

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ю. М. Терещенко

Доктор технических наук, профессор*

Контактный тел.: (044) 406-75-93

Е. В. Дорошенко

Аспирант*

Контактный тел.: 068-351-30-39

Л. Г. Волянская

Кандидат технических наук, доцент*

*Кафедра авиационных двигателей**

И. А. Ластивка

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра высшей математики**

**Национальный авиационный университет
пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058

Розглянуто енергетичний баланс турбореактивного двигуна з урахуванням втрат енергії на акустичне випромінювання. Отримано залежності, що дозволяють визначити коефіцієнт корисної дії з урахуванням втрат енергії на акустичне випромінювання

Ключові слова: КПД, двухконтурний двигун, енергетичний баланс, акустичне випромінювання

Рассмотрен энергетический баланс турбореактивного двигателя с учетом потерь энергии на акустическое излучение. Получены зависимости, позволяющие определить коэффициент полезного действия с учетом потерь энергии на акустическое излучение

Ключевые слова: КПД, двухконтурный двигатель, энергетический баланс, акустическое излучение

The energy balance of a turbofan engine, taking into account energy losses due to acoustic emission are considered in this article. Obtaining dependencies allow to determine the efficiency of the light energy loss due to acoustic emission

Key words: efficiency, turbofan engine, energy balance, acoustic emission

1. Введение

В двухконтурных газотурбинных двигателях (ТРДД) рабочее тело термодинамического цикла участвует в создании силы тяги только первого контура. Тяга второго контура создается воздухом, не участвующим в термодинамических процессах цикла. При оптимизации термодинамических параметров ТРДД важным этапом является определение параметров вентилятора для расчетных условий полета на основе максимизации значения полного коэффициента полезного действия двигателя с учетом всех потерь.

Вентилятор является одним из основных источников акустического излучения ТРДД [1]. Для уменьшения акустической мощности устанавливаются системы шумоглушения, самой эффективной составляющей которых являются звукопоглощающие конструкции. Однако системы шумоглушения не уменьшают потери, связанные с акустическим излучением, которые составляют 0,1-0,3% от мощности вентилятора ТРДД [2]. Поэтому для более корректного расчета тяговой эффективности и топливной экономичности нужно учитывать потери на акустическое излучение вентилятора в энергетическом балансе ТРДД.

Цель работы

Целью работы является получение зависимостей, позволяющих оценивать влияние потерь энергии на акустическое излучение на коэффициент полезного действия ТРДД.

Основная часть

На рис. 1 представлена диаграмма энергетического баланса ТРДД с учетом потерь энергии, связанная с акустическим излучением основных источников шума двигателей с большой степенью двухконтурности.

На рис. 1 символом Q_0 обозначено количество теплоты, которое теоретически могло бы выделиться при полном сгорании топлива. Теплота Q_0 эквивалентна величине химической энергии, внесенной в двигатель с топливом.

В реальном процессе горения топлива в камере сгорания двигателя на нагрев продуктов сгорания топлива в воздухе расходуется теплота Q , которая меньше Q_0 из-за потерь вследствие неполного сгорания топлива и отвода части теплоты через корпус камеры сгорания, эти потери оцениваются коэффи-

циентом полноты сгорания топлива в камере сгорания $\eta = \frac{Q}{Q_0}$, откуда следует, что потери теплоты от неполноты сгорания равны $Q_0 - Q = (1 - \eta_r)Q_0$.

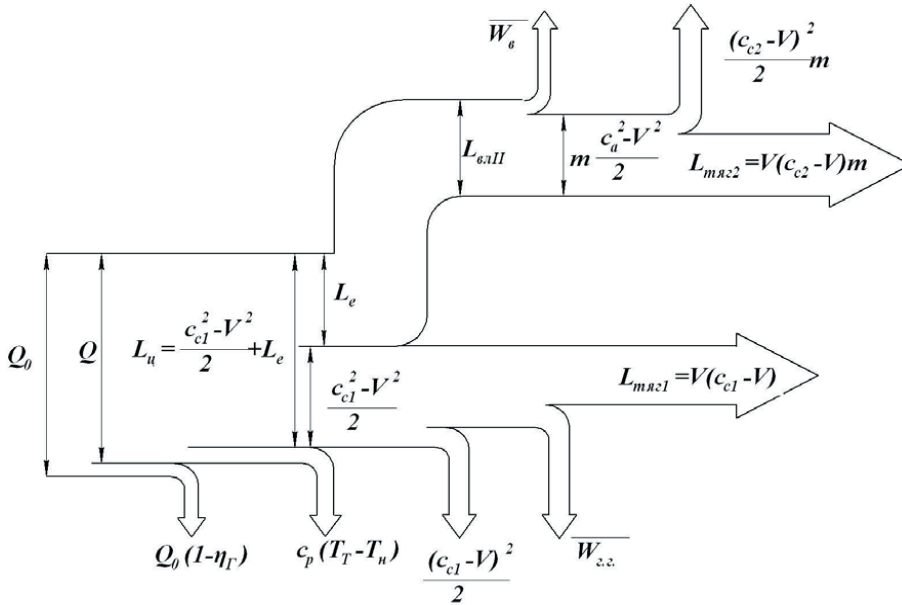


Рис. 1. Диаграмма энергетического баланса ТРДД с учетом потерь энергии на акустическое излучение

Рассмотрим другие виды потерь в процессе преобразования теплоты Q в тяговую работу: $c_p(T_T - T_H)$ - потери тепловой энергии из газового потока, исходящего из реактивного сопла двигателя; $\frac{(c_{cl} - V)^2}{2}$, $\frac{(c_{c2} - V)^2}{2} m$ - потери кинетической энергии газового потока; $\overline{W}_в$ - потери энергии на акустическое излучение вентилятора; $\overline{W}_{з.з.}$ - потери энергии на акустическое излучение газогенератора.

В данной работе рассмотрим более подробно учет потерь энергии на акустическое излучение вентилятора ТРДД. Для учета потерь на акустическое излучение вентилятора предлагается ввести коэффициент потерь энергии акустического излучения $\xi_{акБ} = \frac{W_{акБ}}{W_B}$, который показывает долю механической энергии вентилятора, которая переходит в акустическое излучение.

КПД вентиляторного степени двухконтурного двигателя без учета потерь энергии на акустическое излучение запишется в следующем виде:

$$\eta_{II} = \frac{c_{cl}^2 - V^2}{2 \cdot L_{кII}}, \text{ где } L_{вЛП} = \frac{L_e}{m}.$$

η_{II} - коэффициент полезного действия второго контура, учитывающий все гидравлические потери, возникающие при движении воздуха во втором контуре.

Работа сжатия во втором контуре запишется в следующем виде: $L_{вЛП} = \frac{c_{cl}^2 - V^2}{2} + L_{гII}$, где $L_{гII}$ - работа на преодоление всех гидравлических потерь во втором контуре двигателя в процессе сжатия воздуха.

КПД второго контура, характеризующий уровень потерь, определяется в виде:

$\eta_{II} = 1 - \xi_{гII} = 1 - \xi_{проф} - \xi_{втр} - \xi_{конц} - \xi_{рад}$, где $\xi_{проф} = \frac{L_r}{L_e}$ - профильные потери, обусловленные трением и влиянием пограничного слоя, образующегося на поверхности лопаток; $\xi_{рад} = \frac{\Delta L_{рад}}{L_e}$ - потери в радиальном зазоре; $\xi_{конц} = \frac{\Delta L_{конц}}{L_e}$ - концевые потери; $\xi_{втр} = \frac{\Delta L_{втр}}{L_e}$ - вторичные потери.

Профильные потери возникают при обтекании решеток реальным потоком воздуха, обусловлены трением и влиянием пограничного слоя, образующегося на поверхности лопаток. Концевые и вторичные потери возникают при перетекании воздуха через концы лопаток и образования вследствие этого вторичных течений в межлопаточных каналах рабочего колеса и направляющего аппарата. При течении воздуха в компрессоре на внутренней поверхности статора компрессора формируется пристенный пограничный слой. Работа, которая затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений при движении концевых частей лопаток в пристенном пограничном слое статора компрессора, характеризует потери в радиальном зазоре. Концевые потери и потери в радиальном зазоре зависят от величины радиального зазора между концевыми сечениями лопаток рабочего колеса и корпусом компрессора.

Таким образом $L_{вЛП} \cdot \eta_{II} = \frac{c_{cl}^2 - V^2}{2} G_{вЛП}$, где c_{cl} - скорость потока воздуха на выходе из второго контура; V - скорость потока воздуха на входе в двигатель.

Работу сжатия $L_{вЛП}$ вентиляторной степени двухконтурного двигателя уменьшается вследствие акустического излучения, поэтому энергетический баланс вентиляторного контура записывается в виде:

$$(G_{2II} L_{кII} - W_{акБ}) \cdot \eta_{II} = \frac{c_{cl}^2 - V^2}{2} G_{вЛП},$$

$$\text{или } G_{вЛП} L_{вЛП} (1 - \xi_{ак}) \cdot \eta_{II} = \frac{c_{cl}^2 - V^2}{2} G_{вЛП},$$

где $\xi_{ак} = \frac{W_{ак}}{G_{вЛП} L_{вЛП}}$ - коэффициент потерь энергии на акустическое излучение; $W_{акБ}$ - энергия акустического излучения вентилятора; $G_{вЛП}$ - расход воздуха во втором контуре; $G_{вЛП} L_{вЛП} = W_B$ - мощность вентилятора.

Для оценки потерь энергии на акустическое излучение введем энергетический коэффициент полезного действия вентилятора $\eta_{ак} = 1 - \xi_{ак}$.

На рис. 2 представлено сравнение экспериментальных данных коэффициента потерь энергии на акустическое излучение вентилятора двигателя Д-36 и расчетные данные.

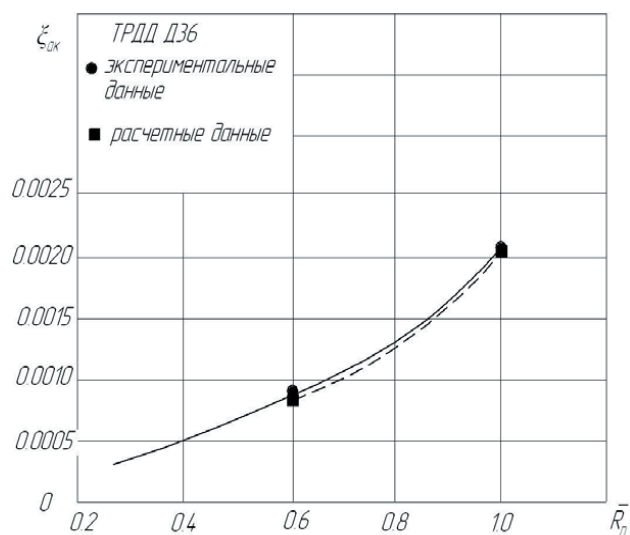


Рис. 2. Коэффициент потерь энергии на акустическое излучение для вентилятора ТРДД Д-36

Тогда $L_{внII} \cdot \eta_{II} \cdot \eta_{ак} = \frac{c_{сII}^2 - V^2}{2}$.

Скорость воздуха на выходе из внешнего контура:

$$c_{сII} = \sqrt{2L_{внII} \cdot \eta_{II} \cdot \eta_{ак} + V^2}.$$

При оптимальном распределении работы цикла между контурами $L_{внII} = \frac{L_{II}}{1+m}$, откуда получаем

$$c_{сII} = \sqrt{\frac{2 \cdot L_{II}}{1+m} \cdot \eta_{II} \cdot \eta_{ак} + V^2}$$

Соответственно, удельная тяга второго контура ТРДД при оптимальном распределении работы цикла:

$$R_{GII} = \sqrt{\frac{2 \cdot L_{II}}{1+m} \cdot \eta_{II} \cdot \eta_{ак} + V^2} - V.$$

Удельный расход топлива

$$C_R = \frac{3600 \cdot g_T}{(1+m)R_{G\Sigma}}, \text{ где } R_{G\Sigma} = \frac{R_I + R_{II}}{G_{в\Sigma}} = \frac{R_{G_I} + R_{G_{II}}}{1+m}.$$

Тогда удельный расход топлива с учетом акустического КПД вентилятора имеет следующий вид:

$$C_R = \frac{3600 \cdot g_T (1+m)}{(1+m)(R_{G_I} + R_{G_{II}})} = \frac{3600 \cdot g_T}{R_{G_I} + (\sqrt{\frac{2 \cdot L_{II}}{1+m} \cdot \eta_{II} \cdot \eta_{ак} + V^2} - V)}$$

Улучшение КПД второго контура ТРДД может быть обеспечено за счет аэродинамического совершенствования лопаточных венцов вентилятора [3]. В свою очередь совершенствование внутренней аэродинамики двигателя способствует также снижению интенсивности акустического излучения в источнике [4], что приведет к увеличению акустического КПД вентилятора.

Вывод

Для учета энергии акустического излучения в общем энергетическом балансе ТРДД и оценки воздействия акустического излучения на параметры вентилятора ТРДД впервые предложено акустический КПД вентилятора, применение которого позволяет более корректно определить тягу и удельный расход топлива двигателя. Получены расчетные зависимости, позволяющие определить удельную тягу и удельный расход топлива с учетом потерь энергии на акустическое излучение.

Литература

1. Терещенко, Ю.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / Ю.М. Терещенко, Л.Г. Волянская, Н.С. Кулик, В.В. Панин. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 500с.
2. Самохин, В.Ф. Курс лекций Шум ГТД [Текст] / В.Ф. Самохин. – М.: МАИ, 2007. – 152с.
3. Терещенко, Ю.М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров [Текст] / Ю.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1988. – 168с.
4. Терехов, А. Л. Современные методы снижения шума ГПА [Текст] / А.Л. Терехов, М.Н. Дробаха. – М.: «Недра», 2008. – 368с.