 2-8, в котором монтируется 9 форсунок и соответственно производительность по воде увеличивается до 2,0—2,7 м³/ч Тип устройства и их общее количество определяются параметрами газохода и объемным расходом охлаждаемого газа

Средний диаметр капель, образуемых при распыле жидкости пневматической форсункой с затопленным соплом, рассчитывается по формуле (4 41)

Методы расчета различных типов пневматических форсунок изложены в [4 48]

Оросительные устройства

Раздача орошающей жидкости в насадочных скрубберах и тарельчатых аппаратах осуществляется с помощью оросителей В отличие от форсунок назначение оросителей — не создание тонкого распыла

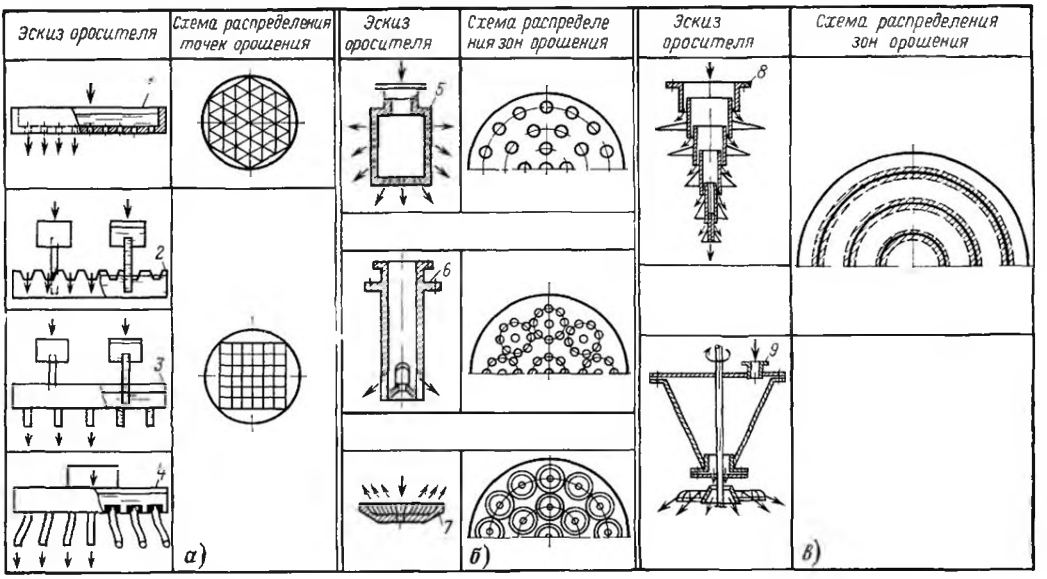


Рис 4 82 Основные типы оросителей

а — точечное орошение, *б* — зональное орошение, *в* — сплошное орошение *1* — распределительная плита *2* — желоб с боковыми прорезями *3* — желоб с донными патрубками *4* — многотрубчатый ороситель *5* — перфорированный стакан, *6* — щелевая брызгалка, *7* — розетка, *8* — многоконусный ороситель *9* — разбрызгивающая звездочка, ——— — границы смежных неперекрывающихся кольцевых зон — — — — — границы перекрывающихся зон (заштрихована площадь перекрытия смежных зон)

жидкости, а лишь равномерное распределение ее по сечению аппарата, что само по себе является сложной задачей особенно в аппаратах с большой площадью сечения

По режиму истечения жидкости оросительные устройства делятся на струйные разбрызгивающие (перфорированные стаканы, щелевые брызгалки и др) и на струйные неразбрызгивающие (плиты, желобы и др) [4 41]

Орошение сечения аппарата (верхнего торцевого слоя насадки) может быть «точечным», зональным и сплошным (рис 4 82) При точечном орошении потоки нераздробленной жидкости равномерно распределяются по всему сечению аппарата Такой вид орошения целесообразен при ограниченном расходе жидкости и при недопустимости брызгоуноса Точечное орошение обеспечивается струйными неразбрызгивающими оросителями Разбрызгивающие оросители позволяют получить зональное или сплошное орошение сечения аппарата При зональном орошении жидкость распределяется по сечению не так равномерно, как при точечном, однако обеспечивается лучшая смоченность площади сечения Это особенно важно для насадочных скрубберов, так как при сплошном орошении обеспечивается наилучшая смоченность насадки, кроме того, при этом способе орошения значительно уменьшается забивка насадки пылью Недостаток рассматриваемого способа — большой расход орошаемой жидкости, перекрытие смежных зон орошения, т е значительная неравномерность плотности орошения по сечению.

4.12. УНОС БРЫЗГ И СЕПАРАЦИЯ КАПЕЛЬ

Работа мокрых пылеуловителей сопровождается тем или иным уносом брызг, интенсивность которого зависит от скорости газового потока в свободном сечении аппарата и способа подвода орошающей жидкости

При распылении жидкости форсунками или дроблении жидкости за счет энергии газового потока (скрубберы Вентури) размер образующихся капель от 50 до 500 мкм Оросители, используемые в тарельчатых скрубберах, образуют крупные капли — 600—800 мкм и более В этих же аппаратах образование капель может происходить в процессе разрыва пузырей В этом случае образуются капли, которые лежат в двух интервалах 20—30 и 600—1200 мкм Доля мелких, так называемых капель спутников, невелика, не превышает 0,30—0,35% уноса (по массе) и не может

оказывать влияния на общий характер каплеуноса

Очень мелкие капли (<10 мкм) образуются при конденсации пара Максимально возможный размер выносимых капель может быть рассчитан по скорости витания капель, которая принимается равной скорости газов в свободном сечении аппарата.

Для сепарации капель из газов используются следующие механизмы осаждения гравитационный, инерционный, центробежный, диффузионный и электростатический Последние два механизма в основном применяются для улавливания туманов и рассматриваются в разд 5 и 6

Брызгоулавливающие устройства могут монтироваться в одном корпусе с мокрым пылеуловителем (встроенные) или в виде отдельного аппарата устанавливаться за ним (выносные)

Гравитационные каплеуловители. Простейшим устройством для улавливания капель из газового потока является осадительная камера, принципиально ничем не отличающаяся от осадительных (пылеулавливающих) камер, рассмотренных в разд 2 Поэтому приведенные формулы могут быть использованы и для расчета гравитационных каплеуловителей Гравитационные каплеуловители находят применение только для улавливания очень крупных капель и при больших нагрузках по жидкости (до 1 кг/м³ и более) Основной недостаток гравитационных каплеуловителей заключается в громоздкости

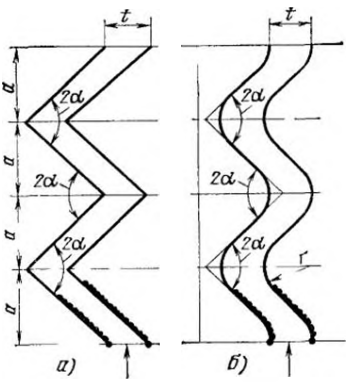
Инерционные каплеуловители по принципу действия не отличаются от простейших инерционных пылеуловителей, например от показанных на рис 2 2

В качестве инерционных каплеуловителей могут быть использованы различные насадки (или пакеты из насадки) — дробленая порода, стружка, галька, шлак, стандартная насадка (кольца Рашига, седла Берля, сферы и т д), вязаная сетка (демистеры), пластины волнообразного и зигзагообразного (уголкового) профилей (жалюзи), прутки, уголки и т д (рис 4 83)

В зависимости от расположения пакетов насадки в пространстве их можно подразделить на горизонтальные, вертикальные и наклонные Слои из гранулированных материалов, колец Рашига, седел Берля и других специальных видов насадки обычно устанавливаются в верхней части аппарата

Эффективность инерционных каплеуловителей увеличивается с ростом скорости газов Однако этот рост не может быть беспредельным, поскольку в определенном диапазоне скоростей газов происходит резкое снижение эффективности сепарации из-за возникновения вторичного уноса наступает «захлебывание» сепаратора Критическая скорость в сечении сепараторов определяется их конструкцией, расположением пакетов насадки в пространстве, направлением набегающего газового потока, геометрическими характеристиками элементов, физико химическими свойствами сред и уносом брызг из аппарата

В [4 49, 4 50] приводятся эмпирические формулы для расчета критической



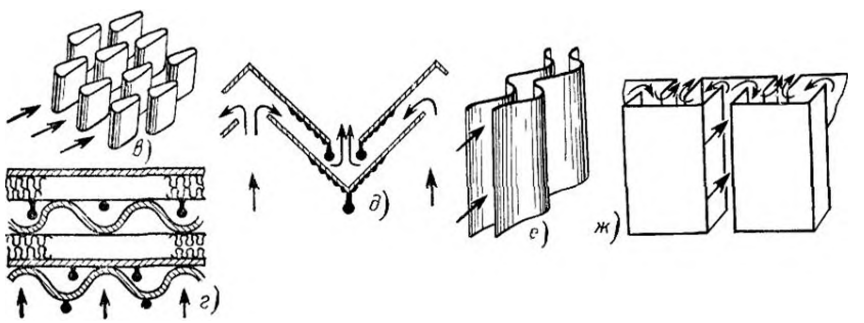


Рис 4 83 Элементы сепарационных устройств·

а б — горизонтальные жалюзийные сетки, *д* — уголковые *в* — прямоточный сепаратор Карбейта *г* — гофрированные вязаные *е* — вертикальные жалюзийные *ж* — швеллерковые

скорости газов в инерционных сепараторах. Формулы включают довольно много параметров, часто неизвестных, что затрудняет их применение на практике. Поэтому обычно пользуются [4.51] более упрощенной формулой

$$w_г = K_c \sqrt{\frac{\rho_ж - \rho_г}{\rho_г}}, \qquad (4.55)$$

где $w_г$ — оптимальная скорость газов в свободном сечении сепаратора, м/с; K_c — коэффициент.

Значение коэффициента K_c для сепаратора Карбейта составляет 0,305; для вертикального жалюзийного сепаратора—0,122; для горизонтально установленного сеточного каплеуловителя при движении газов навстречу стекающему потоку жидкости (при атмосферном давлении)—0,107—0,122; Обычно оптимальная скорость газов 3—5 м/с Для вертикальных волнообразных жалюзийных сепараторов при угле раскрытия профиля $2\alpha=90°$ (см рис. 4 83) и для уголковых — при $2\alpha=120°$ оптимальная скорость газов составляет 5—6 м/с.

Вторичный унос в сепараторах с капельным отводом жидкости (слой насадки, горизонтальные жалюзийные, сетчатые, уголковые) наступает при меньших скоростях газового потока, чем в сепараторах с пленочным отводом жидкости (вертикальные жалюзийные, швеллерковые).

Для увеличения критической скорости восходящего потока газов применяется наклонная установка сепараторов, причем оптимальным считается угол наклона 40—45°. Однако наклонные инерционные сепараторы работают нормально только при небольшом количественном уносе жидкости. Основной недостаток всех инерционных каплеуловителей — возможность образования отложений пыли. Для предотвращения образования отложений рекомендуется применять профили с шагом $t=90$ мм

Гидравлическое сопротивление инерционных каплеуловителей Δp_c, Па, рассчитывается по формуле

$$\Delta p_c = \zeta_c w_г^2 \rho_г/2, \qquad (4.56)$$

где ζ_c — коэффициент гидравлического сопротивления сепаратора

Коэффициент ζ_c для прямоточного сепаратора Карбейта равен 6,5, для горизонтальной сетки при толщине насадки 100 мм составляет 1,8, для жалюзийных сепараторов ζ_c определяется по следующим формулам [4 50]:

для горизонтальных, вертикальных и наклонных (угол наклона 40—45°) пакетов волнистого профиля

$$\zeta_c = (2{,}5\zeta' n + 0{,}4)\,\mathrm{ctg}^2\alpha; \qquad (4.57)$$

для вертикальных и горизонтальных пакетов уголкового профиля:

$$\zeta_c = (2{,}4n - 2)\,\mathrm{ctg}^2\alpha, \qquad (4.58)$$

для наклонных пакетов уголкового профиля

$$\zeta_c = (1{,}8n - 0{,}9)\,\mathrm{ctg}^2\alpha, \qquad (4.59)$$

где ζ' — коэффициент, который можно принять равным 0,20—0,25; n — число ступеней сепарации (количество секций в одной изогнутой пластине жалюзийного сепаратора), обычно $n=4$.

Два ряда вертикальных жалюзийных каплеуловителей при нагрузке по жидкости до 200 г/м³ обеспечивают остаточную концентрацию капель 0,03 г/м³ [4.52].

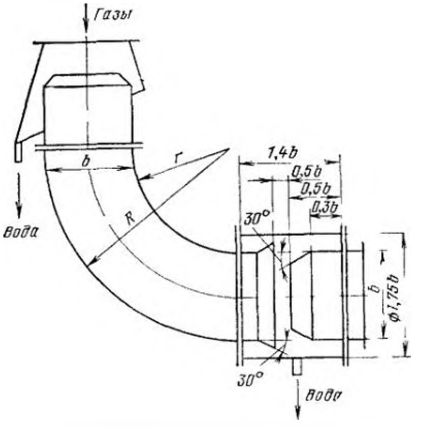


Рис 4.84. Коленный сепаратор

Центробежные каплеуловители получили наибольшее распространение в газоочистной технике. Основными достоинствами являются высокая эффективность и меньшая по сравнению с инерционными склонность к образованию отложений.

Коленный сепаратор (рис. 4.84) представляет собой «колено» прямоугольного сечения с отношением $R/r=2$. Для повышения эффективности устройства жидкость с внутренних стенок подводящего газохода отводится через специальный штуцер. Узел отвода отсепарированной в каплеуловителе жидкости выполнен в виде разрыва канала «колена» и представляет собой два последовательно установленных диффузора с углом раскрытия 60° [4.53].

Исследования сепаратора показали, что проскок ε при вертикальном подводе газов к вертикально расположенному «колену» меньше 0,01 (при удельном орошении m до 1,3 л/м³, медианном размере капель в пределах от 75 до 330 мкм и скорости газов в свободном сечении «колена» 10—18 м/с).

При горизонтальном подводе газов к «колену», расположенному в вертикальной плоскости, ε несколько возрастает с ростом как скорости газов, так и удельного орошения и при $m=1{,}2$ л/м³ и $w_г=18$ м/с составляет ~ 0,2. В сепараторе с горизон-

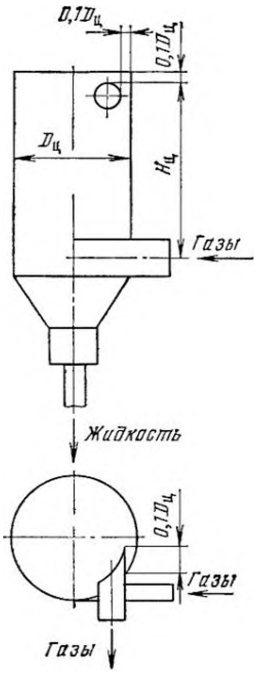


Рис. 4.85. Малогабаритный прямоточный циклон-каплеуловитель

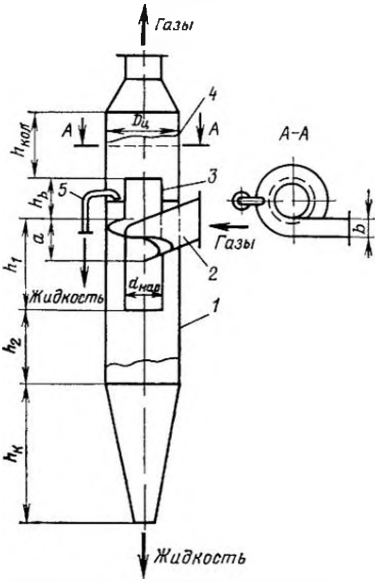


Рис. 4 86. Циклон ЦН-24 с разрывом в выхлопной трубе:

1 — корпус; *2* — устройство для ввода газов; *3* — выхлопная труба; *4* — верхняя камера циклона; *5* — устройство для отвода жидкости из верхней камеры циклона

тальным подводом газов надежное улавливание капель жидкости наблюдается только при скоростях газов до 10 м/с. С увеличением скорости газов эффективность падает за счет вторичного выноса жидкости.

Гидравлическое сопротивление коленного сепаратора изменяется в пределах от 80 Па при $w_г=10$ м/с до 1500 Па при $w_г=18$ м/с и при $m\leqslant1{,}1$ л/м³ практически не зависит от удельного орошения.

Коленные каплеуловители обычно применяются в качестве каплеуловителей-разгрузителей после труб Вентури перед циклонами-каплеуловителями.

Прямоточные циклоны-каплеуловители. В качестве каплеуловителей за трубами Вентури чаще всего устанавливаются циклоны. При установке прямоточных циклонов типа ЦВП (без подвода пленочного орошения и с уменьшенной высотой, см. рис. 4.36,*а*) скорость газов во входном патрубке принимается равной скорости газов на выходе из трубы Вентури (18—20 м/с). Высоту прямоточного циклона-каплеуловителя $H_ц$ (отсчитывается от оси входного патрубка) согласно [4.54] целесообразно принимать $(2{,}0—2{,}5)D_ц$, где $D_ц$ — диаметр циклона, м. Дальнейшее уменьшение высоты циклона приводит к снижению эффективности за счет выноса пленки жидкости, образующейся на его внутренней поверхности.

Уменьшить габаритные размеры прямоточного циклона и одновременно предотвратить унос жидкости в виде пленки удалось в сепараторе, разработанном НИИОГаз [4.32] и получившем название малогабаритный прямоточный циклон-каплеуловитель (рис. 4.85). Скорость газов в плане аппарата составляет 4,5—5,5 м/с; высота рабочей части аппарата $H_ц=1{,}5D_ц$; скорость газов в сечении входного патрубка ~ 25 м/с; отношение высоты входного патрубка к ширине 3 : 1; отношение площадей выходного и входного патрубков 1,7. Остальные параметры аппарата могут быть определены из рис. 4.85. При нагрузке по жидкости до 0,5 л/м³ унос капель из сепаратора не превышает 0,07 г/м³.

НИИОГаз разработан типоразмерный ряд малогабаритных прямоточных каплеуловителей типа КЦТ на производительность по газам от 3100 до 84 000 м³/ч, включающий 13 типоразмеров циклонов диаметром 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2 и 2,4 м.

В качестве каплеуловителей могут быть использованы циклоны ЦН-24, ЦН-15, ЦН-11 (см. раздел 2). Для предотвращения выноса жидкости из циклона в виде пленки применяются циклоны с разрывом в выхлопной трубе (рис. 4.86).

Ниже приведены соотношения элементов циклона ЦН-24 с разрывом в выхлопной трубе в долях от диаметра $D_ц$;

$a=1{,}11D_ц$; $h_1=1{,}7D_ц$; $h_{кол}=1{,}2D_ц$; $h_b=0{,}8D_ц$; $b=0{,}2D_ц$; $d_{нар}=0{,}6D_ц$; $h_к=2D_ц$; $h_2=0{,}6D_ц$. Диаметр сливного отверстия циклона не рекомендуется принимать меньше $0{,}15D_ц$.

В некоторых случаях для предотвращения выноса пленки к выхлопной трубе крепят коническую «юбку» (рис. 4.87).

Помимо центробежных каплеуловителей выносного типа, к которым относятся циклоны, в последнее время получают распространение центробежные сепараторы, непосредственно размещаемые в аппарате, — встроенные каплеуловители. На рис. 4.88 и 4.89 показаны сепараторы с цилиндрическим и коническим центробежными завихрителями [4.32, 4.52]. Соотношения размеров отдельных элементов центробежных завихрителей приводятся ниже:

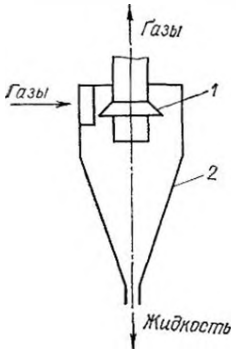


Рис. 4.87. Циклон-каплеуловитель с конической «юбкой»:
1 — «юбка»; 2 — корпус циклона

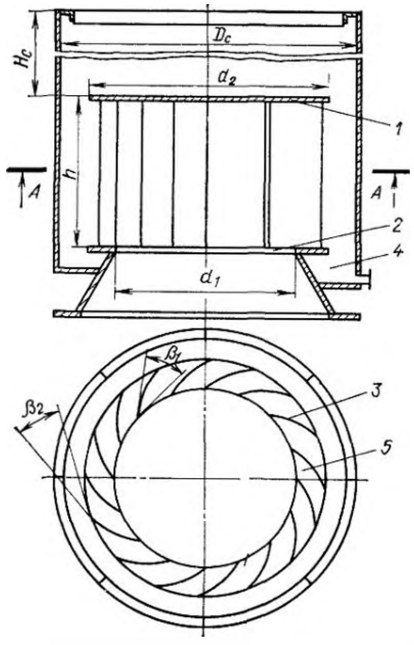


Рис. 4.88. Центробежный каплеуловитель с цилиндрическим завихрителем:
1 — диск; 2 — кольцо; 3 — лопатки; 4 — карман; 5 — канал

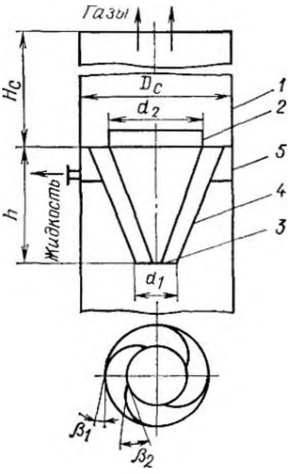


Рис. 4.89. Центробежный каплеуловитель с коническим завихрителем:
1 — корпус; 2 — кольцо; 3 — диск; 4 — лопатки; 5 — карман

Геометрические параметры	Цилиндрический завихритель	Конический завихритель
h/d_1	0,7	6,0
d_2/D_c	0,6	0,85
d_1/D_c	0,5	0,20
d_2/d_1	1,25	4,25
H_c/D_c	До 1,5	2,00
β_1	50°	34°
β_2	0°	10°
Число лопаток, шт.	До 18	18

Оптимальная скорость газов в свободном сечении цилидрического завихрителя 5 м/с, конического 12—18 м/с.

Отвод жидкости из сепараторов осуществляется через сливные патрубки, расположенные в нижней части сепаратора, тангенциально и навстречу газовому потоку. Скорость истечения жидкости в сливных патрубках принимается равной 0,2—0,3 м/с.

При большой производительности по газам применяется батарейная компоновка конических завихрителей из элементов диаметром 500 мм.

Гидравлическое сопротивление центробежных сепараторов может быть определено по формуле (4.56). Ниже приводятся значения коэффициентов гидравлического сопротивления центробежных сепараторов:

Тип сепаратора	Величина ζ_c (относительно скорости газов $w_г$ в плане аппарата)
Циклон ЦН-24 с разрывом в выхлопной трубе	70
Прямоточный циклон (типа ЦВП)	30
Малогабаритный прямоточный циклон (типа КЦТ)	18
Центробежный каплеуловитель:	
с цилиндрическим завихрителем	4,7
с коническим завихрителем	3,5—4,0

Центробежные каплеуловители при работе в оптимальном режиме обеспечивают остаточное содержание капель в газах 60—100 мг/м³.

4.13. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

Общий расход энергии на обработку определенного объема газов в единицу времени (суммарная энергия контакта или, иначе, соприкосновения двух фаз: газ — жидкость) при энергетическом методе расчета включает в общем случае три составляющие: энергию газового потока, характеризующую степень турбулизации газожидкостного потока в аппарате, энергию жидкостного потока, характеризующую степень диспергирования жидкости, и механическую энергию вращающихся элементов конструкции, проявляющуюся у динамических газопромывателей.

Общий расход энергии в мокрых пылеуловителях больше суммарной энергии соприкосновения, так как включает потери на трение в газоходах, вентиляторах, насосах и т. д. В затраты энергии соприкосновения не должны входить затраты энергии, идущие на создание движения газового потока.

Затраты энергии на осуществление мокрой очистки газов от пыли (энергия соприкосновения), выражаемые обычно в кДж/1000 м³ газов, определяются по формуле

$$K_ч = \Delta p_{ап} + p_ж \frac{Q_ж}{Q_г} + \frac{N_м}{Q_г}, \quad (4.60)$$

где $\Delta p_{ап}$ — гидравлическое сопротивление аппарата, Па; $p_ж$ — напор распыливаемой жидкости, Па; $N_м$ — мощность вращающегося механизма, расходуемая на контактирование газов с жидкостью, Вт; $Q_ж$ и $Q_г$ — расходы жидкости и газа соответственно, м³/с (При применении скруббера Вентури $\Delta p_{ап}$ включает в себя гидравлическое сопротивление трубы Вентури и каплеуловителя.)

Влияние на $K_ч$ каждого слагаемого в правой части выражения (4.60) зависит от типа аппарата. Так, в обычном скруббере Вентури решающая роль принадлежит гидравлическому сопротивлению аппарата, в то время как в эжекторных аппаратах — давлению распыла жидкости. Кроме того, в эжекторном скруббере подаваемая жидкость не только образует поверхность осаждения, но и является дополнительным источником энергии, расходуемой на движение газового потока. Эта часть энергии не должна включаться в $K_ч$. То же самое происходит в динамических газопромывателях, в которых необходимо учитывать третье слагаемое. Величина $K_ч$ учитывает способ ввода жидкости в аппарат, диаметр капель, а также все свойства жидкости, включая вязкость и поверхностное натяжение. Зависимость между степенью очистки газов и затратами энергии выражается формулой

$$\eta = 1 - \exp(-BK_ч^{\varkappa}), \quad (4.61)$$

где B, $\varkappa$ — константы, определяемые дисперсным составом пыли.

В интервале высоких значений коэффициента очистки (0,98—0,99) изменения η малоощутимы, поэтому в рассматриваемом случае часто используется понятие числа единиц переноса, аналогичное применяемому в технологических процессах, связанных с тепло- и массообменом.

Число единиц переноса находят по формуле

$$N_ч = \ln \frac{1}{1-\eta}. \quad (4.62)$$

Из (4.61) и (4.62) следует:

$$N_ч = BK_ч^{\varkappa}. \quad (4.63)$$

Значения B и $\varkappa$ зависят от вида улавливаемой пыли и определяются экспериментально и для некоторых пылей и туманов приведены в табл. 4.18 [4.2, 4.32].

Расчет скруббера Вентури энергетическим методом приведен на примере улавливания сажи в процессе электрокрекинга метана.

Исходные данные:

массовый расход крекинг-газов, подлежащих очистке, $G_г = 2$ кг/с;

температура газов перед скруббером $t'_г = 35°C$,

плотность газов $\rho_0 = 0{,}51$ кг/м³ (при нормальных условиях);

концентрация сажи на входе в скруббер $c_1 = 0{,}3$ г/м³,

необходимая концентрация сажи на выходе из скруббера $c_2 = 0{,}015$ г/м³;

абсолютное давление газов перед скруббером $p'_г = 200$ кПа;

температура осветленной воды, поступающей на орошение, $t'_ж = 30°C$;

напор воды $p_ж = 300$ кПа;

Таблица 4.18. **Параметры B и x для некоторых пылей**

Вид пыли или тумана	B	x
Конвертерная пыль (при продувке кислородом сверху)	$9{,}88\cdot10^{-2}$	0,4663
Тальк	0,206	0,3506
Туман фосфорной кислоты	$1{,}34\cdot10^{-2}$	0,6312
Вагранoчная пыль	$1{,}355\cdot10^{-2}$	0,6210
Колошниковая (доменная) пыль	$6{,}61\cdot10^{-3}$	0,891
Пыль известковых печей	$6{,}5\cdot10^{-4}$	1,0529
Пыль, содержащая окислы цинка, из печей, выплавляющих латунь	$2{,}34\cdot10^{-2}$	0,5317
Шелочной аэрозоль из известковых печей	$5{,}53\cdot10^{-5}$	1,2295
Аэрозоль сульфата меди	$2{,}14\cdot10^{-4}$	1,0679
Дурнопахнущие вещества мыльных фабрик	$1{,}09\cdot10^{-5}$	1,4146
Пыль мартеновских печей, работающих на дутье, обогащенном кислородом	$1{,}565\cdot10^{-6}$	1,619
Пыль мартеновских печей, работающих на воздушном дутье	$1{,}74\cdot10^{-6}$	1,594
Пыль из томасовского конвертера	0,268	0,2589
Пыль, образующаяся при выплавке 45% ферросилиция в закрытых электропечах	$2{,}42\cdot10^{-5}$	1,26
Пыль, образующаяся в печах производства целлюлозы	$4\cdot10^{-4}$	1,05
Производство черного щелока:		
обработка предварительно увлажненных газов	$1{,}32\cdot10^{-3}$	0,861
обработка сухих газов	$9{,}3\cdot10^{-4}$	0,861
Частицы поташа из МГД-установок открытого цикла	0,016	0,554
Пыль, образующаяся при выплавке силикомарганца в закрытых электроферросплавных печах	$6{,}9\cdot10^{-3}$	0,67
Пыль коалинового производства	$2{,}34\cdot10^{-4}$	1,115
Улавливание сажи, образующейся при электрокрекинге метана	10^{-5}	1,36
Возгоны свинца и цинка из шахтных печей	$6{,}74\cdot10^{-3}$	0,4775
Пыль дымовых газов карбидной печи	$0{,}823\cdot10^{-3}$	0,914

Продолжение табл. 4.18

Вид пыли или тумана	B	x
Пыль закрытой печи, выплавляющей углеродистый феррохром	$6{,}49\cdot10^{-5}$	1,1
Зола дымовых газов ТЭЦ (пылевидное сжигание многозольных углей)	$4{,}34\cdot10^{-3}$	0,3
Соли натрия из газов, образующихся при сжигании сточных вод	$0{,}21\cdot10^{-5}$	1,515
Пыль печи КС в производстве калийных удобрений	$90{,}5\cdot10^{-11}$	2,92
Пыль, выносимая из циклонов, в производстве фосфорных удобрений	0,12	0,454

содержание взвеси в осветленной воде $c_ж = 50 \div 60$ мг/кг.

Требуется определить:

геометрические параметры трубы Вентури и каплеуловителя;

сопротивление скруббера Вентури Δp;

расход воды на орошение трубы Вентури $G_ж$.

Расчет целесообразно вести в следующем порядке.

1. Выбираем, учитывая небольшую производительность аппарата по очищаемым газам и высокие требования к эффективности очистки, конструкцию скруббера Вентури, состоящую из трубы-распылителя, выполненной в виде трубы Вентури (см. рис. 4.52), и малогабаритного прямоточного циклона-каплеуловителя (см. рис. 4.85). Орошение трубы Вентури осуществляется через центробежную форсунку (см. рис. 4.75).

2. Эффективность аппарата

$$\eta = \frac{c_1 - c_2}{c_1} = 0{,}916,$$

и число единиц переноса

$$N_ч = \ln\frac{1}{1-\eta} = 2{,}47.$$

3. Уравнение энергетической зависимости для данного процесса согласно табл. 4.18

$$N_ч = 10^{-5} K_ч^{1,36},$$

откуда удельная энергия, затрачиваемая на пылеулавливание,

$$K_ч = 9340 \text{ кДж/1000 м}^3 \text{ газов}.$$

4. Затраты энергии $K_ч$ для скруббера Вентури выражаются уравнением

$$K_ч = \Delta p_{тр} + \Delta p_{кап} + p_ж m,$$

где $\Delta p_{тр}$ — гидравлическое сопротивление трубы Вентури, Па; $\Delta p_{кап}$ — гидравличе-

ское сопротивление каплеуловителя, Па; m — удельное орошение трубы Вентури, м³/м³.

5. Удельное орошение трубы Вентури, учитывая большое значение $K_ч$, принимается $m=10^{-3}$ м³/м³.

6. Плотность крекинг-газов на входе в скруббер

$$\rho'_г=\frac{273}{10,1\cdot10^4(273+t'_г)}=0,893 \text{ кг/м}^3.$$

7. Объемный расход газов, поступающих в скруббер,

$$Q'_г=\frac{G_г}{\rho'_г}=2,24 \text{ м}^3/\text{с}.$$

8. Расход орошающей воды

$$G_ж=Q'_г m\rho_ж=2,24 \text{ кг/с}.$$

9. Гидравлическое сопротивление скруббера Вентури

$$\Delta p=\Delta p_{тр}+\Delta p_{кап}=K_ч-p_ж m=9040 \text{ Па}.$$

10. Охлаждение насыщенных газов в скруббере Вентури происходит не более чем на 1—2°С. Поэтому без большой погрешности принимаем температуру крекинг-газов на выходе из скруббера $t''_г=34$°С.

11. Плотность крекинг-газов на выходе из скруббера

$$\rho''_г=\frac{1273(\rho'_г-\Delta p)}{10,1\cdot10^4(273+t''_г)}=0,89 \text{ кг/м}^3.$$

12. Объемный расход газов на выходе из скруббера

$$Q''_г=\frac{G_г}{\rho''_г}=2,25 \text{ м}^3/\text{с}.$$

13. Скорость газов в сечении прямоточного циклона-каплеуловителя $w_г$ согласно рекомендациям, приведенным в § 4.12, принимаем 4,5 м/с.

14. Диаметр циклона-каплеуловителя

$$D_ц=1,13\sqrt{Q''_г/w_г}=0,8 \text{ м}.$$

В соответствии с типоразмерным рядом, разработанным на каплеуловители, принимаем диаметр циклона равным 800 мм. Остальные геометрические параметры каплеуловителя могут быть рассчитаны на основании соотношений, приведенных в § 4.12.

15. Гидравлическое сопротивление циклона-каплеуловителя согласно формуле (4.56)

$$\Delta p_{кап}=\zeta_c w^2_г\rho''_г/2=170 \text{ Па}.$$

16. Гидравлическое сопротивление трубы Вентури

$$\Delta p_{тр}=\Delta p-\Delta p_{кап}=8870 \text{ Па}.$$

17. Параметры трубы Вентури целесообразно рассчитывать по условиям выхода. Учитывая незначительное гидравлическое сопротивление циклона-каплеуловителя, плотность газов на выходе из трубы Вентури принимаем $\rho''_г$.

18. Коэффициент гидравлического сопротивления сухой трубы Вентури $\zeta_{сух}$ принимаем 0,15.

19. Коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий введение в трубу Вентури орошающей жидкости, согласно формуле (4.40) при $l_г=0,15d_э$

$$\zeta_ж=0,63\cdot0,15m^{-0,3}\approx0,75.$$

20. Скорость газов в горловине трубы Вентури

$$w_г=\sqrt{\frac{2\Delta p_{тр}}{\zeta_{сух}\rho''_г+\zeta_ж\rho_ж m}}=142 \text{ м/с}.$$

21. Диаметр горловины трубы Вентури

$$d_г=1,13\sqrt{Q''_г/w_г}\approx0,14 \text{ м}.$$

Воспользовавшись типоразмерным рядом (см. табл. 4.11), выбираем трубу Вентури с диаметром горловины 135 мм. Расчет геометрических параметров трубы Вентури проводится по вышеприведенным соотношениям (см. § 4.9).

4.14. СПОСОБЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАБОТЫ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

Использование эффекта конденсации. Одним из способов повышения эффективности мокрых пылеуловителей является использование эффекта конденсации, наблюдающегося при охлаждении газов, предварительно насыщенных водяными парами [4.2, 4.54].

Подготовка газов перед подачей их в мокрый пылеуловитель, работающий в конденсационном режиме, чаще всего осуществляется предварительным испарительным охлаждением запыленного газового потока. На орошение пылеуловителя, работающего в конденсационном режиме, необходимо подавать воду с возможно более низкой температурой.

Иногда увеличение влажности газов осуществляется подводом пара на входе в аппарат, но этот метод нельзя признать экономичным.

Применение поверхностно-активных веществ (смачивателей). Применение смачивателей не имеет существенного значения до тех пор, пока частицы не будут подведены к каплям за счет какого-нибудь механизма осаждения. Поэтому применение смачивателей могло бы быть полезным при улавливании крупных частиц, высокая эффективность осаждения которых в большинстве случаев в мокрых аппаратах может быть достигнута и без применения смачивателей. При осаждении же мелких частиц вся сложность задачи заключается в подводе их к капле или пленке жидкости, чему смачиватели способствоьать не могут. В связи с этим использование поверхностно-активных добавок возможно в низконапорных пылеулови-

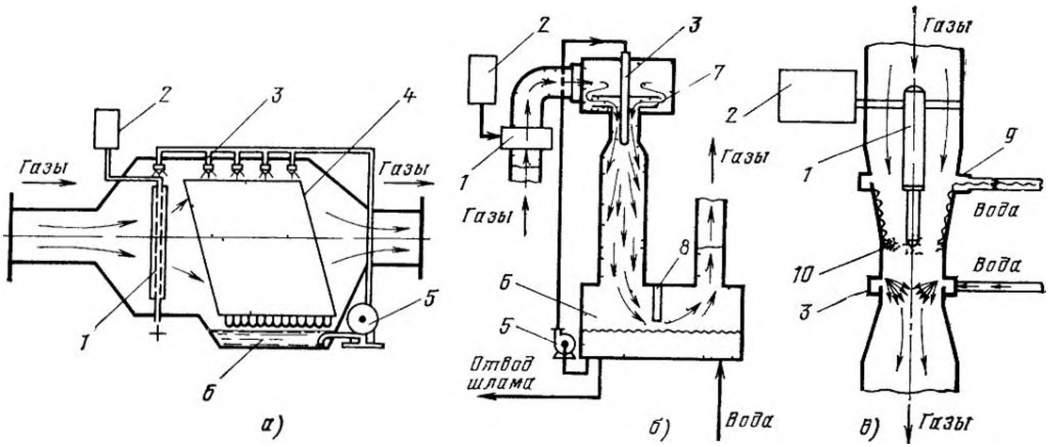


Рис 4 90 Конструкции электростатических скрубберов

а — на базе насадочного скруббера *б* — на базе эжекторного скруббера *в* — на базе скруббера Венту рн *1* — ионизатор *2* — высоковольтный источник *3* — форсунка *4* — насадка *5* — насос *6* — резервуар для воды, *7* — ударно отражательная плита *8* — каплеотбойник *9* — устройство для создания пленочного орошения *10* — электростатическое поле

телях, например в аппаратах барботажного типа, и не имеет смысла в высоконапорных аппаратах типа скруббера Вентури Следует также иметь в виду, что при очистке больших количеств газов применение смачивающих добавок может значительно усложнить и удорожить процесс

Предварительная электрическая зарядка частиц и капель орошающей жидкости Этот метод позволяет существенно увеличить эффективность мокрых аппаратов при улавливании частиц размером меньше 2—3 мкм Хотя теория осаждения взвешенных частиц на каплях при действии электрических зарядов [4 2, 4 55] разработана давно, практическое использование метода началось в последнее время

Наилучшие результаты при использовании метода электризации и мокром пылеулавливании достигается при разноименной зарядке частиц и капель орошающей жидкости В этом случае (при малых значениях относительной скорости частиц и капель) параметр осаждения частиц за счет электрических сил превосходит инерционный параметр ψ

На рис 4 90 приведены конструкции некоторых промышленных электростатических скрубберов [4 56] Электростатические скрубберы создаются на базе мокрых пылеуловителей различного типа насадочных, эжекционных, скрубберов Вентури На входе в каждый из них устанавливается высоковольтный ионизатор (зарядное устройство), на который, как правило, подается отрицательное напряжение в пределах от 15—20 до 50—70 кВ

В некоторых конструкциях электростатических скрубберов (рис 4 90,*а*) частицы, получившие отрицательный заряд, индуцируют заряды противоположного знака на нейтральных элементах насадки, каплях, пленках жидкости, в других (рис 4 90,*в*) индуцирование зарядов противоположного знака на каплях орошающей жидкости обеспечивается специальной конструкцией электрода ионизатора

При зарядке частиц в активном сечении ионизатора напряженность электрического поля составляет 10—12 кВ/см, что примерно в 3 раза больше, чем в обычном электрофильтре

По данным зарубежных источников промышленные электростатические скрубберы изготавливаются на производительность до 100 000 м³/ч, затраты энергии в них (включая ионизатор, подвод орошения, газодутьевое оборудование) составляют 10—20 МДж на очистку 1000 м³ газов В настоящее время НИИОГаз ведутся работы по созданию отечественной конструкции электростатического скруббера

Подогрев очищенных газов перед выводом в атмосферу Температура газов после аппаратов мокрой газоочистки обычно находится в пределах от 50 до 80°С Чаще всего газы насыщены влагой и содержат некоторое остаточное количество пыли, а возможно и газовых примесей (например, SO_2) В результате конденсации водяных паров это может привести к образованию отложений на лопастях дымососов, устанавливаемых за аппаратами мокрой очистки газов, к коррозии, вызывающей разрушение дымососов, стенок газоходов и дымовых труб, к образованию тумана на выходе из дымовых труб, являющегося причиной выпадения кислотных осадков Кроме того, высота

подъема влажных газов с низкой температурой невелика, вследствие чего ухудшается рассеивание вредных веществ, что может служить причиной превышения нормы приземной концентрации этих веществ (даже при соблюдении нормативов по их концентрации на выходе из дымовой трубы)

Для предотвращения подобных явлений

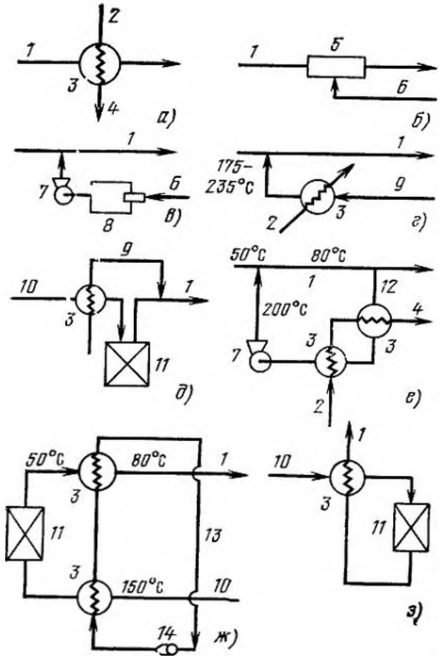


Рис 4 91 Возможные схемы подогрева очищенных газов·

1 — очищенный газ, *2* — пар, *3* — теплообменник *4* — конденсат, *5* — встроенная в газоход горелка *6* — топливо, *7* — вентилятор *8* — камера сжигания, *9* — атмосферный воздух *10* — горячий не очищенный газ, *11* — мокрый пылеуловитель, *12* — циркулирующий очищенный газ; *13* — циркулирующая жидкость с высокой теплоемкостью, *14* — насос

рекомендуется подогревать газы, очищенные в мокрых пылеуловителях, на 15—30°С [4 57] Возможные схемы подогрева очищенных газов показаны на рис 4 91. Наибольшее распространение получил способ подогрева очищенных газов, представленный на схеме 4 91,*д* [4 58]

4.15. СИСТЕМА ВОДОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ МОКРОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

Система водоснабжения оказывает не только существенное влияние на работу мокрых пылеуловителей, но и определяет в значительной степени экономичность применения в каждом конкретном случае мокрого метода очистки газов.

Недопустимость сброса загрязненных сточных вод в водоемы без предварительной очистки требует дополнительных затрат на оснащение оборотных систем водоснабжения и соответственно увеличивает стоимость мокрой газоочистки, делая ее соизмеримой со стоимостью других методов пылеулавливания, например с очисткой газов в рукавных фильтрах Поэтому на тех предприятиях, где имеется налаженная система оборотного водоснабжения, целесообразность применения мокрых пылеуловителей более очевидна, чем на предприятиях, где она отсутствует

В процессе использования в мокрой газоочистке вода может претерпевать следующие физические и химические изменения: загрязнение нерастворимыми взвешенными веществами, нагревание, насыщение газами, изменение концентрации солевого состава из-за растворения некоторых компонентов или всей уловленной пыли В результате этого возможно существенное изменение качества сточных вод по сравнению с качеством исходной воды Состав сточных вод и требования к воде, подаваемой на орошение газоочистных аппаратов, определяют методы обработки сточных вод в оборотном цикле водоснабжения

Наличие взвеси в орошающей аппарат воде до определенной концентрации не оказывает существенного влияния на эффективность захвата частиц пыли Однако с ростом количества взвеси в воде, особенно при улавливании гидрофобной пыли, может наступить момент, когда частицы пыли, располагаясь на поверхности капель, пленок жидкости, будут препятствовать проникновению вновь подводимых частиц пыли, отталкивая их С другой стороны, нормирование допустимого содержания взвеси в воде определяется надежностью работы орошающих устройств

Снижение эффективности мокрого пылеулавливания при работе на оборотной воде с большим содержанием взвеси может произойти за счет уноса брызг Последний оказывает особенно сильное влияние на эффективность при тонкой очистке газов с невысокой начальной концентрацией Зависимость между эффективностью мокрого пылеуловителя и содержанием взвеси в подаваемой на орошение аппарата воде может быть выражена уравнением

$$\eta = \eta_0 - \frac{L_б}{c_1} c_ж, \qquad (4.64)$$

где η_0 — эффективность пылеуловителя при орошении чистой водой, $L_б$ — унос брызг, кг/кг, c_1 — концентрация пыли в газах на входе в аппарат, кг/м³, $c_ж$ — концентрация пыли в воде, подаваемой на орошение, кг/м³

Большое влияние на эффективность улавливания оказывает унос брызг в системах с рециркуляцией жидкости, т е когда

на орошение аппарата подается одна и та же жидкость без промежуточного осветления. Рециркуляция позволяет в течение длительного времени работать без осветления жидкости. Такие системы особенно целесообразны, когда необходима высокая концентрация улавливаемых компонентов в отходящей промывной жидкости.

Допустимое содержание взвеси в оборотной воде, подаваемой на орошение газоочистных аппаратов, определяется надежностью работы оросителей. Кроме того, осветление воды в обороте должно предотвращать образование отложений в аппаратах газоочистки, трубопроводах и сооружениях самой системы водоснабжения. Образование отложений возможно не только за счет значительного содержания в оборотной воде взвеси, но и благодаря наличию в ней некоторых компонентов, например малорастворимых карбонатных соединений, которые в определенных условиях кристаллизуются на внутренней поверхности труб, аппаратов, оросительных устройств и т. п. При этом продукты кристаллизации являются цементирующим материалом, в роли инертного заполнителя выступают взвешенные вещества, примыкающие к поверхности кристаллов, особенно активной в момент их образования.

Подобный процесс представляет наибольшую опасность в трубопроводах малого диаметра, форсунках. Поэтому при наличии в оборотной воде компонентов, склонных к кристаллизации, необходимо увеличивать диаметры шламоотводящих труб, отказываться от форсунок с малым диаметром сопла, делать их легко заменяемыми и устанавливать по возможности меньшее количество вентилей, сужающих диаметр труб Но в этом случае необходимо предусмотреть в системе водоснабжения химическую обработку воды для стабилизации по тем компонентам, которые способствуют образованию твердых отложений.

Характер загрязнений оборотной воды может привести и к затруднениям другого порядка, связанным с коррозионным воздействием оборотной воды на элементы системы. В этом случае при проектировании систем водоснабжения и газоочистных аппаратов следует обращать внимание на выбор материалов и оборудования, устойчивых в данной среде, использовать по возможности защитные покрытия, а также предусматривать соответствующую обработку оборотной воды для снижения ее коррозионных свойств.

На рис. 4.92 приведена принципиальная схема оборотного водоснабжения, обслуживающая мокрый пылеуловитель. Система водоснабжения включает в себя осветлитель, в котором помимо очистки воды от взвеси может осуществляться и химическая обработка воды. Если в схеме газоочистки предусмотрено охлаждение газов и необходимо подавать на орошение аппаратов относительно холодную воду, осветленная оборотная вода может охлаждаться в вентиляторной градирне, в брызгальном бассейне или в поверхностном теплообменнике. При тонком распыливании жидкости для дополнительной очистки устанавливаются специальные фильтры (например, гравийные)

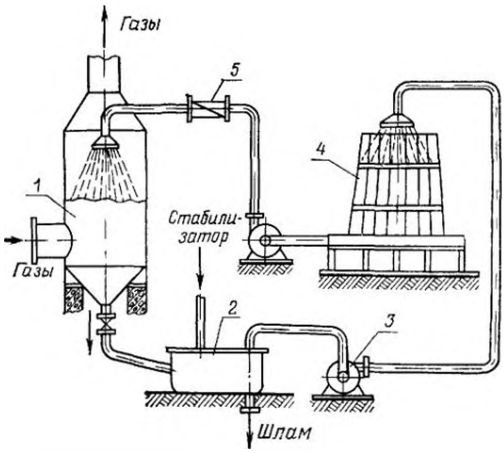


Рис 4 92. Схема оборотного водоснабжения мокрых пылеуловителей:

1 — пылеуловитель; 2 — отстойник; 3 — насос; 4 — холодильник; 5 — фильтр для очистки воды

Основным показателем, определяющим характеристику сточных вод и выбор типа и размеров сооружения для их осветления, является дисперсный состав частиц, содержащихся во взвеси. Если частицы достаточно крупные или легко укрупняются при добавке коагулянтов, осветление воды осуществляется в радиальных отстойниках или специальных прудах. Седиментационное осаждение без добавки коагулянтов обычно применимо к частицам, размер которых превышает 1 мкм В качестве коагулянтов могут быть использованы растворы хлорного железа, сернокислого железа, сернокислого алюминия, полиакриламида.

Очистка оборотной воды в отстойниках является наиболее экономичным способом осветления, к тому же их применение исключает абразивное воздействие частиц. Отстой из нижней части осветлителя откачивается шламовыми насосами в специальные шламовые отвалы, а иногда для окончательного обезвоживания пропускается предварительно через фильтр-прессы. К недостаткам рассмотренного способа осветления следует отнести большие площади отстойников, необходимые при осаждении мелких частиц, частичную утечку воды в грунт и ее потери за счет естественного испарения в атмосферу.

Если частицы, взвешенные в оборотной воде, представляют определенную ценность и должны быть утилизированы, обработка воды может быть осуществлена в непрерывно действующих фильтрах. В этом случае можно добиться почти полного обезвоживания отходов и значительно сократить производственные площади, но при этом возрастает стоимость обработки оборотной воды.

В последнее время для концентрирования твердых частиц в жидкости применяются гидроциклоны. Установка их обходится дешевле, чем фильтрующих аппаратов, и они не требуют больших площадей для размещения. Недостаток гидроциклонов заключается прежде всего в больших расходах энергии на обработку жидкости, а также в относительно высоком остаточном содержании частиц в осветленной жидкости.

Для осветления жидкости, содержащей взвеси особо мелких, субмикронных частиц, иногда применяются центрифуги. Их применение связано со значительными капитальными и эксплуатационными расходами, кроме того, они чувствительны к абразивному и коррозионному воздействию среды. Поэтому их использование ограничивается специальными случаями.

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ
ФИЛЬТРЫ

5.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Процесс очистки газов от твердых или жидких частиц с помощью пористых сред называется **фильтрацией**. Частицы, взвешенные в газовом потоке, осаждаются на поверхности или в объеме пористых сред за счет броуновской диффузии, эффекта касания (зацепления), инерционных, электростатических и гравитационных сил [5.1—5.4].

Броуновская диффузия, или тепловое движение частиц, вызванное столкновениями их с газовыми молекулами, является преобладающим механизмом осаждения частиц диаметром менее 0,5 мкм.

Эффективность диффузионного осаждения частиц может быть представлена в виде зависимости

$$\eta_д \approx \frac{A}{(d_ч w d_в)^{2/3}}, \qquad (5.1)$$

где $d_в$ — диаметр волокна, зерна или другого элемента, образующего пористую перегородку, м; w — скорость газа, м/с; $d_ч$ — диаметр частиц, м; A — коэффициент пропорциональности.

Эффект касания (зацепления) проявляется всякий раз, когда траектории движения частиц проходят над поверхностью волокон, зерен или других элементов, образующих пористую перегородку, на расстоянии, равном радиусу частицы или меньшем его. Если размеры пор фильтра меньше диаметра частиц, то происходит обычное отсеивание. Ситовый эффект является частным случаем эффекта касания.

Параметром, определяющим процесс осаждения частиц за счет эффекта касания, является отношение размеров частиц и элементов, образующих пористую перегородку: $d_ч/d_в$ для волокон и $d^2_ч/d^2_з$ для зерен. Эффективность осаждения частиц при этом не зависит от скорости потока.

Инерционное осаждение имеет место, если масса частицы и скорость движения настолько значительны, что частица не может полностью следовать по линии тока газа, огибающего препятствие.

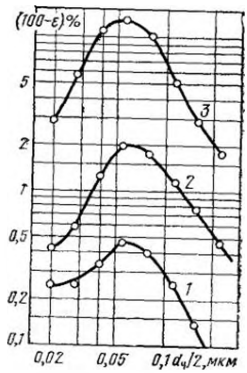


Рис. 5.1. Зависимость коэффициента проскока частиц от их размера для фильтра из волокон с диаметром 0,86 мкм при различных скоростях фильтрации (см/с):
1 — 2,5; *2* — 5,0; *3* — 20

Эффективность инерционного осаждения частиц может быть найдена в виде функциональной зависимости от числа Стокса (см. § 1.3).

Электрическое осаждение происходит при наличии либо зарядов любого знака на фильтрующих материалах или частицах либо разноименных зарядов одновременно на тех и других.

В зависимости от размеров частиц, волокон или зерен и скорости фильтрации один