Промышленные системы газоснабжения

Промышленные и коммунальные предприятия получают газ от городских распределительных сетей с.д. и в.д. Предприятия с малыми расходами газа (50 ÷ 150 $м^3$/ч) можно присоединять также и к сетям н.д. Оптимальный вариант присоединения в этом случае должен быть обоснован технико-экономическим расчетом. Крупные промышленные предприятия и ТЭЦ присоединяют с помощью специальных газопроводов к ГРС или к МГ. Промышленные системы газоснабжения состоят из следующих элементов: 1) ввод газопроводов на территорию предприятия; 2) межцеховые газопроводы; 3) внутрицеховые газопроводы; 4) регуляторные пункты (ГРП) и установки (ГРУ); 5) пункты измерения расхода газа (ПИРГ); 6) обвязочные газопроводы агрегатов, использующих газ.

Газ от городских распределительных сетей поступает в промышленные сети предприятия через ответвления и ввод. На вводе устанавливают главное отключающее устройство, которое следует размещать вне территории предприятия в доступном и удобном для обслуживания месте, максимально близко к распределительному газопроводу, но не ближе 2 м от линии застройки или стены здания. Для газоснабжения промышленных предприятий проектируют тупиковую разветвленную сеть с одним вводом. Только для крупных предприятий, не допускающих перерыва в газоснабжении ГЭС и ТЭЦ, применяют кольцевые схемы сетей с одним или несколькими вводами.

Транспортирование газа от ввода к цехам осуществляется по межцеховым газопроводам, которые могут быть подземными и надземными. Выбор способа их укладки зависит от территориального расположения цехов, характера сооружений, по которым предполагается прокладка газопроводов, насыщенности проездов подземными сооружениями. Надземная прокладка предпочтительнее по сравнению с подземной: исключается подземная коррозия газ-ов; менее опасны утечки газа, так как вытекающий газ рассеивается в атмосфере; утечки легче обнаружить и устранить; проще эксплуатировать и осуществлять наблюдение за состоянием газ-ов. При использовании в качестве опор для газ-ов существующих колонн, эстакад, стен и покрытий зданий надземная прокладка экономичнее подземной. В конечных точках межцеховых газ-ов следует предусматривать продувочные газопроводы.

Некоторые схемы промышленных систем предусматривают проектирование центрального ГРП, который снижает и регулирует давление газа в межцеховых газопроводах. В этом случае в ЦГРП устанавливают и пункты измерения расхода газа (ПИРГ). В межцеховых газ-дах, как правило, поддерживают с.д. и только у мелких потребителей — н.д. В.д. применяют там, где оно необходимо для газоиспользующих агрегатов. На вводе газ-да в цех снаружи или внутри здания устанавливают отключающее устройство. Внутрицеховые газ-ды прокладывают по стенам и колоннам в виде тупиковых линий. Необходимость кольцевания внутрицеховых газ-дов может возникнуть лишь для особо важных промышленных цехов. На ответвлениях к агрегатам устанавливают главные отключающие устройства. Газ-ды пром. предприятий и котельных оборудуют специальными продувочными трубопроводами с запорными устройствами. Отводы к продувочным трубопроводам предусматривают от последних участков внутрицеховых газ-дов и от каждого газ-да агрегата перед последним по ходу газа отключающим устройством.

Давление во внутрицеховых газ-дах определяется давлением газа перед горелками. В случае установки перед агрегатами РД давление во внутрицеховых газ-дах может существенно превосходить необходимое давление перед горелками. Основное отличие принципиальных схем промышленных систем газоснабжения заключается в принятых давлениях газа в межцеховых газопроводах, газ-дах перед горелками агрегатов, а также в

расположении ГРП, установок и наличии РД перед агрегатами. При решении вопроса о выборе схемы следует учитывать давление газа в городских распределительных газ-дах в месте присоединения предприятия; необходимое давление газа перед газовыми горелками в отдельных цехах; территориальное расположение цехов, потребляющих газ; расход газа цехами и режим его потребления; удобство обслуживания и экономическую эффективность.

В зависимости от конкретных условий проектирования используют принципиальные схемы одноступенчатые и двухступенчатые (рис. 9.1).

Одноступенчатые промышленные системы. Схема промышленной системы газоснабжения в случае непосредственного присоединения к городским сетям низкого давления показана на рис. 9.2. Данную схему проектируют для небольших коммунальных и промышленных предприятий. Это объясняется, во-первых, малой пропускной способностью сетей низкого давления, а во-вторых, тем, что переменный режим потребления газа предприятием будет отрицательно сказываться на режиме давлений у газовых приборов жилых зданий, присоединенных к той же сети низкого давления.

Расход газа предприятием измеряют в центральном пункте для учета потребления газа в цехах и зданиях. При необходимости учета расхода газа отдельными цехами или агрегатами следует предусматривать дополнительную установку газовых счетчиков или расходомеров. Для небольших предприятий, состоящих из двух цехов, и при условии незначительного потребления газа одним из них допускается учитывать расход газа по цехам без общезаводского учета (см. рис. 9.2).

Расчетные расходы в промышленных газопроводах определяют исходя из номинальных нагрузок газоиспользующих агрегатов и коэффициента одновременности их работы k_0. Значение k_0 определяется технологическим режимом работы агрегатов и числом агрегатов, присоединенных к данному участку газопровода.

Скорость газа в газопроводах принимают равной 25 ÷ 30 м/с, так как при больших ее значениях возникают шум, эрозия металла, а при неблагоприятной конфигурации — и вибрация трубопроводов.

Двухступенчатая схема промышленной системы газоснабжения показана на рис. 9.4. По этой схеме промышленное предприятие присоединено к городскому газ-ду в.д. через заводской ГРП. В ГРП давление газа снижается до среднего, которое необходимо для цехов №2 и 4. Эти цехи присоединены непосредственно к межцеховому газ-ду. Для цехов №1 и 3 требуется н.д., и они присоединены через ГРУ. Внутрицеховые газопроводы имеют продувочные линии. ПИРГ расположен в заводском ГРП. Такая схема является комбинацией схем I-3 и II-3 (см. рис. 9.1). При гидравлическом расчете данной схемы сначала определяют давление после заводского ГРП исходя из режима заводской сети с.д. при известном номинальном давлении перед горелками с.д. Перепад давления между городскими и промышленными сетями распределяют между ответвлением к пром. предприятию и ГРП таким образом, чтобы их суммарная стоимость была минимальной. Давление после ГРУ находят исходя из режима работы внутрицехового газ-да и давления газа перед горелками низкого давления. ГРУ подбирают на перепад между давлением в межцеховых газопроводах с.д. и необходимым давлением после ГРУ.

Значение расчетного перепада в межцеховых газопроводах (см. рис. 9.4) является небольшим, что приводит к увеличению стоимости трубопроводов. Вместе с тем некоторые цехи не имеют ГРУ, что снижает стоимость системы. Однако для пром. предприятий с компактным расположением цехов и стабильным режимом работы

агрегатов указанные недостатки не имеют существенного значения и такая схема может оказаться более выгодной.

Схема промышленной системы газоснабжения с межцеховыми газопроводами, непосредственно присоединенными к городской сети с.д. (менее 0,3 МПа), показана на рис. 9.5. Эти газопроводы вводят в каждый цех, где в ГРУ давление снижается до необходимого. Из ГРУ газ поступает только в сети данного цеха. Расход газа учитывается в центральном ПИРГе, а также в каждом цехе. Центральный ГРП отсутствует, а межцеховые газопроводы находятся под давлением городской распределительной сети.

Эта схема является комбинацией схем II-1 и II-2 (см. рис. 9.1). Эта схема отличается меньшей стоимостью межцеховых газ-ов, но дополнительными расходами на сооружение центрального ПИРГ и дополнительных ГРУ. Она имеет экономические преимущества для пром. предприятий, у которых цехи расположены на далеко друг от друга. Окончательные выводы об экономической эффективности схем промышленных систем газоснабжения можно сделать после технико-экономического расчета.

По внутрицеховым газопроводам транспортируется газ по цеху от ввода до агрегатов. В большинстве случаев такие газопроводы проектируют тупиковыми. Кольцевание внутрицеховых газопроводов применяют только в особо ответственных цехах. Принципиальная схема внутрицехового газопровода среднего или низкого давления с ПИРГ показана на рис. 9.6. Такую схему применяют для цехов, получающих газ от центральных ГРП или непосредственно от сетей низкого давления. Расход газа измеряют двумя параллельно соединенными газовыми счетчиками.

Приложение к лекции 1.

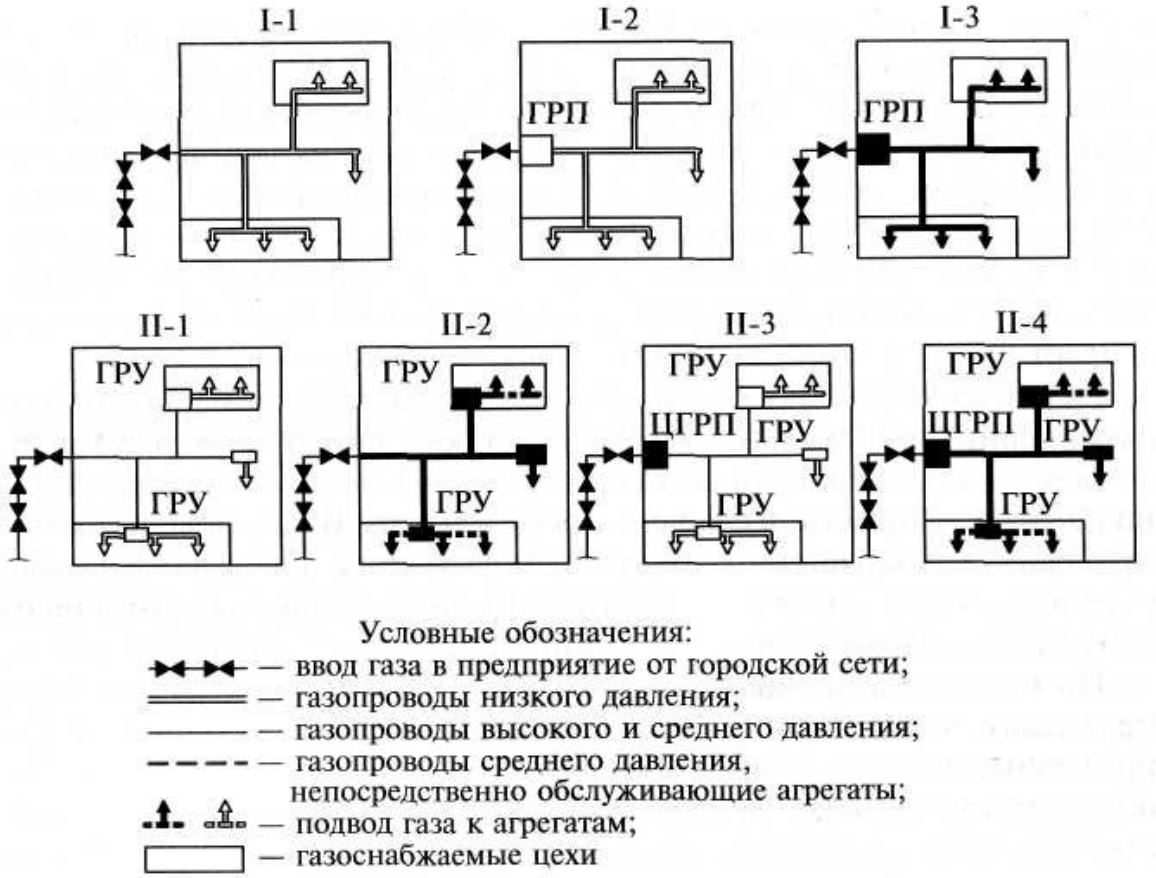


Рис. 9.1. Классификация промышленных систем газоснабжения

I. Одноступенчатые системы газоснабжения (рис. 9.1): а) при непосредственном присоединении предприятий к городским распределительным сетям низкого давления (I-1); б) при присоединении промышленных объектов к городским сетям через центральный ГРП и с низким давлением в промышленных газопроводах (I-2); в) при

присоединении промышленных объектов к городским сетям через центральный ГРП и со средним давлением в промышленных газопроводах (I-3).

II. Двухступенчатые системы (см. рис. 9.1): а) при непосредственном присоединении промышленных объектов к городским сетям среднего давления цеховыми ГРУ и с низким давлением в цеховых газопроводах (II-1); б) при непосредственном присоединении промышленных объектов к городским сетям среднего давления цеховыми ГРУ и со средним давлением в цеховых газопроводах (II-2); в) при присоединении к городским сетям через центральный ГРП и со средним давлением в межцеховых газопроводах, цеховыми ГРУ и с низким давлением в цеховых газопроводах (II-3); г) при присоединении к городским сетям через центральный ГРП и со средним давлением в межцеховых газопроводах, цеховыми ГРУ и со средним давлением в цеховых газопроводах (II-4).

У средних и крупных предприятий агрегаты в отдельных цехах обычно оборудуют горелками, которые работают на различных давлениях. В связи с этим при проектировании возникает необходимость в комбинации приведенных принципиальных схем. Так, часто проектируют промышленную систему газоснабжения с центральным ГРП и ГРУ только у отдельных цехов. Такую систему получают путем комбинации схем I-3 и II-4.

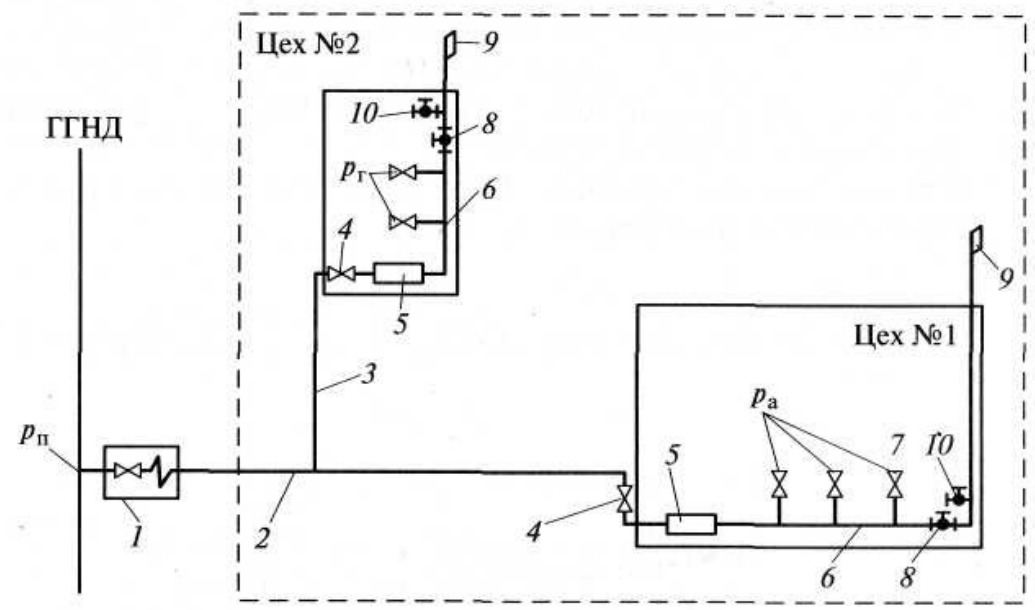


Рис. 9.2. Схема газоснабжения небольшого промышленного предприятия, присоединенного к городской сети низкого давления:

1 — отключающее устройство (задвижка) с компенсатором на вводе в промышленное предприятие; *2* — межцеховый газопровод; *3* — ответвление к цеху; *4* — отключающее устройство на вводе в цех; *5* — пункт измерения расхода газа (ПИРГ); *6* — внутрицеховые газопроводы; *7* — главные отключающие устройства перед агрегатами; *8* — кран на продувочном газопроводе; *9* — продувочный газопровод; *10* — штуцер с краном и пробкой для взятия пробы; ГГНД — городской газопровод низкого давления

Из городской распределительной сети низкого давления (ГГНД) газ через задвижку 1 поступает в межцеховой газопровод 2. У небольших предприятий протяженность межцеховых газопроводов обычно невелика, поэтому на ответвлениях от основного газопровода к цехам отключающие устройства можно не устанавливать. Для продувки межцеховых газопроводов в конце ответвлений предусматривают продувочные свечи. На цеховых вводах устанавливают отключающие устройства. Место установки должно быть доступно для обслуживания, осмотра и ремонта арматуры и обеспечивать возможность быстрого отключения цехового газопровода. При расположении задвижек

или кранов на высоте более 2 м устраивают площадки из несгораемых материалов с ограждениями и лестницами или предусматривают дистанционный привод. На ответвлениях установлены главные отключающие устройства. К последним участкам цеховых газопроводов присоединяют продувочные линии 9 с отключающими кранами 8, а также штуцеры с кранами и пробками для отбора пробы газа. В продувочные линии 9 включены продувочные трубопроводы, присоединенные к газопроводам агрегатов перед последним по ходу газа отключающим устройством, перед горелками.

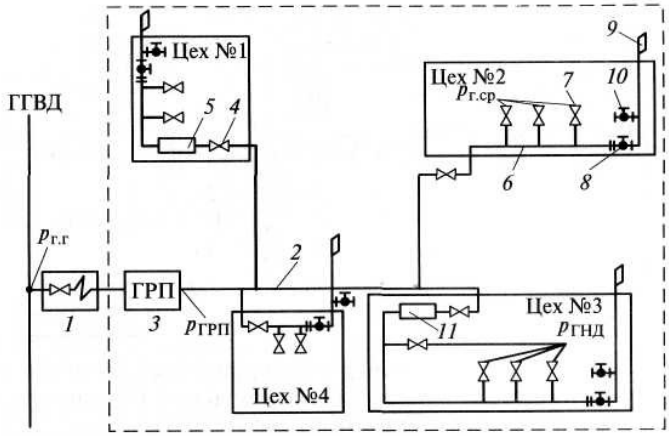


Рис. 9.4. Схема газоснабжения промышленного предприятия с ГРП на вводе:

1 — отключающее устройство на ответвлении к промышленному предприятию; *2* — межцеховый газопровод; *3* — ГРП промышленного предприятия; *4* — отключающее устройство на вводе в цех; *5* — пункт измерения расхода газа (ПИРГ); *6* — внутрицеховый газопровод; *7* — главные отключающие устройства перед агрегатами; *8* — кран на продувочном газопроводе; *9* — продувочный газопровод; *10* — штуцер с краном и пробкой для взятия пробы; *11* — цеховое ГРУ

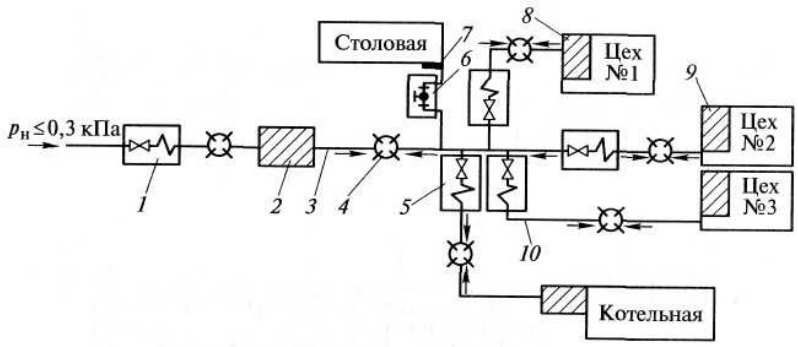


Рис. 9.5. Схема межцехового газопровода среднего давления с центральным пунктом измерения расхода газа и цеховыми ГРУ среднего и низкого конечных давлений:

1, 5 — отключающие устройства в колодце; *2* — центральный пункт измерения расхода газа; *3* — межцеховый газопровод; *4* — сборник конденсата; *6* — отключающее устройство в мелком колодце; *7* — шкафная установка РД; *8* — цеховое ГРУ среднего конечного давления; *9* — цеховое ГРУ низкого конечного давления; *10* — ответвление газопровода к цеху (сборники конденсата устанавливают при использовании влажного газа)

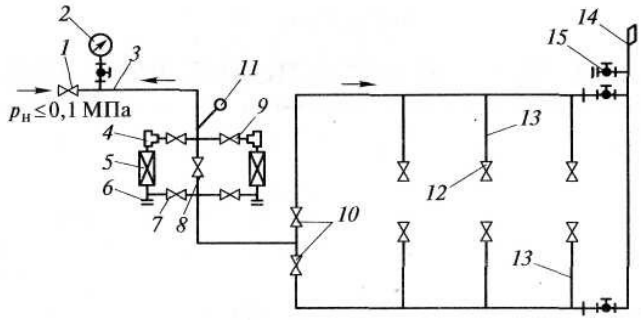


Рис. 9.6. Схема внутрицехового газопровода среднего или низкого давлений с пунктом измерения расхода газа:

1 — отключающее устройство на вводе газопровода в цех; *2* — манометр; *3* — цеховой газопровод; *4* — фильтр-ревизия; *5* — газовый ротационный счетчик; *6* — тройник с пробкой; *7* — отключающее устройство после счетчика; *8* — отключающее устройство на обводном газопроводе; *9* — отключающее устройство до счетчика; *10* — отключающее устройство на ответвлении цехового газопровода; *11* — технический термометр; *12* — главное отключающее устройство на ответвлении газопровода к агрегату; *13* — ответвление газопровода к агрегату; *14* — продувочный трубопровод; *15* — штуцер с краном и пробкой для взятия пробы

Лекция 2

Системы газоснабжения сжиженными газами

Газонаполнительные станции. Источником снабжения потребителей сжиженными углеводородными газами (СУГ) являются газонаполнительные станции (ГНС), которые предназначены для их приема, хранения и распределения в баллонах и автоцистернах. На ГНС должно быть обеспечено раздельное хранение сжиженных газов с повышенным содержанием бутана (до 60 %) и технического пропана, а также раздельная раздача их с помощью баллонов и автоцистерн. На ГНС предусмотрен одновременный слив сжиженных газов из железнодорожных цистерн с разным процентным соотношением пропана и бутана. На ГНС осуществляются следующие операции: прием сжиженных газов от поставщика в железнодорожных цистернах; слив сжиженных газов в хранилища; хранение сжиженных газов в надземных и подземных резервуарах, баллонах; слив из пустых баллонов неиспарившихся остатков; розлив сжиженных газов в баллоны, автоцистерны; прием пустых и выдача наполненных баллонов; технологическое обслуживание и ремонт оборудования; доставка сжиженных газов потребителям в баллонах и автоцистернах; заправка автомашин, работающих на сжиженном газе; рега-зификация (испарение) сжиженных газов; смешивание паров сжиженных газов с воздухом; подача паров сжиженных газов.

Газонаполнительные станции располагают преимущественно вне черты города на специально отведенных спланированных площадках и желательно с подветренной стороны господствующих ветров, чтобы возможные выделения газов не попали в зону жилых, общественных и производственных зданий и сооружений. Принципиальная схема ГНС с надземной установкой резервуаров, рассчитанной на отпуск потребителям 3000 т СУГ в год, приведена на рис. 17.1. Для хранения газа на станции устанавливаются горизонтальные цилиндрические резервуары вместимостью 50 или 100 м^3. Каждый резервуар оборудуют двумя предохранительными клапанами, указателями уровня и уровнемерными трубками.

В состав любой ГНС входят: база хранения со сливной эстакадой, компрессорная установка, насосная со сливным отделением, наполнительное отделение со складом баллонов, отделение освидетельствования баллонов, испарительная установка. Размещение резервуаров может быть надземное, засыпное и подземное. Резервуары связаны между собой наполнительными, расходными и парофазными коллекторами.

Налив сжиженных газов в баллоны и автоцистерны осуществляется не только насосами, но и за счет повышенного давления в расходном резервуаре базы хранения, создаваемого газовыми компрессорами. Для слива неиспарившихся остатков и полного опорожнения баллоны соединяют трубопроводом со сливным резервуаром, в котором поддерживают пониженное давление. Безопасная работа ГНС обеспечивается установкой на оборудовании и трубопроводах запорной и предохранительной арматуры. На всех участках трубопроводов, ограниченных запорными устройствами, должны иметься предохранительные клапаны. На трубопроводах паровой фазы, идущих к всасывающему и напорному коллекторам компрессоров, в качестве основной запорной арматуры используются фланцевые краны со смазкой, а в качестве предохранительной — стальные пружинные клапаны.

Определение мощности газонаполнительной станции. Мощность ГНС зависит от потребности в сжиженных газах. Мощность для ГНС, обслуживающих район радиусом 50...70 км с населением 1 млн чел., рекомендуется в пределах 10...40 тыс. т в год. Если потребители находятся на большем расстоянии от ГНС, устраиваются промежуточные пункты обмена баллонов. Годовая мощность ГНС определяется путем суммирования существующих и перспективных газовых потребителей:

$$G = n_1 g_1 + n_2 g_2 + \ldots + n_n g_n,$$

где G — перспективная потребность газа в районе на год, т; n_1, n_2, -.., n_n — однотипные потребители газа; g_1, g_2, ..., g_n — годовая норма потребления газа однотипными потребителями, т.

Мощность ГНС сжиженного газа определяется, в основном, объемом резервуаров хранилищ (резервуарного парка). Объем резервуаров хранилищ зависит от суточной производительности ГНС, а количество резервируемого для хранения сжиженного газа — от расчетного времени работы ГНС без суточного поступления газа. Расчетное поступление газа

$$П_р = \frac{L}{w_{тр} + П + П_э},$$

где L — расстояние от завода-поставщика газа до ГНС, км; $w_{тр}$ — нормативная суточная скорость транспортирования грузов МПС повагонной отправки, км/сут (принимается 330 км/сут); $П$ — время, затрачиваемое на операции, связанными с отправлением и прибытием груза (принимается 1 сут); $П_э$ — время, на которое следует предусматривать эксплуатационный запас сжиженных газов на ГНС (принимается равным 3 ... 5 сут.). Число резервуаров

$$m = \frac{V}{V_р \varphi},$$

где V — объем резервуарного парка, м^3; $V_р$ — геометрический объем (вместимость) одного резервуара, м^3; φ — коэффициент наполнения резервуаров (0,85 — для наземных, 0,9 — для подземных резервуаров), определяемый нормой заполнения резервуаров (табл. 17.1).

Объем хранилища газа и выбор типа резервуаров. Запас СУГ должен быть достаточным на определенное число дней, которое исчисляется с учетом среднесуточного расхода газа, перспектив роста объектов газоснабжения и расстояния от источников поступления газа. Для хранения СУГ используют стальные сварные резервуары цилиндрической и сферической формы. Резервуары, устанавливаемые вертикально, размещают только на поверхности земли. На ГНС, как правило, применяют цилиндрические горизонтальные резервуары с эллиптическими днищами для наземной и

подземной установки. Конструкция стального горизонтального цилиндрического наземного резервуара вместимостью 50 м^3 для пропана приведена на рис. 17.2. Горизонтальные цилиндрические резервуары устанавливают на прочных фундаментах-опорах из несгораемых материалов. Наземные резервуары устанавливают группами. При размещении наземных резервуаров СУГ в несколько рядов расстояние между рядами должно быть не меньше наиболее длинного резервуара, но не менее 10 м. Каждая группа наземных резервуаров должна иметь обваловку на их полную вместимость.

Для подземной установки применяют только стальные цилиндрические резервуары горизонтального расположения, которые должны иметь антикоррозионную изоляцию не хуже усиленной.

Расчет предохранительного клапана. Предохранительно-сбросные клапаны устанавливаются на каждом наземном и подземном резервуарах. Они предназначены для защиты резервуаров от чрезмерного повышения давления, которое может произойти в следующих случаях: повышение температуры жидкости; наполнение резервуара продуктами с более высоким давлением паров; нагрев резервуаров открытым огнем в случае пожара.

На каждом резервуаре устанавливается не менее двух предохранительно-сбросных клапанов, а перед ними трехходовые краны, позволяющие отключать один из двух предохранительных клапанов и допускающие одновременное их включение. Предохранительно-сбросные пружинные клапаны типа ППК-4 изготовляют с Dy = 50, 80, 100, 150.

Качество предохранительных клапанов, их размеры и пропускная способность выбираются с таким расчетом, чтобы в резервуаре не могло образоваться давление, превышающее рабочее более чем на 0,05 МПа для сосудов с давлением до 0,3 МПа и на 15 % для сосудов с давлением 0,3...6 МПа.

Пропускная способность предохранительного клапана определяется из следующей формулы:

$$F_c = \frac{G}{15{,}9\alpha B\sqrt{(p_1 - p_2)\,\rho_i}},$$

где F_c — площадь проходного сечения, равная наименьшей площади сечения в проточной части, мм^2; G — максимально возможная пропускная способность паров сжиженных газов, кг/ч; α — коэффициент избытка газа перед клапаном; B — коэффициент, учитывающий расширение среды; p_1 — максимальное избыточное давление перед предохранительным клапаном, МПа; p_2 — избыточное давление за предохранительным клапаном, МПа; p_i — плотность рабочей среды.

Конструкции предохранительных клапанов различны. На крышках редукционных головок групповых подземных резервуаров устанавливается сбросный пружинный предохранительный клапан Т831-Г (рис. 17.3), состоящий из корпуса, штока, втулки клапана с резиновым уплотнением, регулировочной гайки, пружины и колпака.

Приложение к лекции 2.

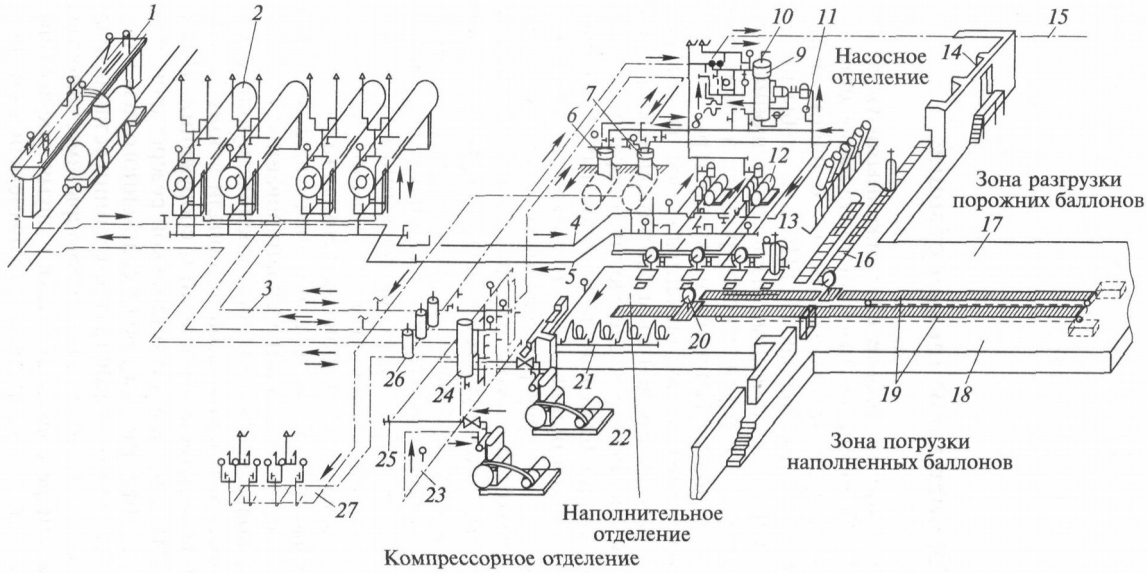


Рис. 17.1. Принципиальная схема ГНС с надземной установкой резервуаров:

1 — сливная эстакада; *2* — база хранения; *3* — электропривод; *4* — всасывающий коллектор; *5* — напорный коллектор; *6* — расходный резервуар испарителя; *7* — резервуар неиспарившихся остатков; *8* — сбросной клапан; *9* — испаритель; *10* — подвод теплоносителя (пар 0,2 МПа); *11* — отвод конденсата; *12* — насосы; *13* — сливная рампа баллонов; *14* — отделение мойки, освидетельствования и окраски баллонов; *15* — трубопровод в котельную; *16* — участок разбраковки баллонов; *17* — склад-навес для порожних баллонов; *18* — склад-навес для наполненных баллонов; *19* — напольные загрузочный и разгрузочный транспортеры; *20* — участок контроля баллонов; *21* — участок заполнения мелких баллонов; *22* — компрессор; *23* — всасывающий коллектор; *24* — маслоотделитель; *25* — напорный коллектор; *26* — конденсатосборник; *27* — колонки для наполнения автоцистерн

Таблица 17.1

Нормы заполнения резервуаров сжиженными газами

Газ	Масса газа на 1 л вместимости резервуара, кг, не более	Вместимость резервуара на 1 кг газа, л, не менее
Бутан	0,488	2,05
Бутилен	0,526	1,90
Этилен	0,286	3,50
Пропан	0,425	2,35
Пропилен	0,445	2,25

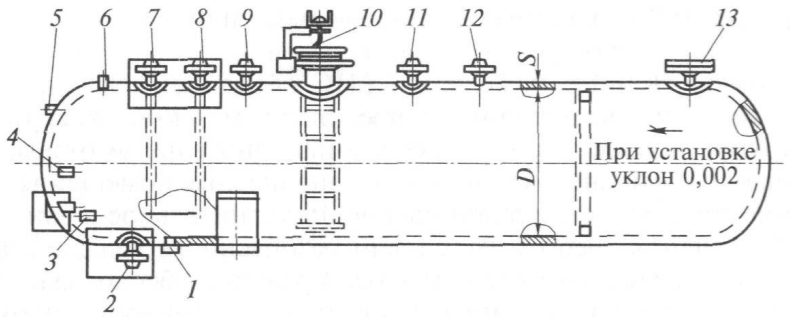
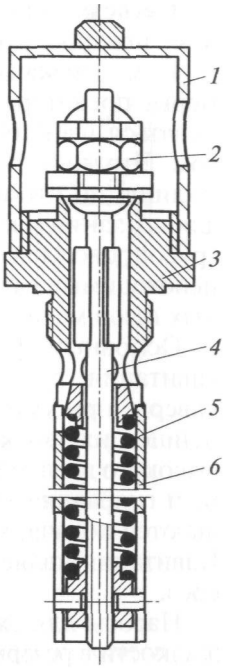


Рис. 17.2. Резервуар для пропана:

1 — муфта для дренажного клапана; *2* — штуцер для жидкой фазы; *3* — штуцер для установки термометра; *4* — муфта для вентилей отбора проб из резервуара; *5* — муфта для настройки уровнемера; *6* — муфта для установки манометра; *7* — штуцер приемный жидкой фазы; *8* — штуцер для уровнемера; *9* — штуцер для сигнализатора уровня жидкости; *10* — люк; *11* — штуцер для установки предохранительно-сбросных клапанов; *12* — штуцер для удаления остатков газа; *13* — штуцер для вентиляции



. 17.3. Сбросный пружинный предохранительны клапан Т831-Г:

колпак; *2* — регулировочная гайка; *3* — втулка; *4* · шток; *5* — пружина; *6* — корпус

Лекция 3

Свойства индивидуальных углеводородов, входящих в СУГ

Под СУГ понимают такие индивидуальные углеводороды или их смеси, которые при температуре окружающего воздуха и атмосферном давлении находятся в газообразном состоянии, а при относительно небольшом повышении давления (без снижения температуры) переходят в жидкости.

Состав СУГ зависит от исходного сырья и способа получения. Основными источниками получения являются попутные нефтяные газы и газы конденсатных месторождений, которые на газобензиновых заводах разделяют на этан, пропан, бутан и газовый бензин. Технические пропан и бутан, а также их смеси представляют собой СУГ, используемые для газоснабжения потребителей.

На нефтеперерабатывающих заводах получают предельные и непредельные углеводороды. Основные компоненты СУГ (пропан и бутан) относятся к насыщенным углеводородам открытого строения - алканам. Их общая химическая формула C_nH_{2n+2}. Алканы представляют собой бесцветные вещества с характерным запахом нефти, практически нерастворимые в воде. Они мало активны и трудно вступают в соединения с другими веществами. Метан CH_4 и этан C_2H_6 являются газами. Метан можно сконденсировать при температуре ниже –82,1°С, а этан ниже –32,3°С. Пропан CH_3–CH_2–CH_3 (C_3H_8), нормальный бутан CH_3–CH_2–CH_2–CH_3 (C_4H_{10}) и изобутан при н.у. находятся в газообразном состоянии, но при незначительном повышении давления (в МПа) до 0,47 (пропан), 0,115 (бутан) и 0,16 (изобутан) и при 0°С они конденсируются в жидкость.

Это свойство выгодно выделяет пропан-бутановые смеси и делает их особенно ценными источниками газоснабжения, ибо транспортировать и хранить их можно в виде жидкостей, а сжигать – в виде газа. Пентан C_5H_{12} – летучая жидкость – входит в состав газового бензина. Алканы являются достаточно сильными наркотиками, но их действие ослабляется малой растворимостью в крови. Поэтому при обычных условиях они являются физиологически индифферентными.

Ненасыщенные углеводороды открытого строения – алкены (C_nH_{2n}) имеют одну двойную связь между соседними атомами углерода. Они обладают способностью к реакциям присоединения, ибо двойная связь легко разрывается и за счет освободившейся валентности углерода происходит присоединение нового атома или атомной группы.

Токсическое действие сходно.

В состав СУГ, получаемых при переработке нефти, могут входить незначительные количества циклических углеводородов – цикланов (C_nH_{2n}).

Состав СУГ, используемых для коммунально-бытового и промышленного газоснабжения, лимитирует ГОСТ (27578-87).

Во избежание повышения упругости паров сжиженный газ не должен содержать значительных количеств этана, а для недопустимого снижения упругости – пентана.

При использовании СУГ всегда имеют место фазовые превращения. Поэтому в отличие от систем, использующих сухой (тощий) газ, элементы систем снабжения СУГ необходимо рассчитывать, исходя из свойств жидкой и паровой фаз с учетом особенностей фазовых превращений. Расчеты проводят по таблицам и диаграммам состояния углеводородов.

Принципиальная схема диаграмм состояния пропана в *p* — *i* координатах показана на рис. приложения. Здесь по оси абсцисс отложена энтальпия *i*, а по оси ординат — абсолютное давление *p*. Нижняя пограничная кривая *MK* соответствует началу кипения, а верхняя пограничная кривая *NK* — сухому насыщенному пару (началу конденсации). Критическое состояние обозначено точкой *K*. Слева от нижней пограничной кривой расположена однофазная система — жидкость. Правее верхней пограничной кривой находится пар. В области между пограничными кривыми расположена двухфазная система жидкость — пар. Следовательно, здесь пар находится в насыщенном состоянии. Соотношение между количеством пара и жидкости отражают линии постоянной сухости *x*, которые показывают долю пара в системе. На диаграмме нанесены изотермы *t*, линии постоянной плотности и линии постоянной энтропии *s*. В области двухфазного насыщенного состояния каждому значению *t* соответствует определенное *p*. Это давление представляет собой упругость насыщенных паров. С ростом температуры упругость паров увеличивается: так, для пропана при t = -40°С, p = 0,11 МПа (абс), а три t = 40°С p = 1,37 МПа (абс). Из приведенных значений следует, что в области температур атмосферного воздуха пары пропана имеют достаточное *p* для использования их в качестве газообразного топлива. Кривая зависимости упругости паров от температуры заканчивается критической точкой. Для пропана $t_{кр}$ = 95,7°С, а $p_{кр}$ = 4 МПа.

Смеси газов и жидкостей (речь о СУГ)

Давление смеси идеальных газов, которые не вступают между собой в химические реакции, определяет закон Дальтона. Давление смеси $p_{см}$ равно сумме парциальных давлений компонентов: $p_{СМ} = \Sigma p_i$.

Состав газовых смесей и смесей взаимно растворимых жидкостей задают молярными долями (для газов r_i, а для жидкостей x_i), массовыми долями m_i, и объемными долями v_i. Молярную долю определяют как отношение числа молей компонента N_i к общему числу молей смеси, т.е. $r_i(x_i) = N_i/\Sigma N_i$.

Массовую долю определяют как отношение массы компонента ко всей массе смеси $m_i = M_i/\Sigma M_i$. Объемную долю для жидких смесей находят как отношение объема компонента V_i, рассчитанного по плотности при температуре смеси к объему смеси $v_i = V_i/\Sigma V_i$ (1). Объемную долю для газовых смесей получают как отношение парциального объема компонента *i* к сумме парциальных объемов, равной объему смеси по формуле (1). Т.к. компонент в парциальном объеме и объеме смеси находится при одинаковой температуре, то по закону Бойля–Мариотта можно написать: $V_i = V_{СМ}\ p_i/p_{СМ}$. По закону Авогадро при одинаковых температурах и давлении объемы, занимаемые молями различных газов, одинаковы, отсюда $\rho = \mu/V_\mu$, где ρ – плотность газа при нормальных условиях в кг/м^3; μ – молекулярная масса киломоля газа в кг; V_μ – объем, занимаемый 1 киломолем газа при нормальных условиях, в м^3. Для идеальных газов и с некоторым

приближением для реальных газов $V_\mu = 22{,}4$ м^3/кмоль.

На основании закона Авогадро можно показать, что для газовых (идеальных) смесей мольные и объемные доли равны. Действительно $V_i = N_i V_\mu$, тогда, подставляя это в (1), получим: $v_i = \frac{V_i}{\Sigma V_i} = \frac{N_i V_\mu}{N_i \Sigma V_\mu} = r_i$, Поэтому для расчета газовых смесей используют мольные (объемные) доли и массовые доли. Расчетные формулы:

Средняя молек. масса смеси $\mu_{см} = \Sigma \mu_i r_i = \frac{1}{\sum \frac{m_i}{\mu_i}}$.

Плотность смеси $\rho_{см} = \frac{1}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}}$.

Приложение к лекции 3.

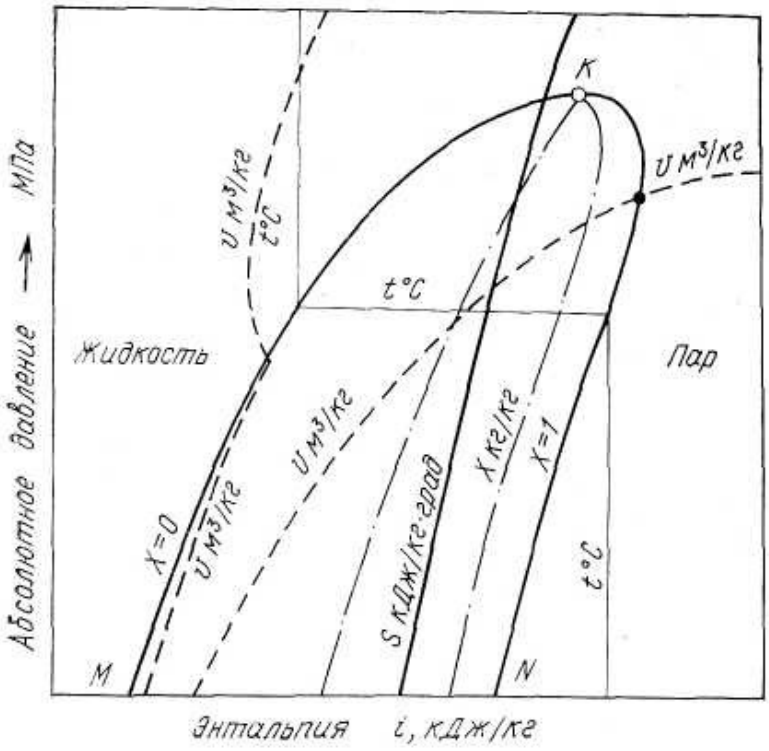


Рис. 13.1. Построение $p - i$-диаграммы

Лекция 4

Скорость химических реакций

В зависимости от количества атомов или молекул, вступающих в соединение, реакции разделяют по порядку на мономолекулярные, бимолекулярные и тримолекулярные. В реакциях первого порядка продукты образуются в результате химического превращения отдельной молекулы: A = M + N + …

В реакциях второго порядка происходит взаимодействие между двумя молекулами или атомом и молекулой: A + B = M + N + …

В реакциях третьего порядка взаимодействуют три частицы: A + B + C =

Чем выше порядок реакций, тем медленнее она протекает, так как для ее осуществления необходимо одновременное столкновение нескольких молекул или атомов. Реакции выше третьего порядка не встречаются, ибо одновременное столкновение четырех и более молекул, обладающих достаточной энергией для реакции, маловероятно.

Порядок реакции часто бывает ниже той величины, которая получается по стехиометрическому уравнению. Это объясняется тем, что стехиометрические уравнения в большинстве случаев не вскрывают механизма реакции, а являются лишь уравнениями итогового баланса. В действительности хим. реакции протекают в виде целого ряда элементарных реакций между атомами, свободными радикалами (т.е. осколками молекул с ненасыщенными валентностями) и молекулами.

Под скоростью химической реакции понимают изменение концентрации реагирующих веществ С, т.е. количество вновь образовавшегося вещества или уменьшение реагирующего вещества в единице объема в единицу времени. В общем виде мгновенная скорость реакции изображается уравнением

$W = \pm\frac{dC}{d\tau}$, знак $\pm$, т.к. можно судить по изменению конц. любого в-ва.

Важнейшими условиями, влияющими на скорость реакции, являются: концентрация реагирующих веществ, температура и наличие катализаторов.

На основании закона действующих масс скорости реакций можно выразить через концентрации реагентов следующим образом:

для мономолекулярной реакции $\frac{dC_M}{d\tau} = k_1 C_A$;

для бимолекулярной реакции $\frac{dC_M}{d\tau} = k_2 C_A C_B$;

для тримолекулярной реакции $\frac{dC_M}{d\tau} = k_3 C_A C_B C_C$.

В этих уравнениях k_i, — константы скоростей реакции, т.е. постоянная для данной реакции при данной температуре. Она характеризует природу реагирующих веществ с точки зрения их склонности к взаимодействию.

Реакции, протекающие между газами, называются гомогенными, а реакции, протекающие на поверхности твердых тел, — гетерогенными.

Скорость реакции от концентрации исходного вещества, которая по мере течения процесса интенсивно падает $W = -\frac{dC_A}{d\tau} = kC_{0A}e^{-k\tau}$.

Зависимость скорости реакции от температуры, по закону Аррениуса отражается на k следующим образом $k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}$, где k_0 — множитель, который в первом приближении принимают постоянным, не зависящим от температуры; Е — энергия активации в кДж/кмоль; R = 8,315 — газовая постоянная в кДж/(кмоль · град); Т — абсолютная температура, К.

Минимальная величина энергии, достаточная для разрушения или значительного ослабления старых внутримолекулярных связей, называется энергией активации. Чем меньше Е, тем легче молекулы вступают в реакцию.

Для химических реакций горения топлива энергия активации Е = 60000 — 160000 кДж/кмоль.

Кинетика цепных реакций горения

Заслуга создания и развития теории цепных реакций, цепного и теплового воспламенений принадлежит акад. Н.Н. Семенову и его сотрудникам.

Теория цепных реакций рассматривает действительный механизм течения реакции, а стехиометрические уравнения считает лишь итоговыми равенствами материального баланса. По цепной теории механизм реакции представляется как цепь последовательных звеньев, а каждое звено состоит из совокупности элементарных

реакций между атомами, радикалами и молекулами. Основное свойство цепи реакций заключается в том, что она начинается с активного центра, который в конце каждого звена регенерируется. Началом каждого звена служит также активный центр. Если в конце каждого звена регенерируется только один активный центр, реакция называется неразветвленной цепью, если каждое звено порождает несколько активных центров, реакция представляет собой разветвленную цепь. Энергия реакции передается активным центрам, а не распределяется по всем степеням свободы. За время своего краткосрочного неустойчивого существования активные центры могут вступать в реакции с атомами, радикалами или молекулами, образуя промежуточные, также неустойчивые соединения, пока звено цепи реакции не завершится конечными продуктами и новыми активными центрами. Наряду с этим они могут рекомбинироваться, терять свою избыточную энергию — иначе, гибнуть.

Цепные реакции горения углеводородов представляют собой весьма сложную совокупность разнообразных реакций, большей частью моно- и бимолекулярного характера. Спектроскопическими исследованиями обнаружено, что в реакционной зоне находятся неравновесные концентрации гидроксила. Кроме того в пламени содержатся свободные радикалы C_2 и CH.

Реакция полного сгорания углеводородного газа C_mH_n (где m и n — число атомов углерода и водорода в молекуле) с кислородом O_2 выражается стехиометрическим уравнением:

$$C_mH_n + \left(m + \frac{n}{4}\right)O_2 = mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O$$

где CO_2, H_2O — компоненты продуктов полного сгорания газа.

На практике для интенсификации процесса горения используются окислители, обогащенные кислородом, тогда реакция горения имеет вид

$$C_mH_n + \left(m + \frac{n}{4}\right)(O_2 + kN_2) = mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O + \left(m + \frac{n}{4}\right)kN_2$$

где k — соотношение содержания азота N_2 и кислорода O_2 в окислителе.

При сжигании углеводородного газа C_mH_n в воздухе, состоящем примерно из 21 % кислорода O_2 и 79 % азота N_2, стехиометрическая реакция полного сгорания имеет вид

$$C_mH_n + \left(m + \frac{n}{4}\right)O_2 + 3{,}76N_2 = mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O + \left(m + \frac{n}{4}\right)3{,}76N_2$$

Стехиометрические уравнения реакции горения некоторых газов в воздухе приведены в таблице приложения.

Стехиометрические уравнения реакций горения газов в воздухе

Реакция	Продукты сгорания, %				
	сухие		влажные		
	CO_2	N_2	CO_2	H_2O	N_2
$H_2 + 0{,}5O_2 + 1{,}88N_2 = H_2O + 1{,}88N_2$	0	100	0	34,72	65,28
$CO + 0{,}5O_2 + 1{,}88N_2 = CO_2 + 1{,}88N_2$	34,72	65,28	34,72	0	65,28
$CH_4 + 2O_2 + 7{,}52N_2 = CO_2 + 2H_2O + 7{,}52N_2$	11,74	88,26	9,51	19,01	71,48
$C_2H_6 + 3{,}5O_2 + 13{,}16N_2 = 2CO_2 + 3H_2O + 13{,}16N_2$	13,19	86,81	11,01	16,52	72,47
$C_3H_8 + 5O_2 + 18{,}8N_2 = 3CO_2 + 4H_2O + 18{,}8N_2$	13,76	86,24	11,63	15,50	72,87
$C_3H_{10} + 6{,}5O_2 + 24{,}4N_2 = 3CO_2 + 5H_2O + 24{,}4N_2$	14,06	85,94	11,96	14,95	73,09
$C_2H_4 + 3O_2 + 11{,}28N_2 = 2CO_2 + 2H_2O + 11{,}28N_2$	15,06	84,94	13,09	13,09	73,82
$C_3H_6 + 4{,}5O_2 + 16{,}9N_2 = 3CO_2 + 3H_2O + 16{,}9N_2$	15,06	84,94	13,09	13,09	73,82
$C_4H_8 + 6O_2 + 22{,}6N_2 = 4CO_2 + 4H_2O + 22{,}6N_2$	15,06	84,94	13,09	13,09	73,82

Лекция 5

Теоретическое количество воздуха

Из стехиометрических реакций горения определяется теоретический объем или расход кислорода (окислителя), необходимый для полного сгорания единицы объема газа, т.е. количество окислителя, требуемое для стехиометрического сжигания единицы объема горючего газа по формуле

$$V_{O_2}^0 = 0{,}01\left[0{,}5(H_2 + CO + 3H_2S) + \left(m + \frac{n}{4}\right)C_mH_n - O_2\right]$$

где H_2, CO, H_2S и т.д. — соответственно компоненты горючего газа в объемных процентах. *Теоретическим количеством воздуха* называется наименьшее количество воздуха, необходимое для полного сжигания единицы объема газа. Теоретическое количество воздуха (стехиометрическое) для углеводородного газа определяется по последней формуле прошлой лекции. Не зная элементарного состава горючего газа, теоретическое количество воздуха можно определить по формуле Д.И. Менделеева: $V_в^0 \approx \frac{Q_н^р}{3{,}76}$,

Коэффициенты избытка воздуха и топлива

На практике сжигание газа в большинстве случаев производится с избытком воздуха (из-за недостаточно совершенного перемешивания вступающих в процесс горения масс газа и воздуха). Коэффициент избытка воздуха определяется отношением фактического объема воздуха к стехиометрическому: $\alpha = \frac{V_в}{V_в^0}$. При сжигании газа для достижения большего КПД и интенсификации процесса горения оптимальный α = 1,05...

1,1. Для оценки горючей смеси используют также коэффициент избытка топлива, представляющий собой отношение горючих компонентов смеси к их стехиометрическому отношению. Можно считать, что $\varphi = \frac{1}{\alpha}$.

Продукты сгорания газа

После полного сгорания 1 м^3 газа получаются продукты полного сгорания углеводородов и серы, азот газа и азот, находящийся в теоретически необходимом количестве воздуха; теоретическое количество водяного пара, включающее в себя пар, образующийся при испарении влаги газа и в результате полного сгорания водорода газа; пар, вносимый в топку влажным теоретически необходимым количеством воздуха, и пар, используемый иногда для распыления; избыточно поданный воздух и находящийся в нем водяной пар.

Для упрощения расчетов компоненты продуктов сгорания подразделяют на теоретические количества, получающиеся при сжигании 1 м^3 газа с $\alpha = 1$, и их количеством в избыточном воздухе. Теоретический объем азота

$$V^0_{N_2} = 0{,}79V^0_в + \frac{N_2}{100}.$$

При анализе содержание трехатомных газов CO_2 и SO_2 определяется совместно по уравнению горения и обозначается символом RO_2:

$$V^0_{RO_2} = 0{,}01(CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_mH_n).$$

Теоретический объем водяных паров

$$V^0_{H_2O} = 0{,}01(H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} C_mH_n + 0{,}124d_{г.т}) + 0{,}0161V^0_в,$$

где $d_{г.т}$ — влагосодержание газового топлива, г/м^3.

Теоретический объем продуктов сгорания $V^0_{п.с} = V^0_{RO_2} + V^0_{N_2} + V^0_{H_2O}$.

При сжигании топлива с $\alpha > 1$ действительный объем продуктов сгорания будет больше теоретического на величину избыточного воздуха и объем водяных паров, содержащихся в нем: $V_{п.с} = V^0_{п.с} + 1{,}0161(\alpha - 1)V^0_в$.

Общий объем продуктов сгорания подразделяется на:

объем сухих газов $V_{с.п.с} = V^0_{RO_2} + V^0_{N_2} + (\alpha - 1)V^0_в$;

объем водяных паров $V_{H_2O} = V^0_{H_2O} + 0{,}0161(\alpha - 1)V^0_в$.

При наличии CO_2, сероводорода и паров воды в газе и воздухе соответствующее их количество, образующееся в продуктах сгорания, можно рассчитать по следующим формулам: $V_{CO_2} = 0{,}01(CO + CH + \sum mC_mH_n + CO^р_2)$,

где CO_2^P — расчетное содержание CO_2 в газе, %;

$$V_{SO_2} = 0{,}01H_2S; \quad V_{H_2O} = \left[H_2 + 2CH_4 + 0{,}5\sum nC_mH_n + H_2S + 0{,}124(d_{г.т} + \alpha V^0_в d_в)\right]$$

Количество азота в продуктах сгорания зависит α $V_{N_2} = 0{,}79\alpha V^0_в + N^р_2$.

Полный объем продуктов сгорания $V_{п.с} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + O_2 + V_{H_2O}$.

Энтальпия (теплосодержание) продуктов полного сгорания (уходящих газов) определяется по формуле, кДж/м^3, $I_{п.с} = V_{п.с}C_рT_{ух}$,

где $C_р$ — средняя объемная теплоемкость продуктов сгорания в интервале температур от 0 до $T_{ух}$, кДж/(м^3 К); $T_{ух}$ — температура уходящих газов, К.

Значения $C_р$ следует брать из таблиц, графиков теплофизических свойств газов или рассчитывать по формулам зависимости $C_р$ от Т.

Коэффициент использования теплоты сгорания, %, $\eta = \frac{Q^р_н - I_{п.с}}{Q^р_н}100.$

Химическая полнота сгорания

При сжигании газа не происходит полного сгорания всех горючих компонентов. В продуктах сгорания всегда имеется некоторое количество горючих газов CO, H_2, CH_4 и т.д. Их количество зависит от условий сжигания. Полный состав продуктов сгорания может быть определен методами газового анализа. Однако это очень трудоемко и требует значительного времени. На практике ограничиваются измерением основных компонентов продуктов сгорания, с помощью которых можно определить две главные характеристики топливосжигающих устройств: коэффициент избытка воздуха α и химическую неполноту сгорания η_x. Под коэффициентом химической неполноты сгорания η_x понимается отношение действительно выделившейся после сгорания газа теплоты Q к теплоте $Q_{полн}$, которая должна выделиться при полном сжигании всех горючих веществ в смеси: $\eta_x = \frac{Q}{Q_{полн}}$.

Определение коэффициента избытка воздуха $\alpha \approx \frac{0{,}21}{0{,}21 - r_{O_2}^{ост}}$.

где $r_O^{ост}$ отношение объема кислорода к общему объему продуктов сгорания (по данным измерений).

Энтальпия продуктов сгорания

Знание энтальпии продуктов сгорания необходимо при определении температуры горения и теплового баланса горения. Она определяется на 1 м^3 газового топлива по выражению $I_{п.с} = I_{п.с}^{\Theta} + (\alpha - 1) I_{в}^{0}$,

где $I^{\Theta}_{п.с}$ — энтальпия теоретического количества продуктов сгорания (α = 1), МДж/м^3 при температуре Θ, °C; $I^0_в$ — энтальпия теоретически необходимого количества воздуха. Энтальпия теоретически необходимого воздуха

$I_{п.с}^{0} = V_{RO_2}^{0}(C^{\Theta})_{RO_2} + V_{N_2}^{0}(C^{\Theta})_{N_2} + V_{H_2O}^{0}(C^{\Theta})_{H_2O}$, (индекс вначале «в» а не «п.с»)

где $(C^{\Theta})_i$ — соответственно теплоемкость CO_2, азота и водяного пара.

Температура горения

Температура горения определяется из теплового баланса процесса горения, который составляется на основе термодинамических законов. Источником энергии, идущей на нагрев продуктов сгорания, является теплота сгорания газа $Q_н^р$ и физическая теплота $Q_ф$, вносимая газом и окислителем (на единицу количества газа). В зависимости от условий сжигания газа и учета явлений при горении различают *максимальную (адиабатическую)* температуру горения, *калориметрическую* и *теоретическую* температуры горения.

Максимальная температура горения, или жаропроизводительность, достигается при полном адиабатическом сжигании газа в н.у. (при α = 1) при относительно низких конечных температурах, когда диссоциацией молекул можно пренебречь: $T_{max} = T_а = T_ж = \frac{Q_н^р}{\sum V_i C_{p_i}}$, Калориметрическая температура горения определяется по формуле $T_к = \frac{Q_н^р + Q_ф}{\sum V_i C_{p_i}}$. При ее определении учитывается физическая теплота свежей горючей смеси $Q_ф$. В отличие от определения жаропроизводительности калориметрическая температура может быть определена при сжигании топлива в адиабатических условиях, без учета диссоциации с избытком окислителя.

Теоретическая температура горения определяется также в условиях адиабатического сжигания топлива, но с учетом теплосодержания свежей горючей смеси, реакций диссоциации молекул CO_2 и H_2O и потерь от химической и физической неполноты сгорания. Ее вычисляют по формуле

$$T_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф}} - Q_g - Q_{\text{х}}}{\sum V_i C_{p_i}}.$$

Процессы тепломассопереноса в топочной камере, теплопотери в окружающую среду и конструктивные особенности камер сгорания несколько снижают температуру горения, и действительная температура горения определяется соотношением $T_{\text{действ}} = \eta_{\text{пр}} T_{\text{к}}$, где $\eta_{\text{пр}}$ — пирометрический коэффициент, который изменяется в пределах 0,7...0,95 для различных топочных устройств.

Лекция 6

Распространение пламени

Существует два предельных случая распространения пламени: нормальное при медленном горении и детонационное при скоростном взрывном горении. Примером медленного горения может служить распространение пламени в неподвижной горючей смеси. Если холодную горючую смесь нагреть в какой-то одной точке до высокой температуры, то в этой точке скорость реакции возрастает в соответствии с законом Аррениуса (см. формулу). Выделившаяся теплота будет прогревать за счет теплопроводности соседние слои смеси, в которых тоже начинается реакция. Химическая реакция протекает в очень тонком слое, который отделяет несгоревшую смесь от продуктов горения. Разогрев свежей смеси происходит в непосредственной близости от зоны реакции также в тонком слое. *Пламенем* называется зона, в которой протекает реакция горения. Пламя является границей, отделяющей еще несгоревшую свежую смесь от продуктов горения. При горении оно распространяется в свежую горючую смесь с определенной скоростью, называемой скоростью распространения пламени. Если в трубке, запаянной с одного конца и заполненной горючей смесью, поджечь смесь с открытого конца, то воспламенится узкий слой смеси, и пламя начнет равномерное движение вдоль трубки за счет передачи теплоты от пламени молекулярной теплопроводностью в свежую смесь. Линейная скорость движения пламени вдоль трубки $U_л$ называется скоростью равномерного распространения пламени.

Нормальной скоростью распространения пламени $U_н$ называется скорость движения фронта пламени относительно свежей смеси в направлении, нормальном к его поверхности, обязанное своим происхождением процессу передачи теплоты молекулярной теплопроводностью. Нормальная скорость распространения пламени определяется физико-химическими свойствами горючей смеси и является физико-химической константой. Нормальная скорость распространения пламени углеводородных газов имеет небольшую величину. Максимальная ее величина для газовоздушной смеси — 2,67 м/с.

Детонация возникает при поджигании смеси в условиях адиабатического сжатия в ударной волне. Детонационное горение распространяется с очень большой скоростью, несколько километров в секунду, и сопровождается очень большими перепадами давления. В качестве характеристики распространения пламени принимается также объем смеси, сгорающей за единицу времени на единице поверхности U, см^3/(см^2·с). Секундный объем сгорающей смеси $U_н$, умноженный на ее плотность ρ, называется массовой скоростью горения $U_{\text{м}} = \rho U_{\text{н}}$. Различают два вида пламени: ламинарный и турбулентный.

Влияние физико-химических факторов на скорость распространения пламени

Состав горючей смеси. На рис. 12.1 даны значения скоростей распространения пламени для некоторых газов в зависимости от их содержания в воздухе, полученные

методами трубки (рис. 12.1, а) (равномерная скорость) и горелки (рис. 12.1, б) (нормальная скорость). Кривые зависимости скоростей пламени от концентраций газа в горючей смеси имеют колоколообразный вид. Следует отметить, что при изменении состава горючей смеси изменяется температура горения, поэтому в действительности с помощью приведенных на рис. 12.2 кривых представлены зависимости скорости горения не только от состава, но и от температуры горения. На рис. 12.2 приведена зависимость нормальной скорости распространения пламени от его температуры для углеводородных газов. Видно, что для всех углеводородов эта зависимость описывается одной кривой за исключением водорода.

Влияние влажности. Введение небольшого количества влаги в горючую смесь приводит к значительному увеличению скорости распространения пламени. Реакция окисления ускоряется в результате каталитического действия паров воды $U_н \sim \sqrt{C_{H_2O}}$,

где C_{H2O} — концентрация водяного пара в зоне реакции.

Начальная температура смеси. Предварительный подогрев, т.е. начальная температура T_0 горючей смеси, оказывает влияние на скорость распространения пламени. Скорость распространения пламени (рис. 12.3) возрастает с повышением начальной температуры во всем диапазоне изменения концентраций горючего. Из рис. 12.3 видно прогрессивное возрастание кривой изменения максимальной скорости распространения пламени с температурой смеси. Для большинства углеводородных газов эта зависимость определяется эмпирическим уравнением вида $U_{н\,max} = A + BT_0^n$, где A, B — коэффициенты, зависящие от вида газа. Показатель степени n изменяется в зависимости от температурной области и вида газа в пределах $1{,}4 < n < 2{,}1$.

Данная зависимость и форма кривых на рис. 12.3 согласуются с эмпирическим законом Пассауэра: $U_н = \alpha T_0^2$, где α — коэффициент, определяемый свойствами горючей смеси и условиями химической реакции. Из кинетики химических реакций известно, что влияние температуры смеси на скорость химических реакций весьма значительно и определяется законом Аррениуса.

Акустические возмущения. Акустические возмущения оказывают влияние на скорость распространения пламени в зависимости от частоты и амплитуды. Влияние акустического поля сводится к нарушению ламинарного потока и изменению формы пламени. В звуковом интервале частот от 5 до 12,5 кГц при повышении амплитуды акустической волны происходит изменение формы фронта пламени. Ультразвуковые колебания с частотой 270...500 кГц увеличивают скорость горения. Это связано с возникновением пульсаций в потоке смеси и ее турбулизацией.

Экспериментальные методы определения нормальной скорости распространения пламени

Нормальная скорость распространения пламени определяется экспериментально различными методами, основанными на том, что на поверхности пламени F сгорает весь объем смеси V в единицу времени, и сводится к измерениям объема смеси и поверхности пламени.

Метод бунзеновского пламени. Используя этот метод, русский ученый В.А. Михельсон установил закон косинуса $U_н = W_{см}\cos\Theta$, где Θ — угол между скоростью потока и нормалью к фронту пламени. На основе этого закона и методики бунзеновского пламени получена эмпирческая формула определения нормальной скорости распространения пламени $U_н = \frac{V_г(1+\alpha V^0)}{\pi R\sqrt{R^2+h^2}}$, где R, h — соответственно внутренний радиус выходного сопла горелки и высота внутреннего конуса бунзеновского пламени. Для экспериментального определения нормальной скорости распространения пламени по

методу горелки достаточно измерить расход газа $V_г$ внутренний радиус горелки, высоту внутреннего конуса, коэффициент избытка воздуха α и подставить в выражение.

Метод горизонтальной трубки. По этому методу нормальная скорость распространения пламени $U_н$ определяется через линейную скорость распространения пламени $U_л$: $U_н = \frac{U_л f}{F}$,

где f — площадь поперечного сечения трубки; F — поверхность пламени. При распространении пламени в трубках имеет место турбулизация потока, поэтому поверхность горения F искривляется и превышает поперечное сечение трубки f. За счет искривления поверхности горения скорость распространения пламени непрерывно растет и может увеличиться в 3 — 6 раз. Равномерное распространение пламени наблюдается только до расстояния 1/4 длины трубки от ее устья.

Приложение к лекции 6

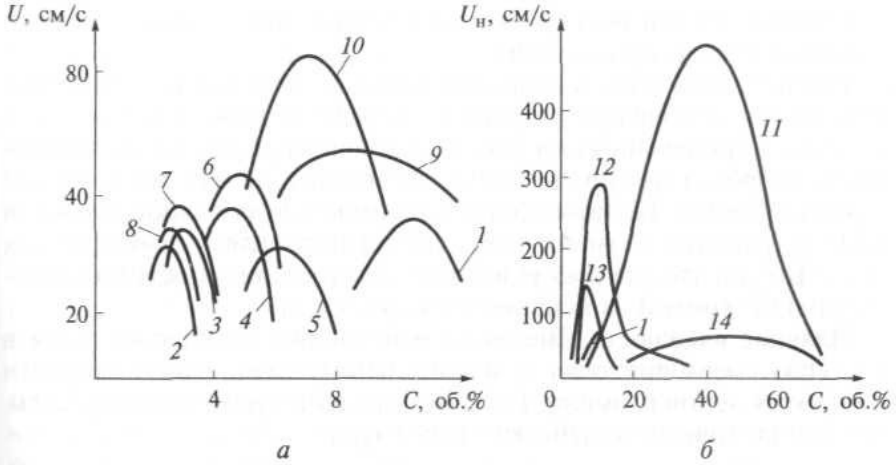


Рис. 12.1. Зависимость равномерной (*а*) и нормальной (*б*) скоростей распространения пламени от концентрации газа в горючей смеси:

1 — метан; *2* — гексан; *3* — пентан; *4* — этиловый эфир; *5* — ацетон; *6* — пропилен; *7* — бензол; *8* — циклогексан; *9* — сероводород; *10* — этилен; *11* — водород; *12* — ацетилен; *13* — этилен; *14* — оксид углерода

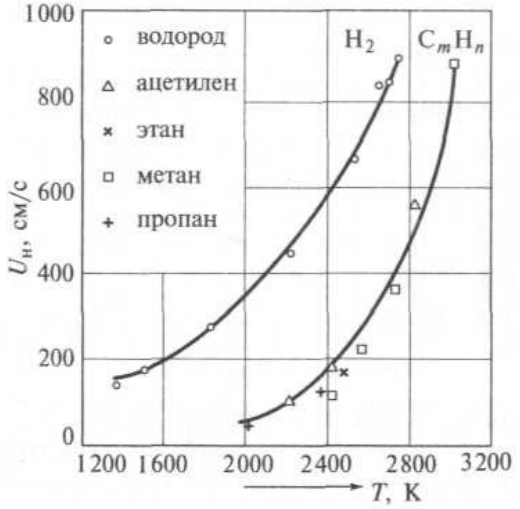


Рис. 12.2. Зависимость скорости горения от температуры пламени

Рис. 12.3. Зависимость скорости пламени от коэффициента избытка топлива при различных начальных температурах смесей для пропановоздушного пламени при атмосферном давлении:

1 — богатая смесь ($\alpha < 1$); *2* — стехиометрическая смесь ($\alpha = 1$); *3* — бедная смесь ($\alpha > 1$)

Лекция 7

Сжигание газа

Факельное и беспламенное горение. Кинетический, диффузионный и промежуточный принципы сжигания газов.

Организация процесса сжигания газа в любом топочном устройстве достигается с помощью тех или иных аэродинамических приемов, определяющих форму взаимодействия газа и окислителя и обусловливающих тип топочного процесса. Сжигание газов производится в основном факельным методом. При *факельном сжигании* газ вносится газовоздушным потоком и сгорает на лету, почти не выпадая из потока. Применяется также *беспламенное (поверхностное) сжигание газов*, характеризующееся тем, что горение горючей смеси происходит в непосредственной близости с раскаленными поверхностями.

При сжигании газов в большинстве случаев истечение газа или воздуха происходит через малые отверстия в большой топочный объем. При воспламенении струи горючего газа или горючей смеси, истекающей из трубки или сопла, на горелке возникает пламя. Стационарное пламя этого типа является основным элементом установок непрерывного горения. На практике такой вид сжигания газа называют также *струйным*. Смешение газовых потоков или струй является важной проблемой при конструировании и эксплуатации камер сгорания и топочных устройств. От смешения воздуха и газа, подаваемых в топку, зависит тепловой эффект и КПД топки.

Организация процессов сжигания газов в потоке с воздухом основывается на различных принципах, предельными из которых являются кинетический и диффузионный. При *кинетическом принципе* предварительно до начала процесса горения подготовляется однородная горючая смесь с содержанием воздуха несколько большим, чем требуется для стехиометрического соотношения. Смесь подготовляется в специальных смесителях или с помощью инжекторов в инжекционных горелках. Коэффициент избытка первичного воздуха α_1 = 1,02... 1,05. При меньшем содержании воздуха по кинетическому принципу протекает только начальная стадия горения, до использования кислорода, находящегося в смеси. Такое сгорание смеси происходит в жестком прозрачном факеле без видимых пиролитических процессов, приводящих к образованию сажистых частиц. При *диффузионном принципе сжигания* газ и воздух подаются раздельно и процессы смешения и горения развиваются параллельно. Горючая смесь образуется непосредственно в процессе горения благодаря диффузии кислорода из окружающего воздуха или на границе раздела потоков газа и воздуха $\alpha_1 = 0$. Принцип сжигания газа при $\alpha_1 < 1$ является *промежуточным между кинетическим и*

диффузионным. С учетом этого принципа конструируются все газовые аппараты, оборудованные инжекционными горелками. В таких горелках содержание первичного воздуха в смеси принимается в зависимости от вида газа таким, чтобы в пламени отсутствовали сажистые частицы и чтобы обеспечить стабильность горения при изменении тепловой мощности в необходимых пределах.

Смесеобразование

Смесеобразование можно считать первой стадией сжигания газа. От этого процесса во многом зависят все дальнейшие стадии сжигания топлива. Смешение осуществляется при взаимодействии потоков газа и воздуха, подаваемых в смесительные устройства и в топочную камеру, где газовоздушная смесь смешивается с высокотемпературными продуктами сгорания, постоянно ее поджигающими.

В зависимости от назначения и конструкций топочных устройств струи газа и воздуха, подаваемые в них, могут быть различными: прямоточными, осесимметричными, плоскими, кольцевыми, закрученными и т.д. Определяющими параметрами струи являются: скорость и температура в произвольной точке струи, ширина и глубина проникания струй, а также взаимодействие струй с соседними струями. В процессе смешения возможно применение двух основных категорий струй: свободные струи и струи, вытекающие в движущийся поток. В каждом из этих случаев рассматривают ламинарные и турбулентные потоки. Струя газа называется *свободной*, если она не ограничена твердыми стенками и распространяется в среде тех же физических свойств. Струя, распространяющаяся в покоящейся среде, называется *затопленной*, а в потоке — *спутной*. Если струя обладает температурой, одинаковой со средой, куда она вытекает, то она называется *изотермической*, а если температура струи и среды различная — *неизотермической*.

Сжигание газа в топочных устройствах производится в турбулентных потоках. Однако ламинарное горение является фундаментальной основой физического понимания процессов сжигания газа.

Предварительное смешение газа с воздухом осуществляется в специальных смесительных устройствах. На практике они во многих случаях компонуются в горел очных устройствах и рассчитываются по определенным методикам.

Физическая картина горения бунзеновского пламени

Существование бунзеновского пламени определяется предварительным смешением горючего газа с воздухом и истечением горючей смеси при строго ламинарном режиме. При поджигании газовоздушной смеси над устьем горелки образуется пламя (рис. 13.3 приложения). Четкий внутренний конус представляет поверхность горения, на которой сгорают готовые для горения газы, обеспеченные первичным воздухом, имеющимся в газовоздушной смеси. При $\alpha = 1$ все сгорает на внутреннем конусе. При $\alpha < 1$ окружающее поверхность горения более слабое свечение (наружный конус) представляет собой область догорания оставшихся горючих газов. Благодаря диффузии они смешиваются с кислородом окружающей атмосферы в наружной кайме пламени и в зависимости от степени смешения сгорают, образуя CO_2 и H_2O. При этом равновесное состояние, установившееся на поверхности внутреннего и внешнего конусов не меняется, несмотря на изменения температур. У основания бунзеновского пламени в устье горелки канала вблизи ее среза в точках, где скорость потока равна нормальной скорости распространения пламени U_H, пламя держится устойчиво, образуя зажигающее кольцо, обеспечивающее непрерывное зажигание поступающей смеси по периферии струи. У стенок горелки, скорость смеси W больше скорости распространения пламени U_H и пламя не может проникнуть в горелку (огневой канал). В непосредственной близости от устья огневого канала не может происходить

горение, так как стенки канала действуют как поглотитель теплоты. Они отводят от пламени теплоту и охлаждают горючую смесь у стенки до температуры зажигания. Между устьем горелки и краем пламени (зажигающим кольцом) находится тонкий слой, в котором не происходит горение. Этот слой называется мертвым пространством. Пламя как бы весит над горелкой.

Необходимое для распространения пламени от периферии горелки к центру струи время $\tau = \frac{R}{U_н}$, где R — радиус огневого канала.

За это время центральные молекулы струи, двигаясь со скоростью W, пройдут расстояние $l = W\tau$, которое соответствует длине факела.

Подставляя первую формулу во вторую, получим, что длина ламинарного факела $l = \frac{WR}{U_н}$.

Фронт пламени однородной смеси принимает устойчивое положение по конусообразной поверхности, в каждой точке которой нормальная составляющая $W_Н$ скорости потока W равна нормальной скорости распространения пламени $W_н = W\cos\Theta = U_н$. Из соотношения видно, что скорость струи W может значительно превышать $U_Н$, не вызывая срыва пламени. Но W не должна быть меньше $U_Н$ во избежание проскока пламени в горелку. Для образования устойчивого факела в нижней части конуса необходимо соблюдение условия равновесия $W = -U_н$. нарушается. Коническая поверхность пламени находится в кажущемся покое, в действительности она является результатом взаимодействия двух движений: движения газа снизу вверх и встречного движения пламени. Внутренний конус или поверхность горения бунзеновского пламени располагается внутри ядра свободной струи (см. рис. 13.1) и находится в динамическом равновесии с потоком газовоздушной смеси, вытекающей из горелки. В зоне реакции температура увеличивается скачками от температуры окружающей среды до температуры реакции, одновременно изменяется плотность газовоздушной смеси. Объем в зоне горения увеличивается в 6 - 8 раз, в пламени возникает сильный шум. Зона горения расширяется, и границы ее искажаются, а зона воспламенения заметно растягивается.

Приложение к лекции 7

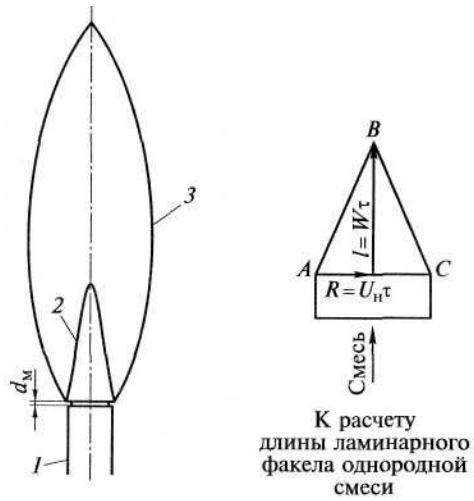


Рис. 13.3. Бунзеновское пламя:
– горелка; *2* — внутренний конус; *3* — наружный конус; $d_м$ — мертвое пространство

Лекция 8

Турбулентное горение однородной смеси

Чтобы обеспечить устойчивое зажигание турбулентного факела однородной газовой смеси, его необходимо подавать в пространство, заполненное накаленными продуктами сгорания. По мере турбулентного расширения струи топочные газы увлекаются ею и одновременно смесь нагревается и разбавляется продуктами сгорания. Нагрев струи происходит в турбулентном пограничном слое. В ядре струи температура равна температуре смеси при истечении из горелки. Нагрев происходит наиболее интенсивно по периферии струи и по мере удаления от устья горелки распространяется внутри струи. По мере приближения к внешней границе струи температура T повышается, а концентрация c падает. Влияние температуры на скорость химических реакций сильнее влияния концентраций реагирующих веществ. Химические реакции протекают в малом интервале температур, близком к температуре горения в смеси, сильно разбавленной продуктами сгорания. Воспламенение благодаря турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии передается соседним слоям. Фронт пламени искривляется, размывается, разрывается на отдельные очаги и непрерывно видоизменяется, но конусообразная форма сохраняется, так как зажигание происходит по периферии струи. Структура факела показана на рис. 13.4. Эффективность процесса сгорания в целом определяется общей длиной факела $l_ф = l_в + \delta_\tau + l_д$,
где $l_в$ — длина или высота внутреннего конуса, зона воспламенения; δ_τ — толщина турбулентной зоны; $l_д$ — длина зоны догорания. Толщина турбулентной зоны $\delta_\tau = \dfrac{W'd}{U_н}$,
где W' — пульсации скорости. В конусе, ограниченном поверхностью воспламенения, движется еще не воспламененная смесь. Горение завершается за видимым фронтом на участке $l_д$ до полного выгорания, называемом длиной зоны догорания. Длина факела $l_ф$ будет тем больше, чем меньше скорость химического реагирования и чем больше скорость движения газов. При малых концентрациях смеси из-за малой скорости реагирования $l_д$ значительно увеличивается.

Стабилизация открытого пламени

Стабилизация ламинарного факела зажигающим кольцом осуществляется в пограничном слое потока, в котором создаются благоприятные гидродинамические и тепловые условия, при которых пламя может существовать устойчиво. Факел стабилизируется немного выше среза горелки. Расстояние от нижнего края пламени до среза горелки определяется расстоянием, на которое распространяется охлаждающее

действие стенок. По порядку величины оно равно ширине фронта пламени. При уменьшении скорости потока до величины, когда $U_н > W$, может произойти *проскок* пламени в горелку. При увеличении W, когда $W > U_н$, может произойти *отрыв* пламени и срыв его с горелки. Пределами устойчивости пламени на горелке являются отрыв и проскок пламени. В основании конического пламени по периферии устья круглой горелки образуется зажигающее кольцо.

Типичные для открытого пламени атмосферных горелок с подсосом вторичного воздуха из окружающей атмосферы пределы устойчивости по скоростям истечения смеси в зависимости от концентрации топлива представлены на рис. 13.5. Проскок всегда происходит в незаштрихованной области, находящейся под кривой проскока. При увеличении скорости потока до значения, превышающего скорость пламени в любой точке, пламя отрывается от горелки и, удаляясь, полностью гаснет.

Теоретический анализ процесса в итоге дает обобщенную зависимость критических параметров потока газовоздушной смеси и скорости распространения пламени, выраженную через критерий Пекле: $\mathrm{Pe} = \frac{W_{ср} d}{a}$,
где $W_{ср}$ — средняя скорость потока газа; d — внутренний диаметр сопла; a — коэффициент температуропроводности. Это соотношение хорошо описывает условия стабилизации как открытого пламени, так и пламени на искусственных стабилизаторах горения.

Влияние некоторых физ.-хим. факторов на устойчивость горения

Влияние состава смеси. Решающим для устойчивости горения оказывается поведение нижней кромки пламени, где локальная скорость потока равна скорости распространения пламени. С изменением состава смеси изменяется не только высота пламени, но и диаметр его основания (но он всегда больше внутреннего диаметра сопла на срезе горелки). С увеличением α ширина нижней кромки уменьшается, затем остается постоянной. Предельно допустимая скорость отрыва для данного газа определяется соотношением

$$W_{отр} = k_{отр} \frac{1 + V^0}{1 + \alpha V^0},$$

где $k_{отр}$ — константа отрыва, постоянная для данного газа и диаметра отверстия; V^0 — теоретически необходимое количество воздуха.

Влияние поперечного и встречного потоков вторичного воздуха. Данные потоки стабилизируют пламя. Стабилизирующее влияние поперечного потока объясняется уменьшением результирующей струи и образованием вихревых зон за трубкой (горелкой). Наибольшее стабилизирующее влияние оказывает встречный поток воздуха, что объясняется характером поля скоростей, аналогичным полю скоростей в рециркуляционных зонах.

Влияние разбавления вторичного воздуха продуктами сгорания. Это имеет место при работе горелок в ограниченном топочном объеме. На устойчивость в отношении проскока пламени п.с. влияния не оказывают. Устойчивость по отношению к отрыву пламени снижается. При горении в атмосфере, разбавленной продуктами сгорания, пламя стабилизируется на значительном расстоянии от устья огневого канала, это расстояние увеличивается с уменьшением O_2 во вторичном воздухе.

Влияние толщины стенок сопла. Уменьшение толщины стенки сопла увеличивает пределы устойчивости в отношении проскока пламени, за счет разбавления нижней кромки пламени, т.е. обеднения смеси и уменьшения скорости распространения пламени. Замена огневого канала цилиндрического на конический того же диаметра уменьшает критическую скорость проскока пламени.

Влияние температуры стенки сопла горелки на пределы устойчивости горения. При повышении температуры смеси пределы устойчивости пламени по отношению к проскоку уменьшаются, а по отношению к отрыву — увеличиваются вследствие увеличения скорости распространения пламени при повышении начальной температуры горючей смеси.

На практике подогрев смеси осуществляется от нагретого корпуса горелки в результате радиационного и конвективного теплообмена между горелкой, пламенем и обрабатываемым изделием. На расстоянии, равном глубине проникновения пламени, можно считать температуру смеси, равной температуре стенки огневого канала. Скорость проскока пламени с повышением температуры стенки канала возрастает, и область проскока пламени увеличивается как в сторону бедных, так и в сторону богатых смесей.

Максимальная скорость проскока пламени газовоздушных смесей углеводородных газов с достаточной точностью прямо пропорциональна квадрату абсолютной температуры стенки огневого канала и его диаметру.

С достаточной степенью точности для практических расчетов скорости проскока или отрыва пламени, а также для определения критических градиентов можно принимать начальную температуру горючей смеси, равной температуре стенки огневого канала.

Приложение к лекции 8.

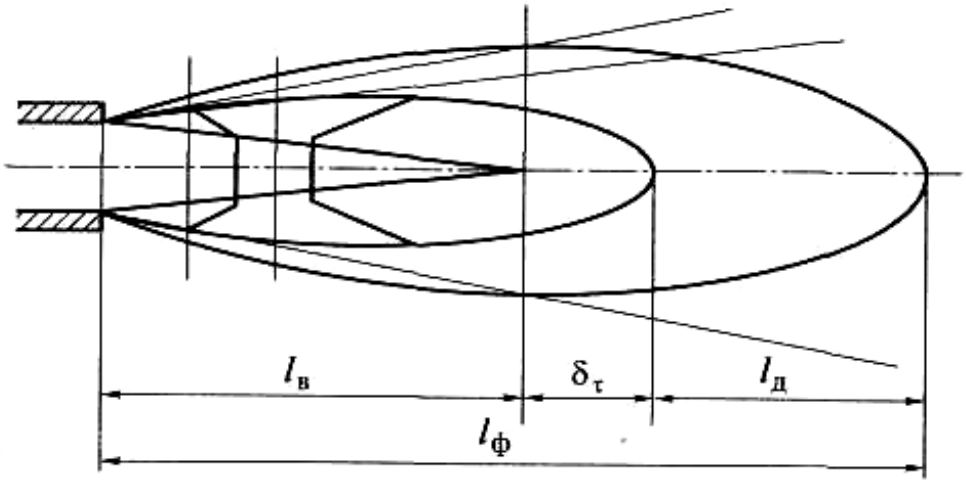


Рис. 13.4. Структура факела

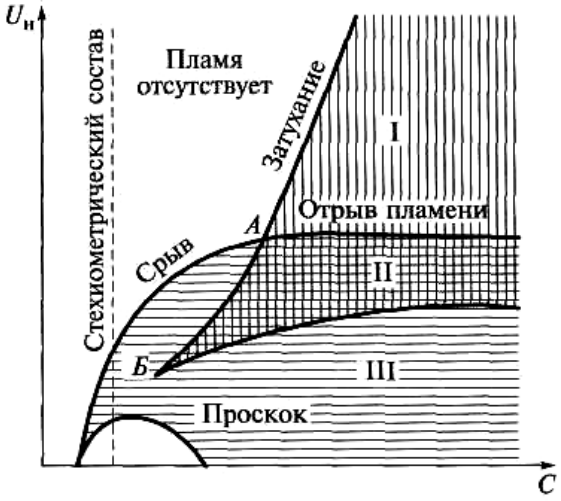


Рис. 13.5. Схема пределов устойчивости открытого газового пламени:
I — оторванное пламя; II — начало отрыва; III — пламя у устья горелки

Лекция 9

Газогорелочные устройства

Основные термины и определения. Газогорелочными устройствами называются устройства, генерирующие тепловую энергию в виде разогретых до высокой температуры продуктов сгорания газа. *Газовой горелкой* называется устройство, обеспечивающее устойчивое сжигание газообразного топлива и возможность регулирования процесса горения. Газовая горелка осуществляет подачу газа и воздуха в зону горения, обеспечивая смесеобразование, воспламенение и стабилизацию факела. Газовые горелки осуществляют преобразование химической энергии газа в тепловую. Газогорелочные устройства должны быть компактными, удобными и надежными в эксплуатации. Общие технические требования к газовым горелкам определяются ГОСТ 21204-97.

Работа каждой горелки характеризуется основными параметрами, определяемыми при испытаниях:

• тепловой мощностью;
• коэффициентом рабочего регулирования;
• давлением газа и воздуха и их расходами;
• концентрациями оксида углерода, диоксида серы, оксидов азота в сухих неразбавленных продуктах сгорания;
• массой и т.д.

Рассмотрим некоторые термины и определения основных параметров, которые независимо от конструктивного исполнения горелок являются общими.

Тепловая мощность горелки $P_Г$ — это количество теплоты, образующееся в результате сжигания газа $V_Г$, подводимого к горелке в единицу времени:

$$P_г = V_г Q_н^р,$$

Различают максимальную, номинальную и минимальную тепловые мощности горелки. На практике пользуются также понятием минимальной рабочей тепловой мощности горелки $P_{г\ min\ раб}$ при которой показатели ее работы соответствуют установленным нормам.

Коэффициент рабочего регулирования горелки $К_{р.р}$ — отношение номинальной тепловой мощности горелки к ее минимальной рабочей тепловой мощности: $K_{р.р} = \frac{P_{г\,min}}{P_{г\,min\,раб}}$.

Коэффициенты рабочего регулирования горелки должны соответствовать значениям, приведенным в таблице приложения. Коэффициент предельного регулирования горелки $К_{пр.р}$ — отношение максимальной тепловой мощности к ее минимальной тепловой мощности: $K_{пр.р} = \frac{P_{г\,max}}{P_{г\,min}}$.

Диапазон регулирования тепловой мощности горелки — диапазон, в котором изменяется тепловая мощность горелки во время эксплуатации.

Давление газа перед горелкой — давление (максимальное, номинальное, минимальное рабочее, минимальное), измеренное после последнего по ходу регулирующего или запорного органа горелки и соответствующее максимальной, номинальной, минимальной рабочей или минимальной тепловой мощности горелки.

Номинальная относительная длина факела представляет собой расстояние по оси факела от выходного сечения горелки, измеренное (при номинальной тепловой мощности) в калибрах выпускного отверстия до точки, где концентрация CO_2 (при $\alpha = 1$) составляет 95 % от максимального значения.

Удельная металлоемкость горелки — отношение массы горелки к номинальной тепловой мощности.

Давление (разряжение) в камере сгорания измеряется в зоне выходного сечения горелки при номинальной тепловой мощности.

Шумовая характеристика горелки — уровень звукового давления, создаваемого работающей горелкой в зависимости от спектра частот.

Автоматика горелки — комплекс элементов, обеспечивающих пуск, автоматическое регулирование и контроль безопасности горелки.

Система контроля пламени включает в себя устройство контроля пламени и управляемый этим устройством запорный клапан.

Горелка с ручным управлением — это горелка, в которой розжиг, изменение режима работы горелки и наблюдение за работой горелки выполняет оператор.

Автоматическая горелка — горелка, оборудованная автоматическими устройствами: дистанционным запальным, контроля пламени, контроля давления топлива и воздуха, запорными клапанами и средствами управления, регулирования и сигнализации.

Блочная газовая горелка — газовая горелка, скомпонованная с вентилятором в единый блок, оборудованная средствами автоматического управления и регулирования.

Запальное устройство — устройство для розжига горелки. *Запальная горелка* — вспомогательная горелка, служащая для розжига основной.

Основные функции и элементы горелок

Процесс сжигания газа условно разделяется на три основных стадии:

• смешение газа с воздухом для горения (подготовка горючей смеси);
• подогрев горючей смеси до температуры воспламенения;
• собственно процесс сжигания — горение.

В соответствии с этим газогорелочные устройства, обеспечивающие сжигание газа, выполняют следующие функции: подготавливают газ и воздух для горения, придавая им требуемое направление и скорость движения; подготавливают горючую смесь; стабилизируют горение; осуществляют подачу горючей смеси или продуктов сгорания в рабочее пространство или из него.

Независимо от типа все горелки имеют общие конструктивные элементы:

• устройства для подвода газа (сопло) и воздуха (воздуховод);
• смеситель и горелочную насадку со стабилизирующим устройством.

Сопло предназначено для подачи определенного количества газа, а иногда и воздуха с определенной скоростью в смесительную часть горелки.

Воздуховод — конструктивный элемент для подачи воздуха в необходимом количестве и требуемой скоростью.

Смеситель предназначен для подготовки горючей смеси для горения в процессе взаимодействия струй газа с воздушным потоком.

Горелочная насадка предназначена для распределения газа или газовоздушной смеси по выходному сечению.

Стабилизаторы предназначены для обеспечения устойчивости процесса горения, предотвращения отрыва и проскока пламени.

В зависимости от типа горелки или условий эксплуатации ее конструктивные элементы имеют различное оформление. В некоторых конструкциях отдельные элементы могут отсутствовать или компоноваться в одной детали.

Приложение к лекции 9

Таблица 14.1

Коэффициенты рабочего регулирования горелки

Класс горелки по способу подачи воздуха и степени подготовки горючей смеси	Коэффициент рабочего регулирования $K_{р.р}$ не менее
Горелки с принудительной подачей воздуха с полным предварительным смешением, инжекционные горелки с полным предварительным смешением	3
Горелки с принудительной подачей воздуха с неполным предварительным смешением	4
Горелки с принудительной подачей воздуха без предварительного смешения, горелки с подачей воздуха за счет разрежения без предварительного смешения, инжекционные горелки с частичной подачей первичного воздуха	5
Беспламенные панельные горелки	2

Примечание. Указанные коэффициенты рабочего регулирования не относятся к блочным горелкам со ступенчатым регулированием; запальным горелкам; горелкам, предназначенным для тепловых агрегатов, не требующих указанных значений $K_{р.р}$.

Лекция 10

Классификация газовых горелок

Горелки могут быть классифицированы по различным признакам:

- по длине факела (длиннопламенные, короткопламенные);
- светимости пламени (светящиеся или слабосветящиеся);
- теплоте сгорания газа (высококалорийные, низкокалорийные);
- давлению газа перед горелкой (низко- и высоконапорные);
- числу подводящих трубопроводов (одно- и двухпроводные).

В соответствии с ГОСТ 21204—97 по способу подачи воздуха и коэффициенту α_1 различают горелки: диффузионные с $\alpha_1 = 0$, инжекционные с $\alpha_1 > 1$ и $\alpha_1 < 1$ и с принудительной подачей воздуха (дутьевые).

Диффузионные горелки (рис. 14.1, а). Это наиболее простые устройства, представляющие собой трубу с просверленными отверстиями. Газ вытекает из отверстий, а необходимый для горения воздух поступает полностью из окружающей среды. В диффузионных горелках процессы смешивания газа с воздухом и горение совершаются параллельно на выходе газа из горелки.

Достоинствами данных горелок: малые габаритные размеры и простота конструкции, удобство и безопасность эксплуатации, высокая устойчивость пламени без проскоков и отрыва, высокая степень черноты пламени, широкий диапазон регулирования тепловой мощности. Недостатки: повышенный коэффициент избытка воздуха, плохие условия догорания газа и выделение при сжигании углеводородных газов продуктов неполного сгорания.

Эти горелки используют при сжигании природных и сжиженных углеводородных газов, когда требуется получение длинного светящегося (коптящего) факела с равномерной температурой по его длине: в печах мартеновских, цементных,

стекловарочных, а также в печах для получения газовой сажи. В отдельных случаях такие горелки незаменимы, например, в высокотемпературных плавильных печах, где требуется получение растянутого факела с высокой степенью черноты.

Инжекционные горелки (рис. 14.1, б, в). Это горелки, в которые необходимый для горения воздух поступает полностью ($\alpha_1 > 1$) или частично ($\alpha_1 < 1$) в качестве первичного, а подача его осуществляется за счет кинетической энергии струи газа, вытекающего из сопла. Процессы смешивания газа с воздухом и горения разделены, при этом обеспечивается хорошее смешивание газа с воздухом.

В инжекционных горелках с $\alpha_1 > 1$ газ, вытекая из сопла с большой скоростью за счет кинетической энергии струи, засасывает в инжектор из окружающего пространства воздух в количестве, необходимом для его полного сгорания. Процесс сжигания происходит по кинетическому принципу: получение короткого пламени с высокой температурой. В горелке автоматически обеспечивается соотношение газа и воздуха в рабочем диапазоне, т.е. постоянный α_1 независимо от изменения давления. Такие горелки имеют низкую устойчивость к образованию проскоков и отрыва пламени, поэтому требуют применения стабилизаторов. Инжекционные горелки с $\alpha_1 > 1$ работают на газе среднего давления (10...90 кПа).

В инжекционных горелках с $\alpha_1 < 1$ выбор значения α_1 зависит от диапазона устойчивой работы. Обычно инжекционные горелки с $\alpha_1 < 1$ работают на газе низкого давления (до 2 кПа). С увеличением значения α_1 происходит переход в область кинетического процесса сгорания газовоздушной смеси, который характеризуется низкой устойчивостью горения, т.е. возможностью проскока и отрыва пламени. При малых коэффициентах первичного воздуха происходит разложение углеводородов с образованием сажи, что приводит к свечению пламени и химической неполноте горения. Такая работа горелок с малым коэффициентом первичного воздуха нежелательна (из устья горелки выходит газовоздушная смесь с избытком горючего, т.е. газ, смешанный только с 50...60 % воздуха от теоретически необходимого). Поэтому для инжекционных горелок с $\alpha_1 < 1$ требуется организовать подвод вторичного воздуха (см. рис. 14.1, в), а в топках, где устанавливаются эти горелки, должно быть разрежение.

Пламя горелки состоит из внутреннего и внешнего конусов. Внутренний конус представляет собой поверхность остановленного фронта пламени, где выгорает часть горючего, обеспеченная первичным воздухом. Горение газовоздушной смеси во внутреннем конусе кинетическое. Внутренний конус пламени ярко очерчен и имеет зеленовато-голубой цвет. Внешний конус представляет собой поверхность, где в результате диффузии окружающего воздуха выгорает оставшаяся часть газа. Процесс сгорания газа во внешнем конусе диффузионный. Такие горелки обладают большой устойчивостью к отрыву и проскоку пламени и не требуют применения стабилизаторов.

Инжекционные горелки с $\alpha_1 < 1$ применяют в бытовых газовых плитах, проточных и емкостных водонагревателях, ресторанных плитах, секционных отопительных котлах и отопительных печах.

Горелки с принудительной подачей воздуха (рис. 14.1, г). Воздух, необходимый для горения, в такие горелки подается вентилятором. Газ из сопла попадает в закрученный поток воздуха, и происходит их смешивание. Газовоздушная смесь через насадок попадает в топочное пространство. Горелки данного типа оснащены стабилизаторами. В схеме обвязки горелок предусматривается установка клапана блокировки, отключающего подачу газа при прекращении подачи воздуха.

Процесс смешивания газа с воздухом зависит от конструкции смесителя. При полном предварительном смешивании процесс горения кинетический, пламя образуется короткое с высокой температурой.

Схемы горелок с принудительной подачей воздуха приведены на рис. 14.2. В горелке на схеме I газ и воздух поступают к месту сгорания раздельно, параллельными потоками. Смешивание происходит медленно, горение диффузионное. Пламя образуется длинное светящееся с невысокой температурой. В горелке на схеме II поверхность соприкосновения потоков газа и воздуха увеличивается за счет подачи газа внутрь воздушного потока. Длина пламени при этом уменьшается.

Еще большее уменьшение длины пламени достигается путем предварительного смешивания газа с воздухом (схема III). Улучшение предварительного смешивания газа с воздухом достигается установкой в горелки завихрителя, закручивающего поток воздуха (схема IV).

Для увеличения площади соприкосновения газа с воздухом используются горелки с множеством мелких отверстий в корпусе, направленных под углом к предварительно закрученному потоку воздуха (схема V). При этом образуется равномерная газовоздушная смесь. Процесс горения кинетический, пламя образуется короткое с высокой температурой.

Если подавать газ в закрученный воздушный поток не только из центра горелки, но и с периферии (схема VI), то обеспечивается равномерное распределение газовых струй в воздушном потоке.

Закручивание воздушного потока может осуществляться лопаточным направляющим аппаратом (улиткой) тангенциальным подводом к горелке.

Горелки с принудительной подачей воздуха в зависимости от конструкции работают на газе низкого или среднего давления. Их применяют для промышленных теплоагрегатов: котлов, печей, сушилок. Горелки позволяют использовать теплоту отработанных дымовых газов за счет подогрева в теплообменниках (рекуператорах, регенераторах) воздуха, подаваемого для горения, что позволяет повысить КПД теплоагрегатов.

Приложение к лекции 10

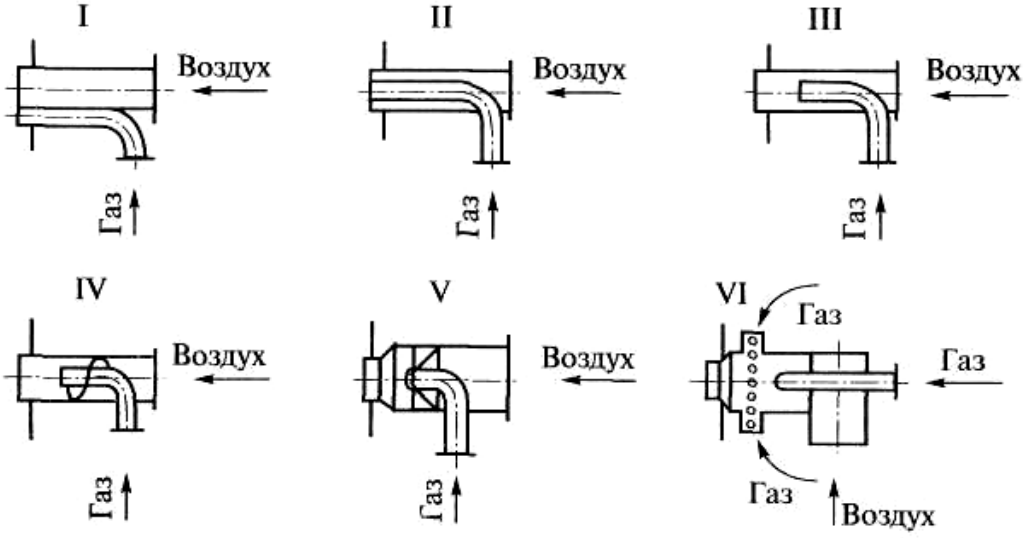


Рис. 14.2. Схемы горелок с принудительной подачей воздуха:

I — раздельная подача газа и воздуха; II — подача газа и воздуха спутными потоками (горелка «труба в трубе»); III — подача газа и воздуха с предварительным смешением; IV — подача газа и воздуха с улучшенным смешением за счет завихрителя; V — улучшенное смешение за счет предварительной закрутки воздуха и подачи газа под углом к оси горелки; VI — улучшенное предварительное смешение газа и воздуха за счет подачи части газа по периферии корпуса горелки

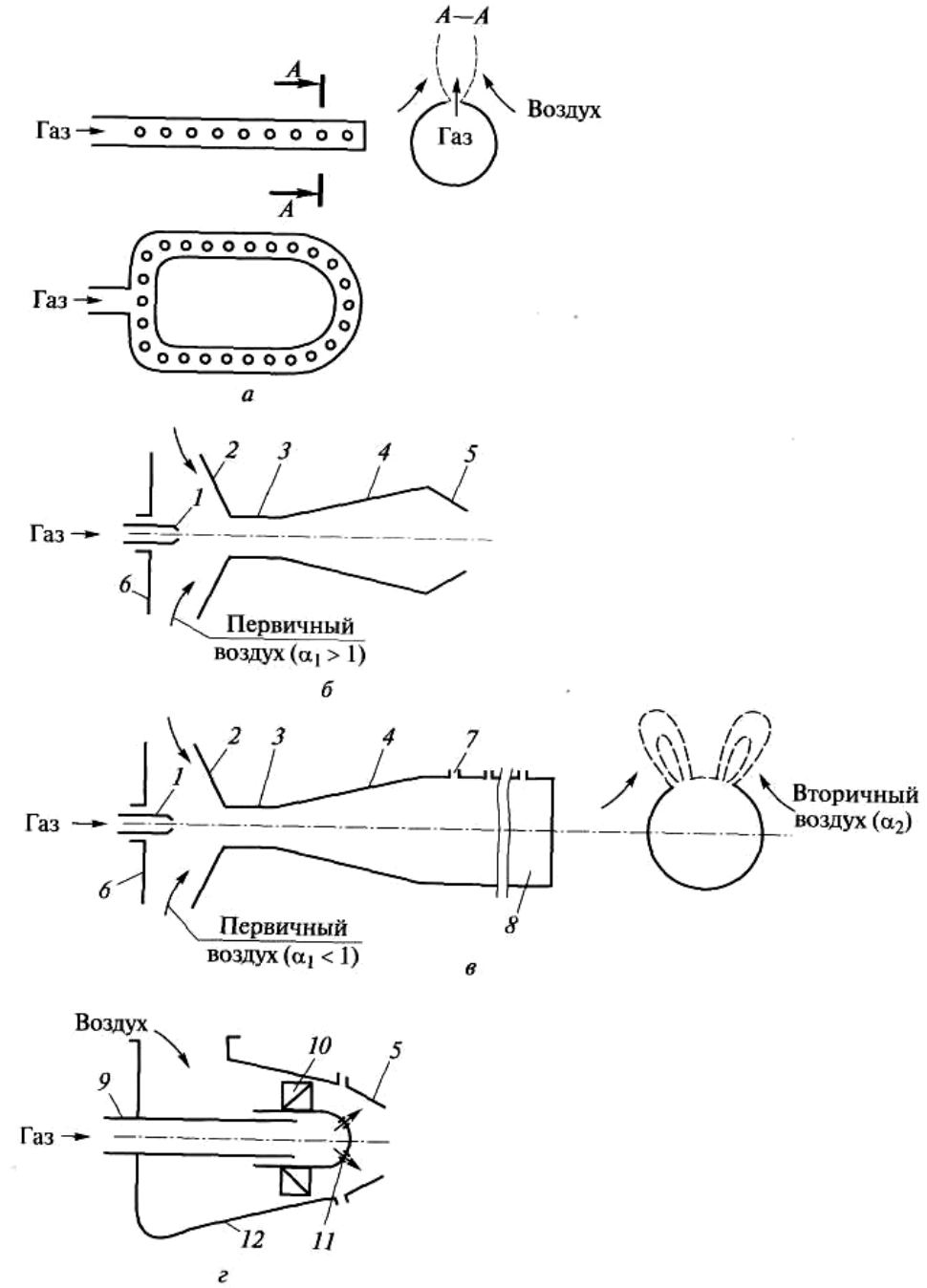


Рис. 14.1. Схемы горелок:

а — диффузионной; *б* — инжекционной с $\alpha_1 > 1$; *в* — инжекционной с $\alpha_1 < 1$; *г* — с принудительной подачей воздуха; *1* — воздушная заслонка; *2* — сопло; *3* — инжектор; *4* — горловина; *5* — диффузор; *6* — насадок; *7* — огневое отверстие; *8* — коллектор; *9* — газораспределительное устройство; *10* — завихритель; *11* — отверстие для выхода газа; *12* — корпус

Лекция 11

Общие технические требования к газовым горелкам

На основании опыта эксплуатации и анализа конструкций устройств сформулированы основные требования к конструкциям газовых горелок.

Горелки должны быть возможно более простыми: без подвижных частей, без устройств, изменяющих сечение для прохода газа и воздуха, и деталей сложной формы, расположенных вблизи носика горелки. Сечения для выхода газа, воздуха и газовоздушной смеси в процессе эксплуатации должны быть неизменными. Количество подаваемых через горелку газа и воздуха следует изменять только дроссельными устройствами, установленными на подводящих трубопроводах.

Сечения для прохода газа и воздуха в горелке и конфигурация внутренних полостей должны обеспечивать минимальное сопротивление на пути движения газа и

воздуха внутри горелки. Давление газа и воздуха должно быть использовано для создания требуемых скоростей в выходных сечениях горелки. Подача воздуха в горелку должна быть регулируемой. При осуществлении частичного предварительного смешения газа и воздуха следует использовать какой-либо один способ, а не усложнять горелку большим числом элементов одного и того же назначения, например для улучшения смешения. Для стабилизации горения предпочтительнее аэродинамические методы, т.е. создание зон циркуляции продуктов сгорания, которые поджигают газовоздушную смесь.

Назначение. Номинальная тепловая мощность каждой горелки должна соответствовать номинальной тепловой мощности, установленной для горелок данного типоразмера (предельные отклонения +10...-5%).

Требования к автоматике. Автоматические горелки должны работать при поддержании давления газа перед основным запорным органом с точностью ±15 % от номинального значения; для газа низкого давления до 5 кПа; для газа среднего давления до 100 кПа. В автоматических горелках должны выполняться следующие операции: пуск горелки по программе, зависящей от ее мощности (включая продувку камеры горения и дымоходов); перевод ее в рабочее состояние; регулирование тепловой мощности; контроль параметров безопасности горелки и тепловой установки; выключение горелки при недопустимых отклонениях контролируемых параметров.

Пуск не должен осуществляться в следующих случаях: прекращение подачи электроэнергии; давление газа за основным запорным органом на 30 % ниже номинального значения; недопустимые отклонения контролируемых параметров тепловой установки; недостаток воздуха для горения; неполадки устройств продувки, отвода или рециркуляции продуктов сгорания; короткое замыкание или разрыв в датчике контроля пламени либо связи датчика; при пуске не обеспечены условия для безопасной эксплуатации горелки (требуемая температура топлива, давление распыливающего вещества, частота вращения механического распыливающего устройства и др.); сигнал о нарушении герметичности запорного органа (у горелок, оснащенных автоматическим контролем герметичности). В автоматических горелках не допускается подача топлива в основную горелку, пока не включено запальное устройство или не появилось пламя запальной горелки. Автоматика должна обеспечивать защитное выключение газовой горелки, если при ее розжиге не произойдет воспламенение топлива в течение не более:
5 с — для горелок тепловой мощностью до 50 кВт;
3 с — для горелок тепловой мощностью свыше 50 кВт.

При работе автоматических горелок защитное выключение должно осуществляться: при погасании контролируемого пламени; прекращении подачи электроэнергии; снижении давления газа за основным запорным органом более чем на 30 % относительно номинального значения; недопустимых отклонениях контролируемых параметров тепловой установки; недостатке воздуха для горения; неполадках устройств продувки, отвода или рециркуляции продуктов сгорания.

Защитное выключение должно сопровождаться сигналом. При защитном выключении автоматической горелки из-за прекращения подачи электроэнергии возобновление подачи энергии не должно вызывать самопроизвольного пуска горелки (за исключением блочных горелок с регулированием мощности от 0 до 100 % от номинальной, находящихся в рабочем состоянии, с выполнением полной программы пуска).

Если горелки устанавливаются на воздухонагревателях, применяемых для воздушного отопления и вентиляции помещений, выработки теплоносителя для сушильных процессов или тепловых завес, то защитное выключение горелок в рабочем

состоянии, должно предусматриваться также: при повышении температуры нагреваемого воздуха выше заданного значения; превышении давления продуктов сгорания над давлением нагреваемого воздуха в рекуперативных воздухонагревателях. Система контроля пламени должна обеспечивать защитное выключение горелки, если произойдет погасание контролируемого пламени, за время не более 2 с.

Для горелок номинальной тепловой мощностью до 0,1 МВт, установленных в камерах горения, работающих под разрежением, время защитного отключения подачи газа в горелку при погасании пламени не должно превышать 30 с. При прекращении подачи электроэнергии от внешнего источника газовый автоматический запорный орган должен закрыться. Запорный орган должен закрываться без дополнительного подвода энергии от внешнего источника. Время от момента прекращения подачи энергии от внешнего источника до прекращения поступления газа через запорный орган не должно превышать 1 с. Устройство контроля пламени должно реагировать только на пламя контролируемой горелки и не должно реагировать на посторонние источники теплоты и света (раскаленная футеровка, освещение и т.д.).

При неисправности устройства контроля пламени или нарушении в линиях связи между чувствительным элементом и вторичным прибором устройства контроля пламени при розжиге или работе горелки должно произойти защитное выключение горелки. Группу горелок допускается оснащать одним устройством контроля пламени в случае, если наличие пламени горелки, оснащенной устройством контроля пламени, обеспечивает розжиг и в других горелках группы.

Газовые горелки номинальной тепловой мощностью до 0,35 МВт должны быть оснащены одним газовым автоматическим запорным органом; мощностью свыше 0,35 до 2 МВт — двумя газовыми автоматическими запорными органами; свыше 2 МВт — двумя газовыми автоматическими запорными органами и автоматическим органом контроля утечки газа, установленным между ними и связанным с атмосферой.

При работе на тепловом агрегате группы горелок с общим подводом газа, суммарная тепловая мощность которых находится в пределах 0,35...2,0 МВт, допускается один из двух автоматических запорных органов устанавливать общим для всех горелок.

Работоспособность автоматики горелок должна быть обеспечена при отклонениях питающего напряжения электрического тока от +10 до -15 % от номинального.

Конструктивные требования. Присоединение горелки к трубопроводам для подвода топлива и распыливающей среды (при необходимости) должно быть разъемным, исключать утечку. Конструкция горелки должна обеспечивать возможность очистки или замены сопла, завихрителя, форсунки без разборки подвода газообразного топлива и демонтажа горелки. Ремонтные и смотровые лючки горелки должны надежно закрываться. Горелки должны быть оснащены блокировкой, не допускающей возможности их включения в открытом положении и осуществляющей их отключение при выдвижении или извлечении в процессе работы.

Система топливораспределения горелки не должна допускать утечки газа. Горелка, розжиг которой осуществляется при помощи переносного запального устройства, должна иметь отверстие, позволяющее безопасное введение запального устройства. Допускается розжиг горелки проводить через отверстие камеры горения теплового агрегата. Конструкция горелки должна обеспечивать возможность визуального наблюдения за пламенем.

Конструкции горелок с принудительной подачей воздуха, предназначенных для печных агрегатов, должны быть выполнены из материалов, допускающих работу на подогретом воздухе температурой не менее 300 °С.

Требования безопасности. Горелки в части общих требований безопасности должны соответствовать ГОСТ 12.2—2003.

Предельно допустимые шумовые хар-ки горелок даны в приложении.

Температура поверхностей элементов горелок, предназначенных для ручного управления, не должна превышать 45 °С при изготовлении из неметаллических материалов и 40 °С — при изготовлении из металлов.

Рекомендуемые значения скоростей для горелок типа «труба в трубе» представлены в таблице приложения.

Электрическое оборудование горелки должно питаться от одного источника электроэнергии и выключаться при помощи одного выключателя.

Горелки номинальной мощностью более 0,12 МВт должны разжигаться при пусковой мощности, не превышающей 50 % номинальной.

Горелки номинальной мощностью более 0,1 МВт должны разжигаться запальным устройством или запальной горелкой (переносной или стационарной). Мощность запальной горелки должна быть не более 5 % номинальной мощности основной горелки, 10 % ее пусковой мощности и не превышать 0,12 МВт. Автоматические и полуавтоматические горелки, пусковая мощность которых превышает 0,4 МВт, должны быть оснащены стационарной запальной горелкой. Группа горелок с ручным управлением может быть оснащена общим переносным запальным устройством или запальной горелкой. Подвод топлива к переносной запальной горелке должен быть независим от подвода топлива к основной горелке и оснащен самостоятельным запорным органом, управляемым вручную.

Тепловая мощность стационарной запальной горелки непрерывного действия не должна превышать 5 % номинальной тепловой мощности основной горелки. Тепловая мощность переносной запальной горелки не должна превышать 30 кВт. Для розжига основной горелки применение электрического запального устройства запальной горелки не допускается.

Группу горелок с ручным управлением допускается оснащать одной стационарной запальной горелкой, если наличие пламени основной горелки, оснащенной запальной горелкой, обеспечивает зажигание пламени других горелок группы.

Конструкция горелок с принудительной подачей воздуха должна предусматривать возможность продувки камеры горения перед розжигом.

Горелки, в которые трубопроводом подается предварительно подготовленная горючая смесь, должны быть оснащены преградителями огня.

Горелки должны быть оборудованы штуцерами для присоединения приборов, измеряющих давление газа перед горелкой, а горелки с принудительной подачей воздуха — дополнительно штуцерами для присоединения приборов, измеряющих давление воздуха перед горелками или в корпусе горелки. Штуцеры могут быть установлены на трубопроводах, принадлежащих непосредственно горелке, и на подводящих трубопроводах. Во всех случаях штуцеры располагают после последнего по ходу газа (воздуха) запорного или регулирующего органа.

Группу горелок допускается оснащать одним штуцером для измерения давления газа и одним штуцером для измерения давления воздуха.

Конструкция автоматических газовых горелок должна обеспечивать возможность измерения: давления газа за основным запорным органом и после последнего по ходу газа регулирующего органа горелки; давления воздуха после последнего по ходу воздуха регулирующего или запорного органа. Измерение давления газа допускается заменять измерением расхода газа.

Конструкция горелки должна предусматривать продувку камеры горения до открытия крана на трубопроводе подвода газа.

Требования по рациональному использованию газа. Газовые горелки при номинальной тепловой мощности должны обеспечивать коэффициент избытка воздуха, не превышающий значений 1,05... 1,15. При работе горелок в системах отопления тепловых агрегатов, предусматривающих многостадийное (ступенчатое) сжигание топлива, значения коэффициентов избытка воздуха следует относить к выходному сечению камеры горения теплового агрегата (за вычетом присосов). Допустимое увеличение коэффициента избытка воздуха в диапазоне рабочего регулирования мощности (за исключением пусковых режимов) не должно превышать 0,2.

Потери теплоты от химической неполноты сгорания на выходе из камеры горения теплового агрегата или установки в диапазоне рабочего регулирования горелки не должны быть более 0,4 %.

Требования по охране окружающей среды. Содержание оксида углерода в продуктах сгорания в пересчете на сухие неразбавленные продукты сгорания (при α = 1,0) не должно превышать на выходе из камеры горения 0,05 об. % и в контролируемом сечении за видимой длиной факела при температуре продуктов сгорания не более 1400 °С.

Содержание оксида углерода в продуктах сгорания для горелок, предназначенных для соответствующих котлов, предельные нормы концентраций оксида азота (NO) в продуктах сгорания для газогорелочных устройств различных по назначению и конструктивному оформлению теплотехнологических агрегатов, соотношение между единицами измерения концентрации NO регламентируются стандартами.

Требования надежности. Средний ресурс горелок до капитального ремонта (для ремонтнопригодных горелок) и до списания (для неремонтнопригодных горелок) должен быть по жаростойкости не менее 18000 ч. Электрические элементы автоматики должны в условиях, близких к эксплуатационным, при напряжении, равном 110% номинального значения, выдерживать не менее 100 000 циклов включения и выключения.

Вероятность безотказной работы устройства контроля пламени — не менее 0,92 за 2000 ч.

Приложение к лекции 11.

Предельно допустимые шумовые характеристики горелок должны соответствовать значениям:

Уровни звукового давления, дБ.....	107	95	87	82	78	75	73	71	69
Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц.....	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000

При этом уровень звука и эквивалентный уровень звука составляет 80 дБ.

Рекомендуемые значения скоростей газа, воздуха и смеси для горелок типа «труба в трубе»

Характерное место	Рекомендуемая скорость, м/с		
	воздуха	газа	смеси
Трубопровод перед горелкой	8...10	10...15	—
Входные сечения горелки:			
при избытке давления	18...20	18...20	—
при недостатке давления	5...7	5...7	—
Газовое сопло до выходного сечения	—	20...25	—
То же в выходном сечении	—	18...100	—
Носик горелки:			
максимальная	—	—	25...30
минимальная	—	—	4...5

Лекция 12

Блочные автоматизированные газогорелочные устройства

В настоящее время эти устройства широко применяются в большой и малой энергетике для отопления разнообразных по назначению и тепловой мощности котлов, а в промышленности — в основном в термических и нагревательных печах малой и средней тепловой мощности для нагрева металла для термообработки, под ковку и горячую штамповку. В сельском хозяйстве автоматизированные газовые горелки применяются в зерносушилках и агрегатах для получения травяной муки. Автоматизированные газогорелочных блоки являются по сути энергетическими машинами. В автоматических горелках выполняются следующие операции: пуск по программе в зависимости от мощности горелки (включая продувку камеры горения, рабочего пространства котла, печи и их дымоходов), перевод в рабочее состояние, регулирование тепловой мощности, контроль параметров безопасности горелки и теплотехнологической установки, отключение при недопустимых отклонениях контролируемых параметров.

На рис. 14.8 приложения показана конструкция автоматизированной блочной горелки мощностью 18...50 кВт, предназначенной для бытовых потребителей (напольных водогрейных котлов и генераторов горячего воздуха) шведской фирмы Benton. На рис. 14.9 показан общий вид автоматизированной блочной горелки той же фирмы для коммунальных потребителей мощностью 60...320 кВт (водогрейных и паровых котлов малой и средней мощности, термических, кузнечных печей, сушил и др.). На рис. 14.10 показана поэлементная структура устройства автоматизированного газогорелочного блока мощностью 1 МВт, являющаяся базовой для разработчиков и производителей этого вида газового оборудования.

Выбор газогорелочных устройств

Разнообразие горелочных устройств дает возможность при проектировании тепловых агрегатов выбирать наиболее предпочтительный вариант горелки. Выбор газогорелочных устройств тепловых агрегатов определяется требованиями технологии, удобствами эксплуатации, безопасностью, экономичностью работы агрегата и сохранением чистоты воздушного бассейна.

Качество горелок определяется их испытаниями на соответствие стандартам и техническим требованиям. Контрольные испытания горелок устанавливают их паспортные технические характеристики. Испытания горелок выполняются независимыми испытательными центрами, аттестованными Госстандартом. Все горелки должны быть сертифицированы органами по сертификации, аккредитованными Госстандартом или региональными центрами стандартизации, метрологии и сертификации.

Целью выбора устройства для сжигания газа является определение его типоразмера, давления газа и воздуха. Определение типоразмера газогорелочного устройства производится по техническим характеристикам данных в справочниках по газогорелочным устройствам, в них также даются и конструктивные размеры.

Пересчет горелок при изменении характеристик газа и взаимозаменяемость газов

Заменяемые газы. Применение в системах газоснабжения газогорелочных устройств и газового оборудования, разработанных для природных и сжиженных газов, предназначенных в качестве топлива для промышленного и коммунально-бытового использования, определяемых ГОСТ 5542—87 и ГОСТ 20448—90, на других газах (коксовый, доменный, смешанный и т.д.) требует их пересчета и проверки данных устойчивой работы. Это, в первую очередь, относится к импортному газовому оборудованию, разработанному для газов, используемых в этих странах. Данное газогорелочное устройство может оказаться непригодным для работы на другом газе, поэтому потребуется переделывать горелки и проводить другие работы по перестройке оборудования. Проблема заменяемости газов является весьма актуальной.

Заменяющими называются такие газы, которые можно сжигать в газовых горелках вместо первоначально предусмотренных без нарушения нормальной работы горелок и изменения их конструкции. Газы, даже с одинаковой теплотой сгорания, не являются еще полностью взаимозаменяемыми. Они могут отличаться по элементному составу, плотности, количеству воздуха, необходимого для полного сгорания, количеству продуктов сгорания и удельной теплоте, максимальному содержанию CO_2 в продуктах сгорания, максимальной температуре пламени, пределам воспламеняемости, скорости распространения пламени, размеру пламени и т.п. Все эти свойства оказывают существенное влияние на форму и особенности пламени, а также на процесс горения. Если просто заменить один газ другим, то в большинстве случаев заменяющий газ или совсем не будет гореть в данных горелках или вызовет серьезные неполадки. В этом случае необходимо конструктивное изменение горелок, связанное с большими материальными затратами и трудностями. Нельзя считать заменяющими и такие газы, которые горят в горелках, но недостаточно хорошо, что ведет к существенному изменению тепловой мощности и формы пламени. Появляются проскоки и отрыв пламени от горелки, увеличивается время сгорания газа, горение становится неполным, выделяется CO.

Качество работы газовых горелок определяется:

- постоянством тепловой мощности;
- устойчивостью горения, характеризующейся нижней границей — проскоком пламени и верхней границей — отрывом пламени;
- полнотой сгорания (наличием желтых языков — желтых вершин пламени);
- экономичностью сжигания (постоянство теплового КПД). Заменяющий газ должен обеспечить сохранение постоянными этих характеристик горелок, установленных для данного газа. Это важно не только для экономичности работы горелок, но и для безопасности их эксплуатации. Требование экономичности сжигания газа зависит от

предыдущих условий, поэтому при определении заменяемости газов на них и сосредоточивают основное внимание.

Принцип заменяемости газов. На качество процесса горения, форму и особенности пламени влияет каждое из следующих свойств заменяемых газов: состав, теплота сгорания, плотность, количество воздуха или кислорода, необходимого для сгорания газа, максимальная температура пламени, скорость распространения пламени и т.д. Все эти свойства Не могут быть одинаковыми у заменяемых газов, поэтому заменяемый газ, имея отклонения в перечисленных свойствах в определенных пределах, должен удовлетворять условиям, обеспечивающим нормальную работу горелок.

Для газогорелочных устройств с раздельной подачей газа и окислителя, предназначенных для пламенной обработки материалов и изделий, эти условия сводятся к следующим: постоянство величины удельной эффективной мощности пламени; стабильность горения, характеризуемая границами отрыва и проскока пламени; полнота сгорания.

Удельной эффективной мощностью пламени называется количество теплоты, вводимое в единицу времени на единицу поверхности нагреваемого изделия. Наибольшее влияние на удельную эффективную мощность пламени оказывают соотношение окислителя и горючего газа в смеси, а также расход горючего газа. Для заменяемого (индекс г1) и заменяющего (индекс г2) газов при постоянном значении Q можно получить коэффициент замены

$$k_з = \frac{\Delta T_{г1}}{\Delta T_{г2}} = \frac{\sum m_{п.с2} c_{п.с2}}{\sum m_{п.с1} c_{п.с1}}.$$

где ΔT — температурный перепад между пламенем и требуемой температурой воздействия на материал, $m_{пс}$ — масса отдельных компонентов продуктов сгорания, кг; $c_{пс}$ — удельная массовая теплоемкость отдельных компонентов продуктов сгорания при температуре пламени, кДж/(кг К).

Однако этот метод является для практических расчетов несколько сложным. Расход газа-заменителя можно определить исходя из теплопроизводительности газогорелочного устройства. Критерием, характеризующим заменяемость газов по тепловой нагрузке, является число Воббе:

$$W_0 = \frac{Q_н}{\sqrt{\rho_{отн}}},$$

где $Q_н$ — низшая теплота сгорания газа, $\rho_{отн}$ — относительная плотность газа по воздуху.

Газы являются взаимозаменяемыми в достаточно широких пределах и газогорелочные устройства не требуют никаких переделок при условии, если

$$W_{01} = \frac{W_{02}}{k_з},$$

где W_{01}, W_{02} — число Воббе для заменяемого и заменяющего газов; $k_з$ — коэффициент замены газов.

Приложение к лекции 12

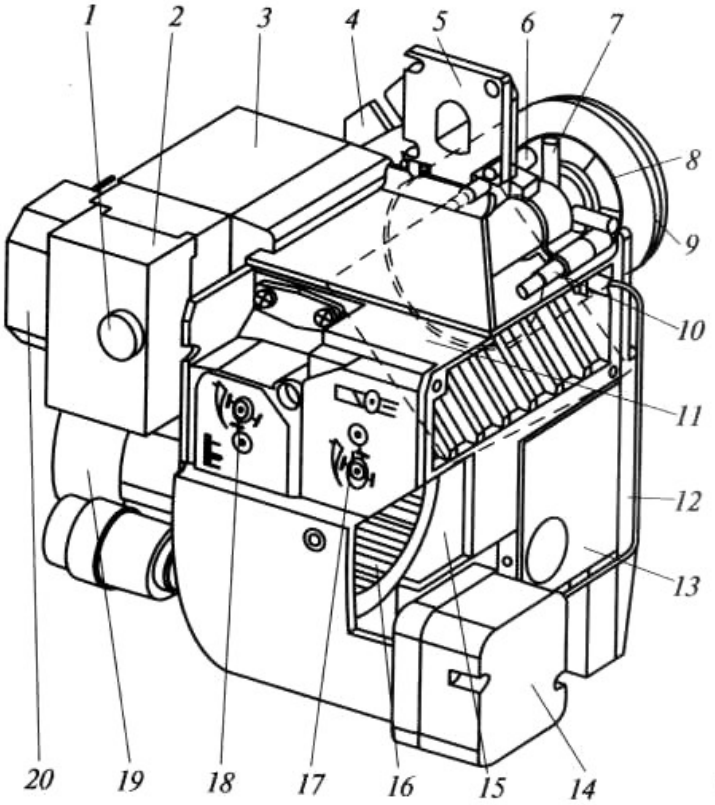


Рис. 14.8. Общий вид автоматизированной блочной горелки фирмы Benton, Швеция, мощностью 12...50 кВт, для бытовых потребителей:

1 — кнопка сброса; *2* — блок управления горелки; *3* — трансформатор; *4* — фиксирующий фланец; *5* — соединительная деталь мультиблока; *6* — ионизационный электрод; *7* — внутренняя сборка; *8* — диск рассекателя; *9* — труба горелки; *10* — запальный электрод; *11* — воздушная заслонка; *12* — фронтальная часть кожуха вентилятора; *13* — задняя часть кожуха вентилятора; *14* — выключатель давления воздуха; *15* — экранизирующая часть кожуха вентилятора; *16* — крыльчатка вентилятора; *17* — регулятор подачи воздуха; *18* — регулятор внутренней сборки; *19* — мотор горелки; *20* — электроподключение

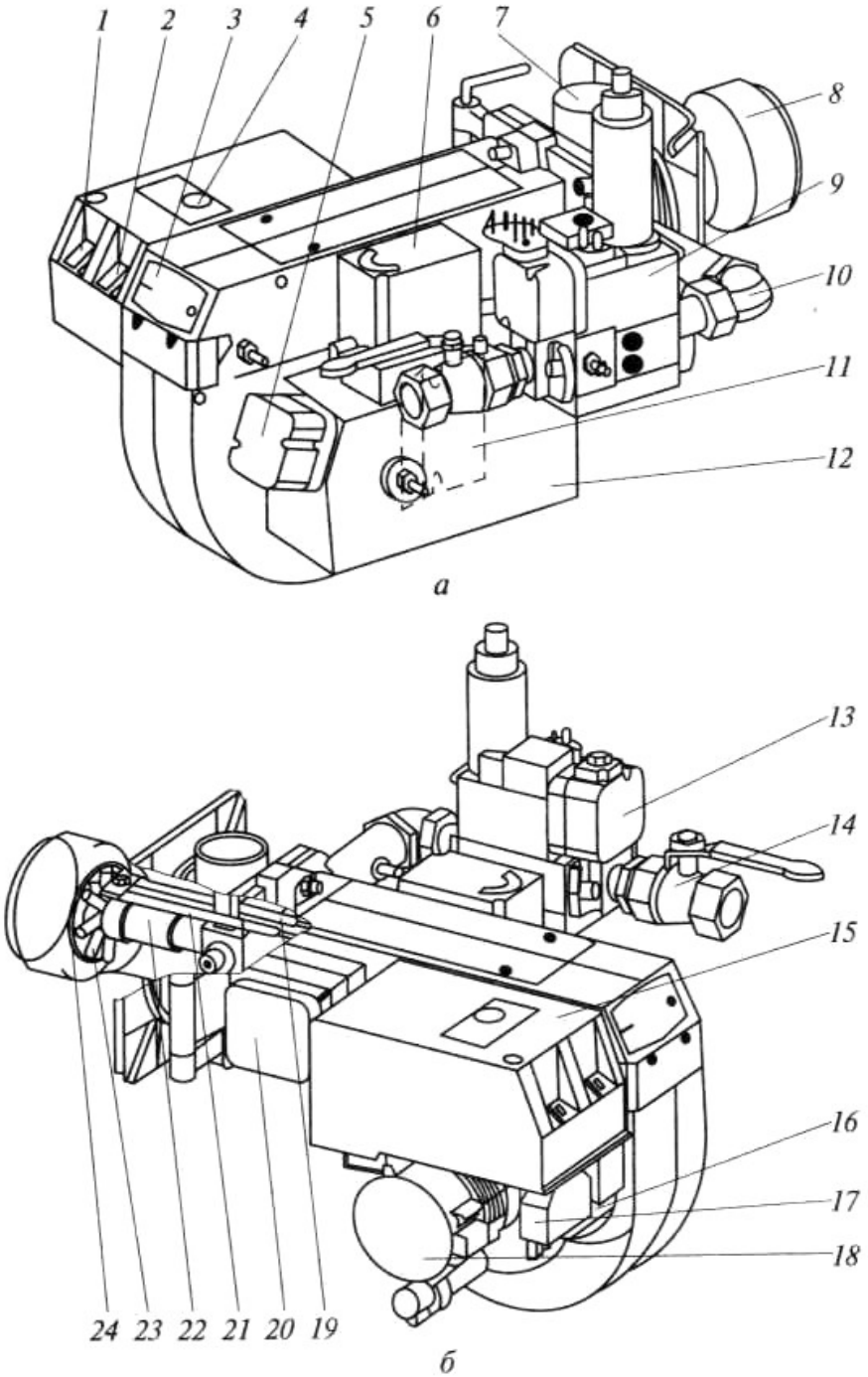


Рис. 14.9. Устройство автоматизированной блочной горелки фирмы Benton, Швеция, мощностью 60...300 кВт, для коммунальных потребителей:

а — вид справа; *б* — вид слева; *1* — тумблер включения первой ступени; *2* — тумблер включения второй ступени; *3* — смотровое окно; *4* — кнопка сброса блокировки; *5* — выключатель давления воздуха; *6* — демпферный мотор; *7* — настройка головной части горелки; *8* — труба горелки; *9* — мультиблок; *10* — соединительная трубка; *11* — воздушная заслонка; *12* — воздухозаборник; *13* — выключатель давления газа; *14* — шаровой кран; *15* — крыльчатка вентилятора; *16* — блок управления; *17* — разъем; *18* — электродвигатель; *19* — электрод зажигания; *20* — трансформатор зажигания; *21* — ионизационный электрод; *22* — внутренняя сборка; *23* — сопло горелки; *24* — пластина прерывателя

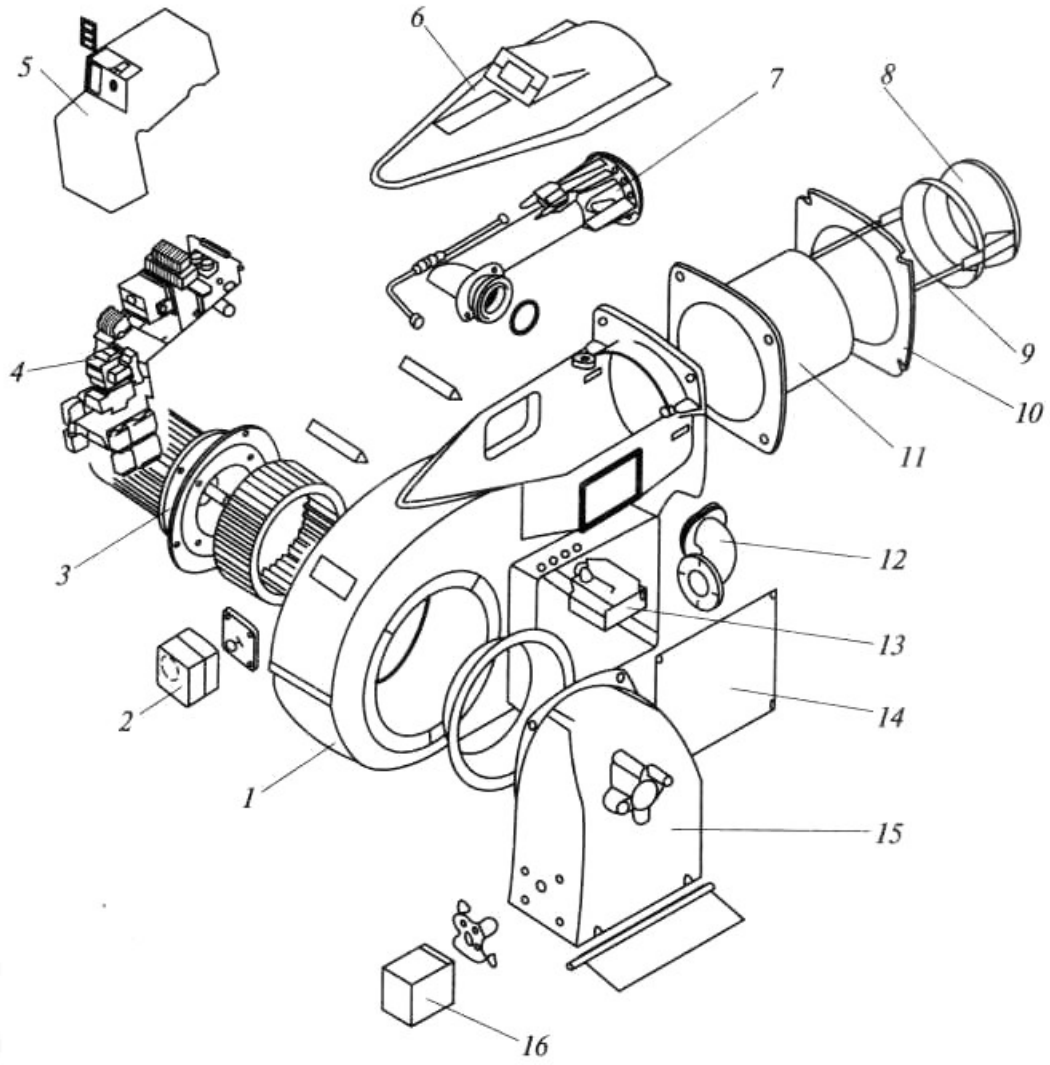


Рис. 14.10. Основные конструктивные элементы автоматизированной блочной горелки фирмы Benton, Швеция, мощностью 1 МВт, для промышленных потребителей:

1 — кожух вентилятора; *2* — реле давления воздуха с платой; *3* — электродвигатель с крыльчаткой вентилятора; *4* — блок управления; *5* — крышка блока управления; *6* — крышка запально-защитного устройства; *7* — блок запально-защитного устройства; *8* — головка коническая литая с диффузором; *9* — направляющие диффузора; *10* — прокладка; *11* — корпус смесителя с фланцем; *12* — угольник соединительной газовой рампы; *13* — трансформаторная коробка с трансформатором; *14* — крышка трансформаторной коробки; *15* — воздухозаборник с заслонкой; *16* — сервомотор со станиной

Лекция 13

Основные задачи автоматизации газоиспользующих установок

Автоматическое регулирование процесса горения значительно повышает экономичность газоиспользующих установок. Применение автоматики обеспечивает безопасность использования газа, улучшает условия труда обслуживающего персонала и способствует повышению его технического уровня. Комплексная автоматика состоит из следующих основных систем: автоматики регулирования, автоматики безопасности, аварийной сигнализации и теплотехнического контроля.

Автоматика регулирования ком.-быт. газовых приборов, котлов и промышленных печей предназначена для управления процессом горения газа таким образом, чтобы газоиспользующая установка работала в заданном технологическом

режиме при соблюдении оптимальных показателей горения газа. Так, у отопительных водогрейных котлов автоматически изменяется температура горячей воды в соответствии с изменением температуры наружного воздуха; у паровых котлов поддерживается постоянным давлением пара; у пром. печей контролируется температура в рабочем объеме печи и т.д.

Автоматика безопасности обеспечивает безаварийную работу агрегата, немедленно прекращая подачу газа к горелкам при различного рода нарушениях работы газоиспользующей установки. Контролируются параметры:

1. Давление газа перед горелками. При повышении или понижении давления газа перед горелками на 20 — 25% против установленного максимального и минимального значения подача газа должна прекращаться.
2. Горение факела в топке. При погасании пламени в топочном пространстве должна немедленно прекращаться подача газа.
3. Давление воздуха. При падении давления газ отключается.
4. Разрежение в топке. При понижении разрежения в топках котлов до 3 — 5 Па подача газа должна прекращаться.
5. Температура воды или давления пара в котле. Если величины этих параметров превышают максимально допустимые, то это должно приводить к прекращению подачи газа.
6. Уровень воды в котле. При нарушении допустимых значений уровня газ отключается.

Автоматика должна обладать самоконтролем, т.е. при прекращении подачи энергии, приводящей в действие прибора автоматики, или при нарушении работы какого-либо элемента автоматики должна прекращаться подача газа к горелкам. Кроме указанных параметров должна контролироваться загазованность помещений, где находятся газоиспользующие агрегаты.

При аварийном отключении агрегата подаются световой и звуковой сигналы. Для ведения правильного и экономичного технологического процесса, учета и анализа работы оборудования агрегаты оснащены приборами теплотехнического контроля. В зависимости от конкретных условий газоиспользующий агрегат может быть автоматизирован полностью или частично. В последнем случае автоматизируются лишь отдельные элементы агрегата.

Снижение содержания токсичных веществ в уходящих газах

При сжигании различных видов топлива могут образовываться вещества, загрязняющие воздушный бассейн: зола, сажа, окислы серы, окись углерода, окислы азота, ароматические и канцерогенные вещества (бенз(а)пирен). С ростом промышленности увеличивается потребление топлива, а также количество выбрасываемых в атмосферу твердых взвесей, токсичных и канцерогенных веществ. Поэтому проблема защиты воздушного бассейна от загрязнений является одной из наиболее острых проблем современности.

Окись углерода очень токсична; попадая в легкие, она соединяется с гемоглобином крови и кровь теряет способность усваивать кислород. В связи с тем что способность крови воспринимать окись углерода в 200 раз больше, чем способность воспринимать кислород, то даже малые концентрации CO опасны. По санитарным нормам, предельно допустимая концентрация CO в воздухе при использовании газа для коммунально-бытового потребления составляет 2 мг/м^3. Окись углерода образуется при неполном сгорании газа.

В пламени, в зоне высоких температур, при наличии кислорода азот воздуха соединяется с ним, образуя окись NO, представляющую собой токсичное вещество. При температурах 1500 — 1800°C концентрации NO могут быть значительными. Горячие

газы, выбрасываемые в атмосферу, охлаждаются, и значительная часть NO превращается в двуокись азота NO_2. Окислы азота оказывают вредное действие на органы дыхания человека. Попадая в легкие, окислы азота поглощаются кровью и оказывают действие, аналогичное действию окиси углерода. Однако при одинаковой концентрации окислы азота более вредны, чем окись углерода. Предельно допустимая концентрация окислов азота (в пересчете на NO_2) в атмосфере населенных пунктов составляет 0,085 мг/м^3. Концентрация же их в дымовых газах изменяется от 0,2 до 2 г/м^3. Таким образом, окислы азота, содержащиеся в продуктах горения, являются опасными загрязнителями воздушного бассейна.

Канцерогенные вещества относятся к ароматическим полициклическим углеводородам, наиболее распространенным и сильно действующим из которых является бенз(а)пирен ($C_{20}H_{12}$). Канцерогенные вещества способствуют раковым заболеваниям. Они образуются при сжигании твердого и жидкого топлива.

Одним из наиболее эффективных средств борьбы с загрязнением воздушного бассейна городов является замена твердого и жидкого топлива природным газом. При сжигании газа не образуются твердые частицы. Если природный газ содержит сероводород, то его обязательно очищают от сероводорода, исключая возможность образования окислов серы при сжигании. В настоящее время созданы и внедрены такие конструкции газогорелочных устройств, которые дают возможность полностью сжигать газовое топливо и уменьшать содержание CO в уходящих газах до допустимой нормы. Основными загрязнителями воздушного бассейна, которые сохраняются, и при сжигании газа, служат окислы азота. Однако при соответствующей организации процесса сжигания газообразного топлива можно существенно снизить количество образующихся окислов азота.

Рассмотрим условия образования окислов азота и способы снижения их концентрации в продуктах сгорания. Окись азота NO образуется в зоне высоких температур при наличии свободного кислорода. При низкой температуре до 1000 — 1300°C наблюдается небольшое образование окиси азота. Более высокие температуры характерны для топочных камер котлов и промышленных печей. Таким образом, газы, уходящие из высокотемпературных топок, являются основными загрязнителями окружающего воздуха окислами азота.

Температурный уровень процесса определяется в значительной мере тепловым напряжением объема камеры сгорания. С увеличением тепловых нагрузок температура в топке растет и при прочих равных условиях увеличивается количество окислов азота в продуктах сгорания. Количество NO зависит также от избытка воздуха а. Максимальный выход NO соответствует области избытка воздуха $\alpha \approx 1{,}2$. Наличие максимума объясняется тем, что увеличение концентрации кислорода способствует более активному протеканию процесса окисления азота, но вместе с тем при увеличении значения а температура в зоне горения понижается, в результате чего интенсивность образования NO уменьшается. При величине $\alpha > 1{,}2$ последний фактор оказывает большее влияние, что приводит к уменьшению выхода NO.

Окись азота NO образуется на сравнительно коротком участке факела в зоне максимальных температур. Действительная концентрация окислов азота меньше равновесной, так как время пребывания реагентов в зоне высоких температур меньше необходимого для установления равновесия реакции образования NO.

Для уменьшения выхода NO необходимо снизить максимальные локальные температуры в факеле и концентрации кислорода в зоне максимальных температур, причем этого можно добиться без снижения тепловой эффективности агрегатов. Снизить температурный уровень в туннеле или амбразуре можно путем сокращения длины

туннеля и увеличения угла раскрытия амбразуры. В результате концентрацию окислов азота можно уменьшить на 35—40%. Значительного сокращения количества NO в продуктах сгорания можно добиться путем интенсификации внешнего теплообмена из области максимальных температур.

Эффективным методом уменьшения концентрации NO является создание горелочных устройств с пониженными удельными тепловыми напряжениями огневого сечения и равномерным распределением теплового потока по сечению топочной камеры. Снизить концентрацию окислов азота можно также путем организации двухстадийного горения, применением рециркуляции продуктов горения и регулированием интенсивности закрутки воздушного потока. Снижение концентрации окислов азота в выбросных газах является сложной научной и инженерной проблемой, решение которой будет большим вкладом в дело защиты воздушного бассейна от загрязнений.

Лекция 14

Пуск газа и продувка объектов газораспределения

Перед пуском газа производят контрольную опрессовку подключаемых газопроводов воздухом с давлением 20 кПа независимо от рабочего давления в газопроводе. Падение давления при контрольной опрессовке не должно превышать 0,1 кПа за 1 ч.

Оборудование и газопроводы в ГРП подвергают контрольной опрессовке давлением воздуха, равным 10кПа. Падение давления при этом не должно превышать 0,6 кПа за 1 ч.

После контрольной опрессовки проводят продувку газом подключаемых газопроводов, оборудования и газопроводов в ГРП через продувочные свечи, установленные в ГРП, на конденсатосборниках и в конечных точках газопроводов. Продувочные свечи на подземных газопроводах должны быть высотой не менее 3 м от поверхности земли. В свечи вваривaются патрубки с кранами и штуцерами на высоте 1,5 м от поверхности земли для отбора проб газа. При наличии ГРП продувку осуществляют последовательно: до ГРП, в ГРП после ГРП. Каждая операция проводится самостоятельно.

Продувку подземных газопроводов среднего и высокого давлений осуществляется газом с давлением не более 0,1 МПа, газопроводов низкого давления — газом с давлением, не превышающим рабочее. Продувку газом осуществляют до полного вытеснения воздуха из газопровода. Окончание продувки определяют путем анализа на содержание кислорода в газе, которое не должно превышать 1 %. После окончания продувки давление в газопроводе снижают до 0,4... 1,5 кПа и демонтируют продувочные свечи.

Пуск газа в газопроводы и внутридомовое газовое оборудование является газоопасной работой. Контрольную опресовку газопровода с подключенными газовыми приборами производят воздухом с давлением 5 кПа (500 мм вод. ст.). Продувку газопровода газом производят только при получении положительных результатов опрессовки.

Закрывают краны на стояках и спусках к газовым приборам, открывают запорное устройство на вводе и проверяют на герметичность места соединения внутреннего газопровода с вводом. При положительных результатах этой проверки начинают продувку газопроводов.

Сначала продувают наиболее удаленный стояк от ввода. Выпуск газовоздушной смеси осуществляют с помощью резинового шланга, присоединяемого к

соплу горелки газового прибора, наиболее удаленного от ввода. Резиновый шланг через окно выводят на улицу.

Окончание продувки определяют путем анализа на наличие кислорода, содержание которого в газе не должно превышать 1 %, или путем сжигания отбираемых проб, сгорание которых при пропуске через мыльную эмульсию должно происходить спокойно, без хлопков. Продувка остальных стояков выполняется в такой же последовательности.

По окончании продувки проверяют манометром давление газа на газовых приборах, которое должно соответствовать допустимому для их нормальной работы. Затем поочередно разжигают горелки газовых приборов и регулируют работу автоматики безопасности, контролируют герметичность всех соединений мыльной эмульсией.

Эксплуатация подземных и надземных газопроводов

Предприятия газового хозяйства должны иметь паспорт и комплект эксплуатационной документации, дающей характеристику каждого газопровода и сооружений на нем (диаметр, тип изоляции, средства электрозащиты, точное местоположение, техническое состояние и др.). Для ведения и хранения эксплуатационной документации назначаются ответственные лица. В паспорт газопровода необходимо систематически заносить все виды проводимых работ (капитальный и текущий ремонт, буровой и шурфовой осмотр либо приборный метод контроля электрозащиты).

При эксплуатации газопроводов осуществляют техническое обслуживание, плановые ремонты (текущий и капитальный) и аварийно-восстановительные работы. В состав работ по техническому обслуживанию газопроводов входят: наблюдение за состоянием наружных газопроводов и сооружений на них, включая средства электрозащиты, а также устранение мелких неисправностей, возникающих в процессе их эксплуатации; периодическая проверка состояния газопроводов и их изоляции опрессовкой, приборным методом или методом бурового осмотра; измерение давления газа в газопроводах и электрических потенциалов на них.

Наблюдение за состоянием наружных газопроводов и сооружений на них производится во время систематических обходов трасс газопроводов. Обход трасс в городах и других населенных пунктах и другие работы по техническому обслуживанию газопроводов осуществляются в сроки, предусмотренные СП 62.13330.2010.

Трассу подземных газопроводов обходит бригада слесарей в составе не менее двух человек. За каждой бригадой должны быть закреплены определенные участки трасс с прилегающими к ним вводами, разделенные для удобства обслуживания на маршруты. Для обслуживания подземных газопроводов составляются и выдаются на руки обходчикам маршрутные карты, в которых указываются схема трассы газопровода и ее данные, а также колодцы и подвалы зданий, расположенных в 15-метровой зоне газопровода.

При обходе трасс газопроводов выполняют следующие работы: проверяют на загазованность колодцы, контрольные трубки, установленные на газопроводах, другие сооружения, расположенные на расстоянии до 15 м в обе стороны от оси газопроводов, колодцы других подземных коммуникаций (телефонных, водопроводных, теплофикации и др.), коллекторы, подвалы зданий и др.; выявляют утечки газа по внешним признакам (пожелтение растительности на трассе газопровода, бурые пятна на снегу, выделение пузырьков газа); наблюдают за сохранностью и состоянием коверов и настенных указателей, очищают их от снега, льда, грязи; следят за дорожными и другими строительными работами, производимыми вблизи трассы газопровода, в целях

предупреждения возможности повреждения газопровода, застройки трассы газопровода, складирования на ней материалов и т.д.

Наличие газа в подвалах, колодцах, коллекторах, камерах, контрольных трубках и других сооружениях определяют газоанализаторами. Для контрольной проверки наличия газа в колодцах и других сооружениях в случае необходимости берут пробу воздуха.

Результаты проверки состояния трасс газопровода и сооружений после каждого обхода слесарь записывает в журнал обхода трасс. По результатам записей обходчиков принимаются необходимые меры по обеспечению безопасной эксплуатации газопровода. Результаты проверки заносятся в журнал обхода трасс газопровода.

Организация, производящая земляные работы вблизи газопроводов, представляет предприятию газового хозяйства проект производства работ. Все работы по рытью траншей и котлованов, производимые вблизи газопроводов, фиксируются в журнале производства земляных работ на трассах действующих газопроводов. На места вскрытия газопроводов выполняются эскизы, прилагаемые к технической документации на данный газопровод.

Вскрытие газопровода используется для его осмотра и оценки технического состояния. Результаты осмотра заносятся в паспорт газопровода. Подземные стальные газопроводы всех давлений в процессе эксплуатации подвергаются периодической проверке с целью определения их плотности и состояния изоляции. Без вскрытия грунта такую проверку можно выполнять приборами, позволяющими с достаточной точностью выявлять утечки газа и места повреждений изоляции. Графики проверки утверждает руководитель предприятия газового хозяйства. Они должны проводиться не реже одного раза в пять лет.

Методом бурового осмотра плотность газопроводов проверяют преимущественно в летний период. При этом вдоль трассы газопровода бурят скважины и определяют наличие в них газа. На распределительных газопроводах скважины предусматривают у стыков на расстоянии 0,3...0,5 м от стенки трубы; дно скважины должно располагаться на 0,2...0,3 м выше верха трубы. В зимнее время глубина скважины должна быть не менее глубины промерзания грунта. На дворовых и квартальных разводках, а также при отсутствии схемы расположения стыков распределительного газопровода скважины бурят через каждые 2 м.

Результаты проверки плотности газопровода заносят в его паспорт. Они учитываются при назначении видов и сроков ремонта газопровода, а также при определении его пригодности к дальнейшей эксплуатации.

Если при проверке технического состояния газопровода обнаружены дефекты (неудовлетворительное состояние изоляции, коррозионные повреждения), разрабатывают мероприятия по предотвращению дальнейшего разрушения и устранению этих дефектов, устанавливают сроки их выполнения и разрабатывают особый график наблюдения за состоянием этого газопровода.

Текущий ремонт. В состав текущего ремонта входят следующие основные работы: устранение мелких дефектов и утечек газа, выявленных при техническом надзоре; усиление отдельных сварных стыков с помощью муфт; ремонт поврежденных мест изоляции; устранение провеса газопроводов, снежно-ледяных и кристаллогидратных пробок в газопроводах; приведение в порядок настенных знаков; окрашивание надземных газопроводов; проверка состояния люков и крышек колодцев и коверов с устранением перекосов, оседаний и других неисправностей; ремонт кирпичной кладки колодцев, наращивание кладки под люки, заделка выбоин горловин, ремонт поврежденных мест штукатурки, восстановление отмостки; проверка, осмотр и ремонт

задвижек, кранов и компенсаторов; замена неисправных кранов и задвижек; окрашивание задвижек, кранов и компенсаторов; проверка плотности резьбовых соединений конденсатосборников, устранение повреждений
их оголовков, наращивание или обрезка выводных трубок конденсатосборников и контрольных трубок.

Текущий ремонт выполняют по графику, утвержденному главным инженером предприятия газового хозяйства. Запорную арматуру, компенсаторы, колодцы, коверы ремонтируют не реже одного раза в год; надземные газопроводы и оборудование окрашивают по мере необходимости, но не реже одного раза в четыре года.

Ремонт запорной арматуры и компенсаторов заключается в очистке от грязи и ржавчины, окраске (при необходимости), разгоне и смазке шпинделя у задвижек, проверке и набивке сальников, проверке исправности и ремонте привода задвижек, проверке состояния компенсаторов (стяжные болты снимают, а плотность всех сварных, резьбовых и фланцевых соединений проверяют с помощью мыльной эмульсии), смене износившихся и поврежденных болтов и прокладок. Результаты проверки и ремонта арматуры и компенсаторов заносят в паспорт газопровода.

Для ликвидации образующихся во время эксплуатации водных, снежно-ледяных, кристаллогидратных, смоляных, нафталиновых, грязевых и других закупорок газопроводов и арматуры используют заливку растворителя в газопровод, отогрев мест ледяной закупорки паром или водой, прочистку газопровода стальной проволокой или ершом, продувку газом или воздухом, измельчение посторонних предметов через специально вырезанные окна.

После ликвидации закупорок, вызвавших необходимость ремонта, газопровод испытывают на плотность в соответствии с требованиями Правил безопасности в газовом хозяйстве. Неплотности в арматуре газопроводов устраняют подтягиванием болтов фланцевых соединений, уплотнением сальниковых устройств, заменой отдельных деталей.

Арматура и оборудование (задвижки, краны, конденсатосбор-ники и др.) с дефектами, которые невозможно устранить на месте, подлежат замене.
Капитальный ремонт. При капитальном ремонте производят замену изношенных конструкций, узлов и деталей на более прочные или экономичные, а также ремонтируют основные конструкции. Объекты для капитального ремонта отбирают на основании дефектных ведомостей. Для всех газопроводов, отобранных для капитального ремонта, составляют сметную документацию.

Для объектов со сложной технологией ремонта разрабатывают планы производства работ, в которых определяют методы и сроки их выполнения, потребность в рабочей силе, материалах, арматуре, деталях, строительных материалах, а также размещение на территории, прилегающей к ремонтируемому объекту, материалов, временных сооружений, приспособлений и механизмов. План производства работ разрабатывает организация, выполняющая капитальный ремонт по согласованию с предприятием газового хозяйства.

Капитальный ремонт подземных газопроводов и сооружений на них включает в себя следующие работы:
• замена пришедших в негодность участков газопроводов длиной более 3 м трубами другого диаметра или из другого материала;
• замена пришедших в негодность задвижек, кранов, компенсаторов и другой арматуры на газопроводе;

• установка новых компенсаторов к существующим задвижкам при капитальном ремонте колодцев;
• ремонт задвижек и компенсаторов с разборкой перекрытия или стенок колодца;
• вскрытие газопровода для установки на стыках усилительных муфт;
• устранение провесов газопровода;
• замена или восстановление на газопроводе пришедшей в негодность изоляции, а также теплоизоляции на газопроводах, проходящих под мостами, по эстакадам, в тоннелях;
• устройство дополнительных колодцев, задвижек и компенсаторов на газопроводе;
• устройство новой гидроизоляции, смена крышек и разрушенной кладки колодцев;
• замена и ремонт устройств защиты от коррозии, а также установку дополнительных защитных устройств;
• отрезка недействующих ответвлений у газопроводов;
• рытье шурфов (котлованов) на газопроводе для устранения утечки газа и ремонта газопровода;
• установка ориентиров после замены устаревшего участка газопровода новым;
• восстановление пришедших в ветхость ориентиров;
• установка дополнительных контрольных трубок и конденсатосборников на газопроводе;
• замена пришедшего в негодность подхода к дюкеру, насоса и коммуникаций для откачки воды из колодца дюкера;
• ремонт нарушенной постели под газовым дюкером;
• водолазное обследование дюкера;
• крепление береговых откосов у дюкера;
• перекладка пришедших в негодность газовых вводов;
• установка дренажных трубок на газопроводах.

При ремонтных работах арматуру, резьбовые и фланцевые соединения газопроводов и резервуаров сжиженных газов разбирают только после продувки их воздухом или инертным газом.

Разборка и смазка кранов внутридомового газового оборудования на газопроводах диаметром до 50 мм допускается при давлении газа не более 3 кПа. Разборка резьбовых соединений конденсатосборников среднего и высокого давлений допускается при давлении газа не более 0,1 МПа.

Перед началом ремонтных работ на подземных газопроводах, оборудованных средствами противокоррозионной электрозащиты, принимают меры, исключающие возможность искрообразования. Для этого отключают защитные токи, монтируют перемычки на резьбовых участках газопроводов, газовых колодцах и др.

При ремонте надземных газопроводов и сооружений на них заменяют:
• пришедшие в негодность участки газопровода, проложенного на поверхности грунта, по стенам зданий, эстакадам, под мостами с учетом восстановительных дорожных работ;
• ремонтируют или заменяют задвижки, краны, фасонные части;
• ремонтируют эстакады, на которых уложен газопровод;
• выполняют противокоррозионную окраску газопроводов участками длиной более 5 м.

В диспетчерских пунктах ремонтируют и заменяют элементы коммутации кабеля и оборудования, а также релейные преобразователи телеизмерения. Объекты с законченным ремонтом проверяет комиссия, в состав которой входят представители заказчика (организации, эксплуатирующей газопровод), строительно-монтажной организации, а также местного органа Росгортехнадзора (по согласованию с ним). Комиссия составляет акт приемки отремонтированного объекта с указанием объема выполненных работ, качества работ и результатов испытаний с приложением

исполнительно-технической документации. Результаты работ по капитальному ремонту заносятся в паспорт газопровода.

При перекладке участков газопроводов с изменением их трассировки на эти участки составляется проектная и исполнительно-техническая документация в соответствии с требованиями, предъявленными к вновь строящимся газопроводам.

Аварийно-восстановительные работы. К внеплановым ремонтам относятся аварийно-восстановительные работы, необходимость выполнения которых появляется вследствие нарушения целостности газопровода или сооружений на нем, создающего аварийную ситуацию. Аварийно-восста-новительные работы должны проводиться немедленно.