

Лекция 14

Циклы паротурбинных установок

Цикл Карно

Ранее нами отмечалось, что в качестве рабочего тела могут использоваться материальные вещества, обладающие способностью легко воспринимать тепловую энергию, при необходимости отдавать тепловую энергию. Легко изменять свое состояние под действием внешних сил и перемещаться в соответствии со складывающимися текущими условиями. Как правило, этим условиям отвечают газообразные вещества, в том числе пары жидкостей, перешедших в газообразное состояние под действием подвода теплоты и повышения своего температурного состояния. Наиболее широкое распространение к использованию получил водяной пар в состоянии сухого насыщенного и перегретого пара, близко соответствующего по своим свойствам газообразному веществу.

Схема и состав упрощенной конструкции паротурбинной установки представлена на рисунке 38. Принцип и порядок работы заключается в следующем.

В результате высокотемпературной реакции окисления топлива выделяется энергия в виде теплоты. Энергия, через стенки парового котла 1, передается воде и водяному пару. Влажный пар воды поступает в пароперегреватель 2, где в результате дополнительного нагрева влажный пар переходит в состояние сухого насыщенного или перегретого пара. Сухой насыщенный или перегретый пар, под определенным давлением направляется через сопло, где получает дополнительно разгон потока и поступает на лопатки паровой турбины 3. Подведенная тепловая энергия превращается в механическую энергию вращения турбины, для привода различного рода агрегатов и устройств 4.

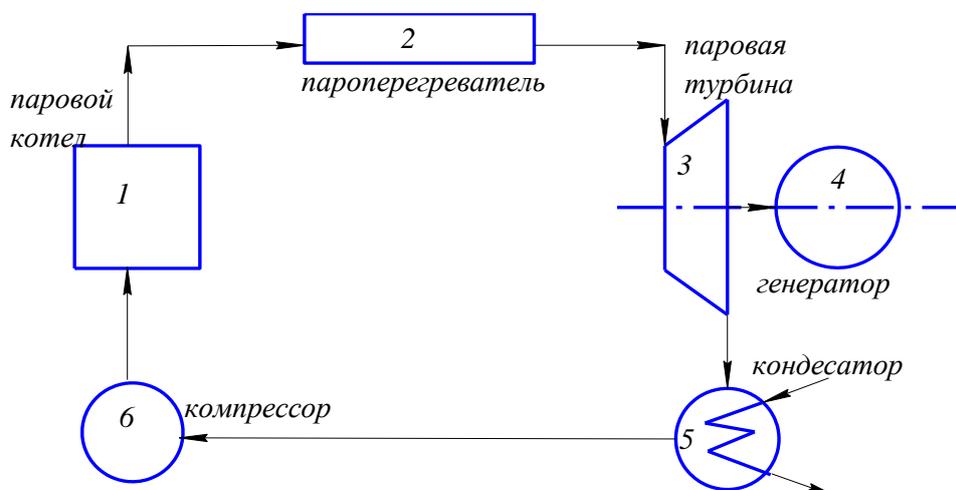


Рисунок 38 – Схема паросиловой установки по циклу Карно

После расширения пара на лопатках турбины, пар переходит в состояние влажного пара и направляется в кондиционер 5, где частично охлаждается водой с более низкой температурой. Образовавшийся конденсат откачивается конденсационным насосом 6 в питательный бак. С питательного бака вода после предварительного подогрева в подогревателе, под давлением, чуть выше первоначального давления, снова поступает в паровой котел 1.

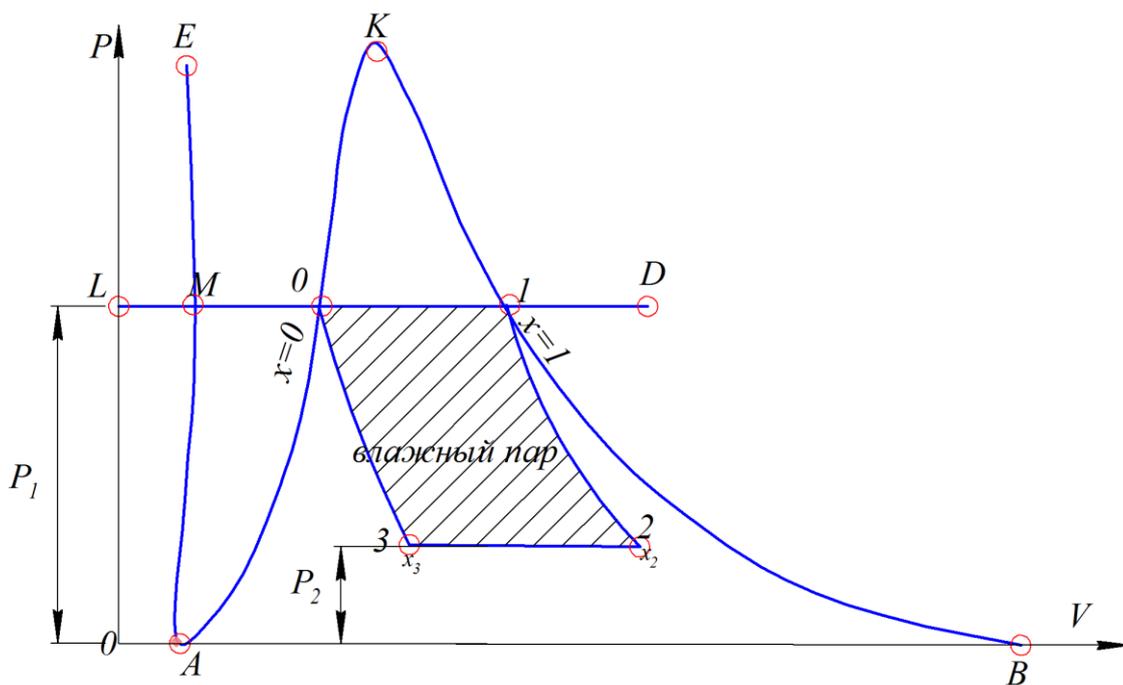


Рисунок 39 – Идеальный цикл паросиловой установки по циклу Карно в $P - V$ координатах

Идеальный цикл паротурбинной установки в координатах $P - V$ и $T - S$ представлен на рисунках 39 и 40. Это идеализированная диаграмма изменения состояния рабочего тела в процессе превращения тепловой энергии в механическую работу.

Процесс 0-1 – представляет собой изобарно-изотермический процесс подвода теплоты q_1 и превращения единицы массы воды в сухой насыщенный пар.

Процесс 1-2 – представляет собой адиабатный процесс расширения сухого насыщенного пара на лопатках паровой турбины.

Процесс 2-3 – представляет собой изобарно-изотермический процесс конденсации пара в охладителе до определенного состояния высокой степени влажности.

Процесс 3-0 – представляет собой процесс адиабатного сжатия конденсата в конденсационном насосе до первоначального состояния кипящей воды при давлении равном давлению в паровом котле.

Из диаграммы изменения состояния рабочего тела, представленного на рисунке 36, отчетливо видно – это идеальный цикл Карно для паротурбинной установки с реальной перспективой его реализации.

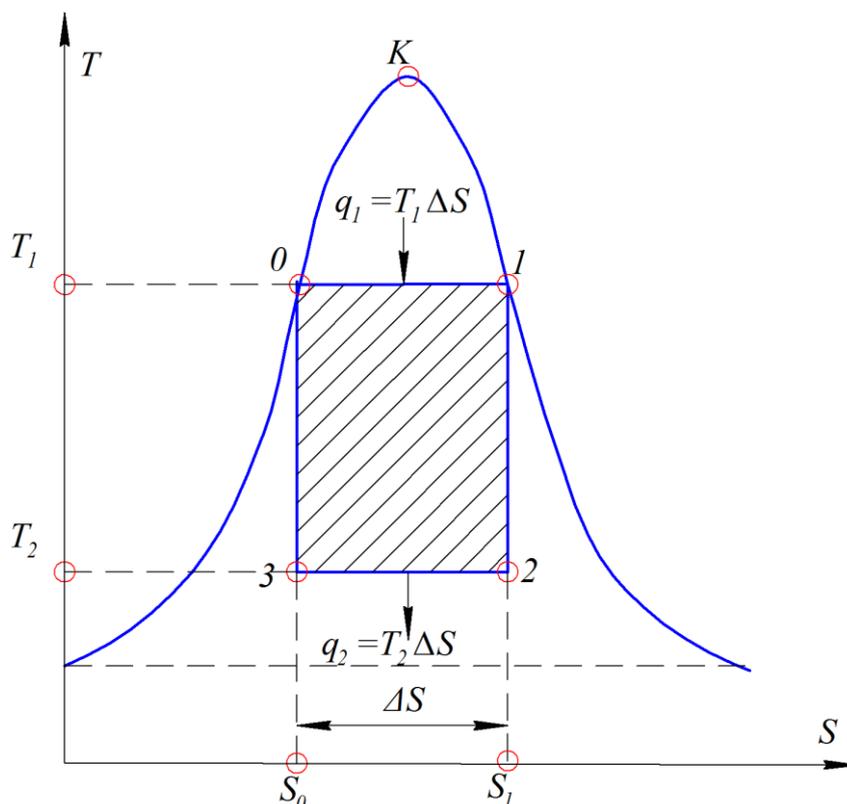


Рисунок 40 – Идеальный цикл паросиловой установки по циклу Карно в $T - S$ координатах

Однако, практическая реальность выявляет ряд недостатков. В частности, компрессор адиабатного сжатия влажного пара для перевода его в состояние исходного давления и температуры кипящей воды, требует его конструкции особо больших размеров. В том числе, при переходе к более выгодным условиям организации работы, повышения исходного давления и температуры, снижения давления и температуры на выходе из паровой турбины перед конденсатором, требует дополнительного и существенного увеличения размеров компрессора адиабатного сжатия. Высокая необратимость происходящих процессов в реальном компрессоре окончательно подтверждает нецелесообразность реализации паросиловой установки такого типа. Необратимость происходящих процессов увеличивает действительную работу на привод компрессора на 50 %.

Цикл Ренкина

В настоящее время за основной цикл паротурбинной установки принят цикл Ренкина.

Основное изменение в организации работы паротурбинной установки заключается в следующем. После разогрева и превращения воды в сухой насыщенный пар (паровой котел 1), сухой пар пропускают через пароперегреватель 2. От пароперегревателя перегретый пар с более высокой температурой, после разгона в сопле Лавалю, поступает и на лопатки турбины, где в результате адиабатного расширения происходит превращения кинетической энергии движения в механическую энергию перемещения (вращения) паровой турбины и привод пользователей механической энергии, электрогенератор. После полного расширения на лопатках турбины влажный пар поступает в конденсатор с более глубоким охлаждением до степени влажности близко к единице, полного перехода влажного пара в жидкость. Образовавшийся конденсат откачивается конденсационным насосом 6 в питательный бак 7. С питательного бака вода откачивается водным насосом 8 и, после предварительного подогрева в подогревателе 9, под давлением, чуть выше первоначального давления, снова поступает в паровой котел 1, рисунок 41.

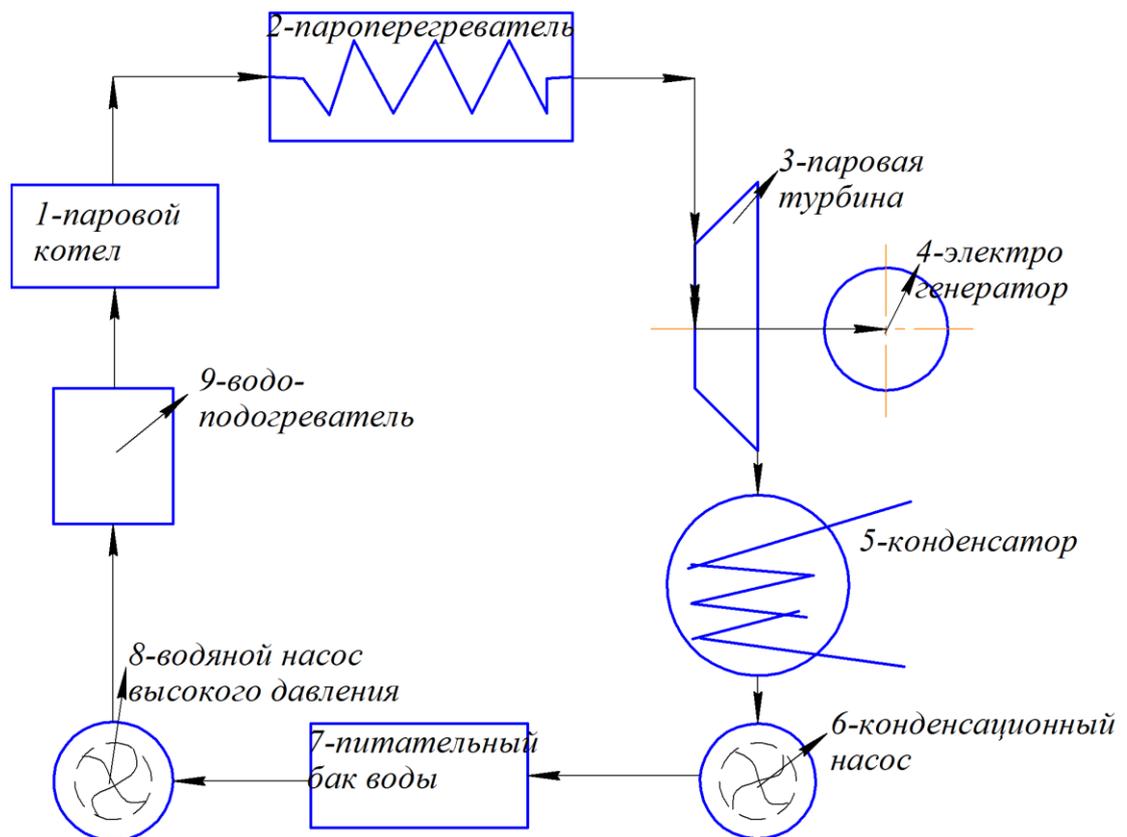


Рисунок 41– Схема паросиловой установки по циклу Ренкина

Изобарно-изотермический процесс конденсации 2-3 завершается на нижней пограничной кривой, линии кипящей жидкости. Далее кипящая вода отбирается водяным насосом, условно сжимается до исходного давления P_1 и поступает в паровой котел, где вода подогревается до температуры кипения и вступает в рабочий цикл перегрева воды в пар.

На рисунке 42 представлен идеальный цикл Ренкина в координатах $P-V$. Точка 4 определяет энергетическое и температурное состояние кипящей воды при давлении P_1 . Линия 4-5-6 представляет изобарно-изотермический процесс подвода теплоты в паровом котле и превращения кипящей жидкости в сухой насыщенный пар.

При этом же давлении, сухой насыщенный пар поступает в пароперегреватель, где получает дополнительную тепловую энергию. Процесс сопровождается повышением температурного состояния пара и его энергетического состояния. К моменту достижения точки 1 энтальпия пара составляет i_1 . Соответственно, количество подведенной теплоты q_1 к рабочему телу составляет $q_1 = i_1 - i_3$.

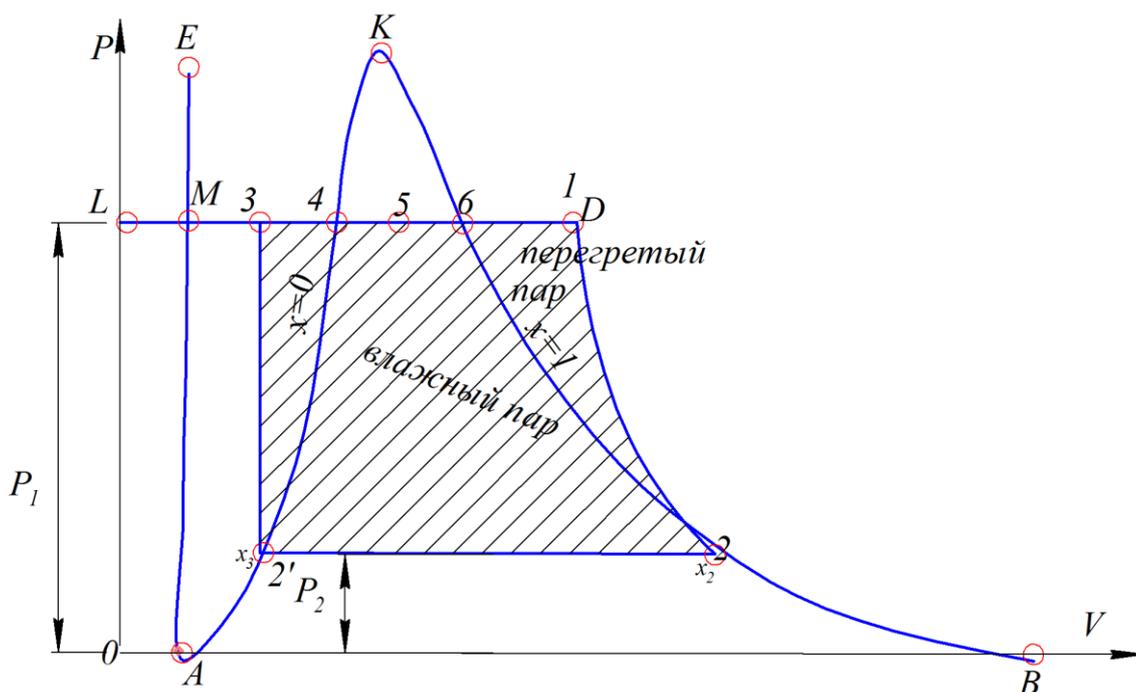


Рисунок 42 – Идеальный цикл паротурбинной установки по схеме Ренкина в $P-V$ координатах

С этого состояния, перегретый пар поступает на лопатки турбины, где происходит адиабатное расширение, с понижением температурного состояния и давления до P_2 , участок рабочего цикла 1-2. Пар переходит в состояние влажного пара повышенной степени сухости, в пределах

$x = 0,87 \dots 0,95$, и поступает в конденсатор. Энергоемкость и энтальпия пара, к моменту входа перед конденсатором, составляет i_2 .

В конденсаторе происходит глубокое охлаждение пара с переходом в жидкость кипящей воды, рисунок 43. Энергоемкость и энтальпия кипящей воды составляет i_2' . Соответственно, количество отведенной теплоты в изобарно-изотермическом процессе, для реализации процесса конденсации, составляет $q_2 = i_2 - i_2'$

Термический к. п. д. паротурбинной установки работающей по циклу Ренкина определится из общего выражения

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(i_1 - i_3) - (i_2 - i_2')}{(i_1 - i_3)} = \frac{(i_1 - i_2) - (i_3 - i_2')}{i_1 - i_3} = \frac{l}{q_1};$$

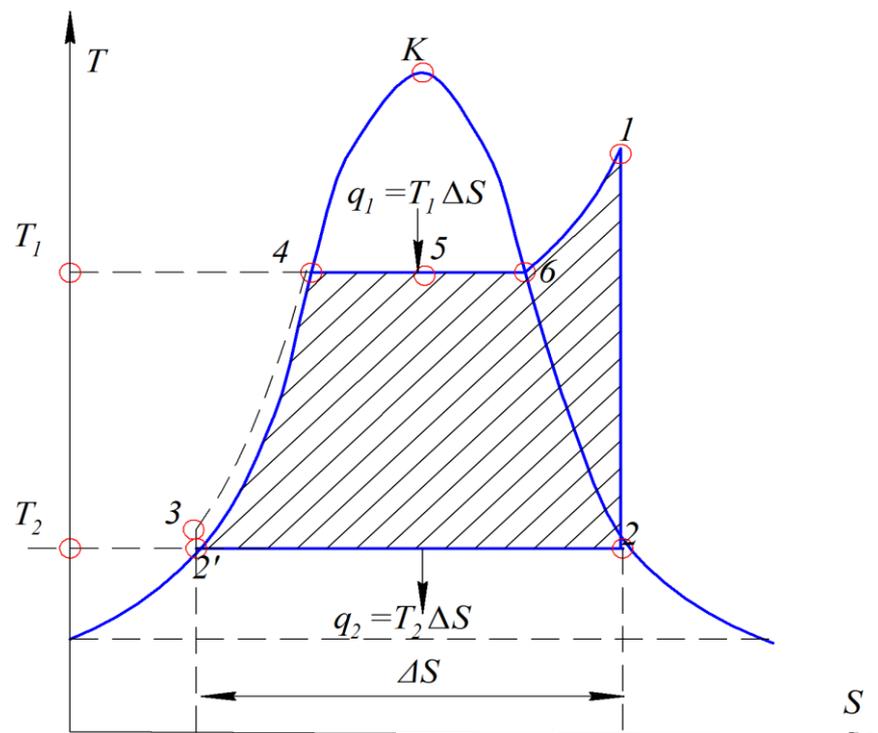


Рисунок 43 – Идеальный цикл паротурбинной установки по схеме Ренкина в $T - S$ координатах

Влияние основных параметров на значение к. п. д. цикла Ренкина

Обще полагающим можно считать, что с повышением исходного давления и начальной температуры пара в котле и пароперегревателе, а также при более глубоком расширении пара до более низких давлений, к.п.д. паротурбинной установки возрастает. Однако, представляет интерес и более глубокий анализ влияние каждого из перечисленных параметров на к. п. д. цикла Ренкина.

Влияние начального давления пара. С увеличением начального давления пара перед турбиной и сохранении конечного давления в конденсаторе термический к. п. д. паротурбинной установки значительно увеличивается, а удельный расход пара на единицу мощности уменьшается.

Более глубокий анализ показывает, что при увеличении начального давления, сам процесс парообразования и перегрева пара происходит при более высоких температурах. При сохранении давления и температурного состояния пара в конденсаторе возрастает средне интегральная температура подвода и отвода теплоты, что и обеспечивает повышение термического к.п.д. цикла. То есть можно констатировать, что первопричиной повышения к п д цикла является повышение температуры процесса подвода теплоты.

Влияние начальной температуры пара. Повышение начальной температуры пара сопровождается повышением средне интегральной температуры процесса подвода теплоты, и при сохранении температуры перед конденсатором, увеличивается адиабатное теплопадение на участке паровой турбины. Эти условия и обеспечивают повышение термического к. п. д. цикла паротурбинных установок при повышении начальной температуры пара. Повышение к. п. д. цикла будет более значительным, если с повышением температуры пара перед турбиной будет возрастать и начальное давление пара.

Пример: при давлении 20 бар и температуре 400°C к.п.д. составит 0,332;
при давлении 20 бар и температуре 550°C к.п.д. составит 0,355;
при давлении 200 бар и температуре 400°C к.п.д. составит 0,405;
при давлении 200 бар и температуре 550°C к.п.д. составит 0,434.

Повышение температуры перегрева пара и высоких давлений ограничивается изменением свойств металлов, при их использовании в условиях повышенных значений давления и высоких температур.

Влияние конечного давления в конденсаторе.

Понижение конечного давления в конденсаторе будет сопровождаться и снижением средне интегральной температуры процесса отвода теплоты и является особенно эффективным мероприятием для повышения термического к. п. д. цикла паротурбинной установки.

Пример: при $P_1=100$ бар, температуре $T_1=600^{\circ}\text{C}$ и конечном давлении $P_2=1$ бар, термический к.п.д. составит 0,308;

при $P_1=100$ бар, температуре $T_1=600^{\circ}\text{C}$ и конечном давлении $P_2=0,3$ бара, термический к.п.д. составит 0,356;

при $P_1=100$ бар, температуре $T_1=600^\circ\text{C}$ и конечном давлении $P_2=0,05$ бара, термический к.п.д. составит 0,417, температура пара 33°C ;

Тем самым, выбор конечного давления в конденсаторе ограничивается температурой охлаждающей воды, температура которой должна быть на 10 17 градусов ниже температуры пара.

Для обеспечения более высоких значений термического к. п. д. паротурбинных установок широко используются циклы ПТУ со вторичным перегревом пара, регенеративные циклы ПТУ, бинарные циклы ПТУ.

2.4.3 Циклы ПТУ с вторичным перегревом пара

Результаты теоретических и экспериментальных исследований подтвердили, что с повышением начального давления пара перед турбиной и снижением конечного давления в конденсаторе однозначно обеспечивает повышение термического к. п. д. цикла Ренкина. Однако одностороннее повышение начального давления и температуры пара перед турбиной при сохранении конечного давления в конденсаторе, приводит к более раннему и существенному снижению степени сухости пара на выходе.

Одним из эффективных методов обеспечить повышение степени сухости пара после паровой турбины является включение в состав цикла участка повторного перегрева сухого насыщенного пара, рисунок 44.

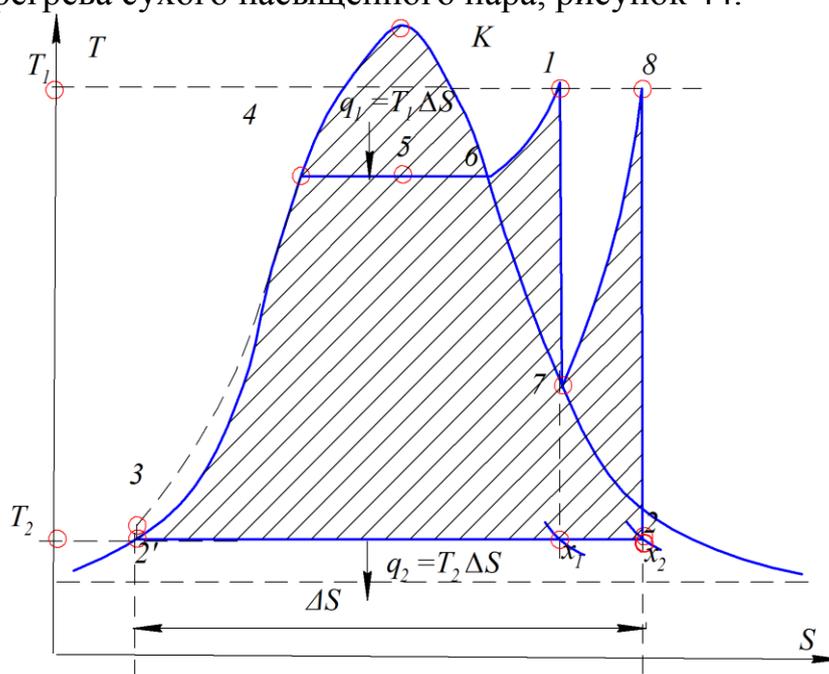


Рисунок 44 – Идеальный цикл паротурбинной установки по схеме Ренкина в $T - S$ координатах с вторичным перегревом паром

После первичного перегрева пара, пар поступает на лопатки турбины и расширяется с понижением температуры и давления до состояния сухого насыщенного пара. После первичного процесса расширения на лопатках первой турбины, сухой насыщенный пар снова направляется в пароперегреватель для вторичного перегрева. Такая процедура позволяет

отодвинуть линию адиабатного расширения вправо, снизить конечное давление, обеспечив тем самым более глубокое расширение и несколько повысить степень сухости пара на выходе с под турбины.

Кроме обеспечения безопасности работы турбины, в данном случае обеспечивается и некоторое повышение термического к. п. д. паротурбинной установки, с вторичным перегревом пара, на 2 ... 3 %.

Термический к.п.д. ПСУ с вторичным перегревом пара определяется с учетом дополнительных процессов по уравнению

$$\eta_t = \frac{(i_1 - i_7) + (i_8 - i_2)}{(i_1 - i_3) + (i_8 - i_7)},$$

где $(i_1 - i_7)$ и $(i_8 - i_2)$ – адиабатное тепло падение в первой и второй ступени;

$(i_1 - i_3)$ – количество теплоты подведенной к котлу и первому пароперегревателю;

$(i_8 - i_7)$ – количество теплоты подведенной ко второму пароперегревателю.

Массовый расход пара на 1 МДж работы составит

$$d = \frac{1000}{(i_1 - i_7) + (i_8 - i_2)} \text{ кг / МДж} .$$