

Для разделения жидких и газовых суспензий можно использовать силы электрического поля. При действии на эмульсию поля переменного тока высокого напряжения происходит слияние (коагуляция) мелких капелек диспергированной жидкости в более крупные, которые затем легко осаждаются под действием силы тяжести. Создавая электрический разряд в газе, добиваются заряджения взвешенных в нем частиц, которые затем осаждаются электрическими силами в поле постоянного тока высокого напряжения.

ЭЛЕКТРООБРАБОТКА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Добываемая нефть часто содержит воду в виде стойкой эмульсии. Эта вода отличается сравнительно высоким содержанием солей, поэтому нефть, подлежащая переработке, должна быть предварительно обезвожена и обессолена.

Обезвоживание, а следовательно, и обессоливание нефти может быть осуществлено механическим или химическим методом, но наиболее эффективным является воздействие электрического поля.

Обработке нефти в электрическом поле обычно предшествует ее смешение с менее минерализованной пресной водой в количестве 5-15 % на нефть. В этом случае концентрация солей значительно уменьшается, что позволяет при данной степени обезвоживания (десятые доли процента остаточной воды) существенно снизить содержание солей и обеспечить высокую степень обессоливания (менее 5 мг на 1 л нефти). При высоком содержании воды в исходной нефти обработку нефти водой осуществляют дважды.

Сущность метода электрообработки заключается в том, что под действием электрического поля высокого напряжения и переменного направления капельки воды заряжаются и начинают двигаться по направлению силовых линий электрического поля. Разноименно заряженные капельки взаимно притягиваются и сливаются. Заряженные одноименно (в основном отрицательно) капельки воды движутся к противоположному полюсу, все время меняя направление движения вследствие переменности поля, сталкиваются и тоже сливаются. Для улучшения процесса коагуляции в поток часто добавляют немного щелочи, нейтрализующей органические кислоты и увеличивающей электропроводность воды. Процесс ведут с подогревом (для уменьшения вязкости) и под давлением, исключающим возможность испарения воды и кипения нефти. Применяемая в промышленных установках разность потенциалов достигает 35 кВ.

Электродегидратором называется устройство для обработки в электрическом поле суспензии типа жидкость — жидкость (например, нефть — вода).

В промышленной практике получили распространение электродегидраторы различных типов: вертикальные, горизонтальные, сферические.

В качестве примера на рис. XV-1 показан горизонтальный электроде-

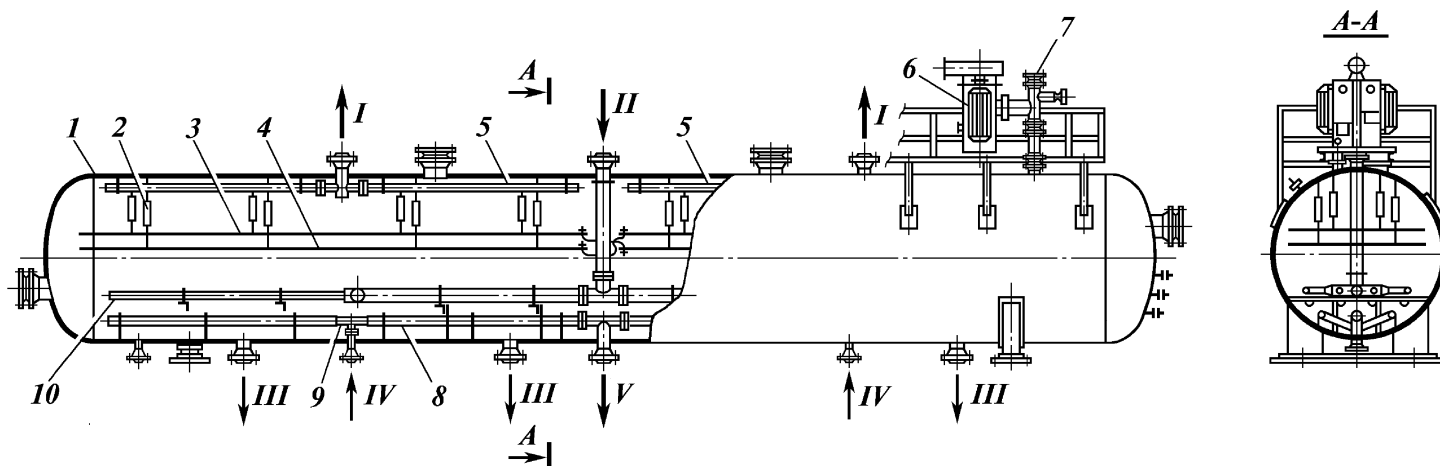


Рис. XV-1. Горизонтальный электродегидратор ЭГ200-10:

1 — корпус; 2 — изолятор; 3 — верхний электрод; 4 — нижний электрод; 5 — сборник обессоленной нефти; 6 — трансформатор; 7 — ввод высокого напряжения; 8 — сборник соленой воды; 9 — промывочный коллектор; 10 — распределитель нефти. Потоки: I — выход обессоленной нефти; II — вход нефти; III — удаление шлама; IV — ввод воды на промывку аппарата; V — выход дренажной воды

гидратор ЭГ200-10 конструкции ВНИИнефтемаша вместимостью 200 м³ на давление 1 МПа (10 кгс/см²), предназначенный для обезвоживания и обессоливания нефти и газовых конденсатов на промысловых и нефтезаводских установках. В корпусе 1 аппарата размещены электроды (верхний 3 и нижний 4), подвешенные на изоляторах 2, распределитель 10 нефти, сборник 8 соленой воды, два сборника 5 обессоленной нефти и промывочный коллектор 9.

На корпусе электродегидратора смонтированы трансформатор 6 и ввод 7 высокого напряжения. Каждый электрод разделен на две равные части, которые для обеспечения равномерной загрузки трансформатора соединены так, что каждая половина верхнего электрода соединена с другой половиной нижнего электрода.

Нефть, вводимая в середину распределителя 10, равномерно распределяется по всему сечению аппарата и после промывки в слое воды, уровень которой поддерживается автоматически выше распределителя на 200–300 мм, движется вертикально вверх. При этом нефть сначала обрабатывается в слабом электрическом поле в объеме между уровнем раздела нефть – вода и плоскостью нижнего электрода, а затем в сильном электрическом поле между электродами, после чего собирается сборниками обессоленной нефти 5 и выводится из аппарата. Различие в напряженности электрического поля позволяет обеспечить выделение из эмульсии вначале более крупных глобул воды и разгрузить таким образом зону между электродами для выполнения более сложной задачи – отделения мелких капель воды. Соленая вода собирается в нижней части электродегидратора сборником 8 и выводится из аппарата. Для промывки аппарата без его вскрытия предусмотрен промывочный коллектор 9, отверстия которого направляют струи воды на стенки корпуса.

Питание электродов осуществляется от сдвоенного трансформатора мощностью 160 кВ·А, позволяющего получить между электродами напряжение 30, 35, 40, 45 и 50 кВ, присоединение трансформатора к электродам – с помощью двух вводов высокого напряжения.

Для обеспечения обезвоживания и обессоливания как легких, так и тяжелых нефтей разработаны электродегидраторы с двумя отдельными системами ввода нефти. Для этого в корпусе аппарата установлен дополнительный распределитель нефти со стояками, обеспечивающими ввод части нефти непосредственно в межэлектродное пространство, где особенно эффективно разрушаются устойчивые и тяжелые по плотности нефтяные эмульсии.

Ввод части нефти непосредственно в межэлектродное пространство существенно повышает устойчивость электрического режима и, следовательно, режима обезвоживания и обессоливания нефти в промысловых условиях. При этом также уменьшается количество промывочной воды, что делает аппарат универсальным и весьма эффективным.

Для разрушения нефтяных эмульсий в электрическом поле в промышленности широко применяются также электрокоалесцеры, которые устанавливаются перед емкостью или отстойником. Электрокоалесцеры отличаются от обычных электродегидраторов компактностью, а также более высокой безопасностью и надежностью в работе.

В качестве примера на рис. XV-2 показан электрокоалесцер с чередующимся электрическим полем, разработанный совместно ВНИИнефтемашем и БашНИИнефтью. В электрокоалесцере чередование импульсов и пауз воздействия электрического поля высокой напряженности частотой 50 Гц на эмульсию создается за счет движения потока эмульсии между цилиндрическими коаксиальными электродами, внешним из которых является заземленный корпус 2, а внутренним – соединенный с трансформатором электрод 3, на котором установлены диэлектрические кольца 1.

Напряженность поля в области колец из диэлектрического материала намного меньше, чем против открытых участков электрода 3, поэтому при движении эмульсии в осевом направлении она поочередно попадает в зоны различной напряженности поля, благодаря чему чередуются процессы коалесценции капель электролита – формирование в сильном поле

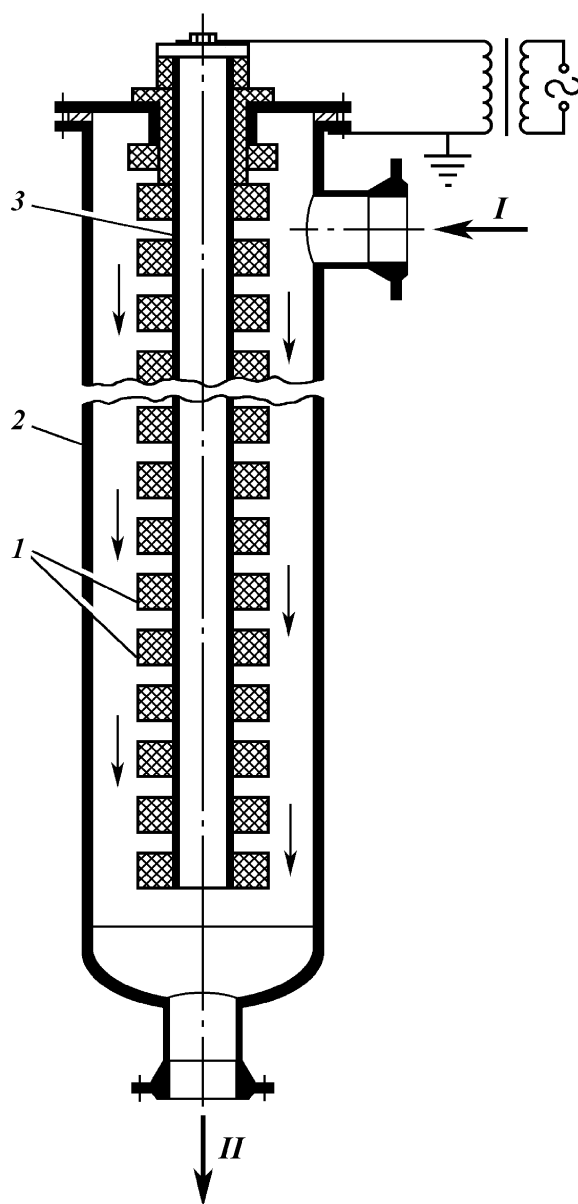


Рис. XV-2. Электрокоалесцер с чередующимся электрическим полем:

1 — диэлектрические кольца; 2 — корпус (внешний электрод); 3 — внутренний электрод. Поток: I — исходная эмульсия; II — обработанная эмульсия в отстойник

цепочек скоалесцировавших капель в направлении силовых линий электрического поля (т.е. в радиальном направлении) и разрушение этих цепочек под действием гидродинамических сил в слабом поле против колец. Чередование этих процессов в аппарате приводит к эффективному разрушению устойчивых эмульсий на стадии обезвоживания и эффективной коалесценции капель пластовой и промывочной воды на стадии обессоливания.

Высота диэлектрических колец и промежутков между ними зависит от скорости движения нефтепродукта, его свойств и напряженности электрического поля. Для каждого технологического процесса можно подобрать оптимальное соотношение высоты колец и промежутков между ними.

В нефтегазоперерабатывающей промышленности обработка в электрическом поле применяется не только для нефтей, но также и для ряда

нефтепродуктов (сжиженные газы, бензин, керосин, дизельное топливо и др.). Она позволяет добиться более полного обезвоживания или отделения взвешенных частиц реагента, содержащихся в нефтепродуктах после той или иной технологической операции.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Если к положительному и отрицательному полюсам источника электрического тока присоединить два электрода, то между ними, несмотря на отсутствие тока (газ не является проводником), создается электрическое поле. Напряженностью поля или градиентом напряжения называют изменение (падение) напряжения на единицу длины. Графически величину и направление действия электрических сил характеризуют силовые линии.

Если взять электроды, сильно отличающиеся по величине поверхности (например, пластину и острие), то при их зарядке возникнет неоднородное поле, характеризующееся силовыми линиями, показанными на рис. XV-3. Если разность напряжений между электродами повышать, то при некотором ее значении, называемом *критическим*, обстановка качественно изменится. Молекулы газа, находящиеся в этом поле, ионизируются, расщепляясь на положительно заряженные ионы и электроны, которые перемещаются по направлению действия силовых линий.

При достижении разности напряжений выше критического значения наступает явление пробоя; в темноте около острия наблюдается голубоватое свечение, называемое коронным разрядом или короной. В области короны градиент напряжения выше пробивного, но пробой газа является «местным», так как по мере удаления от острия напряженность поля уменьшается.

В случае, когда пластина заряжена положительно, а острие отрицательно, образующиеся отрицательные ионы будут притягиваться к пластине и между электродами установится постоянный ионный поток того же

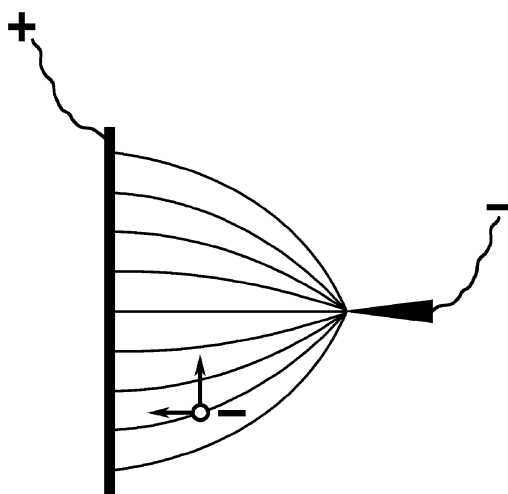


Рис. XV-3. Схема силовых линий электрического поля между пластиной и острием

знака, что и корона. Если между электродами пропустить запыленный газ, то ионы будут сталкиваться с частицами пыли, передавая им заряд того же знака, какой имеет корона; пылинки тоже станут притягиваться к пластине и осаждаться на ней; лишь отдельные частицы, попавшие в область самой короны, могут там зарядиться положительно и осесть на отрицательном острие.

Неоднородное электрическое поле может быть создано в цилиндрической трубе с помещенным по ее оси тонким проводом (рис. XV-4, а) либо при сочетании пластины с коронирующими проводами (рис. XV-4, б).

В качестве коронирующих применяют провода минимального диаметра, обеспечивающего механическую и коррозионную стойкость.

Применяемые в промышленности устройства для обработки суспензии газ (пар) — жидкость или газ (пар) — твердое тело в электрическом поле называют *электрофильтрами*.

Рабочее напряжение в электрофильтрах составляет 40—75 кВ. Электрофильтры с осадительными электродами в виде пучка цилиндрических или шестигранных труб называются *трубчатыми*, электрофильтры с осадительными электродами в форме пластин — *пластинчатыми*.

По направлению потока газа между пластинами электрофильтры подразделяются на горизонтальные и вертикальные.

Электрический ток, питающий электрофильтры, должен быть постоянным. Что касается полярности тока, то обычно применяют отрицательную корону, так как скорость движения отрицательных ионов выше, чем положительных, сама же отрицательная корона менее склонна к пробоям.

В местах, где нет электросетей постоянного тока высокого напряжения, для питания электрофильтров пользуются переменным током обычно 60 кВ, которое повышают в трансформаторах и затем при помощи выпрямителей преобразуют в постоянный ток.

В зависимости от вида улавливаемых частиц и способа их удаления с электродов электрофильтры подразделяются на *сухие* и *мокрые*. В сухих электрофильтрах для очистки поверхности электродов от пыли используются механизмы встряхивания ударно-молоткового типа. Пыль из бункера выводится в сухом виде.

В мокрых электрофильтрах очистка поверхности от пыли осуществляется промывкой водой. В электрофильтрах, предназначенных для очистки газов от туманов кислот и смол, уловленные продукты с поверхности пластинчатых электродов удаляются самотеком, а в трубчатых — самотеком с периодической промывкой слабой кислотой.

На рис. XV-5 приведена конструкция горизонтального электрофильтра, предназначенного для улавливания технического углерода из углеродной газовой смеси при температуре от 100 до 250 °С и катализаторной пыли на установках каталитического крекинга с пылевидным катализатором.

Электрофильтр состоит из металлического корпуса 5, в котором установлены газораспределительные решетки 2, обеспечивающие равномерное распределение газа по всему сечению аппарата. Активная зона электрофильтра состоит из пластинчатых осадительных электродов 11, каждый из которых образован из системы отдельных прутков и коронирующих электродов 10, подвешенных на раме 9 и натянутых с помощью рамы 13 с грузами. Расстояние между осадительными электродами 300 мм. Удаление уловленного продукта с электродов обеспечивается механизмами ударного действия для встряхивания коронирующих 8 и осадительных 12 электродов.

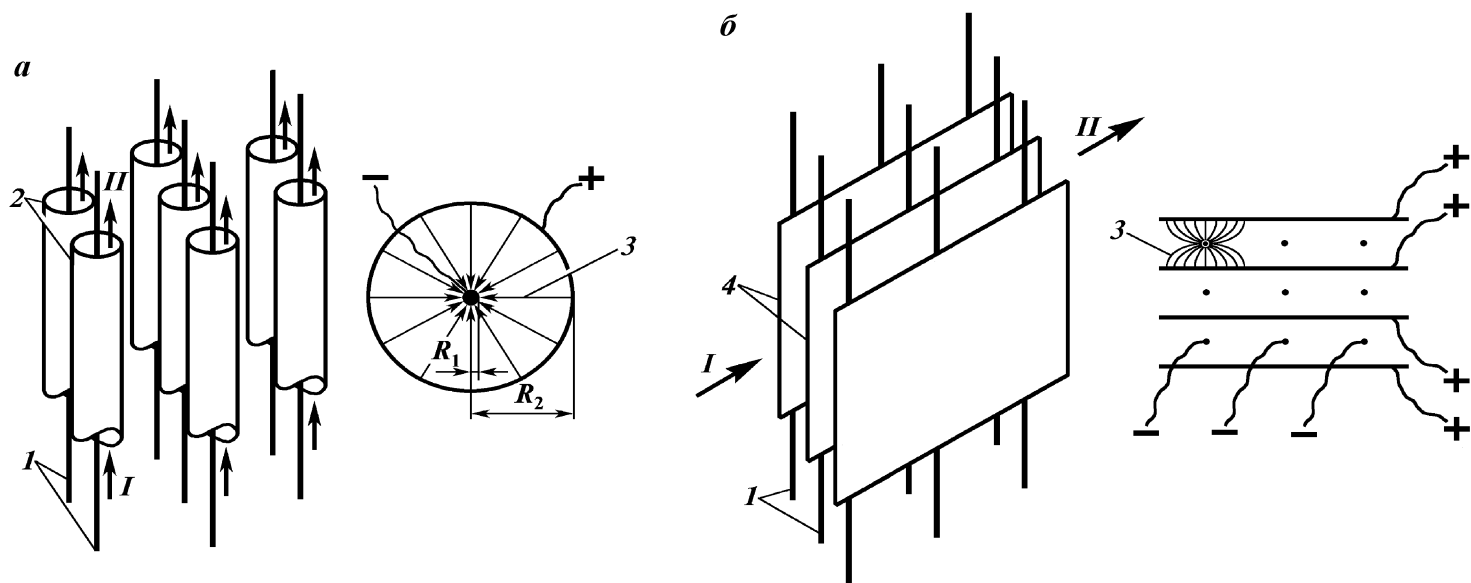


Рис. XV-4. Схемы трубчатых *а* и пластинчатых *б* электродов:

1 — коронирующие электроды; 2 — трубчатые осадительные электроды; 3 — силовые линии; 4 — пластинчатые осадительные электроды.
Потоки: I — исходный газ; II — очищенный газ

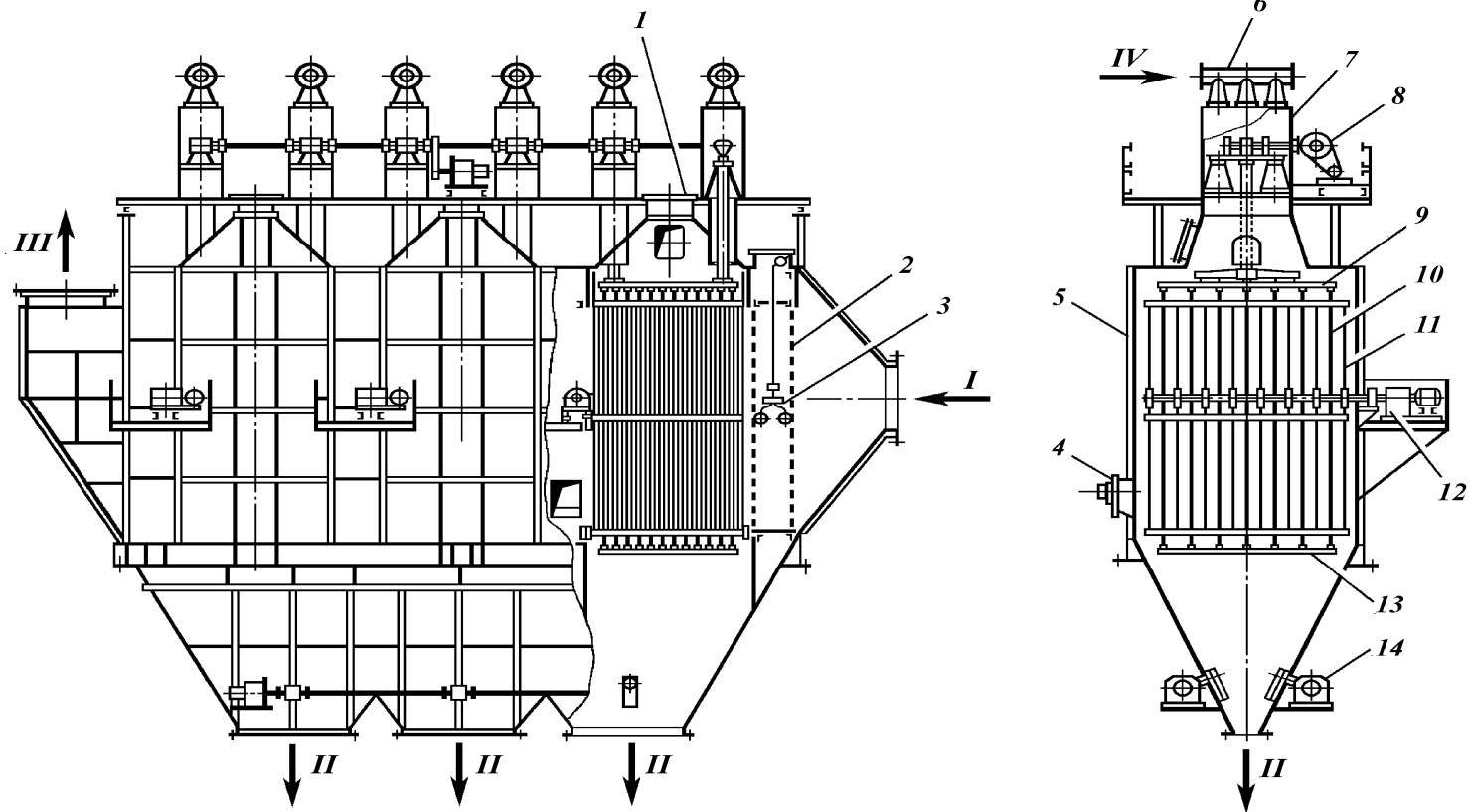


Рис. XV-5. Электрофильтр сажевый горизонтальный:

1 — предохранительный клапан; 2 — газораспределительная решетка; 3 — механизм встряхивания решетки; 4 — люк для обслуживания; 5 — корпус; 6 — коллектор для поддува в изоляторные коробки; 7 — изоляторная коробка; 8 — механизм встряхивания коронирующих электродов; 9 — рама подвеса коронирующих электродов; 10 — коронирующий электрод; 11 — осадительный электрод; 12 — механизм встряхивания осадительных электродов; 13 — нижняя рама для подвеса коронирующих электродов с грузами; 14 — механизм ворошения уловленных частиц. Поток: I — исходный газ; II — уловленные частицы; III — очищенный газ; IV — подув

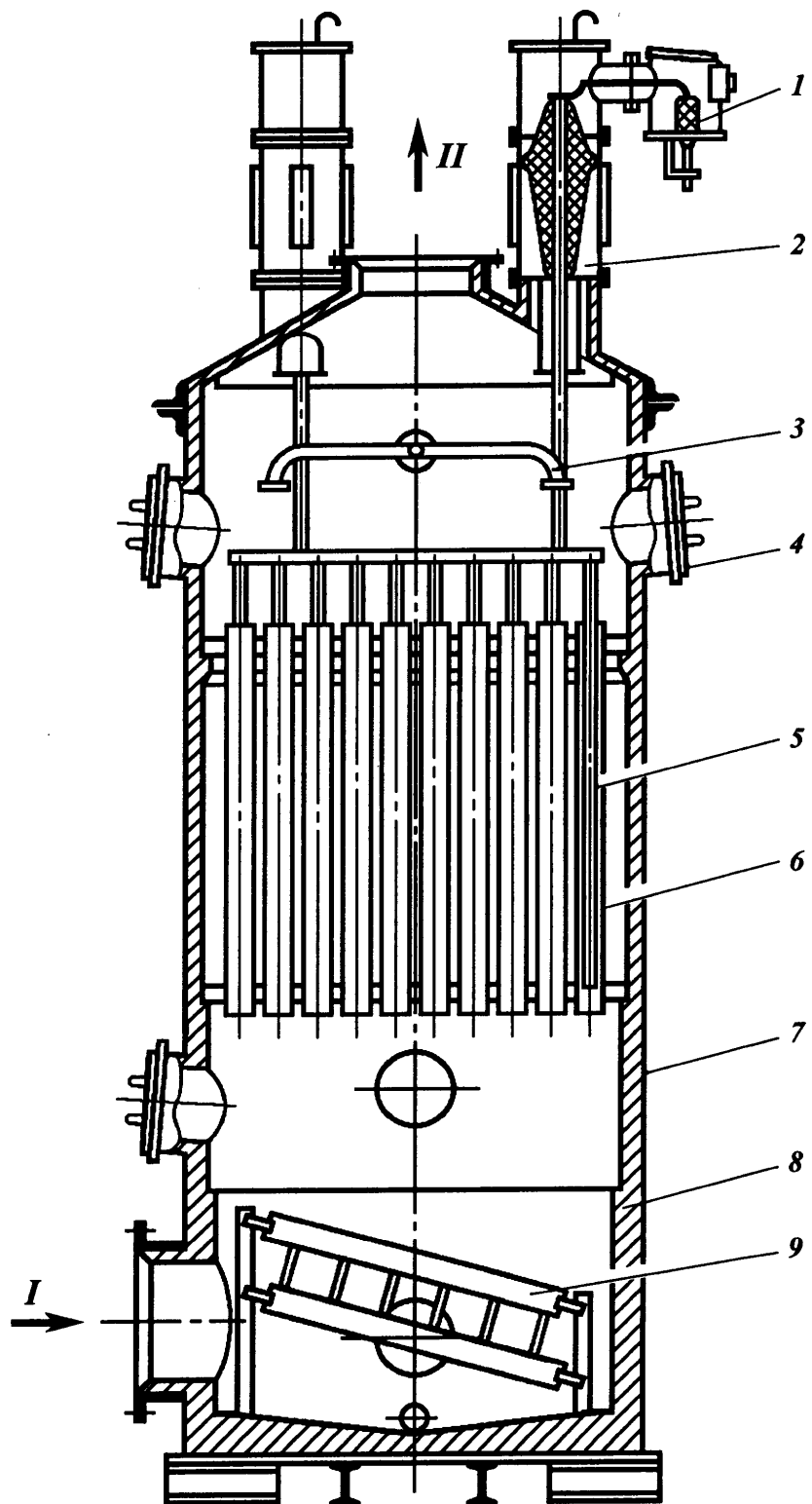


Рис. XV-6. Электрофильтр для улавливания тумана серной кислоты:

1 – защитная коробка для подвода тока; 2 – изоляторная коробка; 3 – коллектор периодической промывки; 4 – люк для обслуживания; 5 – коронирующий электрод; 6 – осадительный электрод; 7 – корпус; 8 – футеровка корпуса; 9 – направляющие лопатки. Потоки: I – исходный газ; II – очищенный газ

Электрофилтры с бункерами, оснащенными механизмом ворошения 14, применяются для улавливания технического углерода, без механизма ворошения — для улавливания катализаторной пыли. Ворошение уловленных частиц и их выгрузка производятся непрерывно.

К особенностям рассмотренной конструкции электрофилтра следует отнести наличие над каждым из полей предохранительных клапанов 1 большого сечения, а также систему обдувки 6 изоляторов, предотвращающих отложение пыли в изоляторных коробках 7.

На рис. XV-6 приведена конструкция вертикального трубчатого электрофилтра, предназначенного для улавливания тумана серной кислоты из хвостовых газов с температурой 50 °С при сернокислотном производстве.

Стальной корпус электрофилтра 7 изнутри покрыт слоем кислотостойкой футеровки 8. Активная зона электрофилтра состоит из коронирующих электродов 5, подвешенных по осям осадительных труб 6. Электроды периодически промываются конденсатом уловленной кислоты, которая поступает через форсунки коллектора 3, расположенного над электродами. Во время промывки электродов с электрофилтра снимается высокое напряжение.

ÐÀÑ×ÀÒ ÝËÀËËÒËÎ ÕËËÛÒËÎ Â

Расчет осаждения частиц в электрическом поле проводится по такой же схеме, как и в случае гравитационного поля или поля центробежной силы. Рассмотрим ход такого расчета на примере электрофилтра с трубчатыми электродами (см. рис. XV-4, а).

Напряженность электрического поля E_x в любой точке на расстоянии x от центрального электрода определяется как градиент потенциала в этой точке. Если приложенное напряжение или разность потенциалов между двумя коаксиальными электродами радиуса R_1 и R_2 обозначить через U , то

$$U = \int_{R_1}^{R_2} E_x dx.$$

В газе до образования короны присутствует незначительное количество ионов, и в отсутствие какого-либо ионного тока напряженность поля на расстоянии x от центрального электрода выражается в интегрированной форме уравнением

$$E_x = \frac{U}{x \ln \frac{R_2}{R_1}}.$$

Сила F частицы, несущей заряд q в электрическом поле напряженностью E_x , действует в направлении осадительного электрода и выражается уравнением

$$F = qE_x = \frac{qU}{x \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (\text{XV.1})$$

В общем случае сопротивление движению частицы, оказываемое средой, может быть определено в соответствии с законом Ньютона

$$R = \xi S \frac{\rho_r W_{oc}^2}{2},$$

где ξ — безразмерный коэффициент сопротивления среды; S — площадь поперечного сечения частицы; ρ_r — плотность газовой среды; W_{oc} — скорость движения частицы.

Если принять, что частица имеет шарообразную форму и движется в ламинарном режиме, который обычно лимитирует процесс отстаивания (т.е. принимая закон Стокса $\xi = 24/Re$), получим следующее выражение для определения силы сопротивления R :

$$R = \frac{24}{Re} \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_r W_{oc}^2}{2} = \frac{24\mu}{W_{oc} d \rho_r} \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_r W_{oc}^2}{2},$$

откуда после необходимых сокращений получаем

$$R = 3\pi d \mu W_{oc}. \quad (XV.2)$$

Так как частица движется в радиальном направлении от коронирующего электрода к осадительному, в уравнении (XV.2) переменная скорость осаждения может быть выражена как производная от расстояния x до центрального электрода по времени:

$$R = 3\pi d \mu \frac{dx}{d\tau}. \quad (XV.3)$$

Приравняв уравнения (XV.1) и (XV.3), разделим переменные и, интегрируя в пределах самого длинного пути от R_1 до R_2 , найдем время осаждения частиц в электрическом поле:

$$\frac{qU}{x \ln R_2 / R_1} = 3\pi d \mu \frac{dx}{d\tau},$$

откуда

$$d\tau = \frac{3\pi d \mu \ln R_2 / R_1}{qU} x dx$$

и окончательно

$$\tau_{oc} = \frac{3\pi d \mu \ln R_2 / R_1}{qU} \int_{R_1}^{R_2} x dx = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi d \mu \ln R_2 / R_1}{qU} (R_2^2 - R_1^2).$$

Время нахождения газа в аппарате

$$\tau_n = \frac{l}{W},$$

где l — длина осадительного электрода; W — средняя скорость газового потока.

Для очистки газа необходимо, чтобы $\tau_n \geq \tau_{oc}$. Однако на практике между электродами может иметь место не ламинарный, а турбулентный поток, усиливающийся действием электрического поля. Поэтому приведен-

ный выше ход расчета рассматривается только как основа для понимания и оценки влияния отдельных факторов на процесс осаждения в электрическом поле.

Для практического расчета пользуются взятой из опыта продолжительностью обработки газа в электрическом поле $\tau = 5 \div 10$ с. Пребывание газа в электрофилт্রে при длине электрополя l в течение времени τ обеспечивается при скорости газа $W = l/\tau_n$.

Если секундный объем очищаемого газа V_r ($\text{м}^3/\text{с}$), то требуемое поперечное сечение трубчатого электрофилтра составит

$$S = \frac{V_r}{W} = \frac{\pi D^2}{4} z,$$

откуда находят число труб z принятого диаметра D .

В промышленных электрофилтрах скорость газа составляет 0,75–1,5 м/с при трубчатой конструкции и 0,5–1,0 м/с при пластинчатой; различие объясняется более эффективным действием электрического поля в трубах.

Для оценки степени очистки газа в электрофилтрах предлагается следующее уравнение:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{FW_{oc}}{V_r}},$$

где F — площадь осаждения; V_r — секундный объем газа; W_{oc} — скорость движения заряженных частиц к электроду.

Мощность, потребляемая электрофилтром, рассчитывается как произведение силы тока на напряжение. С учетом расхода электроэнергии, потребляемой выпрямителями, получим

$$N = \frac{0,707 \sum IV_m}{10^6} + 0,5z,$$

где i — удельный расход тока на единицу коронирующего электрода, А/м; $\sum l$ — общая активная длина электродов, м; V — разность потенциалов на электродах, кВ; m — коэффициент формы кривой выпрямленного тока; z — число выпрямителей, потребляющих практически по 0,5 кВт.

В электрическом поле электрофилтров любая частица, даже самая мелкая, получает заряд и в отличие от циклонов может быть осаждена при соответствующей продолжительности очистки. Поэтому в электрофилтрах, как и в рукавных тканевых филтрах, можно получить степень очистки газа близкую к 100 %, так что вопрос о степени очистки здесь сводится не к технике, а к экономике. Гидравлическое сопротивление электрофилтров в несколько раз меньше, чем у циклонов и тканевых филтров, и составляет 50–200 Па. Кроме того, по конструкции электрофилтры, в отличие от рукавных филтров, могут быть приспособлены к любым производственным условиям (горячий газ, мокрый газ, химически активные суспензии и т.д.) путем соответствующего выбора материалов, форм электродов и методов защиты высоковольтных изоляторов.

Работу электрофилтров можно полностью автоматизировать и механизировать, а расход энергии на очистку сравнительно невелик — в среднем он составляет 0,5–0,8 кВт·ч на 1000 м^3 газа.

Недостатком электроочистки газа являются значительные капиталовложения, обусловленные сравнительно высокой стоимостью трансформаторов и выпрямителей.