

УДК 621.45.01:681.5.015.44

О.В. ВЕДЕРНИКОВ<sup>1</sup>, С.В. ЕПИФАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ УЧЕТА ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯТОРОВ ТРДД ПО РАДИУСУ ПРИ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

Рассмотрены существующие методы раздельного задания параметров вентилятора по контурам: через соотношение работ  $l_{aII}/l_{aI}$ , через коэффициенты  $k_\pi$  и  $k_\eta$ , по линиям тока. Выявлены основные преимущества и недостатки каждого из методов и выработаны соответствующие рекомендации.

**вентилятор, характеристика вентилятора, степень двухконтурности, радиальная неравномерность, метод разделение параметров вентилятора по контурам, двумерный расчет вентилятора в составе двигателя**

### Введение

В настоящее время двухконтурные турбореактивные двигатели (ТРДД) занимают значительное место среди силовых установок летательных аппаратов. Область применения ТРДД постоянно расширяется, что ведет к увеличению номенклатуры двигателей данного типа. Жесткая конкуренция на рынке ТРДД вынуждает производителей оптимизировать процесс создания новых двигателей. Одним из важнейших этапов данного процесса является стадия предварительного расчета основных параметров двигателя. Точность полученных значений на данной стадии во многом определяет объем и трудоемкость дальнейших работ по разработке двигателя. Поэтому одной из важнейших задач является усовершенствование методик предварительного расчета с целью повышения его точности.

### 1. Формулирование проблемы

В настоящее время на стадии предварительного проектировочного расчета для определения оптимальных значений основных параметров двигателя зачастую используется одномерный расчет двигателя, так как он не требует больших затрат труда и времени. Однако такой расчет не позволяет учиты-

вать распределение параметров потока по радиусу вентилятора, что приводит к неточности при определении параметров воздуха на входе в наружный и внутренний контуры. Это, в свою очередь, влечет за собой погрешность определения основных параметров двигателя.

Поэтому для учета радиальной неравномерности потока за вентилятором необходимо описывать раздельно (в дальнейшем будем использовать термин «разделять») значения его параметров для наружного и внутреннего контуров.

### 2. Решение проблемы.

#### Существующие методы разделения параметров потока за вентилятором

**2.1. Метод разделения параметров вентилятора через отношение работ  $l_{aII}/l_{aI}$ .** Одним из методов учета радиальной неравномерности параметров потока за вентилятором является разделение его параметров через отношение работ  $l_{aII}/l_{aI}$ . Данный метод применяется специалистами ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» и ОАО «Мотор Сич».

В этом методе принимается, что заданная характеристика вентилятора справедлива для его периферийной части, работающей на наружный контур. Таким образом, вначале определяются параметры

воздуха на входе в наружный контур, а для внутреннего контура они находятся путем пересчета через заданное отношение работ  $l_{eII}/l_{eI}$ .

$$\frac{\pi_{eII}^* \frac{k-1}{k} - 1}{\pi_{eI}^* \frac{k-1}{k} - 1} = \frac{l_{eII}}{l_{eI}}. \quad (1)$$

Здесь принято  $\eta_{eI}^* = \eta_{eII}^*$ . Если необходимо учесть отличие  $\eta_{eI}^*$  от  $\eta_{eII}^*$ , то формула примет вид

$$\frac{\pi_{eII}^* \frac{k-1}{k} - 1}{\pi_{eI}^* \frac{k-1}{k} - 1} \cdot \frac{\eta_{eI}^*}{\eta_{eII}^*} = \frac{l_{eII}}{l_{eI}}. \quad (2)$$

Однако для каждого вновь разрабатываемого или уже существующего вентилятора значения отношений  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$  различны. К тому же они изменяются в зависимости от степени двухконтурности и приведенной частоты вращения ротора вентилятора. Поэтому основная сложность при применении данного метода заключается в определении отношений  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$  и задании их зависимости от режима работы двигателя.

**2.1.1. Способы определения отношений  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$ .** Для определения параметров на входе в наружный и внутренний контуры при одномерном расчете двигателя и задании параметров вентилятора с использованием данного метода в качестве исходных данных выступают значения отношений  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$ . Поэтому они должны быть заранее определены.

При проектировании ТРДД с вновь разрабатываемым вентилятором отношения  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$  могут быть определены с помощью двух- или трехмерного расчета. Двухмерный расчет обычно применяется на начальных этапах проектирования, когда принята предварительная геометрия вентилятора. Трехмерный расчет является более точным, однако требует больших затрат труда и времени. Поэтому его применяют на конечном этапе проектирования по уточненным геометрическим параметрам вентилятора.

При расчете ТРДД с ранее разработанным вентилятором значения отношений  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$  могут быть определены как с помощью двух- или трехмерного расчета по известной геометрии, так и на основании испытаний по замеренным параметрам  $P_{ex}^*$ ,  $T_{ex}^*$ ,  $P_{eII}^*$ ,  $T_{eII}^*$ ,  $P_{eI}^*$ ,  $T_{eI}^*$ . Каждый из данных методов имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому для большей достоверности желательно произвести расчет обоими методами и на основании их результатов уточнить значения отношений  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$ .

**2.1.2. Методы задания отношений  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$ .** Существует несколько способов задания отношений  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$ . Так, их можно представить в виде:

- констант;
- функций одной или нескольких переменных.

В первом случае в качестве констант обычно принимаются значения отношений  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$  на расчетном режиме. Этот способ является наиболее простым, но дает точные результаты лишь в этой одной расчетной точке, а по мере удаления от нее точность расчета падает.

При задании отношений  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$  в виде функций аппроксимируется изменение расчетных значений этих отношений вдоль линии рабочих режимов (ЛРР). Но при изменении условий полета ЛРР может сместиться, и точность расчета упадет. Это особенно актуально для двигателей с большой степенью двухконтурности. Таким образом, эти методы дают точные результаты при работе двигателя вдоль определенной ЛРР, а не только в одной рабочей точке, как первый способ. Однако представление отношений  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$  в виде функций по сравнению с заданием их в виде констант - гораздо более трудоемкий процесс.

**2.1.3. Анализ метода разделения параметров через отношения  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$ .** Для оценки эффективности метода разделения параметров через отношения  $l_{eII}/l_{eI}$  и  $\eta_{eII}^*/\eta_{eI}^*$  приведем пример расчета

характеристик вентилятора одного из двигателей, разрабатываемых ОАО «Мотор Сич», для значения степени двухконтурности  $m = 3$ .

Исследование выполнялось в несколько этапов:

- двумерный расчет параметров потока за вентилятором с целью определения суммарной характеристики вентилятора и расчетных характеристик частей вентилятора, работающих на наружный и внутренний контуры;

- определение отношений работ и КПД;

- аппроксимация полученных значений отношений;

- пересчет характеристик частей вентилятора из суммарной характеристики через соотношения работ и КПД;

- сравнение расчетной и пересчитанной характеристик.

По результатам двумерного расчета для были определены значения отношений  $l_{elII}/l_{elI}$  и  $\eta_{elII}^*/\eta_{elI}^*$ , представленные на рис. 1 и 2.

Из данных рисунков очевидно, что эти соотношения изменяются не только в зависимости от приведенной относительной частоты вращения, но и от суммарного расхода воздуха. Следовательно, если задавать их как функцию одного аргумента (относительной приведенной частоты вращения), эти зависимости будут различны для каждой линии рабочих режимов (ЛРР).

Для одной линии рабочих режимов значения соотношений  $l_{elII}/l_{elI}$  и  $\eta_{elII}^*/\eta_{elI}^*$  представлены на рис. 3.

В результате аппроксимации данных, представленных на рис. 3, были получены следующие функции:

$$\frac{l_{elII}}{l_{elI}} = -10,2n_{np}^3 + 27,6n_{np}^2 + 24,5n_{np} + 8,2; \quad (3)$$

$$\frac{\eta_{elII}^*}{\eta_{elI}^*} = -6,5n_{np}^3 + 18,2n_{np}^2 - 16,9n_{np} + 6,2 \quad (4)$$

и с их использованием произведен расчет характеристик частей вентилятора, работающих на различные контуры, из его суммарной характеристики.

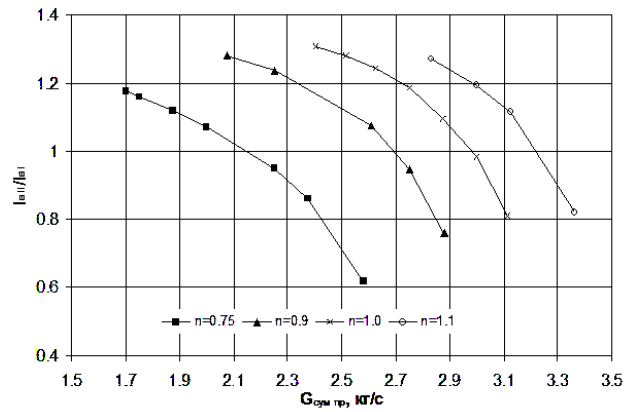


Рис. 1. Зависимость отношения работ  $l_{elII}/l_{elI}$  от суммарного расхода воздуха для различных значений относительной приведенной частоты вращения

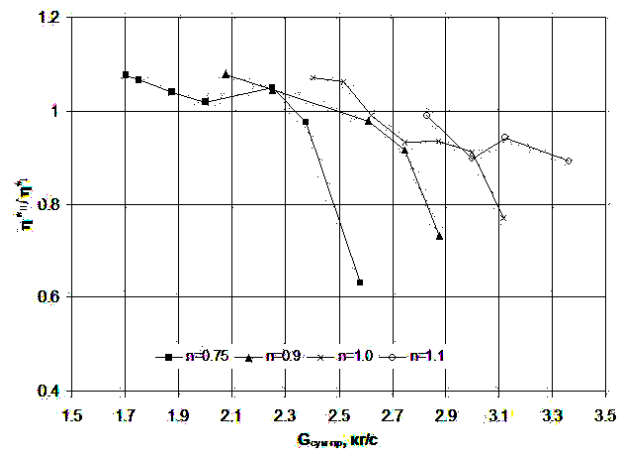


Рис. 2. Зависимость отношения  $\eta_{elII}^*/\eta_{elI}^*$  от суммарного расхода воздуха для различных значений относительной приведенной частоты вращения

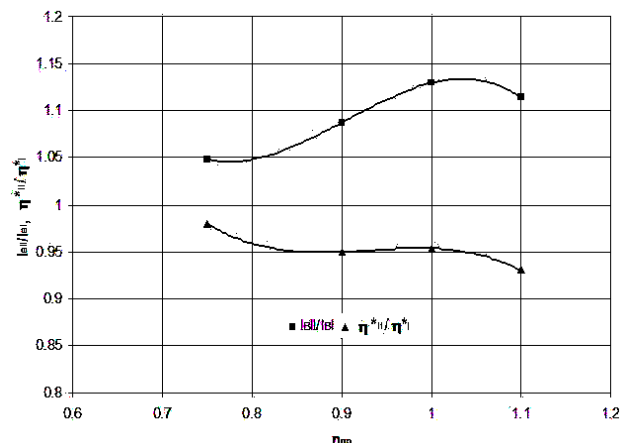


Рис. 3. Зависимость отношений от приведенной относительной частоты вращения

Полученные с помощью двумерного расчета и пересчитанные через отношения  $l_{elII}/l_{elI}$  и  $\eta_{elII}^*/\eta_{elI}^*$

характеристики представлены на рис. 4, 5 в относительном виде.

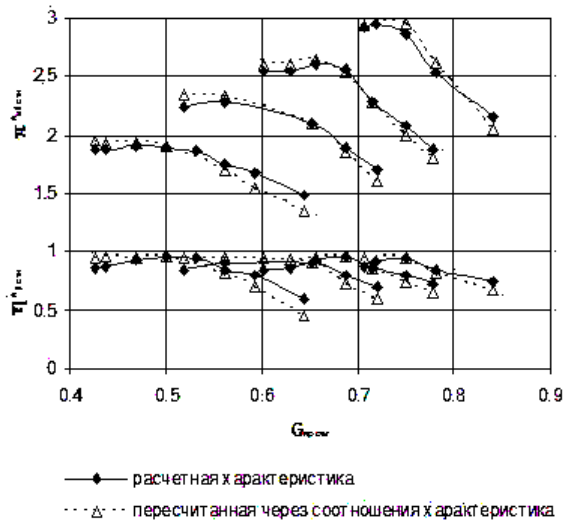


Рис. 4. Сравнение характеристик частей вентилятора, работающих на наружный контур

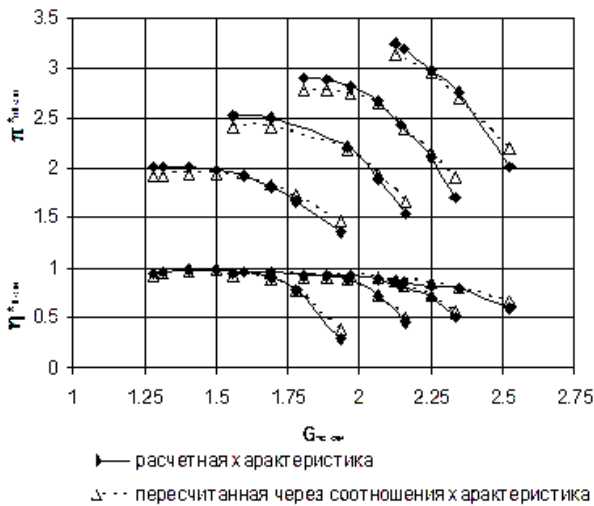


Рис. 5. Сравнение характеристик частей вентилятора, работающих на внутренний контур

Очевидно, что данные характеристики отличаются. Таким образом, данный метод применим лишь для предварительных расчетов. К тому же, определение отношений  $l_{el}/l_{e\Sigma}$  и  $\eta^*_{el}/\eta^*_{e\Sigma}$  является достаточно трудоемким процессом, требующим больших затрат времени.

Следовательно, для более точного расчета необходимо применять другие подходы к определению параметров потока на входе в наружный и внутренний контуры.

Таким образом, рассмотрев данный метод, можно сделать выводы:

- так как в данном методе характеристика части вентилятора, работающая на наружный контур, принимается равной суммарной характеристике вентилятора, то, очевидно, что более точные результаты будут получены для больших степеней двухконтурности; с уменьшением значений степени двухконтурности будет снижаться и точность результатов, полученных с помощью данного метода;

- область на характеристике, где данный метод дает точные результаты, существенно зависит от метода задания отношений  $l_{el}/l_{el}$  и  $\eta^*_{el}/\eta^*_{el}$  (константа, функция одной или нескольких переменных); однако, чтобы задать данные отношения как функцию от нескольких переменных, требуются большие затраты труда и времени;

- проведенные расчеты для степени двухконтурности  $m = 3$  показали, что характеристика части вентилятора, работающей на наружный контур, значительно отличается от полученной с помощью двумерного расчета; таким образом, для получения более точных результатов следует не принимать в качестве характеристики наружной части вентилятора его суммарную характеристику, а производить ее пересчет либо через отношения  $l_{el}/l_{e\Sigma}$  и  $\eta^*_{el}/\eta^*_{e\Sigma}$ , либо другим способом.

**2.2. Метод разделения параметров через коэффициенты  $k_\pi$  и  $k_\eta$ .** По второму методу разделение параметров внутреннего и наружного контуров производится исходя из следующих соотношений:

$$\pi_{B\Sigma}^* = \frac{G_{BI} \cdot \pi_{BI}^* + G_{BII} \cdot \pi_{BII}^*}{G_{B\Sigma}}; \quad (5)$$

$$\eta_{B\Sigma}^* = \frac{G_{BI} \cdot \eta_{BI}^* + G_{BII} \cdot \eta_{BII}^*}{G_{B\Sigma}}; \quad (6)$$

$$k_\pi = \frac{\pi_{BI}^* - 1}{\pi_{BII}^* - 1}; \quad (7)$$

$$k_{\eta} = \frac{\eta_{BI}^*}{\eta_{BII}^*}. \quad (8)$$

Значения коэффициентов  $k_{\pi}$  и  $k_{\eta}$  определяются в соответствии с полученными в расчете по высоте лопасти параметрами потока воздуха.

Очевидно, что данный метод аналогичен изложенному выше.

Главным его недостатком является то, что область на характеристике, где данный способ дает точные результаты, существенно зависит от метода задания коэффициентов  $k_{\pi}$  и  $k_{\eta}$  (константа, функция одной или нескольких переменных). Однако задание коэффициентов в виде функции от нескольких переменных является очень трудоемким.

**2.3. Разделение параметров вентилятора по линиям тока.** Третий способ разделения параметров заключается в определении характеристик частей вентилятора, работающих на различные контуры, по результатам двумерного расчета вентилятора по линиям тока. Разделение производится отдельно для каждой степени двухконтурности, после чего полученные характеристики необходимо аппроксимировать и заложить в математическую модель двигателя.

Основным преимуществом данного метода по сравнению с первыми двумя является то, что он позволяет точно определять параметры воздуха за вентилятором в любой точке характеристики.

Однако при проектировании нового двигателя с заранее не известной степенью двухконтурности разработчику приходится многократно производить такие трудоемкие операции, как разделение параметров, аппроксимация характеристик, а также их подключение к математической модели двигателя.

Это делает применение данного метода в практических целях весьма затруднительным.

## Заключение

Рассмотрев применяемые методы разделения параметров вентилятора, можно сделать вывод о том, что необходимо производить двумерный расчет вентилятора в составе двигателя.

Такое решение позволит значительно повысить точность получаемых результатов, а также уменьшить затраты труда и времени в процессе выбора оптимальных параметров проектируемого ТРДД.

Эти преимущества достигаются с помощью исключения из процесса проектирования таких этапов, как:

- аппроксимация характеристики вентилятора;
- определение значений коэффициентов разделения параметров;
- подключение полученных зависимостей к модели двигателя.

## Литература

1. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей / Под ред. С.М. Шляхтенко, В.А. Сосунова. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
2. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1. – М.: Машиностроение, 1977. – 312 с.
3. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 2. – М.: Машиностроение, 1978. – 336 с.
4. Кулагин В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. Кн. 3. – М.: Машиностроение, 2005. – 461 с.

*Поступила в редакцию 4.06.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.