

Профилирование дозвуковых воздухозаборников двухконтурных турбореактивных двигателей

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Изложен усовершенствованный метод определения основных параметров воздухозаборников ТРДД на этапе эскизного проектирования самолета. При его разработке устранены процедуры подбора параметров из рекомендуемого диапазона, что позволило увеличить оперативность выполнения расчетов и понизить требуемую для этого квалификацию исполнителей. Метод может быть использован при реальном эскизном проектировании, выполнении исследований по оптимизации параметров авиационных силовых установок, а также выполнении курсовых и дипломных проектов.

Ключевые слова: воздухозаборник, профилирование, эскизное проектирование.

Введение

Расчет основных параметров воздухозаборника — необходимый и весьма ответственный этап проектирования силовой установки практически любого самолета. Такие проекторочные расчеты выполняют многократно: варьируют режим полета, ряд проектных параметров (включая компоновку силовой установки) в целях отыскания наиболее эффективного варианта, при уточнении исходных данных по мере развития проекта и выполнения дополнительных экспериментальных исследований. Кроме того, необходимо проанализировать работу воздухозаборников на различных режимах полета, при различных углах атаки и возможных углах скоса потока, а также в аварийных и нештатных ситуациях. Особенно многочисленны итерации на этапе эскизного проектирования. Поэтому разработка достаточно простого и быстро осуществимого при ограниченных исходных данных метода такого расчета, позволяющего сократить затраты времени и интеллектуальных ресурсов на выполнение эскизного проектирования воздухозаборников будущего самолета, — непростая и весьма **актуальная** задача. Этот же метод обеспечивает достаточную точность для выполнения курсовых и дипломных проектов.

Обычно используемые для этих целей алгоритмы [1-6] представляют собой более или менее радикальное развитие общепринятого метода, изложенного в работе [7]. Однако их практическое применение в существующем виде требует *подбора* ряда параметров, что существенно осложняет оперативное получение достоверных результатов, во всяком случае значительно увеличивает затраты времени и интеллектуальных ресурсов на эскизное проектирование. Кроме того, такой подход требует высокой квалификации исполнителей. Разработка и апробация четких алгоритмов расчетного определения этих параметров составляют **цель** проведенной работы, результаты которой кратко изложены в данной статье.

1. Основной алгоритм эскизного проектирования воздухозаборника

Кратко рассмотрим основной алгоритм эскизного проектирования воздухозаборника, конкретизировав место в нем разработанных алгоритмов и их информационное взаимодействие с другими этапами расчета. В минимальный комплект исходных данных [1] для эскизного проектирования воздухозаборников обычно

$$\beta = \frac{\pi K_\beta}{180} \sqrt{\frac{1}{V_e} - 1}. \quad (3)$$

Коэффициент K_β зависит от формы воздухозаборника при виде спереди. Для круглых воздухозаборников $K_\beta = 22$.

Для построения «скелетной» линии используют уравнение эллипса, большая полуось которого равна $L + L_1$, а меньшая — $D_{M_0}/2$ [1]:

$$\frac{x^2}{(L + L_1)^2} + \frac{y^2}{(D_{M_0}/2)^2} = 1. \quad (4)$$

Внешний обвод профилируют [1] по эллипсу с полуосями L_δ и δ . Ординаты этого эллипса откладывают по нормали к «скелетной» линии

$$\frac{x_\delta^2}{L_\delta^2} + \frac{y_\delta^2}{\delta^2} = 1. \quad (5)$$

Радиус кривизны входной кромки приближённо принимают [1]

$$\rho_{min} = K_1 \sqrt{F_e}, \quad K_1 = 0,04 \dots 0,05. \quad (6)$$

Диаметр миделя мотогондолы задают [1] как

$$D_M = K_2 D_{об}, \quad K_2 = 1,2 \dots 1,3. \quad (7)$$

Полуоси L_δ и δ определяют [1] по соотношениям

$$\delta = \frac{\rho_{min}}{\bar{\delta}}, \quad L_\delta = \frac{\delta}{\bar{\delta}}, \quad \bar{\delta} = 0,1 \dots 0,25. \quad (8)$$

Полуоси эллипса «скелетной» линии рассчитывают по формулам [1]

$$D_{M_0} = D_M - 2\delta, \quad L = \frac{D_{M_0}^2 - D_e^2}{2D_e \operatorname{tg} \beta}, \quad L_1 + L = \frac{L}{\sqrt{1 - (D_e/D_{M_0})^2}}. \quad (9)$$

Опытным путем установлено, что для хорошей работы воздухозаборника на месте (при нулевой скорости набегающего потока) рационально обеспечить [1] площадь минимального сечения

$$F_{min} = K_4 F_e, \quad K_4 = 0,8 \dots 0,9, \quad (10)$$

а радиус кривизны входной кромки

$$R_1 = \frac{D_e - D_{min}}{2(1 - \sin \beta)}. \quad (11)$$

Окончательно принимают [1] большее из рассчитанных значений радиуса кривизны входной кромки: $R = \max\{\rho_{min}, R_1\}$.

Профилирование внутренних обводов выполняют [1] по одному из известных законов: $dP/dx = \text{const}$ или $dV/dx = \text{const}$.

2. Расчетное определение параметра $\bar{\delta}$

В приведенном общепринятом алгоритме длина воздухозаборника L никак не связана с размером большей полуоси эллипса «скелетной» линии L_δ . Практически при $L_\delta < L$ это приводит к тому, что в миделевом сечении воздухозаборни-

ка обечайка не параллельна его оси, а имеет с ней некоторый угол. Для избежания такой ситуации рационально записать условие

$$L_{\delta} \leq L. \tag{12}$$

Записав выражения для L_{δ} и L с учётом (6)–(9), получим

$$L_{\delta} = \frac{\delta}{\delta} = \frac{\rho_{min}}{\delta^2} = \frac{\sqrt{\pi K_1 D_e}}{2\delta^2};$$

$$L = \frac{\left(K_2 D_{\delta\delta} - 2 \frac{\rho_{min}}{\delta}\right)^2 - D_e^2}{2D_e \operatorname{tg}\beta} = \frac{\left(K_2 D_{\delta\delta} - K_1 \sqrt{\pi} \frac{D_e}{\delta}\right)^2 - D_e^2}{2D_e \operatorname{tg}\beta}. \tag{13}$$

Таким образом, условие (12) может быть представлено в виде

$$\frac{\sqrt{\pi K_1 D_e}}{\delta^2} \leq \frac{\left(K_2 D_{\delta\delta} - K_1 \sqrt{\pi} \frac{D_e}{\delta}\right)^2 - D_e^2}{2D_e \operatorname{tg}\beta},$$

что приводит к квадратичному неравенству относительно $\bar{\delta}$:

$$\bar{\delta}^2 - \frac{2\sqrt{\pi K_1 K_2 D_{\delta\delta} D_e}}{K_2^2 D_{\delta\delta}^2 - D_e^2} \bar{\delta} + \frac{\pi K_1^2 D_e^2 - \sqrt{\pi K_1 D_e^2 \operatorname{tg}\beta}}{K_2^2 D_{\delta\delta}^2 - D_e^2} \geq 0. \tag{14}$$

Корни соответствующего уравнения определяют по известной формуле

$$\bar{\delta}_{1,2} = \frac{\sqrt{\pi K_1 K_2 D_{\delta\delta} D_e}}{K_2^2 D_{\delta\delta}^2 - D_e^2} \mp \sqrt{\frac{\pi K_1^2 K_2^2 D_{\delta\delta}^2 D_e^2}{(K_2^2 D_{\delta\delta}^2 - D_e^2)^2} - \frac{\pi K_1^2 D_e^2 - \sqrt{\pi K_1 D_e^2 \operatorname{tg}\beta}}{K_2^2 D_{\delta\delta}^2 - D_e^2}}, \tag{15}$$

а решение неравенства (14)

$$\bar{\delta} \in (-\infty; \bar{\delta}_1] \cup [\bar{\delta}_2; +\infty). \tag{16}$$

Из выражений (13) и (15) видно, что для уменьшения длины воздухозаборника желательно выбирать максимальное значение $K_1 = 0,05$, минимальное значение $K_2 = 1,2$ (последнее также предпочтительно для уменьшения миделя воздухозаборника) и минимальное значение $\bar{\delta}$.

Добавив к найденным соотношениям рекомендации $\bar{\delta} \in [0,1; 0,25]$ из книги [1], получим следующие соотношения для выбора величины $\bar{\delta}$ (рис. 2):

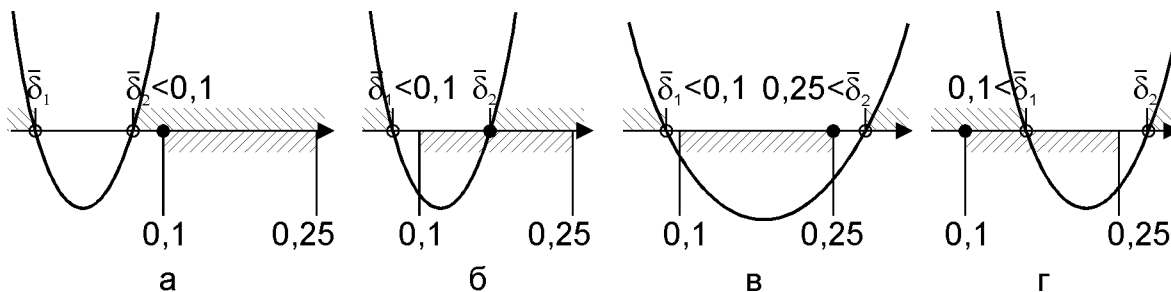


Рис. 2. Выбор $\bar{\delta}$ (верхняя штриховка соответствует диапазону, определенному по формуле (16), а нижняя — допустимому диапазону)

$$\bar{\delta} = \begin{cases} 0,1; & \bar{\delta}_2 < 0,1; \\ \bar{\delta}_2; & (\bar{\delta}_1 < 0,1) \wedge (0,1 \leq \bar{\delta}_2 \leq 0,25); \\ 0,25; & (\bar{\delta}_1 < 0,1) \wedge (0,25 < \bar{\delta}_2); \\ 0,1; & 0,1 < \bar{\delta}_1. \end{cases} \quad (17)$$

3. Расчетное определение относительной скорости во входном сечении \bar{V}_e

При выборе относительной скорости во входном сечении необходимо учитывать множество факторов. В данной работе проанализировано только влияние \bar{V}_e на длину воздухозаборника. Для сокращения потерь трения и снижения массы воздухозаборника желательно, чтобы его длина была минимальной, однако при этом возрастают потери в диффузоре. Анализируя реальные конструкции воздухозаборников, можно заметить, что отношение длины воздухозаборника к диаметру входа двигателя составляет

$$K_D = \frac{L}{D_{\text{об}}} = 0,5 \dots 1,5. \quad (18)$$

Если выразить длину воздухозаборника из формул (1)–(9) и принять плотность воздуха с учётом сжимаемости по среднему значению \bar{V}_e , то получим

$$K_D D_{\text{об}} = L = \frac{D_{M_0}^2 - D_e^2}{2 D_e \operatorname{tg} \beta} = \frac{1}{2 \operatorname{tg} \beta} \sqrt{\frac{\pi \rho_{\text{сж}} V_H \bar{V}_e}{4 G_6}} \left[D_{M_0}^2 - \frac{4 G_6}{\pi \rho_{\text{сж}} V_H \bar{V}_e} \right].$$

Поскольку угол притекания существенно меньше 45° , можно с вполне допустимой для эскизного проектирования точностью заменить тангенс угла притекания самим углом. Тогда рассматриваемое соотношение примет вид

$$K_D D_{\text{об}} = \frac{180}{2 \pi K_\beta} \sqrt{\frac{\bar{V}_e}{(1 - \bar{V}_e)}} \frac{\pi \rho_{\text{сж}} V_H \bar{V}_e}{4 G_6} \times \left[D_{M_0}^2 - \frac{4 G_6}{\pi \rho_{\text{сж}} V_H \bar{V}_e} \right].$$

Возведя обе части уравнения в квадрат (чтобы избавиться от радикала), приходим к квадратному уравнению относительно \bar{V}_e :

$$\bar{V}_e^2 + 2k\bar{V}_e + c = 0,$$

$$\text{где } k = \frac{G_6 (\pi^2 K_D^2 K_\beta^2 D_{\text{об}}^2 - 16200 D_{M_0}^2)}{4050 \pi \rho_{\text{сж}} V_H D_{M_0}^4}, \quad c = \frac{16 G_6^2}{\pi^2 \rho_{\text{сж}}^2 V_H^2 D_{M_0}^4} - \frac{\pi K_D^2 K_\beta^2 G_6 D_{\text{об}}^2}{2025 \rho_{\text{сж}} V_H D_{M_0}^4}.$$

Его положительное решение

$$\bar{V}_e = -k + \sqrt{k^2 - c}$$

даёт скорость во входном сечении, обеспечивающую длину воздухозаборника, с некоторым приближением равную заданной $K_D D_{\text{об}}$.

Рассмотренные усовершенствования общепринятого метода [1] реализованы Р. Ю. Цукановым в расчётном модуле программного обеспечения Power Unit 10.0. Результаты расчётов по этому алгоритму удовлетворительно согласуются с профилями воздухозаборников ТРДД, разработанными ведущими авиационными фирмами.

В качестве примера на рис. 3 показан результат расчёта для двигателя Д-18Т ($H = 11$ км, $M = 0,75$, $G_g = 427$ кг/с).

При реальном проектировании воздухозаборников, очевидно, учтены многочисленные дополнительные (производственные, эксплуатационные и другие требования), и поэтому их можно считать оптимальными (рис. 4).

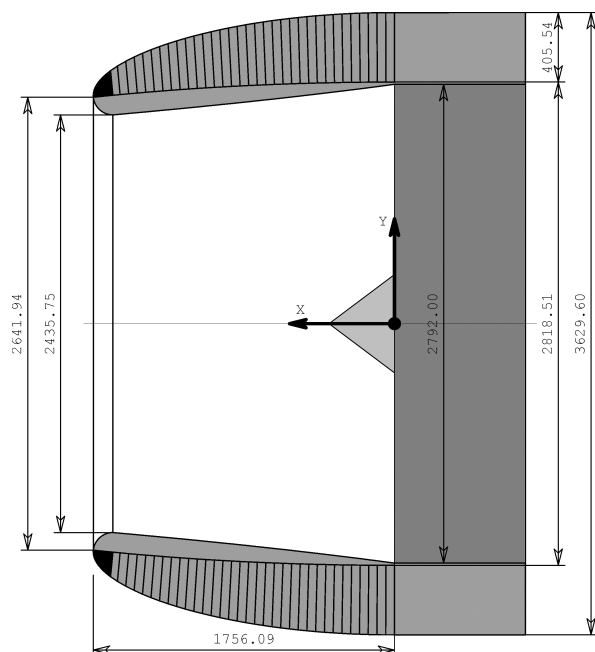


Рис. 3. Расчётный профиль воздухозаборника (Power Unit 10.0)

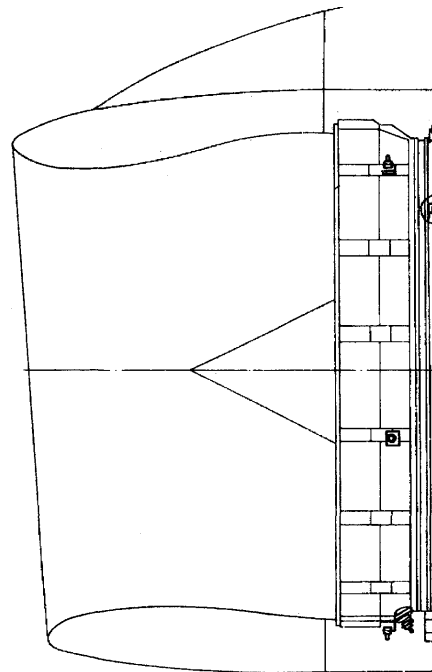


Рис. 4. Профиль воздухозаборника самолёта Ан-124 с двигателем Д-18Т [8]

Выводы

1. Применяемые до настоящего времени при эскизном проектировании и выполнении курсовых и дипломных проектов методы расчета воздухозаборников самолетов с ТРДД требуют подбора некоторых параметров, что существенно увеличивает время проектирования и требует высокой квалификации исполнителей.

2. Предложенные алгоритмы расчетного определения этих параметров сравнительно просты и могут быть успешно реализованы в условиях свойственного эскизному проектированию дефицита информации.

3. Сопоставление результатов расчётов по этим алгоритмам с профилями реальных воздухозаборников, разработанных ведущими авиационными фирмами, продемонстрировало удовлетворительную сходимость, т. е. получение параметров заборников, способных в перспективе удовлетворить всему сложному комплексу предъявляемых к ним требований.

4. Для дальнейшего совершенствования алгоритма проектирования воздухозаборников необходимо выполнить их продувки в аэродинамической трубе или численное моделирование обдувки, исследовать обтекание заборника при косом обдуве, а также проанализировать работу этого устройства в нештатных и аварийных ситуациях, после чего доработать соответствующим образом программное обеспечение.

Список литературы

1. Поликовский, В. И. Силовые установки летательных аппаратов с воздушно-реактивными двигателями [Текст] / В. И. Поликовский, Д. Н. Сурнов. — М. : Машиностроение, 1965. — 261 с.
2. Дыбский, П. В. Силовые установки самолётов [Текст] : метод. указания к курс. проектированию / П. В. Дыбский. — Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1975. — 40 с.
3. Лебединский, А. Г. Силовые установки самолётов [Текст] : учеб. пособие по курс. и дипл. проектированию / А. Г. Лебединский, В. Д. Пехтерев, В. Н. Желдоченко. — Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1981. — 64 с.
4. Данильченко, К. П. Воздухозаборники самолётов [Текст] : учеб. пособие по курс. и дипл. проектированию / К. П. Данильченко, А. Г. Лебединский. — Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1984. — 56 с.
5. Шмирьов, В. Ф. Проектування систем силових установок літака [Текст] : консп. лекцій / В. Ф. Шмирьов, Р. Ю. Цуканов, О. І. Риженко, В. Д. Пехтерев. — Х.: Нац. аерокосм. ун-т ім. Н. Е. Жуковського «Харьк. авиац. ин-т», 2011. — 220 с.
6. Проектирование систем силовых установок самолётов [Текст] : консп. лекций / С. В. Епифанов, В. Д. Пехтерев, А. И. Рыженко и др. — Х. : Нац. аэрокосм. ун-т ім. Н. Е. Жуковського «Харьк. авиац. ин-т», 2012. — 512 с.
7. Поликовский, В. И. Самолётные силовые установки [Текст] / В. И. Поликовский. — М. : Оборонгиз, 1952. — 600 с.
8. Самолёт Ан-124. Руководство по технической эксплуатации [Текст] : в 18 кн. — К. : ОКБ ім. О. К. Антонова, 1993. — Кн. 17. — 582 с

Рецензент: д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник
НИИ ПФМ А. В. Бетин, Харьков

Поступила в редакцию 6.12.2013

Профілювання дозвукових повітрязабірників двоконтурних турбореактивних двигунів

Викладено вдосконалений метод визначення основних параметрів повітрязабірників ТРДД на етапі ескізного проектування літака. При його розробленні усунуто процедуру підбору параметрів із рекомендованого діапазону, що дозволило підвищити оперативність виконання розрахунків і знизити потрібну для цього кваліфікацію виконавців. Метод може бути використаний при реальному ескізному проектуванні, виконанні досліджень з оптимізації параметрів авіаційних силових установок, а також виконанні курсових і дипломних проектів.

Ключові слова: повітрязабірник, профілювання, ескізне проектування.

Shaping of Turbofan's Subsonic Air Intakes

Improved method of turbofan air intake main parameters determination at airplane preliminary designing stage is given. Parameters selection from recommended band procedures are avoided in the method, that allows to increase the calculation operability and decrease executor required qualification. The method can be used during real preliminary designing, parameters optimization research of aviation power plants, and also for course and diploma projects making.

Keywords: air intake, shaping, preliminary designing.