

УДК 621.452.038.2/4

О. А. ФУРМАН, В. Ю. БОНДАРЧУК

АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОБДУВА ДИСКОВ ОСЕВОЙ ЧЕТЫРЁХСТУПЕНЧАТОЙ СВОБОДНОЙ ТУРБИНЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Выполнен гидравлический расчёт системы охлаждения осевой четырёхступенчатой свободной турбины. Рассматривается практическое использование существующих алгоритмов теплогидравлического расчёта. Обсуждается рациональное распределение воздуха по каналам тракта охлаждения и уменьшение утечек из системы охлаждения в проточную часть. Показано, что наилучшим, с точки зрения простоты реализации, способом управления дозированием расхода охлаждающего воздуха по ступеням турбины является применение в роторе экрана, разделяющего внутреннюю полость вала свободной турбины и полости между дисками.

Ключевые слова: турбина, система охлаждения, расход воздуха, экран

Введение

Надёжность и работоспособность газотурбинного двигателя в течение всего жизненного цикла зависят в первую очередь от теплового состояния элементов конструкции турбин – лопаток, дисков, корпусов и других, как на стационарных, так и на переходных режимах. [1]

В настоящее время широко применяются открытые схемы воздушного охлаждения этих деталей. Продолжаются поиски более эффективных конструктивных мероприятий, ведётся интенсивная работа по их усовершенствованию.

Новые производственные задания АО «МОТОР СИЧ» требуют развёрнутого технического обоснования принимаемых решений, в том числе с помощью соответствующих тепловых и гидравлических расчётов.

Осевая четырёхступенчатая свободная турбина, рассматриваемая в данной статье, спроектирована так, что энергетическая газотурбинная установка напрямую приводит генератор без применения редуктора, а выходной вал ротора свободной турбины вращается с частотой 3000 об/мин (синхронной частотой вращения 50 Гц).

Известен ротор турбины базовой установки АИ-336-2-10 ГП «Ивченко-Прогресс», принятый за прототип: для распределения расхода воздуха, охлаждающего диски, в конструкции ротора имеется экран с выступом. Однако свободная турбина данной установки имеет две ступени и обеспечивает частоту вращения 6500 об/мин.

В конструкции ротора осевой четырёхступенчатой свободной турбины газотурбинного привода

МС-10000 АО «Мотор Сич» с частотой вращения 3000 об/мин применён экран, имеющий три выступа.

Сущность проведенного анализа заключается в проработке возможности использования элементов базового газотурбинного привода, а также проверке эффективности системы охлаждения, при работе в составе привода с новыми требованиями и показателями.

Необходимо отметить, что ключевой особенностью гидравлического расчёта рассматриваемого фрагмента конструкции с тремя выступами является влияние таких факторов, как дополнительное сопротивление пережатия живого сечения внутри канала и центробежный эффект.

В связи с этим уместно упомянуть работы [1 - 4, 8], в которых ранее уже исследовались сложные процессы течения охлаждающего воздуха в придисковых зазорах роторов газовых турбин.

Далее представлено описание одного из наиболее простых методов распределения воздуха по ступеням, а также успешное практическое применение результатов научных работ в области моделирования теплогидравлического состояния при выполнении гидравлических и тепловых расчётов на этапе проектирования турбины.

1. Постановка задачи

Задача при проектировании системы охлаждения турбины - не допустить проникновение горячего газа в тракт охлаждения и вместе с тем свести к минимуму утечки охлаждающего воздуха в проточную часть, обеспечивая при этом необходимое темпера-

турное состояние деталей в ожидаемых условиях эксплуатации и заданные характеристики.

С этой целью рассчитываются гидродинамические характеристики системы охлаждения, определяются расходы, скорости, давления и температуры охладителя во всех каналах охлаждающего тракта. Определяются коэффициенты теплоотдачи со стороны горячего газа, рассчитываются температурные поля в охлаждаемых деталях.

Целью данной работы является проверка эффективности работы элементов системы охлаждения осевой четырёхступенчатой свободной турбины.

2. Методы и теоретические основы моделирования теплогидравлического состояния турбины

Известно, что для расчёта гидродинамических характеристик системы охлаждения необходимо, прежде всего, составить её эквивалентную схему. При составлении этой схемы весь охлаждающий тракт разбивается на отдельные элементарные участки, представляющие собой типовые элементы (круглые, прямоугольные, кольцевые и др. каналы), для которых имеется возможность с достаточной точностью определить изменение полного давления воздуха за счёт гидравлического сопротивления по одной зависимости, отражающей физические закономерности течения воздуха в рассматриваемом элементе [5].

Математическая модель пассивного канала обычно содержит гидравлическую модель, которая отражает падение полного давления в функции массового расхода [2]

$$\Delta P^* = P^*_1 - P^*_2 = \zeta \frac{\rho \cdot w^2}{2} = \zeta \frac{G^2}{2 \cdot \rho \cdot F^2} = \gamma \cdot G^2, \quad (1)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления;

w – среднemasсовая скорость, м/с;

ρ – плотность, кг/м³;

G – массовый расход, кг/с;

F – площадь проходного сечения канала, м²

При моделировании теплового состояния деталей турбины используется метод математической физики, который рассматривает протекание физических процессов в произвольно выделенном из всего рассматриваемого пространства элементарном объёме в течение промежутка времени. Рассматриваются три основных вида переноса теплоты: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

В основу установления зависимости между величинами, характеризующими явление теплопро-

водности, положен закон сохранения энергии, согласно которому вся теплота, выделенная внутренними источниками и внесённая извне в элементарный объём путём теплопроводности за некоторое время, идёт на изменение внутренней энергии вещества, содержащегося в этом объёме. Задача теплопроводности описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \Delta t + q_v, \quad (2)$$

где t – температура, К;

τ – время, с;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

Δt – оператор Гамильтона, описывающий приращение температуры;

q_v – количество теплоты, которое выделилось в элементарном объёме за счёт внутренних источников

Для решения конкретной задачи необходимо к дифференциальному уравнению присоединить математическое описание частных особенностей рассматриваемой задачи – параметров задачи: геометрических, характеризующих форму и размеры тела, в котором протекает процесс теплопроводности; физических, характеризующих физические свойства материала; временных, характеризующих распределение температуры тела в начальный момент времени; граничных, характеризующих взаимодействие тела с окружающей средой [6].

Процессы конвективного теплообмена и теплового излучения также описываются с помощью систем уравнений, основываясь на законах физики. Эти уравнения должны быть дополнены условиями, характеризующими конкретные особенности рассматриваемой задачи.

Существует два вида методов решения данного типа уравнений: аналитический, при котором результат выводится различными математическими преобразованиями; и численный, при котором полученный результат соответствует действительному с заданной точностью.

За последние десятилетия методы решения таких задач стремительно развивались. Получена сходимость расчётов. Достигнут высокий уровень автоматизации проектирования. Достаточно эффективным инструментом моделирования теплогидравлического состояния является программный комплекс ТНА [7].

Решение проблемы теплового состояния объектов в данном комплексе основано на методе конечных элементов.

Метод расчёта гидравлических систем основан на теории графов, в основе которого лежит итераци-

онное уточнение расходов охладителя в независимых контурах. Систему охлаждения турбины представляют в виде графа, ветви которого соответствуют охлаждающим каналам, а узлы – местам соединения отдельных каналов в единую систему. Давления во внешних узлах системы заданы в исходных данных, а во внутренних узлах неизвестны и подлежат определению.

3. Распределение воздуха по каналам системы охлаждения ротора осевой четырёхступенчатой свободной турбины

Охлаждение рабочих лопаток отводом тепла в диск, с конструктивной точки зрения, является одним из самых простых. Отбор тепла охлаждения осуществляется воздухом, который обдувает ротор (диски) или продувается через специальные каналы, после чего выпускается в проточную часть турбины.

К недостаткам относится тот факт, что возможности этой схемы охлаждения ограничиваются механическими свойствами материалов, понижающимися в зависимости от температуры. Также следует отметить, что диски турбин, имея достаточно большую массу, обладают значительной тепловой инерцией – от ступицы к ободу диска присутствует градиент температуры [9].

Применение покрывных дисков способствует более рациональному использованию ресурсов охлаждающего воздуха, практически устраняет осевой градиент температуры в рабочем диске, одновременно понижая общий уровень его температуры, позволяет влиять на распределение температуры по радиусу диска и на его тепловую инерцию [10].

Распределение охлаждающего воздуха при обдуве дисков осевой четырёхступенчатой свободной турбины осуществляется специальными конструктивными мероприятиями: с помощью лабиринтных уплотнений, гребешков и выступов.

Известно, что если на пути движения воздуха в канале системы охлаждения имеется резкое сужение сечения (выступ, перегородка с небольшим отверстием или др.), которое создаёт местное сопротивление потоку, то в месте сужения сечения скорость движения потока резко возрастает, а давление падает. За сужением скорость уменьшается и восстанавливается до первоначальной, но давление из-за потерь на завихрение восстанавливается не полностью. Таким образом, обеспечивается такое давление воздуха по всему тракту охлаждения, чтобы оно на незначительную величину превышало давление газа в соответствующих местах проточной части [7].

Ротор осевой четырёхступенчатой свободной турбины, фрагмент которого представлен на рис. 1, имеет экран с тремя выступами, разделяющий внут-

реннюю полость вала свободной турбины и полости между дисками.

Такое исполнение позволило осуществить дозирование расхода охлаждающего воздуха по ступеням турбины. Кроме того, применение экрана уменьшает теплообмен излучением.

На распределение расхода в данной гидравлической схеме существенно влияет отношение живого сечения канала между диском и экраном в узкой его части к живому сечению канала и гидравлическое сопротивление.



Рис. 1. Фрагмент ротора четырёхступенчатой свободной турбины газотурбинного привода МС-10000 АО «Мотор Сич»

Несмотря на это, характер течения в около или междисковых полостях является достаточно сложным. На течение воздуха и на теплообмен могут оказывать влияние массовые силы, возникающие в поле центробежного ускорения. При относительно малых расходах охлаждающего воздуха и большой закрутке среды в междисковой полости доминирующими могут быть процессы переноса тепла, обусловленные не принудительным течением охлаждающего воздуха под действием перепада давления, а естественной конвекцией среды под действием массовых сил. Эти явления до сих пор изучены недостаточно [1].

Результаты

Рассматриваемая конструкция подтвердила работоспособность в составе газотурбинного привода в ходе выполнения соответствующих программ испытаний.

Заключение

Развитие и модификация численного анализа течения воздуха и процессов теплообмена в каналах системы охлаждения остаётся актуальным вопросом для дальнейших научных исследований.

Литература

1. *Высокотемпературные газовые турбины [Текст] : сб. науч. тр. ЦИАМ №1342 / под ред. М. Я. Иванова. – М. : ТОРУС ПРЕСС, 2010. – 304 с.*
2. *Комплексный метод расчета систем охлаждения роторов газовых турбин [Текст] / А. И. Тарасов, Чан Конг Шанг, О. А. Литвиненко, И. А. Михайлова // Вестн. НТУ «ХПИ». – 2015. – Вып. № 15. – С. 63-68.*
3. *Чан Конг Шанг. Развитие методов расчета систем охлаждения роторов газовых турбин [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.05.16 / Чан Конг Шанг ; НТУ «ХПИ». – Харьков, 2010. – 16 с.*
4. *Долгов, А. И. Теплогидравлическое обоснование оптимизационной модели расчетов системы охлаждения газовых турбин [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.16 / Долгов Александр Игоревич ; НТУ «ХПИ». – Харьков, 2015. – 21 с.*
5. *Пасконов, В. М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена [Текст] : учеб. пособие / В. М. Пасконов, В. И. Полежаев, Л. А. Чудов. – М. : Наука, 1984. – 288 с.*
6. *Теплотехника [Текст] : учеб. для вузов / Н. Ф. Кираковский [и др.] ; под ред. В. Ф. Хмель. – Киев : Вища школа, 1976. – 520 с.*
7. *Тарасов, А. И. ТНА (Thermal & Hydraulic Analysis) [Текст] / А. И. Тарасов, А. И. Долгов // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, Россия. – Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2007610141, 10 ноября 2006.*
8. *Долгов, А. И. Проектирование систем охлаждения газовых турбин [Текст] / А. И. Тарасов, А. И. Долгов // Турбины и дизели : Специализированный информационно-технический журнал. – Пермь. – 2010. – № 3. – С. 14-16.*
9. *Газовые турбины двигателей летательных аппаратов: Теория, конструкция и расчет [Текст] : учеб. для вузов / В. И. Локай [и др.]. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.*
10. *Копелев, С. З. Конструкции и расчет систем охлаждения ГТД [Текст] : монография / С. З. Копелев, А. Ф. Слитенко. – Х. : Основа, 1994. – 240 с.*

References

1. *Ivanov, M. Ya. Vysokotemperaturnye gazovye turbiny [High temperature gas turbines]. Sb. nauch. tr. TsIAM №1342 [Proc. of the Central Scientific-Research Institute of Airplane-Engine Design №1342]. Moscow, TORUS PRESS Publ., 2010. 304 p.*
2. *Tarasov, A. I., Chan Kong Shang, Litvinenko, O. A., Mikhailova, I. A. Kompleksnyi metod rascheta sistem okhlazhdeniya rotorov gazovykh turbin [Complex method of rotor cooling system analysis]. Vestn. NTU «KhPI», 2015, no. 15, pp. 63-68.*
3. *Chan Kong Shang. Razvitie metodov rascheta sistem okhlazhdeniya rotorov gazovykh turbin. Avtoref. dys. kand. tekhn. nauk [Development of gas turbine rotor cooling systems' analysis methods]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2010. 16 p.*
4. *Dolgov, A. I. Teplogidravlichesкое obosnovanie optimizatsionnoi modeli raschetov sistemy okhlazhdeniya gazovykh turbin. Avtoref. dys. kand. tekhn. nauk [Thermal-hydraulic basis of gas turbine cooling systems' analysis optimization model]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2015. 21 p.*
5. *Paskonov, V. M., Polezhaev, V. I. Chudov, L. A. Chislennoe modelirovanie protsessov teplo- i massoobmena [Computational modeling of mass-heat exchange processes]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 288 p.*
6. *Kirakovskii, N. F., Khmel', V. F. Teplotekhnika [Thermal engineering]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1976. 520 p.*
7. *Tarasov, A. I., Dolgov, A. I. TNA (Thermal & Hydraulic Analysis). The Certificate on official registration of the computer program, no. 2007610141, 2006. (In Russian, unpublished).*
8. *Dolgov, A. I., Tarasov, A. I. Proektirovanie sistem okhlazhdeniya gazovykh turbin [Gas turbines' cooling systems' design]. Turbiny i dizeli, Perm', 2010, no. 3, pp. 14-16.*
9. *Lokai, V. I. Gazovye turbiny dvigatelei letatel'nykh apparatov: Teoriya, konstruktziya i raschet [Aircraft engine gas turbines: theory, design and analysis]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 447 p.*
10. *Kopelev, S. Z., Slitenko, A. F. Konstruktsii i raschet sistem okhlazhdeniya GTD [Gas turbine engine cooling systems' design and analysis]. Kharkov, Osnova Publ., 1994. 240 p.*

Поступила в редакцию 12.04.2018, рассмотрена на редколлегии 27.07.2018

АНАЛІЗ СИСТЕМИ ОБДУВУ ДИСКІВ ОСЬОВОЇ ЧОТИРИСТУПЕНЕВОЇ ВІЛЬНОЇ ТУРБИНИ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНОГО СТАНУ

О. О. Фурман, В. Ю. Бондарчук

Виконано гідравлічний розрахунок системи охолодження осьової чотириступеневої вільної турбіни. Розглядається практичне використання існуючих алгоритмів теплогидравлічного розрахунку. Обговорюється раціональний розподіл повітря по каналам тракту охолодження та зменшення втрат повітря із системи охолодження в проточну частину. Показано, що найліпшим, з точки зору простоти реалізації, способом управління дозуванням витрати охолоджуючого повітря по ступеням турбіни є застосування в роторі екрана, що розділяє внутрішню порожнину вільної турбіни і порожнини між дисками.

Ключові слова: турбіна, система охолодження, витрата повітря, екран

**AN ASSESSMENT OF FOUR STAGE AXIAL POWER TURBINE DISKS'
AIR-COOLING SYSTEM BASED ON THERMAL-HYDRAULIC MODELING*****O. A. Furman, V. U. Bondarchuk***

A hydraulic analysis of four stage axial power turbine cooling system was performed. A practical application of the existing algorithms of thermal-hydraulic analysis is considered. Reasonable flow-rate distribution among the cooling channels and cooling system air leakage waste reduction are discussed. An implementation of the rotor screen dividing rotor internal cavity into disk and shaft cavities is revealed as the best way to keep the flow-rate balance of cooling air in account of achievement simplicity.

This paper also covers a key design concept that the structure of turbine shall be such as to promote good dissipation of heat from blades to disks by means of air flow passing through special channels between rotor parts.

A turbine disks' air-cooling system assessment importance is shown according to the aim of hot gas ingress prevention. It is given a brief description of known theoretical fundamentals on which the used thermal-hydraulic analysis computational method of modeling was based.

Flow-rate distribution among the four stage axial power turbine disks' air-cooling system is noted to be carried out by certain basic design choices such as labyrinth seals, fins and ledges. The most important factors on which the flow-rate distribution depends on are mentioned including a ratio of narrow section hydraulic area to channel section hydraulic area, hydraulic resistance and availability of centrifugal pressure between disks.

Narrowing of cooling flow passage section causes air velocity increase and pressure reduction. Even though some recovery of velocity appears downstream the narrowing element, the pressure value changes its magnitude due to vortex losses. Therefore it makes possible to provide the required air distribution.

The considered rotor screen structure confirmed its functionality in operating gas turbine plant and it is stated as achieved results. Numeral details of dealt analysis are omitted.

Generally, the behavior of flow and heat exchange in area between rotating disks is classified as rather complicated and methods of its modeling are summarized to remain relevant question of further studies.

Keywords: turbine, cooling system, flow-rate, screen

Фурман Ольга Александровна – инженер-конструктор АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина, e-mail: ugk@motorsich.com.

Бондарчук Валерий Юрьевич – инженер-конструктор АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина, e-mail: ugk@motorsich.com.

Furman Olga Alexandrovna – designer, MOTOR SICH JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: ugk@motorsich.com.

Bondarchuk Valeriy Urievich – designer, MOTOR SICH JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: ugk@motorsich.com.