

УДК 621.165:536.24

С.В. АЛЁХИНА, В.Н. ГОЛОЩАПОВ, О.В. КОТУЛЬСКАЯ

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина

ТЕПЛОТДАЧА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН

В статье представлены результаты обобщения известных экспериментальных исследований теплообмена в камерах паровпуска и выходных патрубках паровых турбин большой мощности. Приведены зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи на внутренних поверхностях камер паровпуска ЦВД и ЦСД и выходных патрубков ЦВД полученные по результатам исследований турбин К-200-130-ЛМЗ и К-325-23,5-ТА. Для выходного патрубка турбины К-325-23,5-ТА приведены результаты численного исследования тепловых и газодинамических процессов путем решения сопряженных задач теплообмена, представлены структура потока и характер распределения коэффициентов теплоотдачи на внутренних поверхностях.

Ключевые слова: паровая турбина, камера паровпуска, выходной патрубок, сопряженные задачи теплообмена.

Введение

При эксплуатации энергооборудования электростанций работа на переменных нагрузках оказывает значительное влияние на тепловое состояние агрегатов, на их работоспособность и надежность. Тепловое состояние турбоагрегата определяется граничными условиями теплообмена на поверхностях его узлов и деталей [1]. И если условия теплообмена на поверхностях элементов ротора изучены достаточно детально [2], то теплообмену во входных и выходных элементах цилиндров уделялось значительно меньше внимания.

Ввиду ограниченного объема информации, которую можно получать при работе турбин в реальных условиях, что объясняется наличием таких факторов, как высокие давления и температуры, толстые стенки корпусных элементов, сложные конструктивные соединения элементов, паровая среда и т.п., выражения для определения коэффициентов теплоотдачи на поверхностях входных и выходных элементов полученные на эксплуатируемых турбинах, не представлены в виде критериальных уравнений, а имеют вид зависимостей от режимных параметров. Значения параметров определяются графиками пусков турбины из различных тепловых состояний, временем включения отборов, порядком работы регулирующих клапанов, уровнем расхода пара через турбину и другими факторами.

Наиболее часто определение коэффициентов теплоотдачи на внутренних поверхностях паровых турбин, находящихся в эксплуатации, проводится методом решения обратных задач теплопроводности

[3 – 7] по результатам измерения температуры металла стенок корпусных элементов на некотором удалении от поверхности, обтекаемой паровым потоком и температуры пара в основном потоке вблизи этих стенок, или вблизи мест установки термомпар. В работах [5, 6] показано, что для определения более достоверных значений коэффициентов теплоотдачи (КТО) разность между температурами пара и поверхности исследуемого элемента должна превышать 10 °С.

Сложность подготовки экспериментального исследования чаще всего не позволяет устанавливать больше 1-2 датчиков температуры на одном элементе, что приводит к ограниченному объему получаемой информации, а ограничение по температурной разности позволяет определять значения КТО лишь при пусках турбины и частично – на переходных режимах. Для получения полной информации о тепловых процессах во входных и выходных элементах турбин необходимо привлекать инструментарий численного моделирования одновременно с обобщением представленной в литературе информации о результатах физических экспериментов.

1. Входные и выходные элементы паровых турбин

Течение пара в камерах паровпуска и выходных патрубках цилиндров паровых турбин большой мощности имеет достаточно сложную структуру, которая определяется характером ввода и вывода потока. Параметры, определяющие интенсивность

теплообмена в указанных элементах связаны совместным действием естественной и вынужденной конвекции, взаимодействие которых зависит от чисел Рейнольдса и Грасгофа.

Камеры паровпуска для ЦВД и ЦСД паровой турбины К-200-130 ЛМЗ представлены на рис. 1. Исследование теплообмена между потоком пара и поверхностью камеры выполнено в плоскости мери-

дионального сечения в точке А. Значения КТО определялись путем решения обратной задачи теплопроводности при изменении режима работы турбины в широком диапазоне, который характеризовался значением относительной мощности

$$\bar{N} = \frac{N}{N_H} = 0,2 \dots 1,0, \text{ где } N_H = 200 \text{ МВт [6].}$$

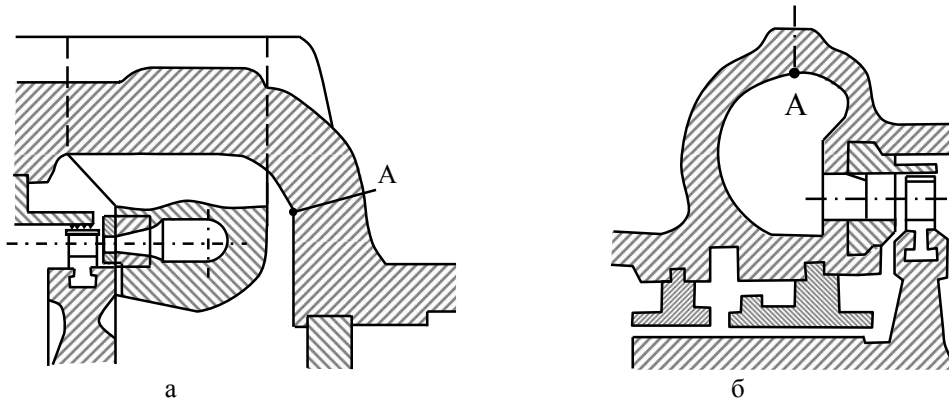


Рис. 1. Камера паровпуска ЦВД (а) и ЦСД (б) турбины К-200-130 ЛМЗ

Выходные патрубки паровых турбин большой мощности (рис. 2) зачастую имеют типовую конструкцию. Внутренняя полость выходного патрубка имеет близкую к тороидальной форму, в некоторых случаях с дополнительными конструктивными эле-

ментами, создающими закрутку потока. Входная плоскость патрубка представляет собой кольцевую плоскость, через которую поступает пар из проточной части, выхлоп (один или несколько) расположен в нижней части корпуса цилиндра.

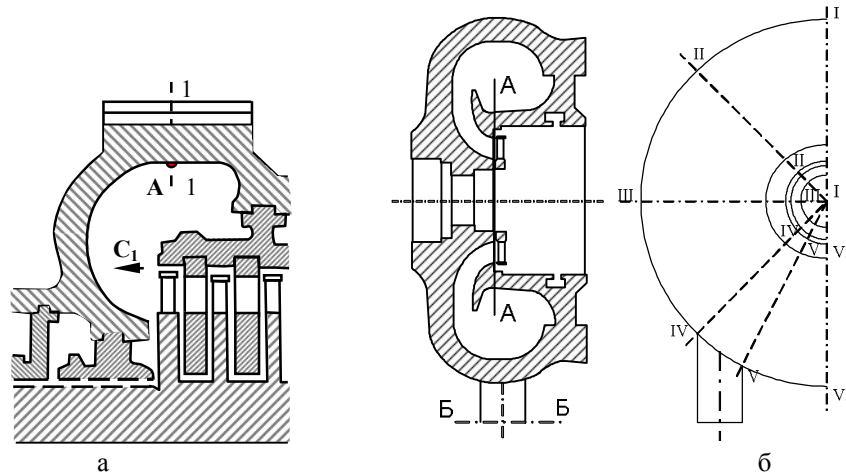


Рис. 2. Выходной патрубок ЦВД турбины К-200-130 ЛМЗ (а) и К-325-23,5 (б)

Теплообмен на внешней поверхности камеры выходного патрубка ЦВД турбины К-200-130 ЛМЗ (рис. 2, а) исследован в сечении 1-1 (точка А). Коэффициент теплоотдачи в этой точке определялся путем решения обратной задачи теплопроводности [6]. Относительная мощность турбины \bar{N} изменялась в диапазоне от 0 до 0,8.

Исследование теплообмена в камере выходного патрубка ЦВД турбины К-325-23,5 [8] (рис. 2, б) был выполнен путем решения сопряженных и обратных задач теплообмена для различных режимов

работы турбины. Режимные характеристики для расчетного исследования условий теплообмена на внутренней поверхности патрубка приняты по результатам теплового расчета проточной части ЦВД.

Для определения КТО на внутренней поверхности выходного патрубка в качестве граничных условий приняты:

- параметры пара на входе в патрубок (сечение А-А) и его физические характеристики при этих параметрах;
- скорость потока пара и ее составляющие в

осевом и окружном направлениях на выходе из последней ступени ЦВД.

2. Коэффициенты теплоотдачи на внутренней поверхности камеры паровпуска

Изменение КТО на внутренней поверхности наружного корпуса ЦВД (рис.1, а, точка А) определяется протечкой пара в переднее концевое уплотнение [3, 4] в зависимости от режима работы турбины.

В диапазоне изменения мощности $0 < \bar{N} \leq 0,225$ КТО рассчитывается по зависимости

$$\alpha = 120 + 1730\bar{N},$$

а при дальнейшем повышении мощности $\alpha = 510 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и остается практически неизменным.

Теплообмен на внешней поверхности камеры паровпуска ЦСД (рис. 1, б) исследовался при пусках турбины из различных тепловых состояний до значения мощности $N = 100 \text{ МВт}$ ($\bar{N} = 0,5$) и полученные значения КТО были аппроксимированы зависимостью

$$\alpha = 260 + 1480\bar{N}.$$

Значение $\alpha = 260 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ соответствует режиму прогрева камеры паровпуска при повышении частоты вращения и синхронизации генератора с сетью, вплоть до начала набора мощности, а приведенная зависимость, по-видимому, может быть распространена на весь диапазон изменения мощности $0 \leq \bar{N} \leq 1,05$, это коррелируется с изменением параметров пара и изменением КТО в других элементах турбины.

В опытах ЦКТИ [9], проведенных на модели паровпуска ЦСД, получены результаты, обработка которых может быть представлена приближенной формулой для расчета числа Нуссельта

$$\text{Nu} = 0,7 \cdot 10^4 \frac{\text{Re}^{0,8}}{\text{Gr}_\delta} \left[1 + 1,32 \cdot (\bar{G} - 0,3)^{0,9} \right], \quad (1)$$

где $\bar{G} = \frac{\text{Gr}_\delta}{\text{Re}} \left(\frac{\varphi}{90^\circ} \right)^{-1}$; φ – угол положения сечения,

изменяющийся от 0 до $\varphi_{\text{патр}}$; $\varphi_{\text{патр}}$ – угол положения отводного патрубка.

Параметр \bar{G} определяется отдельно для верхней и нижней половин камеры, а отсчет угла φ производится от вертикального сечения. Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{C_{\text{ср}} \cdot d_3}{\nu}, \quad (2)$$

где $C_{\text{ср}}$ – среднерасходная скорость, равная

$$C_{\text{ср}} = \frac{G}{\rho \cdot F}; \quad d_3 \text{ – эквивалентный диаметр, } d_3 = \frac{4F}{\Pi};$$

F – площадь меридионального сечения паровпуска; Π – смоченный периметр в этом сечении; ρ – плотность пара в паровпуске.

Число Gr_δ определяется по разности температур $\delta T = T_{\text{пар}} - T_{\text{ст}}$ и по эквивалентному диаметру d_3

$$\text{Gr}_\delta = g \cdot \beta \cdot \frac{\delta T \cdot d_3^3}{\nu^2}, \quad (3)$$

где g – гравитационная постоянная, $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$;

β – коэффициент объемного расширения, $\beta = \frac{1}{T_{\text{пар}}}$,

ν – кинематическая вязкость.

Для физических характеристик определяющей температурой является $T_{\text{ср}} = 0,5 (T_{\text{пар}} - T_{\text{ст}})$. Формула (1) с погрешностью $\pm 25\%$ аппроксимирует опытные данные в диапазоне изменения параметров $\text{Re} = (1,8 \div 4,2) \cdot 10^5$; $\text{Gr}_\delta = (0,1 \div 1,0) \cdot 10^6$.

Обработка результатов экспериментального исследования паровпуска ЦСД турбин К-200-130 ЛМЗ, К-500-60/1500 ОАО «Турбоатом», К-300-240 ЛМЗ с тангенциальным подводом пара двумя патрубками позволила получить критериальную зависимость, аналогичную выражению [6, 10]

$$\text{Nu} = 0,021 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,43},$$

где $\text{Re} = \frac{C \cdot d_3}{\nu}$; $\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d_3}{\lambda}$.

Определяющая скорость C равна скорости на входе в камеру

$$C = \frac{G \cdot \nu}{2F},$$

где ν – удельный объем пара на входе в камеру паровпуска; F – площадь меридионального сечения.

Определяющий размер – эквивалентный диаметр меридионального (продольного) сечения камеры паровпуска. Определяющая температура для физических характеристик – температура пара, поступающего в камеру паровпуска.

3. Коэффициенты теплоотдачи на внутренних поверхностях выходных патрубков

Результаты определения КТО на внутренней поверхности выходного патрубка ЦВД турбины К-200-130 ЛМЗ были аппроксимированы зависимостью вида

$$\alpha = \alpha_0 + 850\bar{N}. \quad (4)$$

Значение $\alpha_0 = 140 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ в зависимости (4) соответствует начальному прогреву выходного патрубка при наборе оборотов и выдержке частоты

вращения ротора при синхронизации генератора с сетью.

Расчетное исследование, выполненное для полной модели патрубка турбины К-325-23,5 путем

решения сопряженной задачи теплообмена, позволило выявить структуру потока (рис. 3, а). На рисунке цифрами обозначены контрольные точки, в которых определялся КТО.

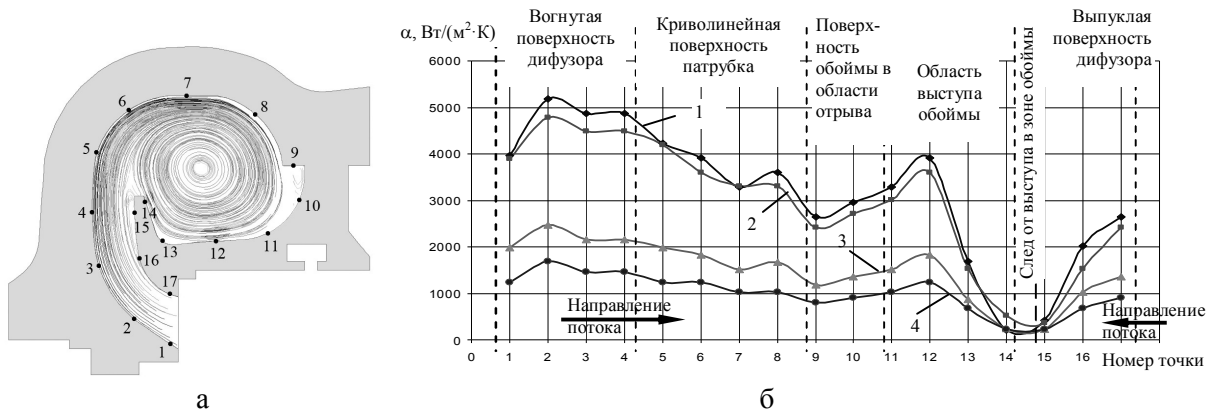


Рис. 3. Результаты исследований рабочих процессов в выходном патрубке турбины К-325-23,5: а – структура потока пара; б – коэффициенты теплоотдачи на участках камеры в горизонтальном разрезе патрубка при различных режимах работы (1 – $G = 1000$ т/ч; 2 – $G = 700$ т/ч; 3 – $G = 500$ т/ч; 4 – $G = 300$ т/ч)

На рис. 3, б приведено распределение КТО по внутренним поверхностям выходного патрубка для различных режимов работы. Как видно, максимальное значение наблюдается на вогнутой поверхности диффузора вблизи входа парового потока. При этом значения α на выпуклой поверхности диффузора ниже, чем на вогнутой, что является следствием перестройки профиля скорости при отрыве потока.

Заключение

На сегодняшний день расчет теплоотдачи на поверхностях входных и выходных корпусных элементов паровых турбин проводится с использованием эмпирических зависимостей, в которых в качестве основного критерия используется мощность турбины. Однако такой подход не очень целесообразен, поскольку, как показывают численные исследования, уровень коэффициентов теплоотдачи зависит, прежде всего, от характера потока.

Другим недостатком экспериментально полученных зависимостей является то, что они, как правило, основаны на результатах измерений в одной точке, что объясняется сложностью установки большого количества датчиков в работающей турбине.

Таким образом использование современных методов моделирования тепловых и газодинамических процессов, основанных на решении сопряженных задач теплообмена целесообразно для идентификации условий теплообмена в конструктивно сложных элементах турбины, в частности во входных и выходных элементах паровых турбин.

Литература

1. Сафонов, Л.П. Тепловое состояние высокоманевренных паровых турбин [Текст] / Л.П. Сафонов, К.П. Селезнев, А.Н. Коваленко. – Л.: Машиностроение. Ленингр. от-ние, 1983. – 295 с.
2. Швеи, И.Т. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин [Текст] / И.Т. Швеи, Е.П. Дыбан. – К.: Наук. думка, 1974. – 488 с.
3. Похорилер, В.Л. Определение коэффициента теплоотдачи и термических напряжений в деталях машин с помощью моделей [Текст] / В.Л. Похорилер, В.Б. Кацельсон, В.А. Викулов // Теплоэнергетика. – 1969. – № 9. – С. 61 – 64.
4. Меламед, Б.М. Обобщение результатов исследований пусковых режимов турбин К-200-130 [Текст] / Б.М. Меламед, В.Л. Похорилер // БТИ ОРГРЭС. – 1967. – 22 с.
5. Плоткин, Е.Р. Исследование условий теплообмена в турбине К-200-130 [Текст] / Е.Р. Плоткин, А.Ш. Лейзерович, И.В. Муратова // Теплоэнергетика. – 1971. – № 5. – С. 27 – 31.
6. Теплоотдача в паровпускных узлах турбины при пуске [Текст] / Е.Р. Плоткин, А.Ш. Лейзерович, А.А. Голынкин, Ю.В. Мясников // Теплофизика и теплотехника. – К.: Наук. думка, 1973. – №. 25. – С. 125 – 129.
7. Забежанский, Л.Д. Исследование условий в корпусах турбин с петлевой схемой потоков пара [Текст] / Л.Д. Забежанский, В.М. Пашиин, В.Л. Похорилер // Теплоэнергетика. – 1981. – № 8. – С. 31 – 34.
8. Створення парових турбін нового покоління потужністю 325 МВт [Текст] / В.Г. Суботін, Є.В. Левченко, В.Л. Швецов, та ін. – Х.: Фоліо, 2009. – 256 с.

9. Зысина-Моложен, Л.М. Теплообмен в турбомашинах [Текст] / Л.М. Зысина-Моложен, Л.М. Зысин, М.П. Поляк – Л.: Машиностроение, 1971. – 336 с.

10. Михеев, М.А. Основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

Поступила в редакцию 12.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Л. Шубенко, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина.

ТЕПЛОВІДДАЧА НА ПОВЕРХНЯХ ВХІДНИХ ТА ВИХІДНИХ КОРПУСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОВИХ ТУРБІН

С.В. Альохіна, В.М. Голощанов, О.В. Котульська

В статті представлені результати узагальнення відомих експериментальних досліджень теплообміну в камерах паровпуску та вихідних патрубках парових турбін великої потужності. Наведені залежності для визначення коефіцієнтів тепловіддачі на внутрішніх поверхнях камер паровпуску ЦВТ та ЦСТ та вихідних патрубків ЦВТ, що отримані за результатами досліджень турбін К-200-130-ЛМЗ та К-325-23,5-ТА. Для вихідного патрубка турбіни К-325-23,5-ТА наведені результати чисельного дослідження теплових та газодинамічних процесів шляхом розв'язання спряжених задач теплообміну, представлена структура потоку та характер розподілу коефіцієнтів тепловіддачі на внутрішніх поверхнях.

Ключові слова: парова турбіна, камера паровпуску, вихідний патрубок, спряжені задачі теплообміну.

THE HEAT TRANSFER ON SURFACES OF THE INLET AND OUTLET ELEMENTS OF STEAM TURBINE CASES

S.V. Alyokhina, V.N. Goloschapov, O.V. Kotulskaya

The results of summarising experimental investigations of heat exchange in the steam inlet cameras and the exhaust hoods of high power steam turbines are present in paper. The relations for heat-transfer coefficients determination on inner surfaces of steam inlet cameras of HPC and IPC and exhaust hoods of HPC are given. The results was obtained on base of results of investigations turbines K-200-130-ЛМЗ and K-325-23,5-ТА. For exhaust hood of turbine K-325-23,5-ТА the results of numerical investigations of thermal and gas-dynamics processes by solving of conjugated heat transfer problems are given. For exhaust hood of turbine K-325-23,5-ТА the results of numerical investigations of thermal and gas-dynamics processes by solving of conjugated heat transfer problems are given. The structure of flow and heat-transfer coefficients character distribution on inner surfaces are given.

Key words: steam turbine, steam inlet camera, exhaust hood, conjugate heat transfer problems.

Алёхина Светлана Викторовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: alyokhina@ipmach.kharkov.ua.

Голощанов Владимир Николаевич – кандидат технических наук, с.н.с., старший научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: ragamonova@ipmach.kharkov.ua.

Котульская Ольга Валериевна – ведущий инженер Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: katulaska@ipmach.kharkov.ua.