

УДК 621.438

СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Шахотько В.Н.

Научный руководитель – старший преподаватель Пронкевич Е.В.

В современных газотурбинных установках охлаждают практически все детали газовой турбины: ротор, подшипники, сопловые и рабочие лопатки, корпус. При охлаждении лопаточного аппарата используют не только воздух, но и в последнее время пар, дистиллированную воду, жидкие металлы (Na, Na + K), обладающие лучшими теплофизическими свойствами.

Система охлаждения газовой турбины выполняет две основные функции: непосредственное охлаждение элементов, подверженных воздействию температуры потока газов, и обеспечение экологической чистоты газотурбинной установки. В разные критические точки газовой турбины подается воздух нужного давления и температуры.

Используются несколько типов систем охлаждения:

а) система воздушного охлаждения, в которой применяется цикловой воздух компрессора, отбираемый из различных отсеков его проточной части. Если после охлаждения этот воздух выводится в проточную часть газовой турбины, такую систему называют открытой. В закрытых воздушных системах охлаждающий воздух возвращается обратно для дожатия в компрессор. Такое техническое решение возможно, если охлаждающий тракт выполнен герметичным;

б) система парового охлаждения, в которой для охлаждения используется водяной пар. Он обладает лучшими теплофизическими свойствами, чем воздух. Его применение связано со значительно меньшими потерями работы сжатия (повышение давления осуществляется в жидкой фазе);

в) комбинированная система охлаждения, в которой первая ступень лопаток (преимущественно сопловых) охлаждаются паром, отводимым обратно в тепловую схему парогазовой установки. Остальные элементы проточной части газовой турбины охлаждаются цикловым воздухом по открытой схеме.

Охлаждение лопаточного аппарата ГТУ

Охлаждение лопаточного аппарата в ГТУ необходимо ввиду больших температур рабочей среды. ГТУ с отсутствием охлаждения лопаточного аппарата нуждается в значительно более низких параметрах рабочей среды. К примеру, ГТУ с охлаждением элементов проточной части работает с температурой рабочей среды примерно 1400 °С, а без охлаждения 850–950 °С, что существенно отражается на их мощности [1].

Охлаждение рабочих лопаток

Внешнее охлаждение. Наиболее часто применяют следующие три разновидности этого способа охлаждения.

1. Теплоотвод в диск от рабочих лопаток.
2. Парциальное охлаждение, которое можно организовать при наличии двух рабочих тел: газа с высокой температурой, обеспечивающего выработку основной доли полезной работы, и газа (например, циклового воздуха или пара) с более низкой температурой, предназначенного в основном для охлаждения рабочих лопаток.

3. Струйное охлаждение лопаток.

Внутреннее охлаждение. В большинстве случаев этот способ охлаждения реализуется в виде систем открытого типа.

1. Системы охлаждения открытого типа. Впервые внутреннее охлаждение рабочих лопаток было использовано в 1942 г. на немецком ГТД ЮМО-003, а несколько позднее на отечественном двигателе РД-20, где охлаждаемая пустотелая лопатка имела внутренний вставной дефлектор.

В охлаждаемых рабочих лопатках, серийного авиационного ГТД «Спей» английской фирмы «Роллс-Ройс», охлаждающий воздух поступает через хвостовик (ножку) в несколько продольных каналов эллиптического сечения 1, пройдя которые, он выбрасывается в радиальный зазор 2 представленный на рисунке 1. При начальной температуре газа 1070°C и расходе воздуха $g_{\text{охл}} = 2\%$ такая система обеспечивает глубину охлаждения лопаток до 220°C .

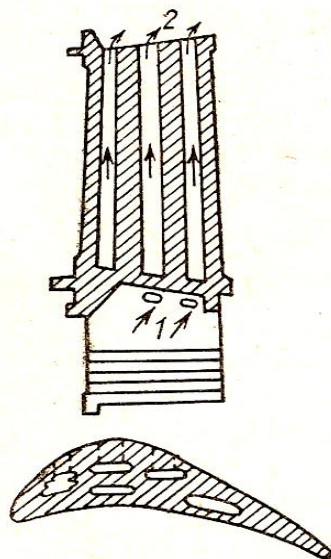


Рисунок 1 – Рабочая лопатка с продольным течением охладителя фирмы «Роллс-Ройс» (Англия): 1 – ввод охладителя; 2 – вывод охладителя

Более равномерное распределение температуры в лопатке обеспечивается при поперечном движении охладителя, когда входная и выходная кромки профиля могут быть охлаждены более интенсивно. На рисунке 2 схематически показана дефлекторная охлаждаемая рабочая лопатка с поперечным движением охладителя, разработанная под руководством К.В. Туманского. Для снижения температуры выходной кромки в этой лопатке применен струйный обдув, воздух выбрасывается через щели в выходной кромке 2. Эти мероприятия позволяют существенно снизить температуру кромок и выровнять температурное поле лопатки.

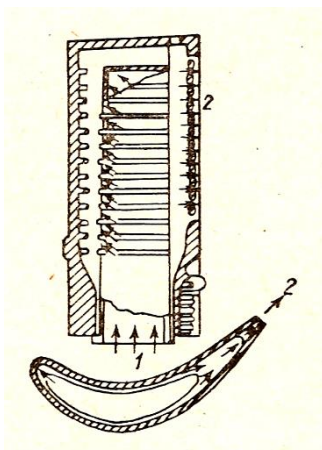


Рисунок 2 – Дефлекторная охлаждаемая рабочая лопатка с поперечным движением охладителя: 1 – ввод охладителя; 2 – вывод охладителя

Значительные возможности воздействия на распределение температур имеются в лопатках гильзовой конструкции, в которых более нагруженный несущий стержень имеет более низкую температуру. Наружная тонкостенная оболочка крепится к стержню обычно в хвостовой части лопатки и усилия от газовых сил также передает стержню.

Для охлаждения рабочих лопаток используется также пленочное и пористое охлаждение. Так, пленочное охлаждение входной кромки рабочей лопатки применено на авиационном двигателе Т-39 фирмы «Дженерал-Электрик» с начальной температурой газа 1260°C . Эта лопатка представляет собой многоканальную конструкцию с выпуском воздуха через отверстия на входную кромку.

Системы охлаждения закрытого типа

По принципу действия различают одно- и двухконтурные системы охлаждения закрытого типа. В одноконтурных системах охладитель отбирает теплоту непосредственно у охлаждаемого элемента, а в двухконтурных – у промежуточного теплоносителя, который циркулирует в охлаждаемом элементе.

Системы охлаждения закрытого типа выполняются с принудительной и естественной циркуляцией, представленной на рисунке 3. В первом случае движение охладителя вызывается главным образом перепадом давлений, создаваемым внешним источником энергии, во втором случае – за счет термосифонного эффекта. Этот эффект создается тем, что к охладителю подводится тепловой поток от охлаждаемого элемента, который вызывает изменение его плотности, а поле центробежных сил обеспечивает интенсивную циркуляцию.

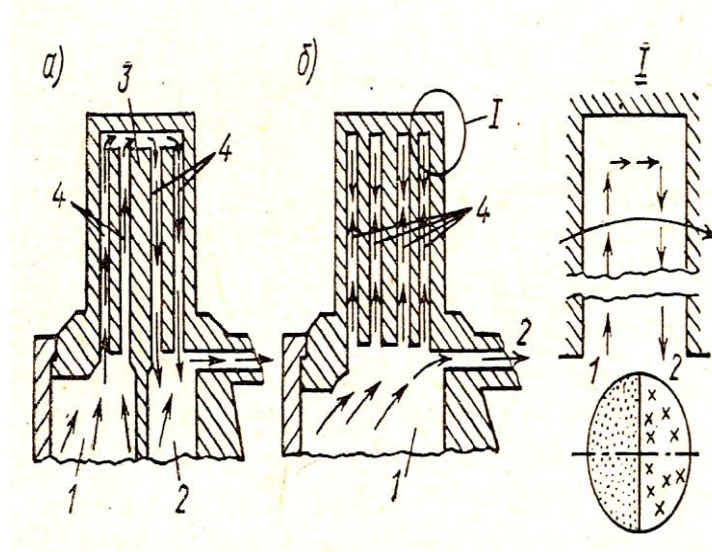


Рисунок 3 – Рабочие лопатки с системой охлаждения закрытого типа:

а – с принудительной циркуляцией; б – с естественной циркуляцией:

- 1 – зона подвода охладителя; 2 – зона отвода охладителя; 3 – разделительная перегородка;
4 – охлаждающие каналы

Термосифонный эффект используется также в двухконтурных системах охлаждения лопаток. В этом случае в теле лопатки 1 имеются глухие каналы 2, заполненные теплоносителем первого контура (обычно дистиллированной водой или натрием). В нижней части лопатки размещен радиатор 3, который омывается охладителем второго контура. Во время работы турбины к перу лопатки от горячего газа подводится теплота, а от радиатора она отводится. При этом за счет вращения во внутренних глухих каналах имеет место интенсивная естественная циркуляция охладителя первого контура (термосифонный эффект), которая обеспечивает передачу теплоты от пера лопатки к охладителю второго контура.

Охлаждение сопловых лопаток

В дефлекторных сопловых лопатках с конвективной системой воздушного охлаждения может быть достигнуто снижение средней температуры лопаток по сравнению с температурой газа на $130\text{--}150^{\circ}\text{C}$ при относительном расходе охлаждающего воздуха $g_{\text{охл}} = 2\%$.

С увеличением начальной температуры газа требуется все большая глубина охлаждения сопловых лопаток первой ступени турбины. При температуре газа более 1000–1150 °С необходимо дополнительно к конвективному вводить пленочное охлаждение.

Дальнейшее увеличение эффективности охлаждения турбинных лопаток может быть достигнуто при использовании пористого охлаждения. Конструктивно пористое охлаждение решается по схеме гильзовых лопаток, в которых основные нагрузки воспринимает относительно холодный несущий стержень 1, а тонкостенная наружная оболочка 2 образует профильную часть. Между стержнем и оболочкой предусмотрены каналы для пропуска охлаждающего агента 3.

Охлаждение корпуса ГТУ

Охлаждение корпуса ГТУ необходимо, так как температура рабочей среды велика. Если рассмотреть ГТУ без охлаждения корпуса, то можно предположить значительный нагрев корпуса и как следствие, появление трещин, а это потери тепла в окружающую среду, а именно в маш. зал, что в дальнейшем будет пагубно влиять на рабочий персонал, обслуживающий данную ГТУ. Помимо всего прочего, есть место присутствию термических расширений металла корпуса ГТУ, что может привести к задеванию корпуса ГТУ о рабочие лопатки, движущиеся с большой скоростью, что в свою очередь не допустимо.

Охлаждение дисков и роторов ГТУ

Выполнение дисков и цельнокованых роторов больших размеров из жаропрочных материалов (аустенитных сталей и сплавов) затруднено ввиду опасности появления дефектов. Кроме того, жаропрочные сплавы обладают сравнительно низкой теплопроводностью и большим коэффициентом линейного расширения. Такое сочетание свойств не позволяет производить быстрое изменение нагрузки ввиду появления больших термических напряжений. Поэтому диски и цельнокованные роторы выполняют обычно из сталей перлитного или ферритного классов, обладающих более благоприятными характеристиками, но допускают значительно более низкие температуры – порядка 500–550 °С. Это вынуждает применять охлаждение дисков даже при сравнительно низких температурах газа.

Литература

1. Соколов В.С. Газотурбинные установки: Учебное пособие – М.: Высшая школа, 1986. – 151 с., ил.