

# Методы регулирования температуры пара

# Поддержание номинальной температуры пара при пониженных нагрузках

- Пароперегреватели современных паровых котлов по характеристикам тепловосприятости являются комбинированными, так как состоят из частей с разными условиями теплообмена поверхности перегревателя газовым потоком (радиационный, полурadiационный, конвективный).
- Во всех случаях поверхность конвективного теплообмена несколько превышает другие, поэтому в целом комбинированный пароперегреватель имеет слабо выраженную конвективную характеристику и при подъеме нагрузки на котле температура перегрева пара несколько растет.

- В виду необходимости глубокого изменения графика нагрузки электростанции желательно иметь возможно больший диапазон регулирования паропроизводительности при сохранении номинальной температуры пара.
- Номинальная температура пара с допустимыми отклонениями не более  $+5$  и  $-10^{\circ}\text{C}$  должна обеспечиваться: по пару высокого давления - в регулировочном диапазоне нагрузок  $0,3- 1,0 D_{ном}$  в прямоточных газомазутных котлах и  $0,5—1,0 D_{ном}$  в барабанных и прямоточных на твердом топливе, по вторичноперегретому пару - в регулировочном диапазоне  $0,6-1,0 D_{ном}$  .

# Классификация методов регулирования температуры пара высокого давления и промежуточного перегрева



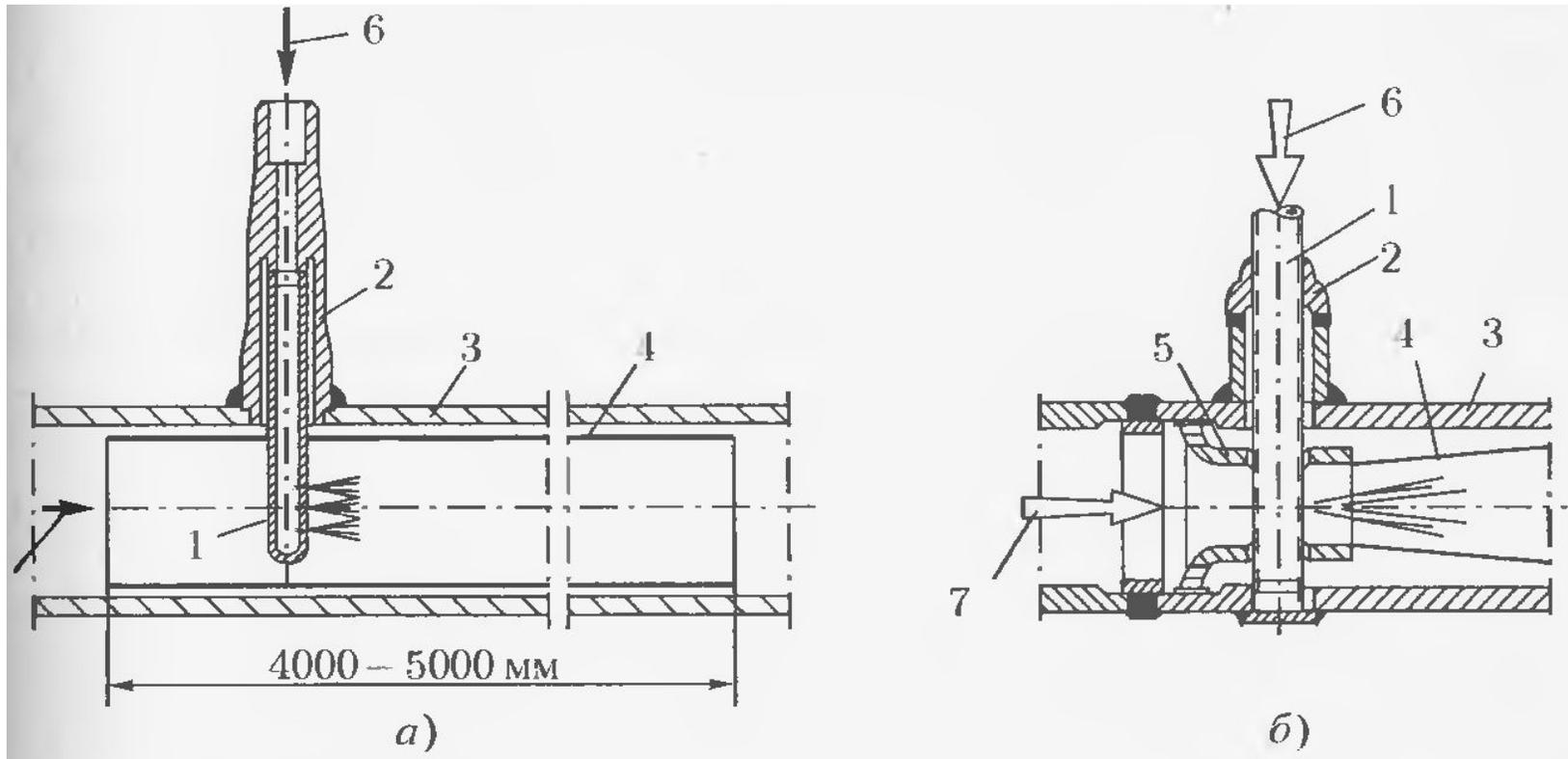
- Регулирование температуры пара высокого давления на барабанных котлах основано на понижении температуры по мере перегрева пара при ее превышении заданного значения в регулируемой точке.
- Поэтому размер поверхности пароперегревателя устанавливают такой, чтобы при нагрузке  $0,5D_{ном}$  без каких-либо воздействий обеспечить номинальный перегрев пара. При нагрузках выше  $0,5D_{ном}$  излишний перегрев пара снимается в пароохладителях. В прямоточных котлах поддержание номинальной температуры обеспечивается изменением соотношения  $B_k/G_{пв}$  при расчетных поверхностях нагрева радиационных и конвективных перегревателей.

- Устройства для регулирования температуры пара в нескольких местах пароперегревательного тракта используются при переходных режимах для стабилизации температуры пара в этих местах. Регулирование промежуточного перегрева пара обеспечивается путем догрева пара до необходимой температуры при нагрузках ниже номинальной. Для этих целей применяются как паровые, так и газовые методы регулирования.

# Впрыскивающий пароохладитель.

- Для поддержания установленной температуры пара высокого давления почти исключительно применяются впрыскивающие пароохладители путем ввода (впрыск.1) в поток частично перегретого пара питательной воды или конденсата, имеющих температуру на 200-300°С ниже охлаждаемого пара.
- Впрыскивающий пароохладитель (рис. 7.10) устанавливают на прямом участке паропровода или в коллекторе длиной 6-7 м, охлаждающая вода или конденсат вводится в поток пара через форсунку-распылитель с несколькими отверстиями диаметром 3-6 мм

Впрыскивающий пароохладитель: *а* — с цилиндрической защитной рубашкой; *б* — с соплом Вентури;  
1 — водяная форсунка; 2 — штуцер; 3 — корпус пароохладителя;  
4 — защитная рубашка; 5 — сопло Вентури;  
6 - вход охлаждающей воды; 7 - вход пара.



- Во избежание попадания относительно холодных струй воды на горячие стенки корпуса (коллектора) внутри него установлена разгруженная от давления защитная рубашка цилиндрической формы или в виде сопла Вентури. Ее размер (3-5 м) определяется расчетной длиной участка испарения капель влаги.

- Снижение температуры перегретого пара впрыскивающим пароохладителем достигается на некотором расстоянии от места ввода воды, так как на испарение капель конденсата и последующий перегрев образовавшегося из них пара требуется некоторый промежуток времени, а скорость потока пара в пароохладителе более 40 м/с. Уменьшения этого расстояния достигают более тонким распылением воды за счет уменьшения диаметра отверстий форсунки и увеличения перепада давления между впрыскиваемой водой и паром и по возможности увеличением разности температур пара и конденсата.

- Тепловой баланс пароохладителя можно записать в форме двух уравнений:
- теплосъем в потоке пара

$$Q_{\text{по}} = D'_{\text{п}}(h'_{\text{по}} - h''_{\text{по}}); \quad (7.11)$$

Тепловосприятие впрыскиваемой воды

$$Q_{\text{по}} = D_{\text{впр}}(\Delta h_{\text{в}} + r + \Delta h_{\text{п}}),$$

- $D/p$   $D_{впр}$  — расход пара перед пароохладителем и воды на впрыск, кг/с;
- $h/po$ ,  $h//po$  — энтальпия пара на входе и выходе пароохладителя, кДж/кг;
- $\Delta h_{в}$ ,  $\Delta h_{п}$  -энтальпия недогрева воды до насыщения и перегрева насыщенного пара до окончательной температуры  $h//po$ , кДж/кг;
- $r$  - теплота парообразования, кДж/кг. В результате осуществления впрыска воды в пар расход пара после пароохладителя возрастает на значение  $D_{впр}$ . Разность  $\Delta h_{по} = h/po - h//po$  называют удельным теплосъемом в пароохладителе. Он составляет обычно (в целом на весь пароперегреватель)  $\Delta h_{по} = 60-85$  кДж/кг или в пересчете на изменение температуры  $\Delta t_{по} = 30-45^{\circ}C$ .

- Расход воды на впрыск в пределах пароохладителя можно определить, составив тепловой и материальный баланс пароохладителя:

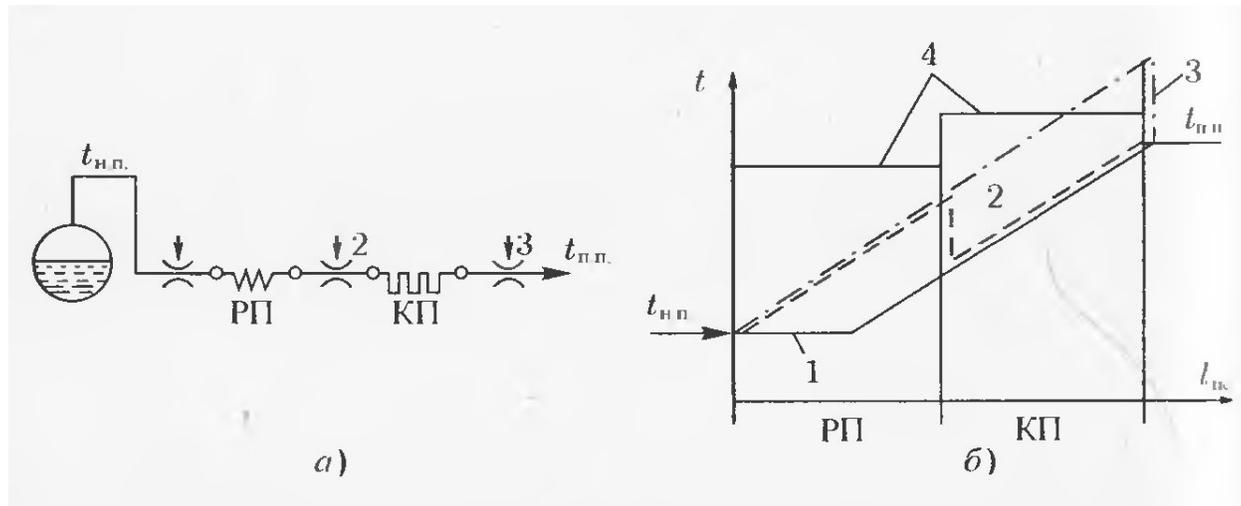
$$D'_{\text{п}} h'_{\text{по}} + D_{\text{впр}} h_{\text{впр}} = (D'_{\text{п}} + D_{\text{впр}}) h''_{\text{по}}$$

- Здесь дополнительно  $h_{\text{впр}}$  — энтальпия воды, поступающей на впрыск кДж/кг.
- Уравнение позволяет определить необходимый расход воды на впрыск, если задан удельный теплосъем в пароохладителе  $\Delta h_{\text{по}}$ .

$$D_{\text{впр}} = \frac{D'_{\text{п}} \Delta h_{\text{по}}}{(h''_{\text{по}} - h_{\text{впр}})}$$

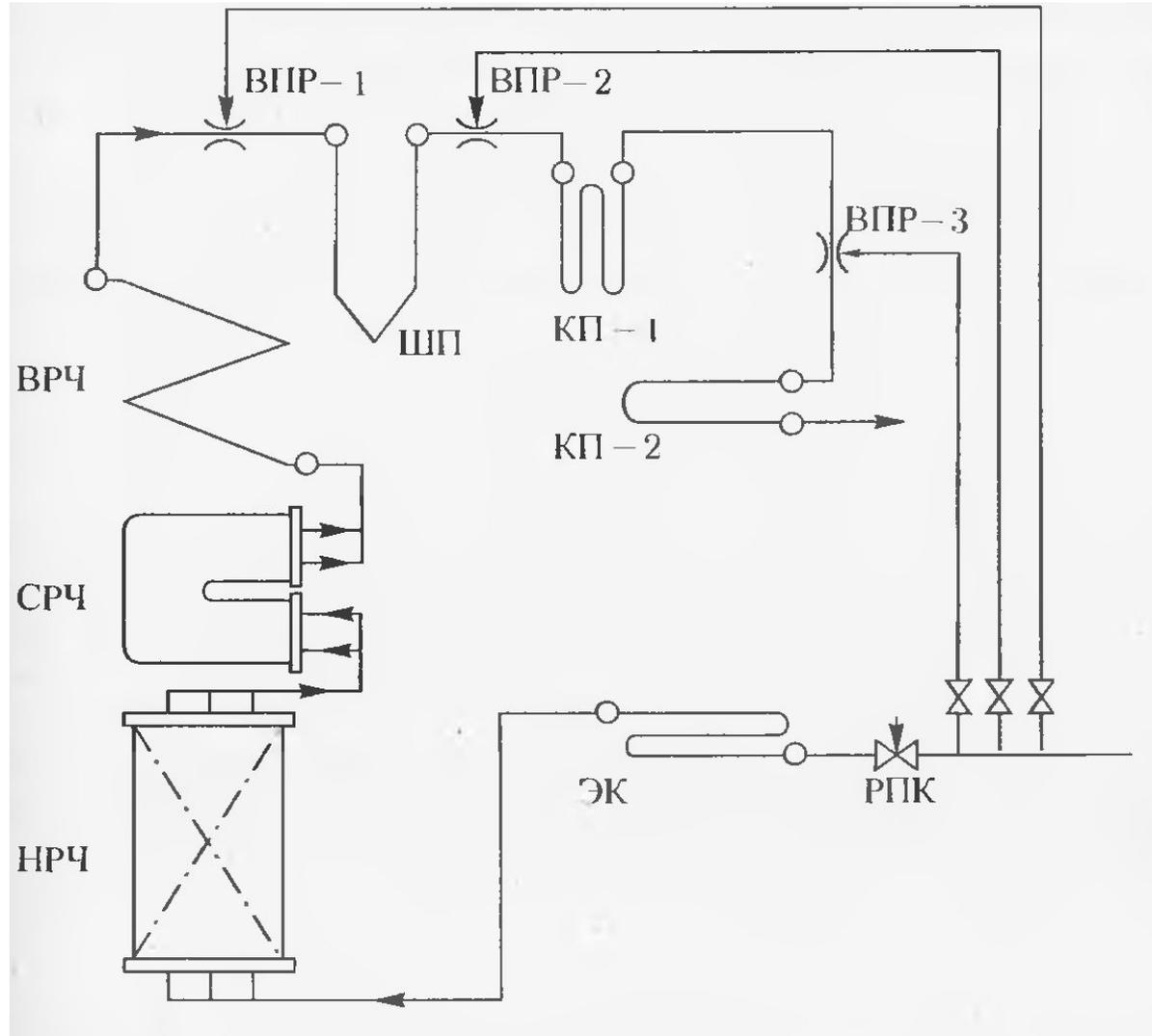
# Изменение температуры перегретого пара при различном размещении пароохладителя в тракте пара:

*a* — общая схема установки впрыскивающих устройств; *б* — изменение температуры пара; 1-3 — места установки пароохладителей и изменение температуры пара в тракте пароперегревателя *l*<sub>пс</sub>; 4 — предельно допустимая температура металла поверхности; РП — радиационный перегреватель; КП — конвективный перегреватель; *t*<sub>н.п.</sub>, *t*<sub>п.п.</sub> — температура насыщенного и перегретого пара.



- Пароохладитель можно устанавливать за пароперегревателем, в рассечку между ступенями пароперегревателя, либо на стороне насыщенном пара. При установке пароохладителя на выходе из него обеспечивается надежное поддержание заданной температуры пара перед турбиной, но металл пароперегревателя в его выходной части остается не защищенным от высокой температуры пара, и потому такой метод применять нельзя. Установка пароохладителя по остальным вариантам защищает металл пароперегревателя. Однако по мере удаления впрыскивающего устройства от выхода из перегревателя возрастает инерционность регулирования и снижается точность поддержания температуры.

Схема расположения впрыскивающих пароохладителей в тракте прямооточного парового котла: ВПР — впрыскивающий пароохладитель; РПК регулирующий питательный клапан.



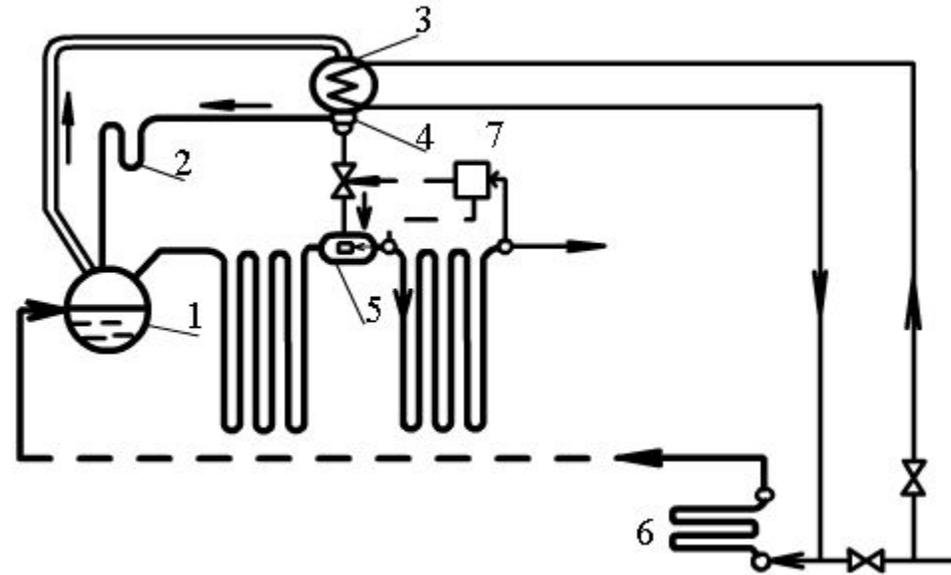
- Обычно для регулирования температуры пара используют не один, и два-три пароохладителя, установленные между отдельными пакетами перегревателя. Один из них устанавливают чаще всего перед ширмовым перегревателем ШП (или в рассечку его) для обеспечения надежной работы металла этой сильно теплонапряженной поверхности. Этот впрыск является наибольшим по воздействию  $\Delta h_1 = (0,5-0,6) \Delta h_{по}$ , его дополнительная задача состоит в стабилизации энтальпии пара на выходе из радиационных поверхностей с учетом неравномерности тепловыделения по стенам топки.

- Второй рекомендуется устанавливать перед конвективными пакетами перегревателя - для стабилизации температуры пара после ширм.
- На барабанных котлах обычно второй пароохладитель отсутствует, а на прямоточных при его установке теплосъем принимают  $\Delta h_{II} = (0,3-0,4)\Delta h_{по}$ . Последний пароохладитель является подрегулирующим и устанавливается перед выходным пакетом перегревателя, имеющим небольшое тепловосприятие по пару (120-200 кДж/кг). Задача пароохладителя - окончательно стабилизировать температуру перегретого пара на выходе из котла.

- Расчетное количество впрыскиваемой воды составляет  $G_{\text{впр}} = (0,05-0,08)D_{\text{НОМ}}$  на прямоточных котлах и до  $0,1D_{\text{НОМ}}$  на барабанных.
- Впрыскивающие пароохладители требовательны к качеству воды, используемой для впрыска. Прямоточные паровые котлы питаются в основном очищенным конденсатом и обессоленной добавочной водой, в связи с чем их оборудуют впрыскивающими пароохладителями, использующими питательную воду.

- В барабанных паровых котлах при сильно минерализованной питательной воде конденсат для впрыска получается в самом котле за счет конденсации части насыщенного пара, отбираемого из барабана котла. Такой способ получения качественной воды для впрыска называется схемой впрыска собственного конденсата (рисунок 18)

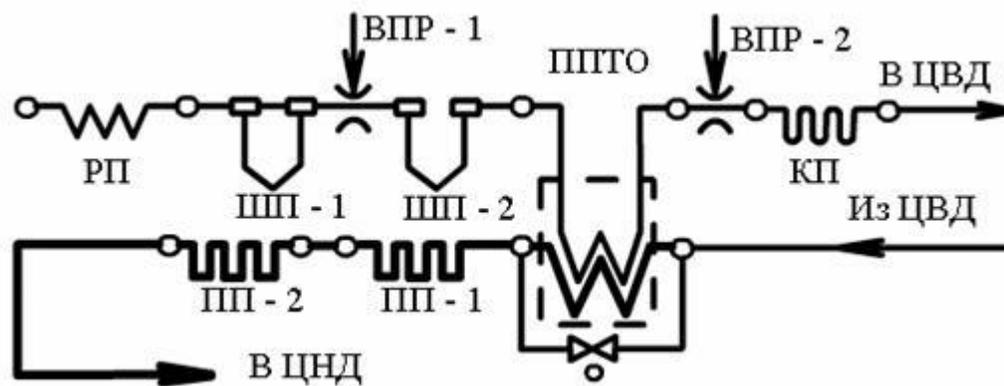
Рисунок 18 - Схема регулирования перегрева пара впрыском собственного конденсата: 1 - барабан; 2 - линия перелива; 3 - конденсатор; 4 - сборник конденсата; 5 - впрыскивающий пароохладитель; 6 - экономайзер; 7 - регулятор



- Конденсация насыщенного пара происходит за счет отвода теплоты к питательной воде, поступающей затем в экономайзер. В нижней части конденсатора установлен конденсатосборник, из которого конденсат поступает в пароохладители, а избыток его через линию перелива возвращается в барабан.

- Для регулирования температуры промежуточного перегрева пара чаще всего применяются паропаровые теплообменники (ППО), в которых часть теплоты пара высокого давления передается пару, поступающему на вторичный перегрев.
- Первая часть пароперегревателя высокого давления, находящаяся до ППО, обладает в основном радиационной характеристикой, а промежуточный перегреватель является конвективным (рисунок 19).

Рисунок 19 - Схема включения ПТТО в тракте котла СКД.



- При снижении нагрузки на котле температура пара высокого давления после прохождения радиационной части перегревателя перед ППТО будет несколько возрастать, а в конвективном промежуточном перегревателе - снижаться. Изменение тепловосприятия ППТО обеспечивается пропуском части вторично перегреваемого пара помимо ППТО через байпасную линию с регулирующим клапаном.

- Если уменьшить расход пара через байпасную линию (увеличить через ППТО), то температура пара в точке смешения за ППТО (или что то же самое - перед конвективной поверхностью перегревателя) повысится, компенсируя снижение тепловосприятия конвективной поверхности при пониженной нагрузке.

- Секция паропарового теплообменника состоит из системы трубок диаметром 25-35 мм, помещенных в коллектор диаметром 160-200 мм. Для лучшей компенсации температурных удлинений трубной системы и компактности устройства теплообменнику придают U-образную форму. Диапазон регулирования температуры пара в ПТТО составляет 30-40°C.

- Паропаровые теплообменники можно рассматривать как часть поверхности нагрева промежуточного пароперегревателя, так как через них всегда проходит небольшой поток пара. По тракту вторично перегреваемого пара теплообменники устанавливают перед входом в конвективную поверхность.

# Методы газового регулирования

- Газовое регулирование применяется для поддержания требуемой температуры пара промежуточного перегрева путем догрева пара при пониженной нагрузке. В этом случае конвективная поверхность устанавливается таких размеров, чтобы при номинальной нагрузке была обеспечена заданная температура пара, а при пониженной нагрузке расход газов через поверхность увеличивается.

- Газовое регулирование вызывает дополнительные расходы энергии на тягу и увеличение потерь теплоты с уходящими газами. Определенное влияние изменение расхода газов оказывает на температуру перегрева свежего пара, что усложняет эксплуатацию.

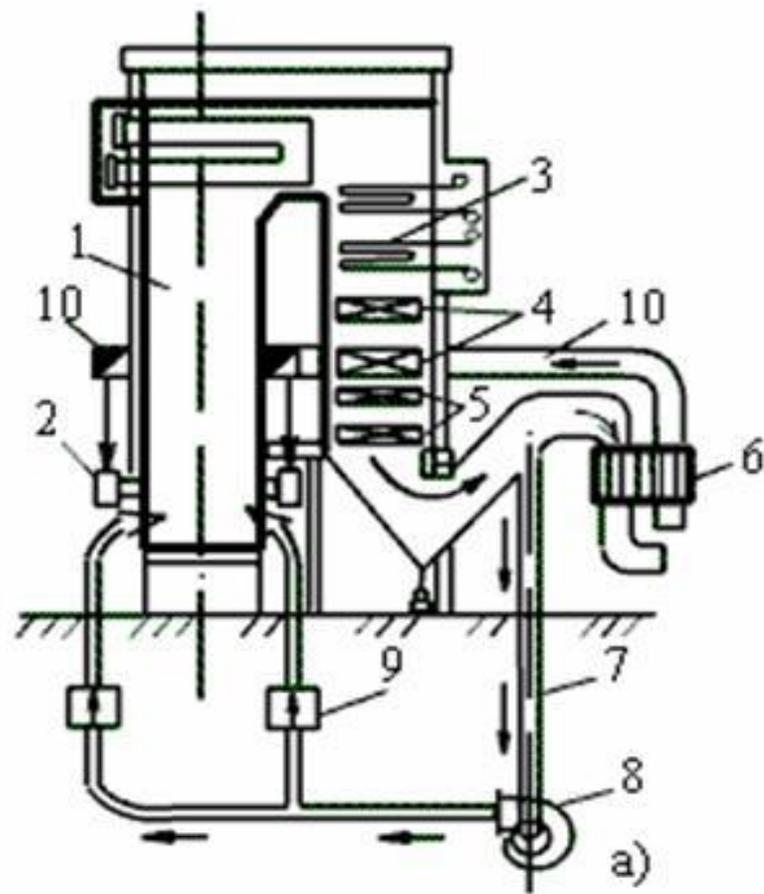


Рисунок 20 - Организация рециркуляции дымовых газов в топку (топливо-мазут): 1 - топка котла; 2 - газомазутные горелки; 3, 4 - конвективные поверхности основного и промежуточного пароперегревателей; 5 - экономайзерные поверхности; 6 - РВП; 7 - линия отбора газов на рециркуляцию; 8 - дымосос рециркуляции газов; 9 - регулятор расхода; 10 - короб горячего воздуха.

- С учетом инерционности газового регулирования в мощных котлах этот метод применяется совместно с паровым.
- Рециркуляция продуктов сгорания обеспечивается возвратом части газов  $V_{rc}$  из газохода после экономайзера с температурой  $t_{rc} = 350 - 450$  °С в топочную камеру. Газы рециркуляции вводятся либо в кольцевой канал вокруг горелки, либо непосредственно в короб воздуха горелок (рисунок 20).

- Поскольку абсолютное давление газов в топке выше, чем в месте отбора их на рециркуляцию, подача газов в топку возможна только специальным дымососом рециркуляции газов. В связи с этим возрастают общие собственные затраты энергии котлом на перекачку газов. Кроме того, возврат части газов в топку увеличивает общий объем газов в тракте от топки до места отбора газов и сопротивление этого тракта, отчего дополнительно увеличиваются затраты энергии на тягу в основных дымососах.

- Доля рециркуляции изменяется обычно от 5 до 40% и увеличивается по мере снижения нагрузки, когда заметно уменьшается тепловосприятие конвективных поверхностей промежуточного перегревателя.

- В результате ввода рециркулирующих газов в топку происходит снижение температуры горения в топке, уменьшение тепловосприятости топочных экранов и увеличение тепловосприятости конвективных поверхностей. В итоге в среднем 1% рециркуляции газов обеспечивает повышение температуры пара на 1,0-1,5°C.

- Рециркуляция дымовых газов в широком диапазоне применяется преимущественно на газомазутных котлах, на которых ввод инертных газов в зону горения практически не влияет на полноту сгорания топлива и поверхности которых не подвержены золовому износу при повышенной скорости газов в газоходах.

- Наличие рециркуляции газов приводит к некоторому повышению температуры уходящих газов и, следовательно, потерь теплоты с ними. При этом несколько возрастет расход топлива по сравнению с режимом без рециркуляции.