

УДК 629.735

А. И. ГОРЮНОВ, И. М. ГОРЮНОВ

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗЛОВ ГТД И ЭУ

Рассмотрены свойства параметров рабочего тела на эксплуатационных режимах ГТД и ЭУ. Проведен анализ существующих методик расчета, позволяющих учитывать неравномерность параметров потока с использованием различных программных средств. *Газотурбинные двигатели; энергетические установки; неравномерность потока; математическое моделирование*

Создание новых изделий авиационной техники не обходится без комплексного математического проектирования. Различные программные средства позволяют выполнить проектные расчеты с достаточно высокой точностью. Однако существует разница между изделием, полученным «на компьютере» и «в металле».

Одним из факторов, наряду с отклонением геометрических размеров, влияющих на отличие реальных параметров авиационного ГТД и ЭУ от проектных, является неравномерность распределения параметров потока в проточной части двигателя. При проектировании предыдущих поколений авиационных двигателей необходимый уровень точности при математическом моделировании ГТД позволял использовать в расчетах осредненные параметры потока в проточной части. Однако необходимость выполнения противоречивых требований при создании современного многорежимного двигателя требует более качественного и точного моделирования параметров узлов ГТД.

ПРИМЕНЯЕМЫЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГТД

В настоящее время на всех этапах создания авиационных ГТД и энергетических установок используются методы математического моделирования и системы САПР. Используемые системы, в целях резкого сокращения сроков (в 2–4 раза), а также стоимости (до 10 раз) создания современных конкурентоспособных двигателей в авиадвигателестроении [1], должны быть развиты в современные методологии

и технологии проектирования, конструирования и производства авиационных двигателей с гарантированным качеством.

В основе систем моделирования лежат междисциплинарные многоуровневые робастные математические модели процессов в двигателе и его конструкционной прочности, полученные аналитическим и экспериментальным путем. Большой объем разработок в этом направлении отражен в [2].

Разработаны и используются системы моделирования процессов в двигателях, имеющие различный уровень сложности (GASTURB, GSP, EcosimPro, комплекс ЦИАМ, ГРАД, DVIGw [3–8]). Эти программные комплексы позволяют выполнять термогазодинамический расчет авиационных ГТД и ЭУ, расчет характеристик на установившихся и переходных режимах. В большинстве мощных систем реализован модульный принцип, т. е. собственно ГТД формируется из модулей, которые являются математическими моделями узлов (входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина и др.) с соответствующей библиотекой их характеристик. Характеристики узлов могут учитывать влияние параметров, описывающих неравномерность потока, на характеристики, например, влияние угла установки входного направляющего аппарата в компрессоре, влияние угла входной закрутки через приведенную скорость.

КРИТЕРИИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОТОКА

Неравномерность потока характеризуется определенным распределением таких параметров потока, как скорость, давление, температуры, углы потока. Изменение этих параметров может быть вдоль радиуса (рис. 1), в окружном

направлении (рис. 2) или же комбинированным. Для упрощения анализа очень сложной картины течения обычно рассматривает отдельно неравномерности потока в радиальном и окружном направлениях.

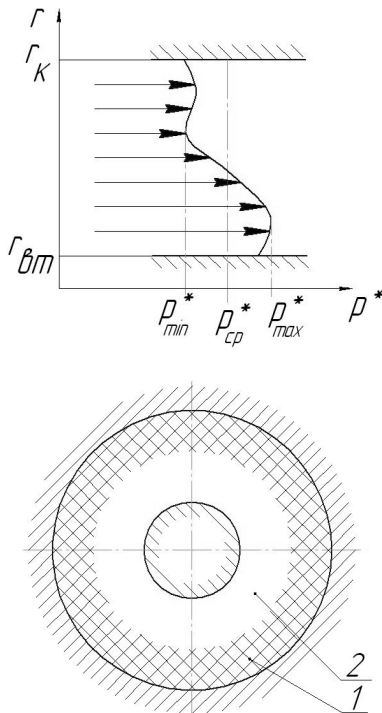


Рис. 1. Радиальная неравномерность

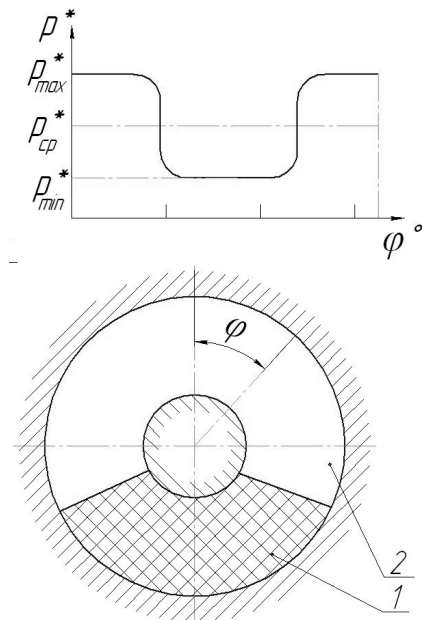


Рис. 2. Окружная неравномерность

Неравномерность поля скоростей

$$\overline{\delta c} = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{c_{\text{cp}}},$$

где c_{\max} и c_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значение скорости потока; c_{cp} – осредненное по площади сечения значение скорости.

Неравномерность поля полных давлений:

$$\overline{\delta p^*} = \frac{p_{\max}^* - p_{\min}^*}{p_{\text{cp}}^*},$$

где p_{\max}^* и p_{\min}^* – соответственно максимальное и минимальное значение полного давления; p_{cp}^* – осредненное по площади сечения значение давления.

Неравномерность поля температур

$$\overline{\delta T^*} = \frac{T_{\max}^* - T_{\min}^*}{T_{\text{cp}}^*},$$

где T_{\max}^* и T_{\min}^* – соответственно максимальное и минимальное значение температуры потока; T_{cp}^* – осредненное по площади сечения значение температуры.

Для оценки влияния неоднородности потока на устойчивость работы двигателя используется интегральный параметр W

$$W = \overline{\Delta \sigma_0} + \varepsilon,$$

где $\overline{\Delta \sigma_0}$ – окружная неравномерность потока; ε – среднее квадратичное значение пульсации полного давления, оценивающее крупномасштабную турбулентность.

В настоящее время для расчета и анализа изменения неравномерности потока в узлах применяются программные комплексы трехмерного моделирования, например, Ansys / Flotran.

В большинстве существующих поэлементных ММ ГТД используются осредненные параметры потока. Такая ситуация может иметь место на одном (как правило, расчетном) или нескольких режимах работы ГТД. При изменении режима работы двигателя изменяется неравномерность потока на входе в узлы двигателя, которая в свою очередь влияет на характеристики узлов и двигателя в целом.

Созданная немецкими разработчиками система GAS-TURB сочетает в себе простоту интерфейса и сложность проводимых многопараметрических расчетов. В ней реализована возможность учета входной неравномерности потока (неравномерность поля давления и поля температур).

Условно в расчетной модели принимается, что неоднородность поля параметров задается в выбранном секторе, ограниченным углом φ

на входе в двигатель. Для описания поведения компрессора также принимается теория о параллельных компрессорах.

Неравномерность поля полных давлений для выбранного угла φ , характеризующего сектор, учитывается поправочным коэффициентом

$$DC_{\varphi} = \frac{P_{\text{mean}} - P_{\varphi \text{ sector}}}{P - P_s}.$$

Этот коэффициент определен исходя из эксплуатации и характеристик входного устройства. Разумные числа для коэффициента искажения давления находятся в диапазоне 0... 1.5.

На компрессоры далее по тракту будет влиять температурное искажение даже в случае, когда задана на входе лишь неравномерность давления.

Поправочный коэффициент влияния температурной неравномерности

$$DT_{\varphi} = \frac{T_{\varphi \text{ sector}} - T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}}}.$$

Для получения адекватных результатов в расчете следует использовать значения DT_{φ} из диапазона 0... 0.1.

Полная температура в расчетном секторе $T_{2,\alpha}$

$$T_{2,\alpha} = \frac{\left(1 - \frac{\alpha}{360^\circ}\right) \cdot (1 + DT_{\alpha})}{1 - \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot (1 + DT_{\alpha})} \cdot T_2.$$

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГТД

Неравномерность потока не является особенностью одного узла двигателя, это присуще всем элементам по газодинамическому тракту. Неравномерность бывает как внешняя (свойство потока за пределами двигателя, параметры на входе), так и внутренняя (влияние рабочих колес и стоек в потоке). В дальнейшем поле параметров рабочего тела может выравниваться либо же стать еще более неравномерным.

В системе математического моделирования DVIGwT поток рабочего тела характеризуется следующими параметрами:

b – влагосодержание воздуха в рабочем теле, кг влаги/кг вл. воздуха;

p^* – давление рабочего тела, кПа;

α – коэффициент избытка воздуха, [-];

G – расход рабочего тела, кг/с;

T^* – температура рабочего тела, К.

Часто вместо изменения поля скоростей рассматривают степень неравномерности поля давлений, а с учетом крупномасштабной турбулентности переходят к использованию интегрального параметра W , поэтому для учета неравномерности вводятся дополнительные параметры потока: W – интегральный параметр; α – угол закрутки потока; $\overline{\delta T^*}$ – неравномерность поля температур.

Связь параметров неравномерности на выходе и входе предлагается описывать соотношениями вида:

$$W_2 = W_1 \cdot \overline{W},$$

$$\overline{W} = f(\Pi, \delta G, K),$$

где Π – режимный параметр (приведенная частота вращения или приведенный расход воздуха); δG – относительный расход отбираемого или подводимого рабочего тела; K – параметр, характеризующий конструкцию узла.

Для каждой конструктивной схемы узла двигателя задается своя зависимость относительного интегрального параметра \overline{W} от режимного параметра Π .

Учет влияния неравномерности параметров потока рабочего тела на характеристики узлов разумнее начинать с входа в двигатель. Неравномерность потока во входном устройстве оказывает влияние на коэффициент восстановления полного давления и учитывается введением поправки

$$\sigma_{\text{вх}} = \sigma_{\text{вх}} \cdot \delta\sigma_{\text{вх}},$$

где $\delta\sigma_{\text{вх}}$ – поправка на коэффициент восстановления полного давления во входном устройстве

$$\delta\sigma_{\text{вх}} = f(W, \alpha, \overline{\delta T^*}, \Pi, K).$$

Остаточная неравномерность на выходе из входного устройства и неосевой вход в компрессор, связанный с закруткой потока, приводят к изменению характеристики компрессора, а именно к смещению границы устойчивости (рис. 3), снижению КПД, снижению приведенного расхода воздуха [9], поэтому в ММ компрессора необходимо вводить соответствующие поправки на параметры в точке образцования характеристики компрессора, учитывающие влияние неравномерности потока на КПД, степень повышения полного давления, приведенный расход воздуха и границу газодинамической устойчивости.

$$\begin{aligned}\eta_k^* &= \eta_{kx}^* \cdot \delta\eta_k^*, \\ \pi_k^* &= \pi_{kx}^* \cdot \delta\pi_k^*, \\ G_{в.пр} &= G_{в.прx} \cdot \delta G_{в.пр}, \\ \left(\frac{\pi_k^*}{G_{в.пр}}\right)_{гр} &= \left(\frac{\pi_{kx}^*}{G_{в.прx}}\right)_{грx} \cdot \delta\left(\frac{\pi_k^*}{G_{в.пр}}\right)_{гр},\end{aligned}$$

где индекс «х» относится к параметрам, снятым с характеристики компрессора;

$$\delta\eta_k^*, \delta\pi_k^*, \delta G_{в.пр} \cdot \delta\left(\frac{\pi_k^*}{G_{в.пр}}\right)_{гр} = f(W, \alpha, \overline{\delta T^*}, \Pi, K).$$

Несмотря на то, что компрессор является многоступенчатым и осевым с наличием спрямляющего аппарата, на выходе может присутствовать неоднородность потока.

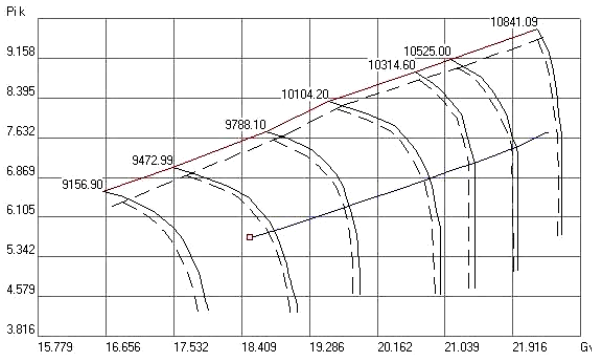


Рис. 3. Влияние неравномерности потока на входе на характеристику компрессора

Входная неравномерность потока влияет на гидравлическое сопротивление камеры сгорания. В связи с этим вводится поправка на коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания

$$\sigma_{кc} = \sigma_{кc} \cdot \delta\sigma_{кc},$$

где $\delta\sigma_{кc}$ – поправка на коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания

$$\delta\sigma_{кc} = f(W, \alpha, \overline{\delta T^*}, \Pi, K).$$

В турбине влияние неравномерности параметров потока на характеристики учитывается аналогично компрессору

$$\begin{aligned}\eta_T^* &= \eta_T^* \cdot \delta\eta_T^*, \\ \pi_T^* &= \pi_T^* \cdot \delta\pi_T^*, \\ A_T &= A_T \cdot \delta A_T,\end{aligned}$$

где индекс «х» относится к параметрам, снятым с характеристики турбины;

$$\delta\eta_T^*, \delta\pi_T^*, \delta A_T = f(W, \alpha, \overline{\delta T^*}, \Pi, K).$$

В переходных каналах влияние неоднородности потока сказывается на коэффициенте восстановления полного давления и учитывается поправкой

$$\sigma_k = \sigma_k \cdot \delta\sigma_k,$$

где $\delta\sigma_k$ – поправка на коэффициент восстановления полного давления в канале

$$\delta\sigma_k = f(W, \alpha, \overline{\delta T^*}, \Pi, K).$$

В выходном устройстве влияние неоднородности потока сказывается на коэффициентах расхода и скорости, учитываются соответствующими поправками

$$\mu_c = \mu_c \cdot \delta\mu_c,$$

$$\varphi_c = \varphi_c \cdot \delta\varphi_c,$$

где $\delta\mu_c, \delta\varphi_c$ – поправки на коэффициент расхода и скорости выходного устройства

$$\delta\mu_c, \delta\varphi_c = f(W, \alpha, \overline{\delta T^*}, \Pi, K).$$

ВЫВОДЫ

Внедрение в математическую модель дополнительных параметров, характеризующих неравномерность потока рабочего тела в различных узлах двигателя, позволит повысить точность расчетов, сократить затраты на создание нового двигателя.

Предложенная методика позволяет оценить влияние неравномерности потока на характеристики узлов и двигателя, определить запас газодинамической устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы развития двигателей для магистральных самолетов гражданской авиации / А. И. Ланшин [и др.] // Конверсия в машиностроение. 2005. № 4–5. С. 22–31.
2. Цховребов М. М. Газотурбинные и комбинированные двигатели для самолетов // ЦИАМ 2001–2005. Основные результаты научно-технической деятельности. Т. 1 / Под общ. науч. ред. В. А. Скибина, В. И. Солонина, М. Я. Иванова. М.: ЦИАМ, 2005. С. 11–13.
3. Visser W. P. J., Broomhead M. J. GSP, a generic object-oriented gas turbine simulation environment [Электронный ресурс] // NLR Technical Publication NLR-TP-2000-267, 21 p (<http://www.gspteam.com>).
4. Научный вклад в создание авиационных двигателей. Кн. 1 / Под общ. науч. ред. В. А. Скибина и В. И. Солонина. М.: Машиностроение, 2000. 725 с.
5. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учеб. Кн. 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных

ГТД / В. В. Кулагин [и др.]. М.: Машиностроение, 2005. 464 с.

6. **Горюнов И. М.** Термогазодинамические расчеты ГТД и теплоэнергетических установок с использованием системы DVIGwT // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 7, № 1 (14). С. 61–70.

7. **Jose Javier Alvarez.** Simulation of compressible internal flow systems with EcosimPro / Jose. Javier Alvarez // 1^a Reunion de Usuarios de EcosimPro, UNED. Madrid. May 3–4, 2001. 7 p. [Электронный ресурс] (<http://innr.ecosimpro.com>).

8. **Бойко Л. Г., Карпенко Е. Л.** Метод расчета характеристик турбовального двигателя с повенцовым описанием многоступенчатого осевого компрессора // Вестник двигателестроения. 2007. № 3. С. 143–146.

9. **Нечаев Ю. Н., Федоров Р. М.** Теория авиационных гозотурбинных двигателей. Ч. I. М.: Машиностроение, 1977. 312 с.

ОБ АВТОРАХ



Горюнов Алексей Иванович, студ. каф. авиац. двиг. Иссл. в обл. рабочих процессов в авиац. ГТД, разработки матем. моделей сложн. техн. объектов.



Горюнов Иван Михайлович, проф. той же каф., зав. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1974). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. автоматизации проектирования, доводки, изготовления и эксплуатации ГТД и ЭУ.