

УДК 621.165

**ПРОГРЕВ ПАРПОДВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ТУРБОАГРЕГАТА ПРИ
ПУСКЕ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ СОСТОЯНИЙ
HEATING THE STEAM SUPPLY SYSTEM OF THE TURBINE AT
STARTING FROM VARIOUS THERMAL STATES**

В.С. Баянкова, А.Д. Белозёрова, Е.А. Савенко
Научный руководитель – С.А. Качан, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
kachan@bntu.by

V. Bayankova, A. Belozeroва, E. Savenko
Supervisor – S. Kachan, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** приведены результаты расчетного исследования прогрева пароподводящей системы турбоагрегата типа К-300-240. При этом рассматриваются пуски из различных тепловых состояний. Описываются особенности теплообмена в паропроводах. Оцениваются изменение температуры и напряжений. Указаны условия предстартовой готовности пароподводящей системы к пуску.*

***Abstract:** the results of a computational study of the heating of the steam supply system of a K-300-240 turbine unit are presented. Launches from various thermal states are considered. The features of heat transfer in steam pipelines are described. Changes in temperature and stresses are estimated. Conditions for the pre-launch readiness of the steam supply system for launch are indicated.*

***Ключевые слова:** паропроводы, пуск, прогрев, теплообмен, температура, напряжения, надежность.*

***Key words:** steam pipelines, start-up, warm-up, heat transfer, temperature, mechanical stresses, reliability.*

Введение

Прогрев главных паропроводов играет существенную роль в реализации пуска современных мощных паротурбинных агрегатов, особенно при частых пусках блоков сверхкритического давления (СКД), где, как известно, после остановок трубопроводы и клапаны остывают значительно быстрее корпусов и ротора. Поэтому изучение процессов прогрева пароподводящих трубопроводов и парораспределительных органов свежего пара и оперативное использование полученных результатов на практике является актуальной задачей. Ее успешное решение позволяет правильно организовать предтолчковый период пуска агрегата и выявить резервы сокращения общего времени пуска.

Основная часть

Рассмотрим результаты расчетного исследования прогрева пароподводящей системы турбоагрегата типа К-300-240, проведенного в [1], где для анализа были использованы методы, модели и программы

исследования нестационарного двухфазного и однофазного теплообмена в трубопроводах паровых турбин.

В [1] исследованы режимы прогрева трубопроводов свежего пара (на всем участке котел–турбина) турбоагрегата К-300-240 от толчка турбины до набора нагрузки $Nэ = 50$ МВт из холодного (общее время $\tau = 3$ ч, начальная температура паровпуска цилиндра высокого давления (ЦВД) не более 350°C) и горячего (общее время $\tau = 40$ мин, начальная температура паровпуска ЦВД не менее 350°C) состояния.

Трубопроводы свежего пара (четыре нитки от котла до блока парораспределения) имеют внутренний диаметр 245 мм, толщину стенки 45 мм, длину одной нитки 77 м; перепускные трубы (десять ниток от блока парораспределения до турбины) – внутренний диаметр 194 мм, толщину стенки 36 мм, длину 16 м. При определении расчетных длин трубопроводов от блока парораспределения до турбины учитывались массы стопорного и регулирующего клапанов; в результате эта длина получилась равной 33 м. Материал трубопроводов и клапанов – сталь 15Х1М1Ф.

При выборе расчетной начальной температуры трубопроводов в [1] исходили из экспериментальных данных, полученных ОРГРЭС и ХТГЗ при испытаниях турбин типа К-300-240 на различных ГРЭС. Рассмотрены сочетания начальных температур ($^{\circ}\text{C}$) трубопроводов и паровпуска ЦВД, представленные в таблице 1 [1].

Таблица 1 – Сочетания начальных температур ($^{\circ}\text{C}$) трубопроводов и паровпуска ЦВД

Элемент	Варианты пуска					
	Из холодного состояния			Из горячего состояния		
	I	II	III	I	II	III
Трубопроводы от котла до	150	200	250	150	200	250
Трубопроводы от до турбины	100	150	200	100	150	200
Паровпуск ЦВД	100	100	100	350	350	350

Для всех вариантов пуска расход пара через байпасную систему (от котла до блока парораспределения) принимался равным 30% номинального. Расход пара через турбину при работе ее с нагрузкой оценивался по формуле

$$G = G_{\text{ном}} N/N_{\text{ном}},$$

а от толчка до холостого хода (ХХ) – соотношением

$$G = G_0 (n/n_0)^3,$$

где $G_{\text{ном}}$, $N_{\text{ном}}$ – номинальные расход пара и мощность;

G_0 – расход пара на ХХ ($G_0 = 0,05 G_{\text{ном}}$);

n_0 – число оборотов ХХ ($n_0 = 3000$ об/мин);

n – число оборотов на развороте.

Давление и температура пара за котлом определялись согласно графикам пуска из различных тепловых состояний, давление пара за блоком парораспределения – по формулам переменного режима [2], температура пара перед блоком парораспределения и перед турбиной – расчетом по специально разработанной программе [1].

Анализ результатов исследований [1] показывает следующее.

В первые моменты пуска на стенках трубопроводов происходит конденсация пара (особенно интенсивно в I вариантах пуска, см. таблицу 1). При этом величины коэффициента теплоотдачи от стенки к пленке α_n , существенно изменяясь на начальном участке трубопроводов (свежего пара и перепускных), на всей остальной длине их находятся на уровне 7000–10 000 Вт/м²·°С.

По мере прогрева стенок трубопроводов количество конденсата уменьшается. Время окончания конденсации зависит от начальной температуры металла, скорости течения и температуры пара; в рассмотренных вариантах на участке трубопровода от котла до блока парораспределения оно наступает через 5–12 мин после начала прогрева [1].

В большинстве исследованных режимов прогрева начальная температура перепускных труб выше температуры насыщения, протекающего через них пара (из-за дросселирования в блоке парораспределения); поэтому здесь в основном происходит однофазный теплообмен.

При прогреве перепускных труб с начальной температурой металла 100°С на первых этапах идет интенсивная конденсация пара. Поскольку его давление непрерывно увеличивается, происходит опережающий рост температуры насыщения пара по сравнению с ростом температуры стенки. Окончание конденсации наблюдается приблизительно через 30 мин после начала прогрева.

Температура пара, поступающего к турбине, существенно изменяется во времени в результате отдачи тепла пароподводящей системе. В начальные моменты прогрева из-за малой скорости пара (из-за малого расхода) эта температура приблизительно равна начальной температуре перепускных труб (или температуре насыщения при давлении пара перед турбиной). В конце прогрева по графику пуска из холодного состояния она увеличивается до 358–360°С за 3 ч при температуре пара за котлом 385°С; при прогреве по графику пуска из горячего состояния – до 445–450°С при температуре пара за котлом 500°С.

Понижение температуры пара (вследствие отдачи тепла трубопроводам и парораспределительным органам), поступающего к турбине, при пуске из холодного состояния не приводит к «захолаживанию» паровпуска ЦВД, поскольку при начальной температуре паровпуска ЦВД не более 100°С температура трубопровода доведена до уровня не менее 100°С предварительным прогревом.

Максимальные температурные напряжения в режиме пуска из холодного состояния на участке трубопроводов котел – блок парораспределения достигают 240 МПа ($\tau = 0,25$ мин, вариант I), то есть не превышают предел текучести материала трубопроводов сталь 15X1M1Ф ($\sigma_{0,2} = 350$ МПа).

При дальнейшем прогреве температурные напряжения резко уменьшаются: например, уже при $\tau = 5$ мин $\sigma = 20$ МПа. Еще ниже уровень напряжений во II и III вариантах прогрева. Напряжения в перепускных трубах во всех случаях незначительны. Таким образом, прочность паропроводов при рассмотренных пусках из холодного состояния не вызывает опасений.

В режиме пуска из горячего состояния наибольшая разность (235° С) между начальной температурой паровпуска ЦВД и температурой пара,

поступающего к турбине, наблюдается в начальный момент пуска ($\tau = 0-5$ мин) при начальной температуре металла трубопроводов свежего пара и перепускных труб, равной соответственно 150 и 100°C (см. таблицу 1). При других сочетаниях температур эта разность снижается соответственно до 200 и 150°C.

В этих режимах наиболее термонапряженным местом является начальный участок трубопровода свежего пара возле котла. При начальной температуре этого участка 150°C (вариант I) максимальные условные упругие термические напряжения σ здесь достигают ($\tau = 0,5$ мин) 490 МПа; при II варианте прогрева $\sigma = 430$ МПа; при III варианте $\sigma = 364$ МПа. Со временем эти напряжения уменьшаются, достигая, например, через $\tau = 10$ мин значения $\sigma = 50$ МПа.

Также можно отметить следующее [1].

Процесс конденсации на участке трубопроводов от котла до блока парораспределения занимает значительное время начального периода пуска (до 30 мин). Для уменьшения этого времени и снижения влияния воздействия конденсации пара на работу деталей турбины представляется целесообразным:

- трубопроводы свежего пара и перепускные трубы (предварительно, до толчка) прогревать до максимально возможной температуры, близкой к температуре насыщения пара, поступающего из котла в начальные моменты толчка;

- прогрев трубопроводов начинать при минимальном давлении, обеспечиваемом котлом, с постепенным повышением этого давления во времени;

- вести прогрев трубопроводов, начиная с начальных моментов процесса при максимально возможных расходах пара.

Заключение

Надежность работы трубопроводов в рассмотренных режимах пуска из холодного состояния не вызывает опасений, так как возникающие в них термические напряжения существенно меньше предела текучести материала. Минимальная температура пара, поступающего к турбине, близка к температуре паровпуска ЦВД (из-за предварительного прогрева трубопроводов). Для снижения напряжений в трубопроводах целесообразно перед толчком ротора обеспечить максимально возможное по технологическому процессу повышение температуры трубопроводов свежего пара и перепускных труб. Более полно вопросы предстартовой готовности пароподводящей системы к пуску могут быть решены наложением на трубопроводы и клапаны высококачественной изоляции, позволяющей удерживать их температуру на должном уровне после остановок различной продолжительности, а также применением различных систем обогрева.

Литература

1. Задачи теплового состояния базовых и маневренных турбоагрегатов / Д.А. Переверзев. – Киев: Наук. думка, 1980. – 216 с.
2. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: учебное пособие для вузов / А.Д. Трухний, Б.В. Ломакин. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 540 с.