

11. Диткин В. А., Прудников А. П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965. – 446 с.

12. Карслоу Х., Егер Д. Операционные методы в прикладной математике. – М.: ГИИЛ, 1948. – 291 с.

13. Стальной слиток / Ю. А. Самойлович, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова и др. – Мн.: Белорусская наука, 2000. – Т. 1. – 584 с.

14. Стальной слиток / Ю. А. Самойлович, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова и др. – Мн.: Белорусская наука, 2000. – Т. 2. – 640 с.

Представлена кафедрой
прикладной технологии

Поступила 15.10.2001

УДК 621.165

КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭРОЗИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ ЦНД ТУРБИНЫ Т-250/300-240

**Докт. техн. наук БАЛАБАНОВИЧ В. К.,
инженеры СКОРОБОГАТЫЙ Н. Н., ПАНТЕЛЕЙ Н. В.**

*Белорусская государственная политехническая академия,
Минская ТЭЦ-3*

Снижение температуры свежего и вторично перегретого пара на турбоустановках СКД с расчетных 560/565 до 540/540 °С в начале 80-х гг. и директивный переход на пониженный температурный график сетевой воды в 90-е гг. существенно повлияли на эрозионный режим работы ступеней ЦНД теплофикационных турбин. Ситуация усугубилась, кроме того, недостатками заводских систем влагоудаления из проточной части низкого давления, что ощутимо снизило эрозионную безопасность работы облопачивания ступеней низкого давления турбин.

В значительных масштабах это коснулось турбины Т-250/300-240, в частности, эрозионный износ нового облопачивания ее последней 31-й (40-й) ступени за месяц работы одной из них на теплофикационных режимах составил тот же уровень, что за несколько предыдущих лет до введения приведенных выше изменений. Появилась реальная опасность поломок рабочих лопаток последней ступени от эрозионного повреждения. Все это потребовало проведения комплексного исследования эрозионно опасных режимов ступеней ЦНД турбины и разработки мер по их защите. В основу расчетных исследований режимов работы ступеней ее ЦНД положен метод детального расчета характеристик потока «снизу вверх» [1]. Удобство нового метода заключается в том, что для известных величин расходов пара в ЦНД и давлений отработанного пара надежно определяются все основные характеристики потока в проточной части турбины, по которым рассчитывалась тепловая схема турбоустановки.

Целью расчетов было получение данных по величинам процессной влажности пара по ступеням ЦНД, а также в его паровпуске в широком диапазоне режимов работы турбоустановки, включая и режимы с частично открытыми поворотными диафрагмами ЦНД. Расчет позволил учесть влияние всех основных характеристик потока в проточной части турбины на всех штатных режимах ее работы, т. е. построить политропу процесса расширения и на ней получить значения степени сухости пара в характерных точках. Для иллюстрации на рис. 1 приведена зависимость степени сухости пара в нижнем отопительном отборе турбины Т-250/300-240 от давления на входе в ЦНД и выведена аналитическая зависимость для нее в функции давления пара для режимов с номинальным расходом пара на турбину

$$x_0 = 0,5387 (p_n)^4 - 0,2826 (p_n)^3 - 0,4052 (p_n)^2 + 0,3683 p_n + 0,904,$$

где p_n – давление в нижнем отопительном отборе, бар;

x_0 – степень сухости пара здесь же.

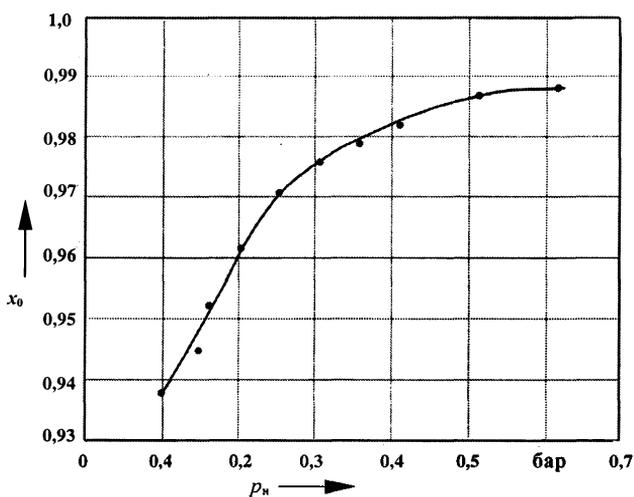


Рис. 1

Для определения источников поступления влаги в ступени цилиндра низкого давления выполнен анализ режимов их работы путем детального расчета тепловой схемы турбины Т-250/300-240 для двух групп режимов: первая – номинальный расход свежего пара на турбину 250 кг/с; тепловая нагрузка $Q_T = 389 \dots 399$ МВт в диапазоне температур наружного воздуха $t_{н.в} = -26 \dots -5$ °С с уменьшением Q_T при более высоких $t_{н.в}$ путем открытия поворотных диафрагм ЦНД и переходом на одноступенчатый подогрев сетевой воды; вторая группа режимов отличается расходом пара на турбину 125 кг/с. Расчет для всех режимов выполнялся с учетом изменения КПД проточной части, в том числе и ЦНД. Результаты расчетов влажнопарового состояния ЦНД для основных режимов работы турбины показали, что на большинстве режимов процессная влага присутствует не только в паровпуске, но и во всем ЦНД.

Дренаж паровпуска ЦНД заведен в патрубок отбора на ПНД-1, и при отключении последнего отсепарированная влага из паровпуска попадает

через камеру отбора в проточную часть низкого давления. Для предотвращения заброса воды из паровпуска ЦНД через камеру отбора пара на ПНД-1 целесообразно установить заглушку на линии отборного пара. Это исключит влияние повышенного давления в ПНД-1, используемого в качестве охладителя пара уплотнений при неплотной задвижке, а также уменьшит возможную потерю теплоты с паром в холодном источнике. Необходимо также организовать отсос пара из паровпуска непосредственно в конденсатор.

До выполнения отсоса пара из паровпуска и камеры отбора на ПНД-1, а также камеры влагоулавливания целесообразно ввести ограничения режимного характера с целью исключения влажнопарового состояния рабочего пара на входе в 29-ю (38-ю) ступень. Для этого нами рассчитаны режимы, гарантирующие сухой насыщенный пар за счет осушки влажного пара путем его дросселирования в поворотных диафрагмах ЦНД (табл. 1). Ограничения включают поддержание минимальной величины расхода пара в ЦНД (нижняя строка таблицы) для фиксированных величин давления в нижнем отопительном отборе (верхняя строка таблицы).

Таблица 1

Режимные ограничения расхода пара в ЦНД турбин Т-250/300-240, гарантирующие осушку пара на входе в 29-ю (38-ю) ступень для фиксированных величин давления в нижнем отопительном отборе

0,3139 (бар)	0,3335	0,343	0,3679	0,3875	0,412
5,56 (кг/с)	11,1	16,7	22,2	27,8	33,3

Эти ограничения описываются выражением

$$D_k = 2052,6(p_r)^3 - 3041,6(p_r)^2 + 1676,4p_r - 284,64,$$

где p_r – давление в нижнем отопительном отборе, бар;

D_k – расход пара в ЦНД, кг/с.

Анализ табл. 1 показывает, что для предотвращения эрозионного повреждения лопаточных аппаратов важно поддерживать минимальные пропуски пара в ЦНД. Такой комплексный подход исключает использование турбоагрегата в покрытии пиковой части графика электрических нагрузок. Попутно повысится не только безопасность работы ЦНД, но и экономичность работы турбоустановки в целом.

Кроме процессной влаги, попадающей в ступени ЦНД с рабочим паром, значительное количество влаги в последнюю 31-ю (40-ю) ступень турбины поступает со стороны выхлопного патрубка с паром корневого вихря. Исключить этот поток можно на основе применения нашей схемы охлаждения (СО) выхлопа турбины.

С середины 80-х гг. нами разрабатывались СО ЧНД теплофикационных турбин. На турбине АП-12-35 (ст. № 2) Минской ТЭЦ-2 была подтверждена высокая эффективность применения для охлаждения ЧНД «холодного» пара [1]. Вентиляционный пропуск в ЧНД турбины был снижен втрое (с 3,33 до 1,11 кг/с). Схема оказалась эффективной и при работе турбины на ухудшенном вакууме. Особенностью такой СО является приготовление охлаждающего пара из перегретого конденсата путем его вскипания в рас-

ширителе-сепараторе (РС), что позволило существенно упростить СО. Такая постановка вопроса позволила, кроме того, заложить в СО и другой прогрессивный принцип: использование дросселирования для осушки пара от неиспарившейся влаги, которая удаляется из охлаждающего пара по ходу его движения к месту охлаждения – последней ступени турбины. Ключительный этап приготовления охлаждающего пара перенесен непосредственно к месту охлаждения. Эту функцию выполняет щель подачи пара из коллектора к последней ступени [1]. Ширина щели (≈ 20 мм) выбрана из условия скорости струи пара (≈ 100 м/с), что гарантирует наддув корневого вихря паром заданного качества и блокировку обратных потоков из патрубка в последнюю ступень – шадящее охлаждение. Достаточно мощная струя – тепловой экран испаряет поступающие из выхлопа капли влаги, гарантируя не только защиту выходных кромок (за 7 лет никаких следов эрозии выходных кромок), но и поддержание на всех режимах, включая и пусковые, туманообразной среды с температурой насыщения.

На турбине Т-110/120-130 (ст. № 2) Минской ТЭЦ-4 нами была опробована возможность переноса коллектора охлаждающего пара в паровое пространство конденсатора. Такое решение не оправдало себя, однако оказалось полезным в плане организации подвода охлаждающего пара. Место подвода (коллектор) максимально должно быть приближено к месту охлаждения – последней ступени турбины.

Расчетные исследования показали, что существует возможность дальнейшего совершенствования СО за счет пропуска охлаждающего потока пара противоточно через ступени ЦНД со сбросом его в регенеративный отбор (рис. 2). С помощью такого охлаждения попутно решается вопрос дренирования процессной влаги из ЦНД. Эта влага, направляясь и смешиваясь в потоках прямоточно поступающего пара через нормально закрытую поворотную диафрагму (ПД) и противоточно поступающего со стороны выхлопа, автоматически понижает потенциал смеси, что обеспечивает работу СО практически по замкнутому циклу. Налицо самоохлаждение

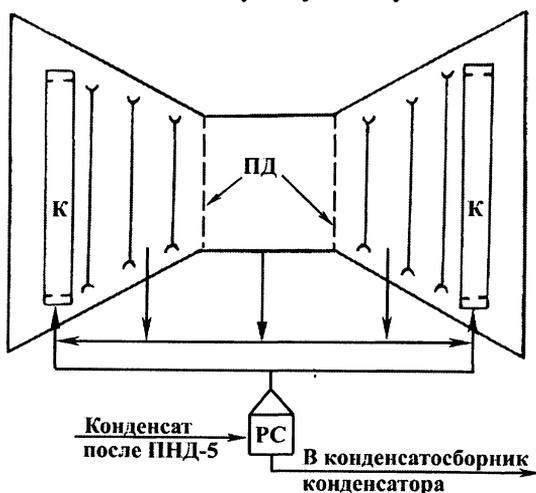


Рис. 2. Схема комбинированного охлаждения и защиты последних ступеней турбины Т-250/300-240: РС – расширитель-сепаратор; ПД – поворотная диафрагма; К – коллектор подачи охлаждающего пара

ЦНД. Поток после смешения подается в паровое пространство РС перед жалюзийным сепаратором для исключения проскоков крупнодисперсной влаги при ее избытке. Последнее важно на пусковых режимах и режимах парового расхолаживания турбины.

Такое охлаждение обеспечит равномерный прогрев основных элементов выхлопного патрубка, предотвращая тем самым его коробление. Применение нашей схемы комбинированного охлаждения и защиты последних ступеней турбины Т-250/300-240 снимает все ограничения по маневренности, так как открытие поворотных диафрагм не потребует каких-либо переключений в СО. При работе на конденсационных режимах СО отключается для повышения экономичности работы ТПТУ.

ВЫВОДЫ

1. Снижение температуры вторично перегретого пара с расчетной 565 до 540 °С, а также температуры обратной сетевой воды является основной причиной повышения влажности пара в проточной части низкого давления турбины Т-250/300-240, в частности в паровпуске влажность может достигать 6 %, а за 31-й (40-й) ступенью – 7...8 %.

2. Существующая заводская система влагоудаления ЦНД неэффективна и нуждается в совершенствовании. До устранения ее недостатков, связанных с вскрытием ЦНД, необходимо ввести режимные ограничения по давлению в нижнем отопительном отборе на уровне 0,32 бара и максимально исключить работу турбины с большими пропусками пара в конденсатор.

3. Комплексное решение вопроса обеспечения эрозионной безопасности работы ступеней ЦНД турбины Т-250/300-240 может быть реализовано на основе предложенной комбинированной схемы защиты и охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабанович В. К. Совершенствование схем и режимов работы теплофикационных паротурбинных установок. – Мн.: Полибиг, 2000. – 188 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 26.09.2001