

## 7.8 Теплофикационные циклы

Как было показано при энергетическом анализе цикла (см. раздел 7.5), большое количество подведенной в нем к рабочему телу теплоты отводится нижнему тепловому источнику, что является неизбежным условием выполнения второго закона термодинамики. В конденсационной паротурбинной установке эта теплота отводится к охлаждающей конденсатор воде и сбрасывается в окружающую среду. В то же время существует огромная потребность в теплоте для отопления зданий и для осуществления ряда производственных процессов. Ясно, что для этих целей не может быть использована охлаждающая конденсатор вода, так как конденсация происходит при давлении  $3\div 4$  кПа, что соответствует температурам  $24\div 29^\circ\text{C}$ , т.е. очень близким к температуре окружающей среды. Для того, чтобы теплоту конденсирующегося пара можно было использовать для целей отопления, давление его повышают до  $0,12\div 0,25$  МПа, что позволяет нагреть циркулирующую в тепловой сети воду до температуры  $100\div 125^\circ\text{C}$ , а если этот пар используется для производственных нужд, то и до более высоких давлений. Турбину в этом случае называют *теплофикационной турбиной с противодавлением*. Схема паротурбинной установки с такой турбиной представлена на рис. 7.39, а ее цикл в  $T,s$  диаграмме – на рис. 7.40. В этой установке приготовленный в паровом котле ПК пар поступает в турбину Т, где при адиабатном расширении (процесс 1–2 на рис. 7.40) производит работу, а затем, конденсируясь, отдает теплоту  $q_T$  тепловому потребителю ТП (процесс 2–3 на рис. 7.40). Полученный конденсат насосом Н подается в котел (работу насоса в данном случае не учитываем), где в изобарном процессе 3–4–1 при подводе теплоты  $q_1$  снова получается пар состояния 1.

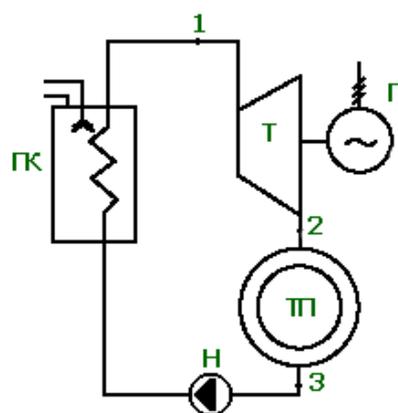


Рис. 7.39

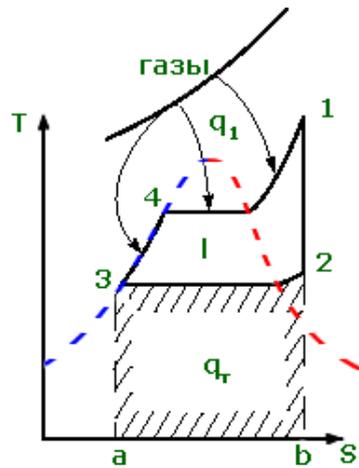


Рис. 7.40

Очевидно, что при повышении давления за турбиной термический КПД цикла ухудшится. Но он в этом случае и не характеризует эффективность работы установки, так как в ней теперь получаются два полезных продукта – работа  $I$  и теплота  $q_T$ , отданная тепловому потребителю. Такая совместная выработка электроэнергии и теплоты для отопления или производственных нужд называется *теплофикацией*, а электростанция, работающая по этому принципу, – теплоэлектроцентралью (ТЭЦ).

Термодинамический выигрыш от применения теплофикации можно пояснить следующим образом. Альтернативой её является раздельная выработка электроэнергии (работы) на конденсационной электростанции (КЭС) и теплоты в отдельной котельной. В этом случае в котельной теплота от газообразных продуктов сгорания топлива передается тепловому потребителю при очень большой разности их температур (рис. 7.41). Этот процесс характеризуется очень большой степенью необратимости и, следовательно, большой потерей эксергии газов. Если же на пути передачи теплоты встроить цикл для получения работы (рис. 7.40), то эксергия газов будет использована намного полнее.

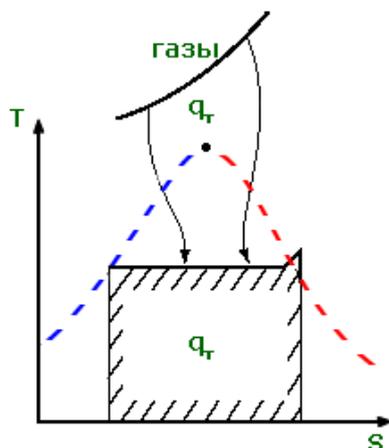


Рис. 7.41

У теплофикационной установки, имеющей турбину с противодавлением (рис. 7.39), выработка электроэнергии жестко связана с отпуском теплоты тепловому потребителю, так как расход пара через турбину может быть только таким, какой нужен для выработки теплоты в количестве, заданном тепловым потребителем. Поэтому такие установки применяются там, где тепловая нагрузка достаточно постоянна (промышленный потребитель). Если же тепловое потребление значительно изменяется в зависимости от времени года (системы отопления) или других факторов, то используют теплофикационные турбины с регулируемым отбором пара. Схема такой установки показана на рис. 7.42. Из парового котла ПК пар в количестве  $D$  поступает в турбину  $T$ , в которой адиабатно расширяется до давления  $p_T$ . При этом давлении часть пара  $D_T$  отбирается в сетевой подогреватель СП воды, циркулирующей в отопительной сети теплового потребителя ТП, где от него отводится теплота  $Q_T$ , используемая для нужд теплофикации. Оставшийся пар продолжает адиабатное расширение в турбине до давления  $p_2$ , поддерживаемого в конденсаторе  $K$ . Конденсат пара теплофикационного отбора  $D_T$  состояния 4 (рис. 7.43) смешивается с конденсатом, поступающим из конденсатора. Получившийся поток состояния 5 сжимается насосом  $H$  до начального давления  $p_1$  (тч. 6 на рис. 7.43) и направляется в котел.

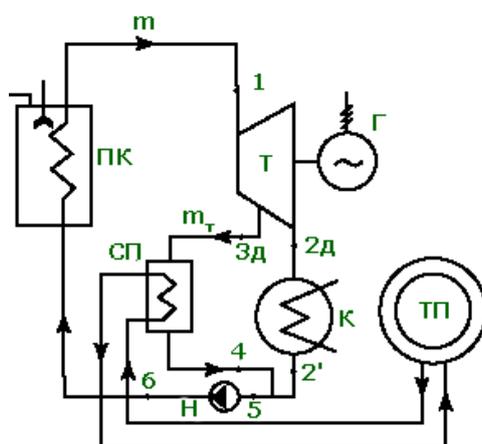


Рис. 7.42

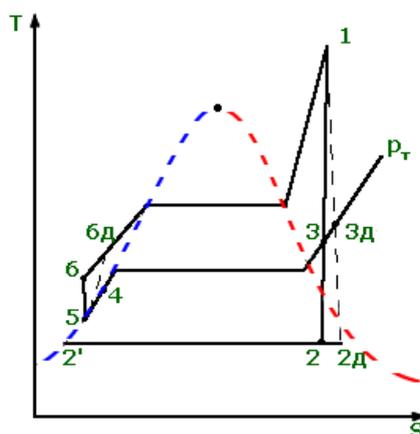


Рис. 7.43

В зависимости от тепловой нагрузки  $Q_T$  регулируется количество отбираемого пара  $D_T$  и, соответственно, количество пара, поступающего в конденсатор. Режим работы турбины может изменяться от чисто конденсационного (нет теплового потребления) до режима, при котором почти весь пар (за исключением минимального, так называемого вентиляционного, пропуска в конденсатор) уходит в отбор.

Мощность, развиваемая теплофикационной турбиной, определяется как

$$N_{\text{э}} = [(D - D_T)(h_1 - h_2) + D_T(h_1 - h_3)]\eta_{oi}^T \eta_M \eta_{\Gamma}, \quad (7.31)$$

а количество теплоты, отданной тепловому потребителю, составляет

$$Q_T = D_T(h_{3\delta} - h_4) \quad (7.32)$$

Для выработки их в котле к воде подводится теплота  $Q_1$ , равная

$$Q_1 = D(h_1 - h_6), \quad (7.33)$$

где  $h_6 = h_5 + I_n^A$ , а энтальпия  $h_5$  находится из теплового баланса слияния потоков конденсата

$$h_5 = [D_T h_4 + (D - D_T) h_2] / D \quad (7.34)$$

Часовой расход топлива при этом составляет

$$B = 3600 Q_1 / Q_{\text{P}}^H \eta_{\text{ка}} \quad (7.35)$$

Для характеристики эффективности применения комбинированной выработки электроэнергии и теплоты применяют несколько показателей. Одним из них является *коэффициент использования теплоты*

$$K = (N_{\text{э}} + Q_T) / Q_1, \quad (7.36)$$

который не может полноценно отражать преимущество применения теплофикации, так как не учитывает качественное различие теплоты и работы как видов энергии. Сопоставлять с помощью него разные теплофикационные установки нельзя. Так например, две установки могут иметь одинаковым этот коэффициент, а доля выработки электроэнергии (более ценной продукции) у одной из них больше и это никак не отразится в этом показателе. Поэтому используют еще один показатель – *удельную выработку электроэнергии на тепловом потреблении*  $\varepsilon$  (кВт·ч/кДж)

$$\varepsilon = D_T (h_1 - h_3) \eta_{oi}^T \eta_M \eta_{\Gamma} / 3600 Q_T \quad (7.37)$$

Применяя его, можно анализировать влияние тех или иных изменений в цикле на экономичность установки. Так для установок с турбинами с противодавлением, для которых коэффициент использования теплоты согласно (7.36) всегда равен произведению коэффициентов  $\eta_M \eta_{\Gamma}$ , можно показать, что повышение параметров пара улучшает экономичность, так как при этом увеличивается удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении и, следовательно, при одинаковой тепловой нагрузке  $Q_T$  возрастает количество электроэнергии, выработанной по очень экономичному циклу.

Так как ТЭЦ производит два вида продукции –электроэнергию и теплоту –для оценки эффективности ее работы применяют два разных КПД. При этом *КПД ТЭЦ по выработке электроэнергии* определяется как

$$\eta_{ТЭЦ}^{\text{э}} = 3600N_{\text{э}} / (BQ_p^{\text{н}} - 3600Q_T / \eta_{\text{ка}}) \quad (7.38)$$

Общая термодинамическая оценка эффективности применения теплофикации может быть сделана на основе эксергетического метода. В этом случае при учете полученной энергии различных видов используется их единая мера –эксергия. Принимая эксергию топлива равной его низшей теплотворной способности, *эксергетический КПД ТЭЦ* представим в виде

$$\eta_{ТЭЦ}^{\text{экс}} = 3600(N_{\text{э}} + E_{Q_T}) / BQ_p^{\text{н}} \quad (7.39)$$

Рассмотрение проблемы отнесения произведенных на ТЭЦ затрат на различные виды продукции выходит за рамки данного курса.