

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

6.1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ЦИКЛА ТРАДИЦИОННЫХ ПАРОТУРБИННЫХ ТЭС

6.1.4 Опыт использования суперсверхкритических параметров пара

Ильин Е.Т., ЗАО «Комплексные энергетические системы»; Гишин С.Г. МЭИ(ТУ)

В настоящее время в России и в других странах мира широко используются энергоблоки со сверхкритическими параметрами с начальным давлением $p_0 = 23,57$ МПа и температурой острого пара $t_0 = 540$ °С, с однократным промежуточным перегревом с параметрами

$p_{\text{пр}} = 3,6$ МПа и $t_{\text{пр}} = 540$ °С. Эти параметры позволяют достигнуть КПД энергоблока 41 %. С 1966 г. и до середины 70-х годов на Каширской ГРЭС действовал экспериментальный энергоблок СКР-100-300 с суперсверхкритическими параметрами $p_0 = 29,4$ МПа, $t_0 = 650$ °С. Эти исследования позволили установить возможность создания промышленного оборудования на суперсверхкритические параметры. Первая промышленная станция Эддистоун-1 на суперсверхкритические параметры: $p_0 = 35,9$ МПа, $t_0 = 648$ °С, с двукратным промежуточным перегревом $t_{\text{пр}} = 565/565$ °С, была построена в США в 1954 г.

В настоящее время в мире насчитывается несколько десятков энергоблоков на суперсверхкритические параметры, построенных в основном в США, Германии, Дании, Японии, характеристики некоторых из них представлены в табл. 6.1.

Анализ приведенных в табл. 6.1 характеристик станций с суперсверхкритическими параметрами пара показывает, что ввод первых экспериментальных энергоблоков с параметрами с $p_0 = 35$ МПа и $t_0 = 650$ °С, с двукратным промпрегревом выявил сложность реализации таких проектов. На последующих этапах, особенно это просматривается на примере станций, построенных в 80-х годах прошлого века, видно, что начальное давление и температура поднимались незначительно, $p_0 = 25...28$ МПа, $t_0 = 560...580$ °С, а вот параметры промежуточного перегрева выросли до $t_{\text{пр}} = 580...600$ °С. Такое решение является оправданным, так как понижение параметров острого пара позволило применять менее дорогостоящие материалы при одновременном сохранении надежности и маневренности оборудования. Повышение температуры промежуточного перегрева является не столь критичным, так как металл в этом случае работает при значительно меньшем давлении. Вместе с тем опыт эксплуатации оборудования показал, что применение двукратного промежуточного перегрева при давлениях пара до 26 МПа является экономически неоправданным, так как прирост общего КПД около 1 % не компенсирует усложнение тепловой схемы энергоблока, конструкции турбины и котла. Поэтому, начиная с 80-х годов, в основном строились энергоблоки с одним промежуточным перегревом. Только переход на давление близкое к $p_0 = 30$ МПа снова сделал целесообразным использование второго промежуточного перегревателя пара.

Одновременно с ростом параметров шло совершен-

ствование тепловых схем, повышалась температура питательной воды, которая достигла $t_{\text{п.в}} = 300$ °С, внедрялись ПНД смешивающего типа, совершенствовались регенеративные ПВД и схемы их включения (схемы Виолена и Рикара—Некольного).

В то же время существенного повышения экономичности удалось достигнуть за счет понижения давления в конденсаторе. Особо следует отметить тот факт, что понижение давления в конденсаторе достигалось не только за счет увеличения площади конденсатора и совершенствования процессов теплообмена в нем, но и за счет поддержания глубокого вакуума в процессе эксплуатации, путем предотвращения отложений в трубной системе конденсаторов и уменьшения присосов воздуха. Такой результат обеспечивался путем внедрения непрерывной шариковой очистки и использования современных герметизирующих материалов. В результате удалось снизить температурные напоры в конденсаторах с $\Delta t = 6...8$ °С до $\Delta t = 3...4$ °С. Такое снижение температурного напора позволило понизить давление в конденсаторе приблизительно на 1 кПа, в результате чего мощность турбины выросла в среднем на 1...1,5 % для оборудования, предназначенного для работы с паром закритических параметров, и на 2,5...4 % для энергоблоков атомных станций.

Эффект от повышения параметров пара приведен в десятках работ. Из табл. 6.1 видно, что достижение параметров пара $p_0 = 29$ МПа и $t = 580/580/600$ °С позволило получить КПД станции 47 %. Повышение при этом расчетного вакуума до $p_k = 2,35$ кПа увеличило КПД станции до 49 %.

В связи с уменьшением запасов газа использование пара с суперсверхкритическими параметрами на угольных станциях представляется весьма перспективным. Вместе с тем следует отметить, что повышение параметров пара до еще более высоких значений не столь перспективно, как выход на $p_0 = 30$ МПа и $t_0 = 600$ °С. Повышение параметров пара до $p_0 = 40$ МПа и $t_0 = 700...750$ °С позволяет повысить КПД станции всего до 51...52 %. При этом стоимость материалов резко возрастает. Таким образом, повышение параметров пара для обычного паротурбинного оборудования близко к достижению своего экономического предела. Только появление материалов абсолютно нового типа, с высокими прочностными характеристиками позволит и далее повышать параметры.

Существенная экономия топлива в настоящее время может быть достигнута:

- за счет комбинированной (совместной) выработки электрической и тепловой энергии;
- путем строительства ПГУ;
- за счет модернизации существующих установок.

Таблица 6.1. Основные характеристики действующих энергоблоков с суперсверхкритическими параметрами пара

Страна, электростанция	Год ввода в эксплуатацию	Топливо	Температура свежего пара и пара промежуточных перегревов $t_0/t_{m1}/t_{m2}$, °С	Начальное давление, МПа	Температура питательной воды, °С	Электрическая мощность, МВт	Давление в конденсаторе, кПа	КПД энергоблока нетто, %
США, Эддистоун-1	1954	Уголь	648/565/565	35,9	—	325	—	—
Россия, Каширская ГРЭС	1966	Уголь	650/565	29,4	—	100	—	—
Япония, Вакамацу	1968	Уголь	593/593/593	31,0	—	50	—	—
Дания, Струдstrup 3 и 4	1984—1985	Уголь	540/540	25,0	261	350	2,1	41...42
Япония, Кавагое-1	1989	Сжиженный газ	566/566/566	30,5	310	700	4	41,9
Дания, Фунен 7	1991	Уголь	540/540	25,0	280	350	2,7	43,5
Германия, Шгаудингер 5	1992	Уголь	545/562	26,2	270	550	3,8	43
Дания, Эсбьерг 3	1992	Уголь	562/560	25,0	275	350	2,3	45,3
Германия, Любек	1995	Уголь	580/560	27,5	—	400	—	45,7
Дания, Скербек 1 и 2 (Конвой)	1997	Газ	582/580/580	29,5	298	395	2,3	47
Дания, Альборг	1997	Уголь	580/580/600	28,5	300	400	2,35	49
Япония, Матсура 2	1998	Уголь	593/593/593	25,6	—	1000	—	45
Дания, Норджилланд (Конвой)	1998	Уголь	582/580/580	29,5	—	385	—	49
Германия, Гесслер	1998	Уголь	580/600	27,5	301	740	3,6	45,4
Германия, Бексбах 2	—	Уголь	575/595/—	25,0	290	750	—	46,3
Германия, Боксберг	2000	Лигнит	545/581	26,6	—	907	—	42,7