

ПАРОСИЛОВЫЕ ЦИКЛЫ С АДИАБАТИЧЕСКИМ ПАРООБРАЗОВАНИЕМ

С. В. ПОЛОЖИИ

(Представлена проф. докт. техн. наук И. Н. Бутаковым)

Энергетика и ведущая ее отрасль — теплоэнергетика — являются основой электрификации страны. Более 80% электроэнергии вырабатывается в нашей стране на тепловых электростанциях. Это придает исключительное значение техническому прогрессу в теплоэнергетике, требует технических решений, обеспечивающих наиболее рациональное развитие тепловых электростанций: снижение удельных капиталовложений и эксплуатационных расходов, сокращение сроков строительства и освоения новых мощностей, достижение высокой тепловой экономичности и надежности энергоснабжения страны. Современная практика решения этой задачи в рамках существующего цикла по пути внедрения сверхвысоких и закритических давлений пара не может быть признана удачной. Такой вывод подтверждается большими трудностями внедрения сверхвысоких и закритических давлений пара, связанными с необходимостью решения многочисленных и сложных проблем, вызванных высокими требованиями к металлу, воде и пару, с необходимостью применения сложных циклов и тепловых схем, наличием специальных условий и т. п. Трудности освоения подобных установок привели к тому, что в капиталистических странах, особенно в США, ставших на путь внедрения сверхвысоких и закритических параметров пара раньше нашей страны, произошел отход от закритических параметров пара [1—4]. В этих странах параметры перегретого пара снижены для вновь строящихся сверхмощных ТЭС: давление с 350—300 бар до 230 бар, температура с 665—600°C до 530°C. Основная вводимая мощность в США имеет температуру перегрева всего лишь 535—540°C. Установки с температурой в 565—658°C снижены почти в 12 раз. В ФРГ основной вводимой мощностью являются установки с температурой 525°C и ниже — 65%, около 25% установок имеют температуру 535—540°C и только 6% — более 540°C. Внедрение закритических параметров пара в блочных установках огромной мощности за рубежом, по существу, оказалось огромным промышленным экспериментом, на основании которого практически убедились в нецелесообразности повышения тепловой экономичности ТЭС за счет применения закритических давлений и сверхвысоких температур пара. Ожидаемый технико-экономический эффект от закритических параметров пара не был полностью достигнут ни в одной крупной установке. Практическая, достигнутая в эксплуатации экономия топлива в результате применения сверхкритического давления пара с двойным

промежуточным перегревом после 3—4 лет эксплуатации в большинстве случаев составляет лишь 30—50% расчетной величины при исключительно высокой стоимости оборудования таких станций. Еще в более тяжелом состоянии находятся промышленные ТЭС и другие типы паросиловых установок невысокой мощности. Такие установки, в силу особенностей современного паросилового цикла, имеют невысокие параметры пара и связанную с ними низкую тепловую экономичность, находятся на низком техническом уровне развития и не имеют перспектив в повышении экономичности. Длительное существование такого типа паросиловых установок и большое их количество приводят в настоящее время к огромному перерасходу топлива, металла и других материальных ценностей [5]. В 1961 г. такие ТЭС перерасходовали около 3 млн. т условного топлива. Ежегодный относительный ущерб народному хозяйству от эксплуатации всех мелких электростанций, по сравнению с эксплуатационными расходами крупных станций, составляет не менее 1,5—2 млрд. рублей.

Такое состояние и развитие современной теплоэнергетики обусловлено существующим паросиловым циклом, применением изобарического парообразования, физическими и термодинамическими свойствами пара и возникающими противоречиями между термодинамической эффективностью цикла η_t и степенью использования рабочего тела в паровой турбине η_{oi} , а также технико-экономическими противоречиями в достижении целесообразного уровня использования энергии топлива. При этом каждому уровню начальных параметров современного паросилового цикла присущи как положительные, так и отрицательные свойства и невозможность сочетания в одной установке положительных сторон низких и сверхвысоких давлений пара.

Положительным свойством паросиловых установок невысокого давления пара является высокая эффективность работы паровых турбин малой мощности, вследствие небольшого давления, значительных объемных расходов пара, малой влажности в конце расширения. Этим же объясняется тонкостенное оформление энергетического оборудования, низкие требования к качеству металла, воды и пара, сравнительная однотипность и дешевизна металла во всех элементах паросилового установки, несложность тепловых схем, энергетического оборудования и т. п. Но, с другой стороны, низкие давления пара приводят к малой термодинамической эффективности цикла η_t , к невысоким значениям результирующей эффективности t установки $\eta_t \cdot \eta_{oi}$, к большим удельным расходам топлива, пара и воды, обуславливают по причине низкой работоспособности k_p пара малую агрегатную мощность паровых турбин и связанную с ней деконцентрацию производства электроэнергии на станциях небольшой мощности. Этим же объясняется высокая себестоимость производства электроэнергии, большие начальные и текущие капиталовложения, низкий технический уровень развития таких паросиловых установок. Применение сверхвысоких и закритических давлений пара, наоборот, позволяет иметь высокую термодинамическую эффективность паросилового цикла η_t , большую работоспособность k_p пара, создавать турбины огромной мощности, производить концентрацию и централизацию производства электрической энергии и в установках огромной мощности получать высокую результирующую эффективность $\eta_t \cdot \eta_{oi}$. Но, с другой стороны, резко ухудшаются физические и термодинамические свойства пара при сверхвысоких и закритических давлениях, ухудшаются условия работы пара в паровой турбине вплоть до невозможности работы паровых турбин при сверхвысоком давлении ввиду чрезмерной влажности пара и больших тепловых потерь в про-

точной части. Только применением промежуточных перегревов пара и турбин огромной мощности удается добиться надежной и эффективной работы турбин сверхвысокого давления. Резко возрастают требования к качеству металла. Приходится конструировать энергетическое оборудование из высоколегированных сталей с большой толщиной стенок и расходом металла. Чрезвычайно усложняется тепловая схема и снижается надежность работы станции. Требуется значительное время для освоения и внедрения такого оборудования, организация больших научно-исследовательских работ и т. п.

Рациональная паросиловая установка и циклы таких установок не должны иметь основных недостатков современных паросиловых установок как низких, так и сверхвысоких давлений пара, сочетать в себе преимущества таких установок, преодолеть трудности развития мощных

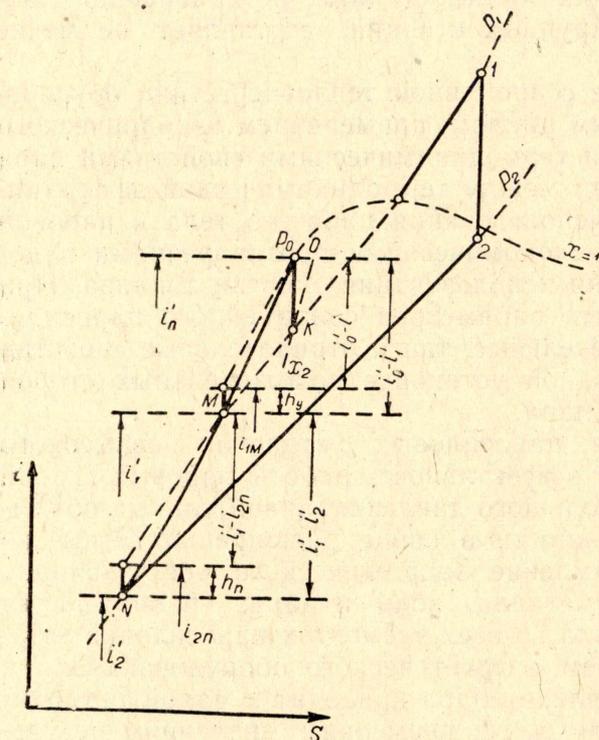


Рис. 1. Теоретический цикл паросиловой установки с адиабатическим парообразованием в $i-s$ диаграмме с учетом работы циркуляционного и питательного насоса водогрейного котла. h_y — работа циркуляционного насоса на 1 кг воды, в цикле участвует G кг воды. h_n — работа питательного насоса на кг пара в цикле.

блочных ГРЭС сверхвысоких давлений, а также застой в развитии паросиловых установок небольшой мощности. Такая паросиловая установка должна сохранить благоприятные свойства пара низкого и сверхвысокого давления, обеспечить высокую тепловую экономичность цикла и эффективность работы пара в турбине как большой, так и малой мощности. Решение этой задачи возможно при применении в паросиловых установках адиабатического парообразования, предложенного и разработанного в Томском политехническом институте [6] (Удостоверение о регистрации и приоритете Комитета по делам изобретений и открытий СССР № 19405 за 1960 г. и № 29529 за 1962 г.).

Паросиловая установка с адиабатическим парообразованием состоит из водогрейного котла сверхвысокого давления, испарителя-генератора, конструк-

тивно выполненного в виде однодисковой турбины, в испарительных элементах которой производится пар и кинетическая энергия потока, пароперегревателя и паровой турбины низкого давления, питательного и циркуляционного насоса водогрейного котла и регенеративных подогревателей питательной воды [6]. Термодинамический цикл паросиловых установок с адиабатическим парообразованием в $i-s$ диаграмме приведен на рис. 1.

Расчет циклов с адиабатическим парообразованием производится по формулам табл. 1. Расчет тепловой схемы станции и определение тепловых показателей, расход пара, топлива и т. п. производится так же,

Расчетные формулы циклов ПСУ с адиабатическим парообразованием

Наименование величин	Теоретическое	С учетом потерь
Количество насыщенного пара на кг воды	$x_s = \frac{(S'_0 - S'_1) \cdot T_{н1}}{r_1}$	$x = x_s + \frac{(1 - \eta_{0i}^{нг}) \cdot l_s}{r_1}$
Количество высокосжатой воды на кг пара	$G_s = \frac{1}{x_s} = \frac{r_1}{(S'_0 - S'_1) \cdot T_{н1}}$	$G = \frac{1}{x}$
Работа кг воды в испарителе-генераторе ИГ	$l_s = i'_0 - i'_1 - (S'_0 - S'_1) \cdot T_{н1}$	$l = l_s \cdot \eta_{0i}^{нг}$
Работа ИГ на кг пара в цикле	$L_s = G_s \cdot l_s$	$L^{нг} = G \cdot l$
Работа пара в цикле	$l_{сп} = i_1 - i_2$	$l_{п} = l_{сп} \cdot \eta_{0i}^{пт}$
Полная работа цикла	$L_0 = L_s + l_{сп}$	$L = L^{нг} + l_{п}$
Расход тепла на нагрев кг конденсата паровой турбины до $t_{н1}$	$Q_1 = i'_1 - i'_2$	$Q_1 = \frac{(i'_1 - i'_2)}{\eta_{ку}}$
Расход тепла на нагрев высокосжатой воды до $t_{н0}$	$Q_2 = G_s (i'_0 - i'_1)$	$Q'_2 = \frac{G \cdot (i'_0 - i'_1)}{\eta_{ку}}$
Полный расход тепла на нагрев воды	$Q_B = Q_1 + Q_2$	$Q'_B = Q_1 + Q'_2$
Тепло перегрева кг пара	$Q_{п} = i_1 - i'_1$	$Q_{п} = \frac{(i_1 - i'_1)}{\eta_{ку}}$
Суммарный расход тепла в цикле	$Q = Q_B + Q_{п}$	$Q' = Q'_B + Q_{п}$
Термический к. п. д. „брутто“	$\eta_t^{Бр} = \frac{L_0}{Q}$	$\eta_t^{ Бр} = \frac{L}{Q'}$
Термический к. п. д. „нетто“ с учетом работы насосов котла	$\eta_t^H = \frac{L_0 - h_H}{Q - h_H}$	$\eta_t'^H = \frac{L - h_{нд}}{Q' - h_H}$
Удельный расход пара установкой	$d_0 = \frac{1}{L_0}$	$d_e = \frac{1}{L \cdot \eta_M \cdot \eta_{ген}}$
Удельный расход тепла	$q_0 = d_0 \cdot Q$	$q_e = d_e \cdot Q'$

Наименование величин	Теоретическое	С учетом потерь
То же при регенеративном подогреве питательной воды	$d_0^p = \frac{1}{L_s + l_{сп} \left[1 - \Sigma a \frac{i_{от} - i_2}{i_1 - i_2} \right]}$	$d_e^p = \frac{1}{\left\{ L_{иг} + l_{п} \left[1 + \Sigma a - \frac{i_{п} - i_2}{i_1 - i_2} \right] \right\} \eta_m \cdot \eta_{ген}}$
Доля выработки энергии ИГ	$\beta = \frac{L_s}{L_0}$	$\beta' = \frac{L_{иг}}{L_0}$
Работа циркуляционного насоса на кг пара	$h_y = \frac{i_{1н} - i_1'}{x_s}$	$h'_y = \frac{i_{1н} - i_1'}{x \cdot \eta_n}$
Работа питательного насоса	$h_{п} = i_{2н} - i_2'$	$h'_{п} = \frac{h_{п}}{\eta_n}$
Суммарный расход энергии на насосы	$h_n = h_y + h_{п}$	$h'_n = h'_y + h'_{п}$
Удельный расход пара установкой	$d_0 = \frac{1}{L_0}$	$d_e = \frac{1}{L \cdot \eta_m \cdot \eta_{ген}}$
Удельный расход тепла	$q_0 = d_0 \cdot Q$	$q_e = d_e \cdot Q'$
Удельный расход пара при регенеративном подогреве питательной воды	$d_0^p = \frac{1}{l_s + l_{сп} \cdot \left[1 - \Sigma a \cdot \frac{i_{от} - i_2}{i_1 - i_2} \right]}$	$d_e^p = \frac{1}{\left\{ L_{иг} + l_{п} \cdot \left[1 - \Sigma a \cdot \frac{i_{от} - i_2}{i_1 - i_2} \right] \right\} \eta_m \cdot \eta_{ген}}$
Удельный расход тепла при регенеративном подогреве питательной воды	$q_0^p = d_0^p \cdot Q^p$	$q_e^p = \frac{d_e^p \cdot Q^p}{\eta_{ку} \cdot \eta_{пот}}$
Доля выработки энергии в турбине испарителя-генератора	$\beta = \frac{L_s}{L_0}$	$\beta' = \frac{L_{иг}}{L}$
Работа циркуляционного насоса на кг пара в цикле	$h_y = \frac{i_{1н} - i_1'}{x_s}$	$h'_y = \frac{i_{1н} - i_1'}{x \cdot \eta_n}$
Работа питательного насоса	$h_{п} = i_{2н} - i_2'$	$h'_{п} = \frac{h_{п}}{\eta_n}$
Суммарный расход энергии на насосы	$h_n = h_y + h_{п}$	$h'_n = h'_y + h'_{п}$

как и для обычных паросиловых установок. На рис. 2 приведены тепловые и энергетические характеристики теоретического цикла с адиабатическим парообразованием в зависимости от давления паровой фазы цикла. Термический к.п.д. цикла при неизменном давлении нагретой воды, конечном давлении и температуре перегретого пара мало зависит от начального давления пара (рис. 2 — отношение данных кривой 3 к 6). Например, при давлении пара в испарителе-генераторе в 40 бар термический к.п.д. такого цикла равен 46%, а при давлении пара в ИГ в 160 бар при той же температуре перегрева термический к.п.д. составляет 46,5%. Высокое значение термического к.п.д. циклов с адиабатическим парообразованием при низком давлении пара является большим преимуществом таких паросиловых установок.

В действительных циклах с адиабатическим парообразованием полезная работа, количество образующегося пара, термический к.п.д. и другие характеристики зависят от внутреннего относительного к.п.д. турбины испарителя-генератора. Наличие внутренних потерь в турбине испарителя-генератора снижает полезную работу и увеличивает количество пара, полученного с кг жидкости. Затрата энергии на циркуляционный насос водогрейного котла также зависит от относительного внутреннего к.п.д. турбины ИГ (табл. 1). С повышением давления паровой фазы цикла общий расход энергии на насосы водогрейного котла несколько падает. На рис. 3 приведено значение к.п.д. «нетто» паросиловых установок с адиабатическим парообразованием в зависимости от к.п.д. турбины испарителей-генераторов. Реальное значение к.п.д. турбин испарителей-генераторов по теоретическим и проектным разработкам составляет 0,64—0,79.

Иная организация технологического процесса производства пара и энергии в паросиловых установках с адиабатическим парообразованием: наличие двух давлений рабочего тела, получение насыщенного пара и работы в испарителе-генераторе, отсутствие парообразования в обогреваемых поверхностях нагрева, сверхвысокое давление воды при

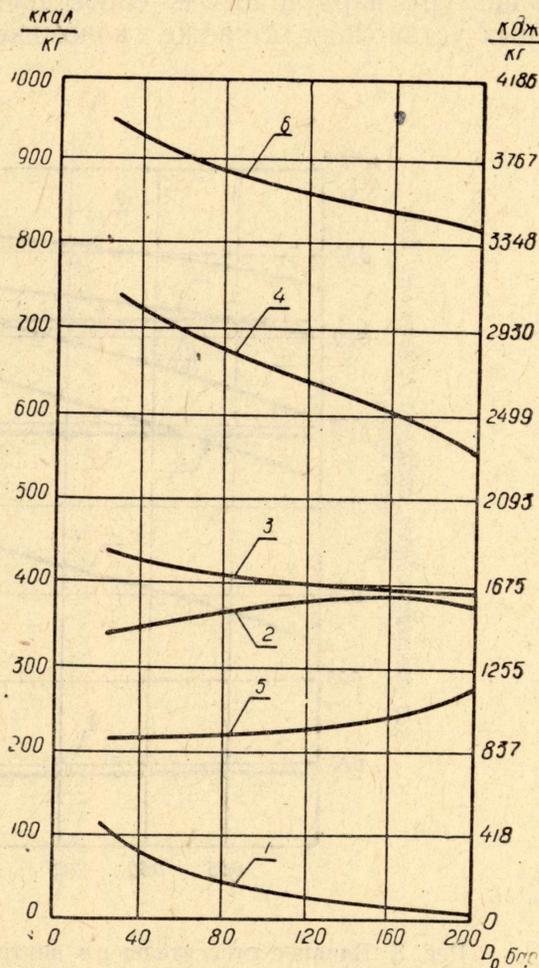


Рис. 2. Тепло и работа цикла с адиабатическим парообразованием в зависимости от давления в испарителе-генераторе:

1 — работа в испарителе - генераторе, 2 — работа пара в цикле, 3 — полная работа цикла, 4 — тепло нагрева жидкости, 5 — тепло перегрева пара, 6 — полный подвод тепла в цикле.

Начальное давление воды $P_0=220$ бар, давление пара в конденсаторе $P_2=0,039$ бар, температура перегрева пара $t_1=600^\circ\text{C}$.

низкой температуре, низкое давление пара при высокой температуре, высокое значение термического к.п.д. при низком давлении пара — позволяет сочетать положительные свойства современных паросиловых установок низкого и сверхвысокого давления в одной установке, устранить недостатки установок как низких, так и сверхвысоких давлений пара. Кроме того, появляется возможность применять очень высокую температуру пара в цикле, сопоставимую с температурой в газотурбинных установках, а также экономически целесообразно использовать

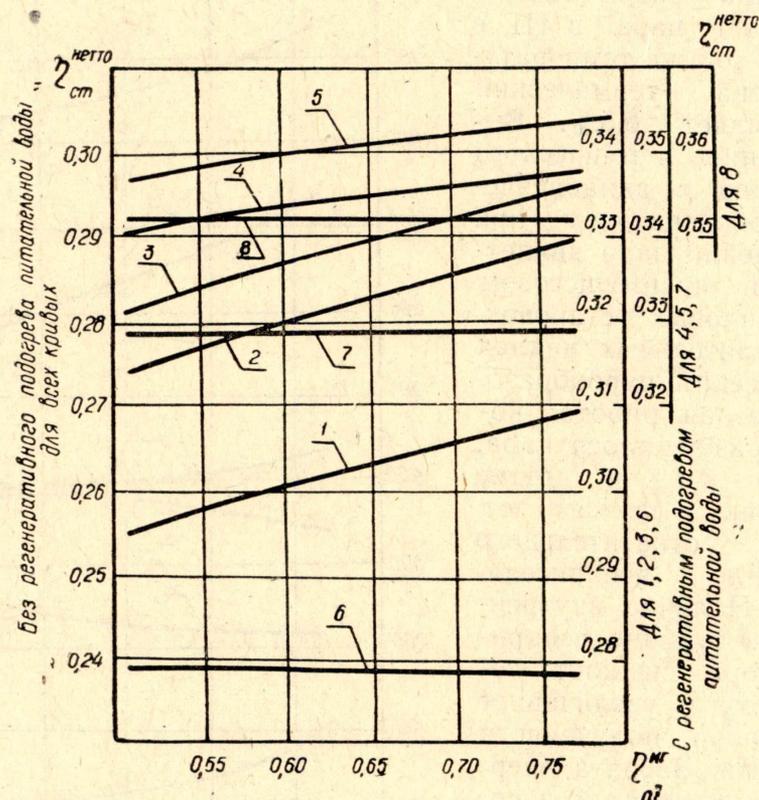


Рис. 3. Влияние относительного внутреннего к.п.д. турбины испарителя-генератора на к.п.д. станции «нетто» с учетом расхода энергии на циркуляционный и питательный насосы водогрейного котла и сравнение их с к.п.д. современных паросиловых установок.

1—5 — установки с адиабатическим парообразованием ($P_0 = 220 \text{ бар}$, $P_2 = 0,039 \text{ бар}$).

1 — давление пара 35 бар, температура — 440°C, 2 — давление пара 35 бар, температура — 550°C, 3 — давление пара 35 бар, температура 600°C, 4 — давление пара 80 бар, температура — 550°C, 5 — давление пара 80 бар, температура — 600°C, 6—8 — современные установки.

6 — давление пара 35 бар, температура — 440°C, 7 — давление пара 90 бар, температура — 500°C, 8 — давление пара 180 бар, температура — 550°C.

Принято: относительный внутренний к.п.д. паровых турбин — 0,85, к.п.д. механический и генератора — 0,96, к.п.д. котла — 0,85.

глубокий вакуум в конденсаторах паровых турбин и строить водогрейные котлы с низкой температурой уходящих газов и на этой основе еще выше поднимать тепловую экономичность паросиловых установок с адиабатическим парообразованием.

Применение адиабатического парообразования является также прогрессивным для атомных и парогазовых энергетических установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Ф. Роддатис. Параметры пара на блочных и крупных установках зарубежных тепловых электростанций. Теплоэнергетика, № 1, 1962.
 2. К. Шредер. Насущные проблемы строительства электростанций. Теплоэнергетика, № 3, 1962.
 3. Л. С. Попырин. Практика выбора начальных параметров пара за рубежом. Теплоэнергетика, № 2, 1963.
 4. С. Л. Зильберштейн. Зарубежные турбоагрегаты крупной мощности (500 мвт и выше) и тенденции паротурбостроения за рубежом. Энергомашиностроение, № 9, 1964.
 5. В. Н. Юрнев. Повышение экономичности промышленных электростанций. Теплоэнергетика, № 4, 1958. Промышленные электростанции. ГЭИ, 1963.
 6. С. В. Положий. Паросиловые установки с адиабатическим парообразованием. Изв. вузов СССР — Энергетика, № 1, 1965.
-