

Емельянов Дмитрий Александрович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры авиационных двигателей,
ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф.
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Елисеев Сергей Яковлевич,
кандидат химических наук, старший преподаватель
кафедры авиационных двигателей,
ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф.
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Гусев Иван Олегович, курсант,
ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф.
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Емельяненко Олег Юрьевич, курсант,
ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф.
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ СО СТУПЕНЧАТЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

Аннотация. В статье описан способ увеличения работы цикла ГТД путем использования в них цикла со ступенчатым подводом теплоты к рабочему телу. Представлен цикл со ступенчатым подводом теплоты в p - v и T - s координатах. Показано, что эффективность использования теплоты в основной камере сгорания выше, чем в форсажной камере сгорания.

Ключевые слова: Термодинамические циклы; газотурбинный двигатель; работа цикла; подвод теплоты.

Переход к сверхзвуковым скоростям полета самолета потребовал создания ГТД с увеличенной работой цикла ($l_{\text{ц}}$). Работа цикла, как следует из уравнения $l_{\text{ц}} = q_1 - q_2$, определяется, прежде всего, количеством теплоты (q_1), подводимым к рабочему телу в камере сгорания, и возрастает с увеличением последнего. Однако возможности увеличения подвода теплоты (q_1) в камеру сгорания ГТД ограничены максимально допустимой в цикле температурой газа перед газовой турбиной ($T_{3 \text{ max}}$), значение которой выбирается исходя из условий обеспечения достаточной прочности элементов конструкции газовой турбины (прежде всего рабочих лопаток турбины, которые при работе двигателя испытывают огромные нагрузки от действия центробежных и других сил в условиях сильного нагрева).

Задачу увеличения работы цикла в ГТД оказалось возможным решить путем использования в них цикла со ступенчатым подводом теплоты к рабочему телу. Такой цикл реализуется в турбореактивных двигателях с форсажной камерой сгорания (ТРДФ) и в двухконтурных турбореактивных двигателях с форсажной камерой сгорания (ТРДДФ). В этих ГТД выполнены две камеры сгорания: одна перед газовой турбиной (она называется основной камерой сгорания) и вторая за газовой турбиной (она называется форсажной камерой сгорания). При работе таких ГТД теплота к рабочему телу подводится дважды: сначала в основной камере сгорания (q_1), а затем дополнительно в форсажной камере сгорания ($q_{1\Phi}$).



Представим цикл со ступенчатым подводом теплоты графически в p - v и T - s координатах (рисунок 1).

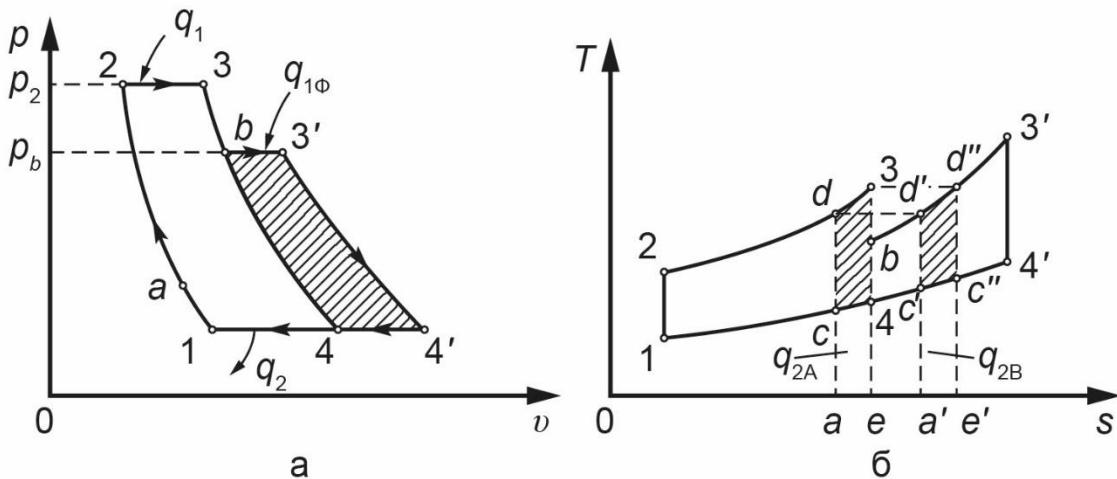


Рисунок 1. Графическое изображение в p - v и T - s координатах цикла со ступенчатым подводом теплоты

Цикл включает адиабатный процесс сжатия воздуха во входном устройстве и компрессоре (1-а-2), изобарный процесс подвода теплоты (q_1) в основной камере сгорания (2-3), адиабатный процесс расширения газа в газовой турбине (3- b), изобарный процесс дополнительного подвода теплоты ($q_{1\Phi}$) в форсажной камере сгорания (b-3'), адиабатный процесс расширения газа в реактивном сопле (3'-4') изобарный процесс отвода теплоты (q_2) в окружающую среду (4'-1).

При ступенчатом подводе теплоты значение работы цикла увеличивается. Это увеличение выражается дополнительной площадью 4- b -3'-4'-4.

Важно выяснить, одинакова ли эффективность использования теплоты в основной и форсажной камерах сгорания, а также какой цикл эффективнее – обычный цикл Брайтона или цикл со ступенчатым подводом теплоты.

Рассмотрим условно два элементарных цикла один из которых относится к циклу Брайтона с подводом теплоты (q_1) в основной камере сгорания (цикл А: с-д-3-4-с), а другой к циклу с подводом теплоты ($q_{1\Phi}$) в форсажной камере сгорания (цикл В: с'-д'-д"-с"-с'). Сравним эти циклы при условии, что $q_{1A} = q_{1B}$. Определим термические КПД циклов

$$\eta_{tA} = 1 - \frac{q_{2A}}{q_{1A}} = 1 - \frac{\text{пл. а-с-4-е-а}}{\text{пл. а-д-3-е-а}}; \quad (1)$$

$$\eta_{tB} = 1 - \frac{q_{2B}}{q_{1B}} = 1 - \frac{\text{пл. а'-с'-с"-е'-а'}}{\text{пл. а'-д'-д"-е'-а'}}. \quad (2)$$

В данных выражениях знаменатели равны (по условию), а $q_{2B} > q_{2A}$ (пл. а'-с'-с"-е'-а' > пл. а-с-4-е-а). Следовательно, $\eta_{tA} > \eta_{tB}$.

Таким образом, эффективность использования теплоты в основной камере сгорания выше, чем в форсажной камере сгорания. Физически это объясняется следующим. В основной камере сгорания теплота (q_{1A}) подводится к рабочему телу, имеющему большее давление, чем давление рабочего тела в форсажной камере сгорания ($p_2 > p_b$). Так как по условию принято, что $q_{1A} = q_{1B}$, то максимальные температуры рабочих тел в первом и втором циклах одинаковы. При последующем адиабатном расширении рабочих тел их температуры будут уменьшаться,



но в разной степени. Газ с большим начальным давлением расширится сильнее, а его температура в конце процесса расширения окажется меньшей. Благодаря чему он выносит в окружающую среду меньше теплоты. Это можно показать с помощью T - s диаграммы, сравнив площади, соответствующие q_{2A} и q_{2B} .

Исходя из изложенного, можно сказать, что цикл Брайтона будет эффективнее цикла со ступенчатым подводом теплоты, так как у последнего общий термический КПД оказывается меньше, чем термический КПД цикла Брайтона.

Список литературы:

1. Кобельков В.Н., Улас В.Д., Федоров Р.М. Термодинамика и теплопередача. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2004. 328 с.
2. Исаев С.И. Термодинамика. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 416 с.

