

### 7.1. Цикл Ренкина.

Схема простой паротурбинной установки показана на рис. 7.1. В этой установке перегретый водяной пар, приготовленный в паровом котле ПК, при давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$  поступает на вход паровой турбины Т. Здесь кинетическая энергия водяного пара, приобретенная им при адиабатном расширении в соплах, на рабочих лопатках преобразуется в механическую работу турбинного вала, а затем с помощью соединенного с ним электрического генератора Г в электроэнергию

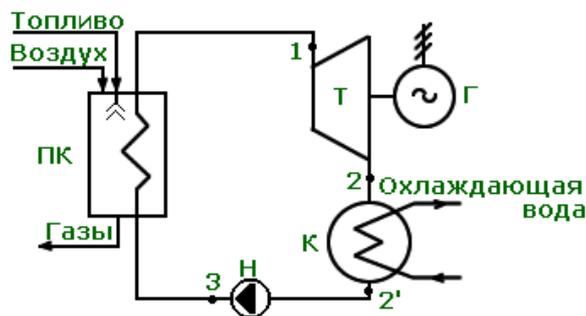


Рис. 7.1

По выходе из турбины влажный пар при давлении  $p_2$  поступает в конденсатор К, где, отдавая теплоту охлаждающей воде, полностью конденсируется при постоянном давлении. Получившаяся вода в насосе Н адиабатно сжимается до давления  $p_1$  и подается в котельный агрегат, в котором она, получая теплоту от горячих газообразных продуктов сгорания топлива, нагревается при постоянном давлении до кипения и испаряется, а образовавшийся пар перегревается до первоначальной температуры  $t_1$ . Таким образом цикл замыкается, а полученный перегретый пар снова направляется в турбину и цикл повторяется.

На рис. 7.2 – 7.4 цикл, совершаемый водой и водяным паром в паротурбинной установке, представлен в различных термодинамических диаграммах. При построении их принято, что цикл является идеальным обратимым, т.е. все составляющие его процессы обратимы. В нем теплообмен между рабочим телом и источниками теплоты осуществляется при бесконечно малой разности температур, в каждом процессе отсутствуют потери теплоты и давления, т.е. отсутствует трение. На всех этих диаграммах линия 1–2 представляет процесс обратимого адиабатного расширения пара в турбине, являющийся в этом случае, согласно уравнению (2.18), процессом изоэнтропным. Линия 2–2' представляет изобарный (а в двухфазной области он является и изотермическим) процесс отвода теплоты  $q_2$  при конденсации влажного пара. Обратимый адиабатный (т.е. тоже изоэнтропный) процесс сжатия жидкой воды в насосе представлен линией 2'–3, а все последующие стадии подвода теплоты  $q_1$  для получения перегретого пара в котельном агрегате (нагрев воды до

кипения, парообразование, перегрев) -различными участками изобары 3 - 1. Такой цикл, состоящий из двух адиабат и двух изобар, называется *циклом Ренкина*.

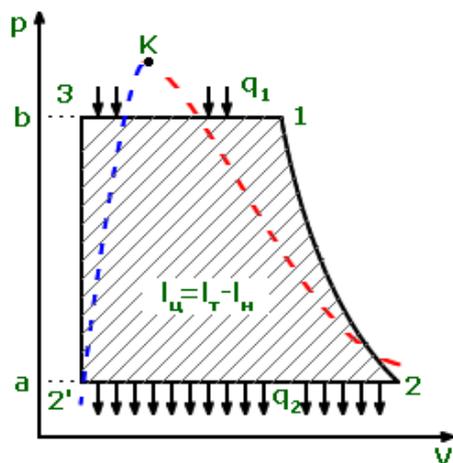


Рис. 7.2

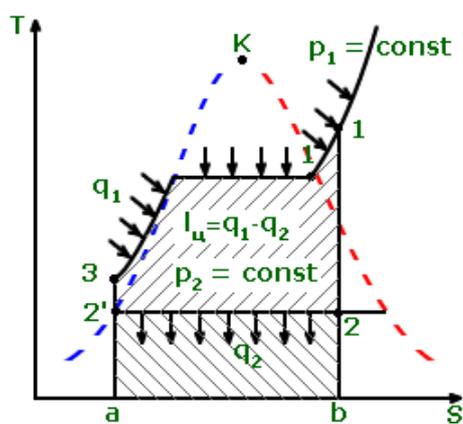


Рис. 7.3

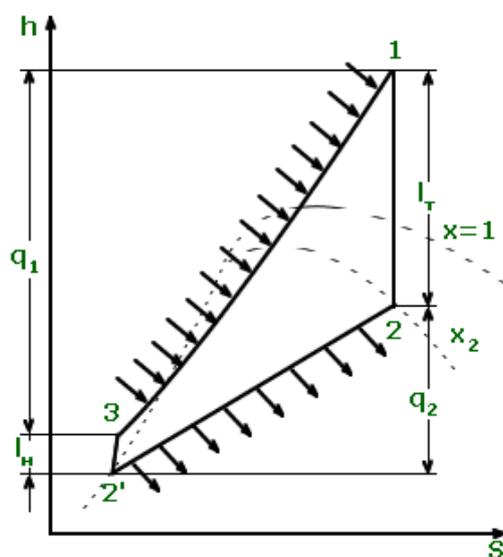


Рис. 7.4

Как было сказано в главе 2, эффективность преобразования теплоты в работу в обратимом цикле характеризуется термическим КПД, определяемым формулой (2.10). В данном цикле работа цикла  $l_{ц}$  является разностью работ –полученной в турбине  $l_T$  и затраченной в насосе  $l_n$ . Поэтому выражение для термического кпд цикла примет вид

$$\eta_T = \frac{l_{ц}}{q_1} = \frac{l_T - l_n}{q_1} \quad (7.1)$$

Все процессы, составляющие цикл паротурбинной установки, происходят в потоке вещества. Поэтому при анализе их следует применять уравнение первого закона термодинамики для потока (1.26) и работы турбины и насоса рассматривать как техническую работу  $l_{тех}$ . В этом случае работа процесса адиабатного расширения пара в турбине при условии равенства кинетической энергии его на входе и выходе из турбины равна

$$l_T = h_1 - h_2 \quad (7.2)$$

При том же условии абсолютная величина работы адиабатного процесса сжатия воды в насосе (знак минус уже учтен в формуле (7.1)) составит

$$l_n = h_3 - h_2 \quad (7.3)$$

Тогда термический КПД цикла Ренкина может быть представлен как

$$\eta_T = [(h_1 - h_2) - (h_3 - h_2)] / (h_1 - h_3) \quad (7.4)$$

Величины энтальпии, входящие в эту формулу, могут быть найдены или с помощью таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара [8] или с помощью вычислительной программы [4]. Отметим также, что работу сжатия воды в насосе приближенно можно вычислить, считая воду мало сжимаемой жидкостью и используя формулу (3.2), как

$$l_n \approx v_2'(p_1 - p_2), \quad (7.5)$$

где  $v_2' = 1,0002 \text{ м}^3/\text{кг}$ .