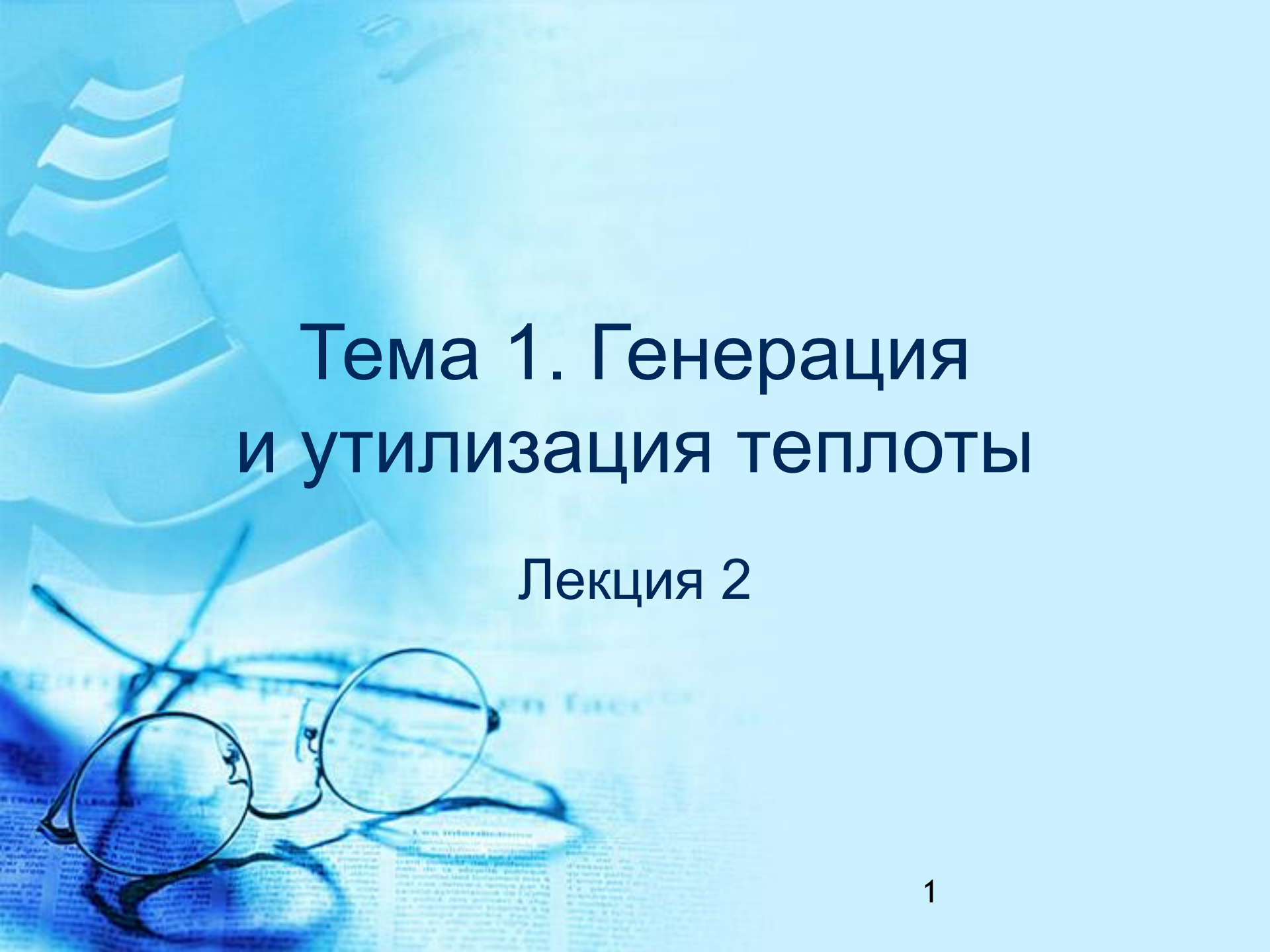




Тема 1. Генерация и утилизация теплоты

Лекция 2

§ 6. Методы использования вторичных энергоресурсов. Способы утилизации теплоты дыма

Высокотемпературные технологические процессы металлургии имеют относительно низкую эффективность использования теплоты и выделяют значительное количество так называемых вторичных энергоресурсов (ВЭР):

- 1) топливные (например, коксовый и доменный газы);
- 2) тепловые;
- 3) ВЭР избыточного давления.

2-ая группа включает в себя:

- 1) теплоту, уносимую дымом;
- 2) теплоту воды, охлаждающей элементы печей;
- 3) физическое тепло технологического продукта;
- 4) физическое тепло металлургических шлаков.

Возможную выработку ВЭР определяют по формуле:

$$Q = (G_1 \cdot H_1 - G_2 \cdot H_2) \cdot B \cdot (1 - g), \text{ кДж/год,}$$

где G_1 и G_2 - количество энергоносителя на выходе из агрегата - источника ВЭР и из утилизационной установки, кг/год ($\text{м}^3/\text{год}$);

H_1 и H_2 - энтальпия энергоносителя на выходе из агрегата - источника ВЭР и из утилизационной установки, кДж/кг (кДж/ м^3);

B - коэффициент, учитывающий несоответствие режима и числа часов работы утилизационной установки и агрегата - источника ВЭР;

g - коэффициент потерь теплоты в окружающую среду в утилизационной установке и на тракте между источником ВЭР и утилизационной установкой.

Различают 4 основных направления использования ВЭР:

- 1) топливное;
- 2) тепловое - непосредственно в последующей технологической операции или в утилизационной установке;
- 3) силовое - использование механической или электрической энергии, получаемой в утилизационной установке за счет ВЭР;
- 4) комбинированное.

Возможны 2 метода утилизации теплоты дыма:

- 1) в теплообменных устройствах - с возвратом отобранной у дыма теплоты обратно в металлургическую печь;
- 2) в теплосиловых котельных и турбинных установках - без возврата теплоты в печь.

Эффективность использования теплоты дыма оценивают *степенью утилизации теплоты*

$$R = \frac{H_c}{H_d},$$

где H_c и H_d - энтальпия подогретой среды и покидающего печь дыма, кДж/ч или кДж/период.

По величине R определяют экономию топлива:

$$\eta = \frac{\frac{H_c}{H'_d}}{1 - (1 - R) \cdot \frac{H_d}{H'_d}} \cdot 100 \%,$$

где H'_d - энтальпия дыма при температуре горения.

Регенератор - теплообменный аппарат, в котором дым нагревает керамическую насадку, а в следующий период нагреваемая среда проходит через насадку, отбирая от нее теплоту. Существует оптимальное время между перекидкой клапанов, т.е. между следующими друг за другом изменениями поступления газообразных сред.

Достоинство регенераторов - способность нагревать воздух и газообразное топливо до высокой температуры, их недостатки:

- 1) не могут обеспечить постоянную температуру подогрева;
- 2) негерметичность;
- 3) при нагреве горючего газа в момент перекидки клапанов его объем, находящийся в регенераторе, теряется вместе с дымом;
- 4) большие объем и масса регенераторов.

Более совершенен рекуперативный принцип утилизации теплоты.

Рекуператор - теплообменник непрерывного действия, в котором передача теплоты от дыма к нагреваемой среде осуществляется через разделяющую эти два потока газонепроницаемую стенку.

В зависимости от материала разделительной стенки рекуператоры бывают металлические и керамические.

Недостатки рекуператоров:

- 1) низкая жаростойкость металлических рекуператоров;
- 2) низкая газоплотность керамических рекуператоров.

§ 7. Конструкции и особенности тепловой работы регенераторов

Доменные воздухонагреватели называют аппаратами Каупера в честь Эдуарда Каупера - английского инженера и изобретателя.

Наиболее распространены доменные воздухонагреватели с внутренней боковой камерой горения, где сжигается доменный газ, продукты сгорания которого, проходя по насадке сверху вниз, нагревают ее. Воздух проходит в обратном направлении.

Обычно применяют воздухонагреватели с трех- и четырехъярусной насадкой. Для поддержания теплоотдачи на должном уровне, сечения для прохода газов, называемые ячейками, как правило, имеют наибольший размер в верхнем ярусе; а, чем ниже ярус, тем меньше его ячейки.

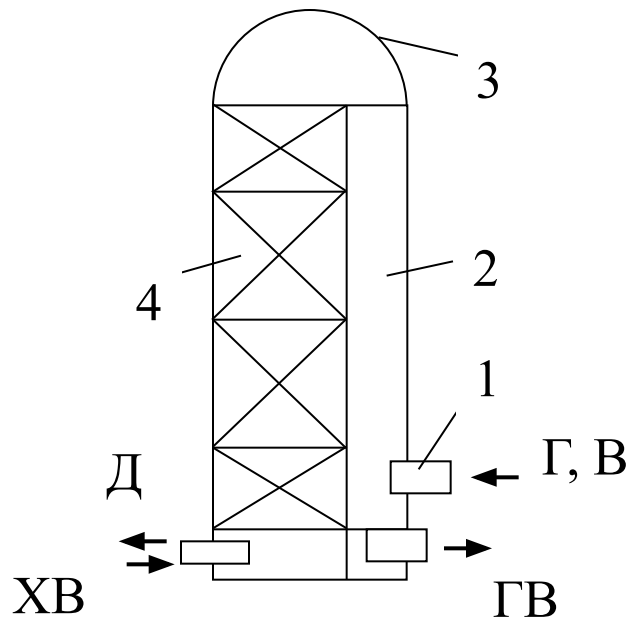


Эдуард Альфред КАУПЕР (1819-1893) известен как изобретатель воздушнонагревательного аппарата для доменных печей (1857), двухцилиндровой паровой машины (1857), колес со стальными спицами и резиновыми шинами (1868), пишущего электромагнитного телеграфа (1879).

С 15 лет он учился в Лондоне у механика. Закончив обучение, он устроился на работу в городе Бирмингем (1846). Там он быстро освоился, нашел хорошую работу и возможность экспериментировать. Каупер являлся членом Института железа и стали (Великобритания).

Цельнометаллические колеса были мукой для велосипедистов того времени - крутились они тяжело, скорость давали невысокую. Колеса с деревянными спицами были легче и быстрходнее, но часто ломались. Каупер ездил на велосипеде и, сам страдая от этих недостатков, занялся модернизацией спиц. Оптимальным решением оказалась толстая проволока. Механик протянул ее от центра колеса к ободу и обратно. Колесо сделалось легким, подвижным и при этом прекрасно держало баланс. На современных велосипедах эта конструкция применяется почти без изменений.

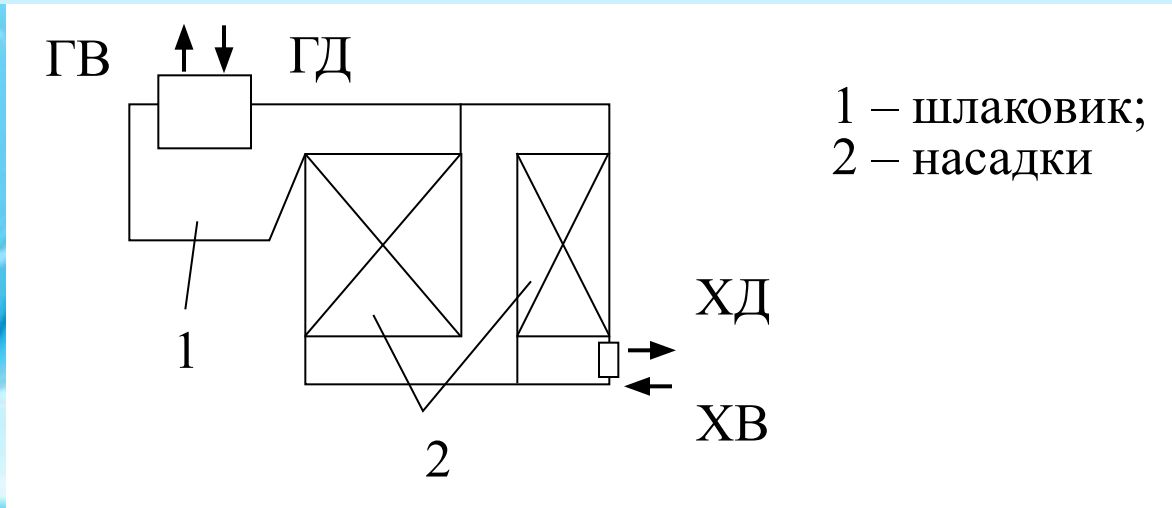




Аппарат
Каупера:
1 – горелка;
2 – камера
горения;
3 – купол;
4 – насадка

Купол, камеру горения, верх насадки и стен рекуператора выполняют из высокоглиноземистого (огнеупорного кирпича, остальное - из шамота. Верхний, наиболее высокотемпературный ярус насадки выполняют из малоразрыхляющегося динаса, второй ярус сверху - из каолинового огнеупора, остальную часть насадки - из шамота. Воздух нагревается до 1150-1200 °С.

Регенераторы мартеновских печей работают в условиях высокой температуры (дым на входе в рекуператор имеет температуру 1500-1600 °С) и интенсивного воздействия шлаковой пыли. Поскольку эти регенераторы расположены ниже уровня земли, то их обычно выполняют двухоборотными, т.е. подогреваемая среда в них дважды разворачивается на 180°.



Первую по ходу дыма (горячую) камеру выполняют из форстерита, хорошо сопротивляющегося воздействию оксидов железа, вторую - из шамота. Воздух и газ нагревается до 1100-1250 °С (природный газ не подогревают).

§ 8. Общая теория и расчет рекуператоров

Металлические рекуператоры имеют более высокий коэффициент теплопередачи и меньший вес по сравнению с керамическими, благодаря чему их можно размещать над печами. Для их изготовления применяют обыкновенные углеродистые стали, а также стали и чугуны, легированные *Cr*, *Si*, *Al*.

Металлические рекуператоры подразделяются на **радиационные** (работающие при температуре более 800 °С, когда основное количество теплоты передается излучением) и **конвективные**.

Поскольку при данном составе продуктов сгорания и данной температуре передача теплоты излучением пропорциональна эффективной длине луча или толщине излучающего слоя газа, в радиационных рекуператорах каналы для прохода дыма имеют большее сечение.

Наиболее распространены радиационные рекуператоры двух конструкций - *щелевые* и *трубчатые*.

Щелевой состоит из двух соосных цилиндрических поверхностей; внутри проходит дым, а в зазоре между цилиндрическими поверхностями - нагреваемая среда. На обоих концах рекуператора имеются кольцевые коробки, служащие для подвода и отвода нагреваемой среды.

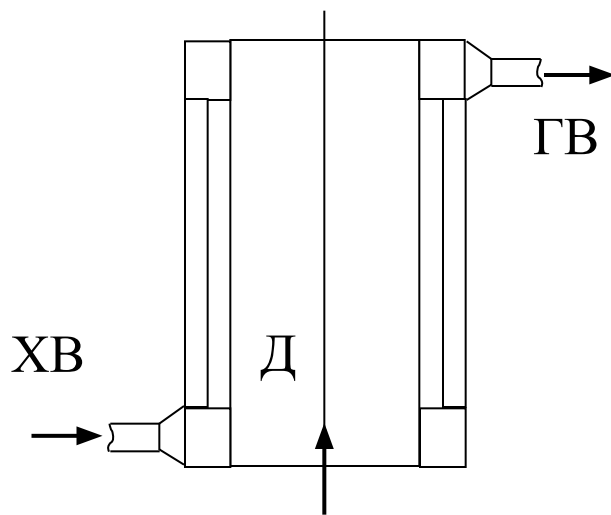


Схема
прямоточного
щелевого
рекуператора

Конвективные рекуператоры по конструкции могут быть *трубчатыми* и *игольчатыми*. Конструкции трубчатых конвективных рекуператоров многообразны. Часто применяют рекуператор с прямыми трубами, в которых воздух проходит между трубами, а дым - внутри труб. На пути воздуха может быть несколько поворотов, что осуществляется при помощи воздушных переточных коробок.

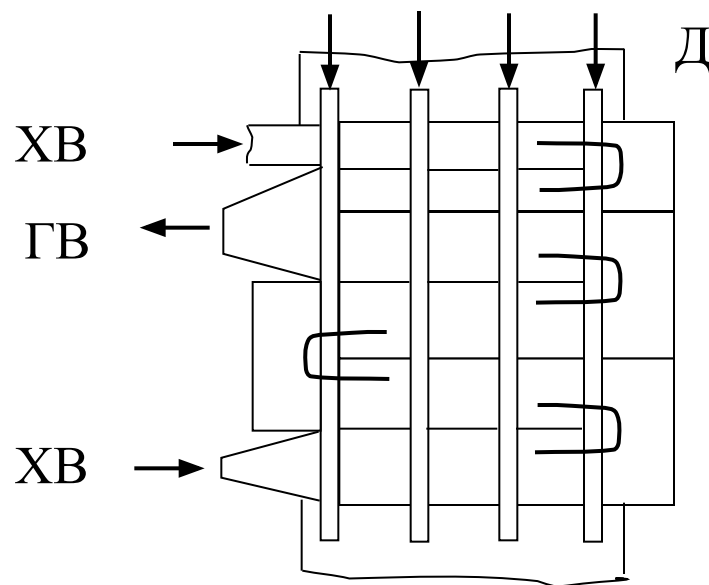
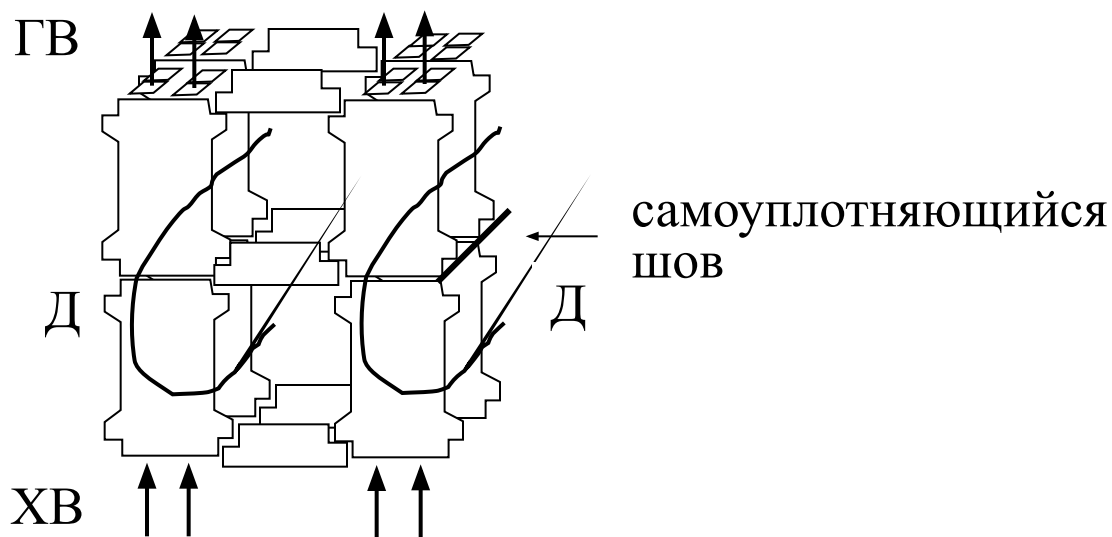


Схема четырехходового рекуператора с перекрестным током и подачей воздуха для охлаждения верхней трубной доски

Керамические рекуператоры обычно делают из шамота. Одна из конструкций состоит из фасонных керамических блоков с 4 отверстиями для прохода воздуха и выступов, на которые укладываются керамические плитки для образования дымовых каналов. Воздух движется снизу вверх по каналам внутри блоков; дым направляется между блоками, совершая петлеобразное движение и омывая их с двух сторон.



Рекуператор работает в условиях, близких к стационарному тепловому состоянию. Полное количество теплоты, передаваемой в рекуператоре

$$Q = k \cdot \Delta t_{\text{ср}} \cdot F, \text{ Вт},$$

где k - суммарный коэффициент теплопередачи от дыма к нагреваемой среде, Вт/(м² · К);

$\Delta t_{\text{ср}}$ - средняя (по всей поверхности теплообмена) разность температуры между дымом и нагреваемой средой, К;

F - площадь поверхности нагрева, через которую происходит передача теплоты, м².

Для плоской стенки

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{д}}} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}} ,$$

где $\alpha_{\text{д}}$ и $\alpha_{\text{в}}$ - суммарные коэффициенты теплоотдачи на дымовой и воздушной стороне, Вт/(м² · К);

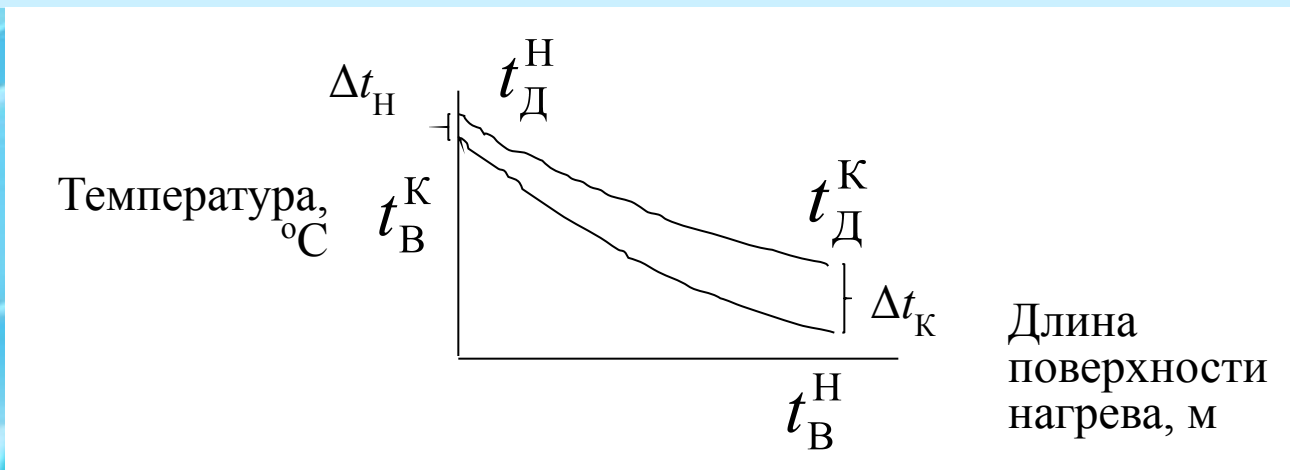
s - толщина разделительной стенки, м;

λ - коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м · К).

В металлических рекуператорах, в которых толщина стенки мала, а коэффициент теплопроводности велик, можно пренебречь тепловым сопротивлением стенки, и тогда

$$k = \frac{\alpha_{\text{д}} \cdot \alpha_{\text{в}}}{\alpha_{\text{д}} + \alpha_{\text{в}}} .$$

Движение газообразных сред в рекуператоре может быть *противоточным*, *перекрестным* и *прямоточным*. При противоточном движении конечная температура воздуха t_B^K может быть выше конечной температуры дыма t_D^K , но, вместе с тем, возрастает опасность перегрева стенки рекуператора:



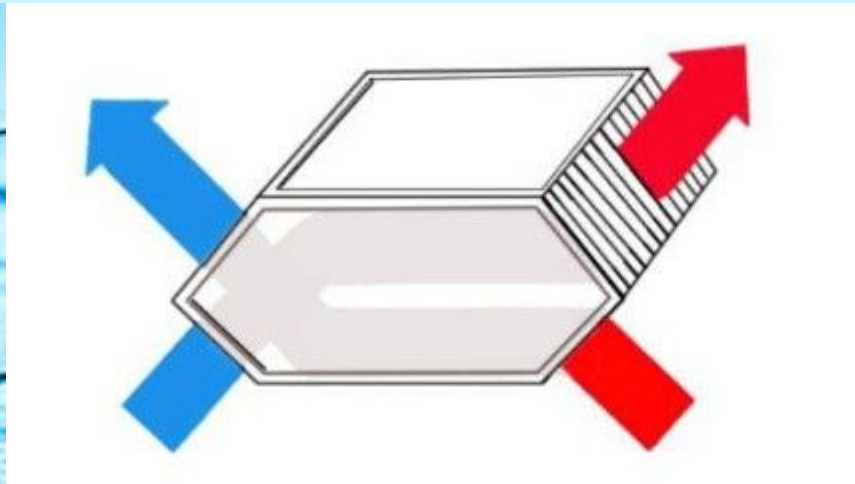
Температуру стенки металлического рекуператора определяют по формуле

$$t_{CT} = \frac{\alpha_D \cdot t_D + \alpha_B \cdot t_B}{\alpha_D + \alpha_B}.$$

Целью расчета рекуператора является определение его размеров и площади поверхности теплообмена, обеспечивающих подогрев требуемого количества воздуха (газа) до необходимой температуры.

Исходными данными для расчета в этом случае являются расходы воздуха и дыма V_B и V_D , $\text{м}^3/\text{с}$, их начальная температура t_B^H и t_D^H , и конечная температура нагрева воздуха t_B^K .

Иногда решают обратную задачу, т.е. полагают, что F известна, а t_B^K - нет.



Алгоритм расчета рекуператора:

1. Составляют тепловой баланс. Например, для газоплотных рекуператоров с учетом 10 % потерь теплоты в окружающую среду

$$0,9 \cdot V_{\text{Д}} \cdot (c_{\text{Д}}^{\text{Н}} \cdot t_{\text{Д}}^{\text{Н}} - c_{\text{Д}}^{\text{К}} \cdot t_{\text{Д}}^{\text{К}}) = V_{\text{В}} \cdot (c_{\text{В}}^{\text{К}} \cdot t_{\text{В}}^{\text{К}} - c_{\text{В}}^{\text{Н}} \cdot t_{\text{В}}^{\text{Н}}),$$

где $c_{\text{Д}}^{\text{Н}}$ и $c_{\text{Д}}^{\text{К}}$ ($c_{\text{В}}^{\text{Н}}$ и $c_{\text{В}}^{\text{К}}$) - соответственно, удельные теплоемкости дыма (воздуха) при начальной и конечной температуре, кДж/(м³ · К).

Уравнение теплового баланса позволяет определить $c_{\text{Д}}^{\text{К}}$ и количество теплоты Q , передаваемое через поверхность нагрева (правая часть уравнения).

2. Определяют среднелогарифмическую разность температуры

$$\Delta t_{\text{CP}} = \frac{\Delta t_{\text{H}} - \Delta t_{\text{K}}}{\ln \left(\frac{\Delta t_{\text{H}}}{\Delta t_{\text{K}}} \right)},$$

где для противотока

$$\Delta t_{\text{H}} = t_{\text{Д}}^{\text{H}} - t_{\text{В}}^{\text{K}}, \quad \Delta t_{\text{K}} = t_{\text{Д}}^{\text{K}} - t_{\text{В}}^{\text{H}}.$$

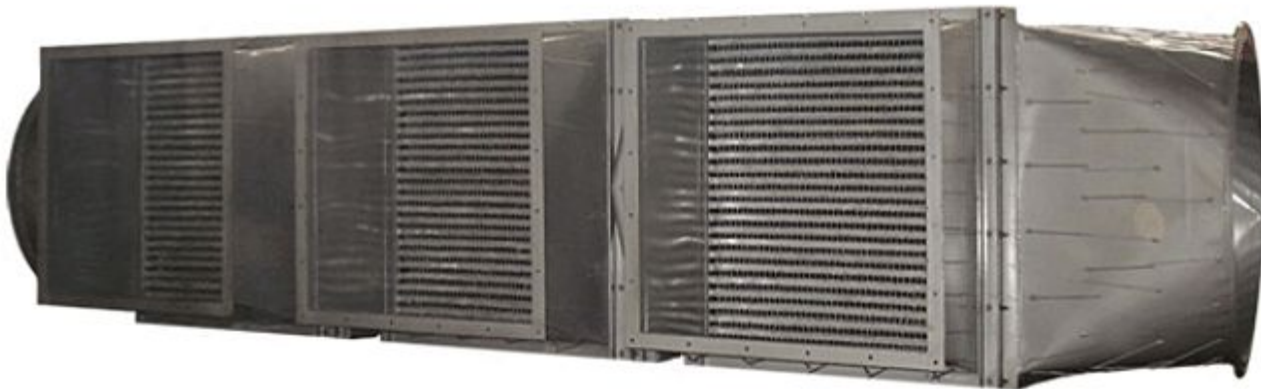
3. Зная температуру газообразных сред и задаваясь скоростями их движения, находят локальные коэффициенты теплоотдачи на воздушной и дымовой стороне рекуператора по критериальным уравнениям для вынужденной конвекции:

$$Nu = f(Re, Pr).$$

4. Определяют суммарный коэффициент теплопередачи.
5. Вычисляют общую поверхность нагрева

$$F = \frac{Q}{k \Delta t_{cp}}$$

6. Разделив общую поверхность нагрева рекуператора на удельную, известную для каждой конструкции, находят объем рекуператора и определяют его размеры.



*Рекуператор
Бушевецкого
завода
(Тверская обл.,
г. Бологое)*

§ 9. Котлы-утилизаторы

В котлах-утилизаторах физическая теплота дыма используется для получения перегретого водяного пара энергетических параметров с давлением от 1,4 до 14 МПа и температурой 420-560 °С. Циркуляция в пароводяном контуре котла может быть организована по естественному или принудительному принципу, т. е. происходить из-за разности плотностей воды и пароводяной смеси или осуществляться насосом.

Модуль котла-утилизатора из оребренных труб



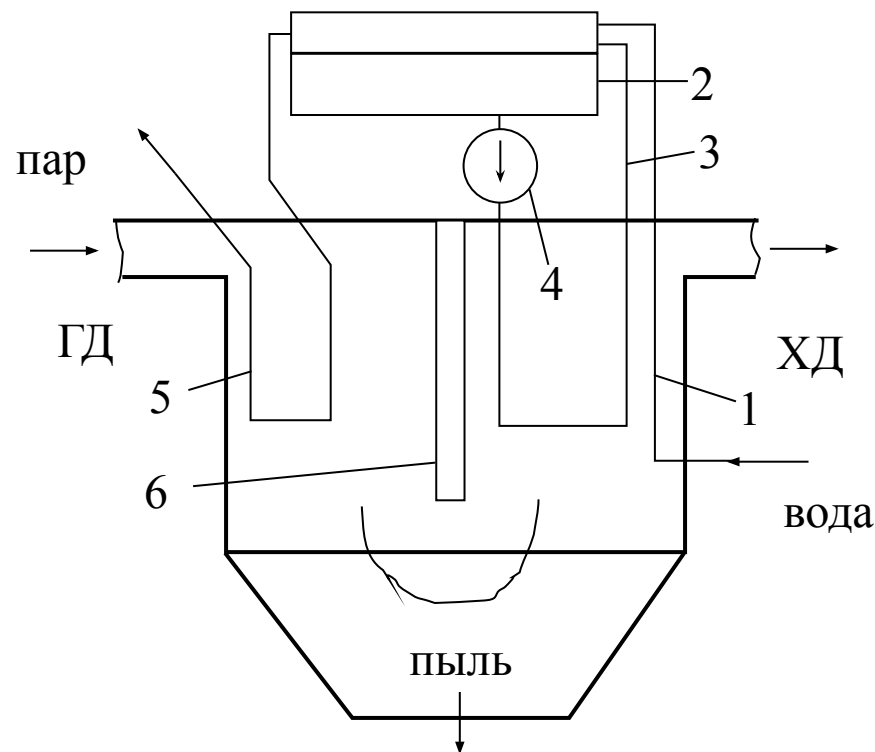


Схема вертикального
однобарабанного котла-
утилизатора
с многократной
циркуляцией

Подпитывающая вода подогревается в экономайзере 1, затем подается в барабан 2. Пар образуется в испарительной части котла-утилизатора 3, многократная циркуляция осуществляется принудительно циркуляционным насосом 4.

Пароперегреватель 5 обеспечивает подсушку пара и его перегрев во избежание конденсации при передаче к потребителю.

Вертикальная компоновка котла, а также создаваемый перегородкой 6 резкий поворот на пути газового потока обеспечивает пылеочистку дыма в пределах камеры котла.

Температура дыма на входе котла-утилизатора данной конструкции не должна превышать 1000°C , температура дыма на выходе $\sim 400^{\circ}\text{C}$. Максимальная паропроизводительность достигает 6 т/ч, а к.п.д. этого агрегата превышает 70 %.

Расчет теплообмена в котельном агрегате аналогичен расчету рекуператора.

§ 10. Способы очистки газов металлургического производства

Вредные вещества, попадающие при функционировании металлургического комплекса в окружающую среду, могут быть **газообразными**: угарный газ CO , сернистый ангидрид SO_2 , оксиды азота N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_5 , либо в виде **аэрозолей** - дисперсных систем, состоящих из твердых или жидких частиц, взвешенных в газообразной среде. Различают 3 вида аэрозолей:

- 1) пыль - малоустойчивая система с твердыми частицами размером от 5 до 50 мкм и более, образующаяся в результате механического разрушения твердого вещества;
- 2) дым - длительно-устойчивая система с твердыми частицами размером от 5 до 0,1 мкм и менее, образующаяся в результате возгонки и конденсации паров;
- 3) туман - дисперсная система с жидкими частицами широкого диапазона размеров, образованная в результате распыления или конденсации паров.

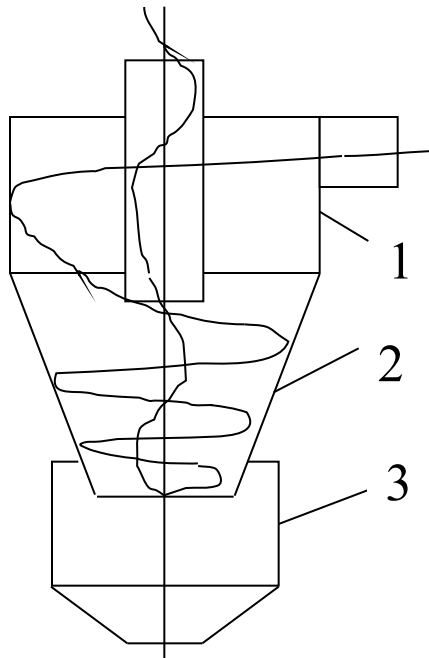
Задача пылеулавливания состоит в создании условий для коагуляции (укрупнения) частиц и осаждения их в пылеулавливающем аппарате. По природе используемых в них сил методы пылеулавливания классифицируются на механические и электрические. Механические методы, в свою очередь, подразделяются на сухие и мокрые.

Эффективность работы пылеулавливающих аппаратов оценивают по относительной величине - *степени улавливания пыли*, представляющей собой отношение массы уловленной в данном аппарате пыли к ее общей массе m_1 , кг, вошедшей в аппарат вместе с дымом:

$$\gamma = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% ,$$

где m_2 - масса вышедшей из аппарата пыли, кг.

Один из наиболее распространенных пылеулавливающих аппаратов - **циклон**, работа которого основана на использовании центробежных сил. Запыленный газ тангенциально вводится в цилиндрическую часть циклона и движется в нем по спирали сверху вниз, переходя в коническую часть аппарата, а затем движется снизу вверх и отводится из циклона. Частицы пыли отбрасываются к стенке аппарата, где они осаждаются и постепенно ссыпаются в бункер:



1 – цилиндрический и
2 – конический участок
корпуса циклона;
3 – бункер для пыли

Стенки циклонов защищают от истирания, покрывая их базальтовыми плитками или другими материалами. При очистке газов с температурой выше 400 °C внутреннюю поверхность корпуса необходимо футеровать огнеупорным кирпичом.

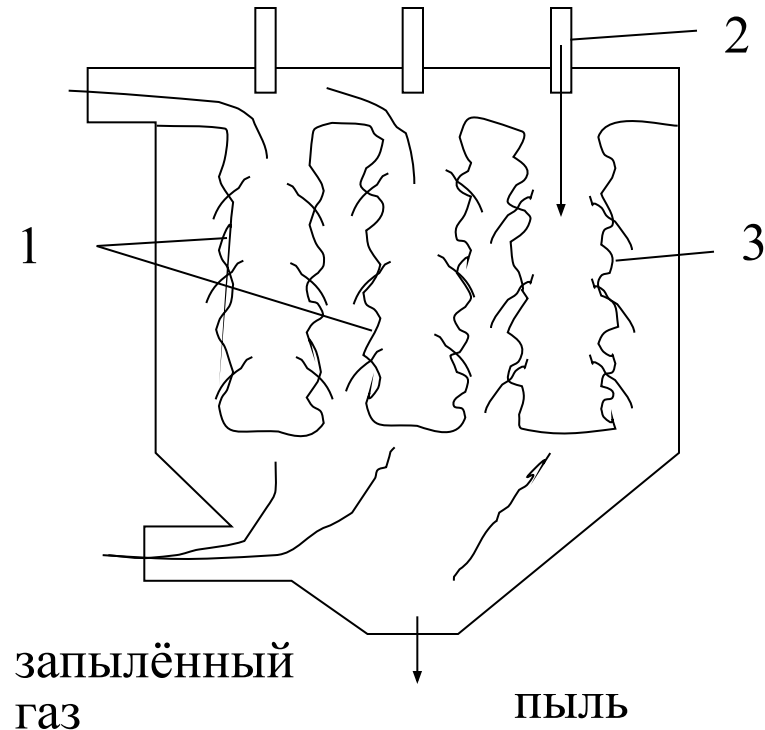
В циклонах степень улавливания пыли η составляет 70-85 %. Эффективность пылеулавливания возрастает с увеличением скорости газового потока и при использовании аппаратов меньшего диаметра.

Достоинства циклона: простота конструкции и возможность очистки сильно запыленных газов; недостатки: невысокая степень очистки, узкие пределы регулирования расхода очищаемых газов.

Очистку газов фильтрацией чаще всего производят в **рукавных фильтрах**, где осаждение пыли происходит в основном за счет сил инерции:



*Рукавный
фильтр ФРИ
с импульсной
продувкой*



- 1 – рабочие рукава;
- 2 – трубка подачи воздуха;
- 3 – рукав на регенерации

Рукава - цилиндры из хлопчатобумажных, шерстяных, нитроновых, лавсановых тканей (торговое название полиэфирного волокна) или стекловолокна.

Газ фильтруется снаружи рукава внутрь.

После осаждения первых порций пыли образуется структура фильтрующего слоя, способная улавливать достаточно мелкие частицы. Однако, одновременно возрастает и сопротивление потоку газов, что приводит к снижению пропускной способности фильтра. Осевшая на ткани пыль периодически отдувается воздухом, подаваемым внутрь рукава. η составляет 96-99 %.

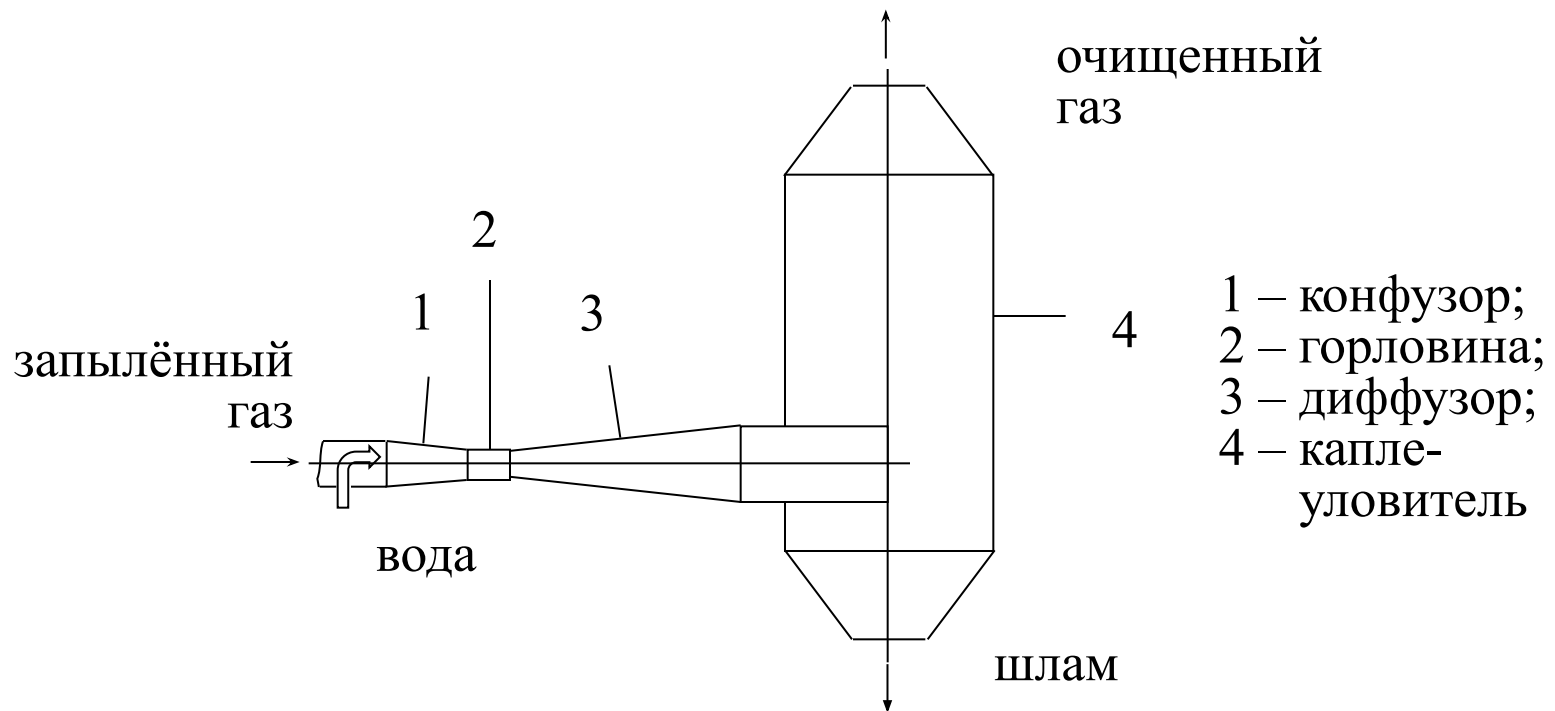
Недостатки аппаратов: большие габариты из-за ограниченной скорости фильтрации, ограниченная стойкостью материалов температура очищаемых газов, необходимость периодической замены рукавов.

Принцип мокрой очистки дыма основан на контакте запыленного потока с водой. В **скруббере Вентури** распыление воды происходит за счет энергии турбулентного газового потока. В горловине трубы Вентури из-за большой скорости потока происходит дробление капель воды и осаждение на них пыли. Благодаря тангенциальному вводу газа в каплеуловитель создается вращение потока, вследствие чего смоченные и укрупненные частицы пыли отбрасываются на стенки каплеуловителя, откуда их непрерывно удаляют в виде шлама (частиц, содержащихся в гидросмеси).



Джованни Баттиста ВЕНТУРИ (1746-1822) - итальянский ученый в области гидравлики, теории света и оптики. Его именем назван открытый им эффект понижения давления газа или жидкости с увеличением скорости их движения, а также труба Вентури. Он был учеником Ладзаро Спалланцани (1729-1799) - известного итальянского натуралиста и физика. Вентури был первым, кто привлек внимание к личности Леонардо да Винчи, собрал и опубликовал множество работ и записей Галилео Галилея.

У скрубберов Вентури $\gamma = 96-98\%$ даже для частиц размером 1-2 мкм (дым). Контакт газов с жидкостью способствует абсорбции вредных газообразных компонентов.



Достоинства аппаратов: возможность использования при высокой температуре очищаемых газов, улавливание паров и газообразных компонентов; недостатки: необходимость оборотного цикла водоснабжения, коррозионный износ оборудования и трубопроводов.

Электроочистка - наиболее эффективный способ улавливания частиц пыли, позволяющий задерживать до 99,9 % последних. В **электрофильтрах** организуют коронный электрический разряд, возникающий при резко выраженной неоднородности электрополя вблизи электродов с очень большой кривизной поверхности (острия, провода). Процесс электроочистки состоит из 2 стадий: зарядки частиц и их осаждения.

На изолированные коронирующие электроды подается потенциал высокого напряжения, от них к заземленным осадительным электродам движутся ионы. Осаждаясь на частицах пыли, ионы передают им заряд, увлекающий их к осадительным электродам. После осаждения частиц заряд с них стекает, но они удерживаются на осадительных электродах силами адгезии (прилипания), удаляют частицы встряхиванием.

*Горизонтальный
электрофильтр
мокрого типа*



Конструктивно электрофильтры выполняют пластинчатыми или трубчатыми (соответственно, коронирующие провода между пластинами и коаксиальные цилиндры или провода внутри цилиндров).

Недостатки этого способа: необходимость предварительной очистки газа от крупной пыли; ограниченная температура очищаемого газа, так как в противном случае повышается вероятность дугового пробоя газового пространства между электродами и их замыкания.