

СОВРЕМЕННЫЕ АВИАЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ: ИСТОРИЯ, КОНСТРУКЦИЯ, НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Е.И. Скворцова, В.К. Зольников, А.С. Ягодкин

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»

В статье рассмотрены основные типы авиационных двигателей, их устройство и принципы работы, а также современное состояние и перспективы мирового и российского двигателестроения. Проанализированы историческое развитие поршневых и газотурбинных установок, особенности конструкции турбовентиляторных двигателей, внедрение новых материалов, аддитивных технологий и цифровых систем управления. Особое внимание уделено экологическим аспектам, снижению шумности и выбросов, а также перспективам перехода к гибридным и электрическим силовым установкам. Сделан акцент на значимости двигателестроения для гражданской и военной авиации, а также на роли России в разработке и производстве современных авиационных двигателей.

Ключевые слова: авиационные двигатели, газотурбинные установки, поршневые двигатели, турбовентиляторные двигатели, ракетные двигатели, материалы, аддитивные технологии, цифровые системы управления, ПД-14, ПД-35, экологичность, гибридные и электрические двигатели, авиационная промышленность России.

MODERN AIRCRAFT ENGINES: HISTORY, DESIGN, NEW TECHNOLOGIES, AND ENVIRONMENTAL PROSPECTS

E.I. Skvortsova, V.K. Zolnikov, A.S. Yagodkin,

Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov

This article examines the main types of aircraft engines, their design and operating principles, as well as the current state and prospects of global and Russian engine manufacturing. It

analyzes the historical development of piston and gas turbine engines, the design features of turbofan engines, and the introduction of new materials, additive manufacturing, and digital control systems. Particular attention is paid to environmental aspects, reducing noise and emissions, and the prospects for the transition to hybrid and electric powertrains. Emphasis is placed on the importance of engine manufacturing for civil and military aviation, as well as Russia's role in the development and production of modern aircraft engines.

Keywords: Aircraft engines, gas turbine units, piston engines, turbofan engines, rocket engines, materials, additive technologies, digital control systems, PD-14, PD-35, environmental friendliness, hybrid and electric engines, Russian aviation industry.

Авиационные двигатели — это сложнейшие устройства, обеспечивающие движение летательных аппаратов в воздушной среде. Их развитие определяет не только возможности современной авиации, но и научно-технический потенциал целых государств. Двигатели определяют скорость, высотность, грузоподъёмность и дальность полёта самолётов, а также эксплуатационные и экономические характеристики авиации в целом. Существование современной мировой авиации в её гражданском и военном варианте немыслимо без постоянного совершенствования авиационного двигателестроения, учитывающего требования эффективности, экологичности и надёжности.

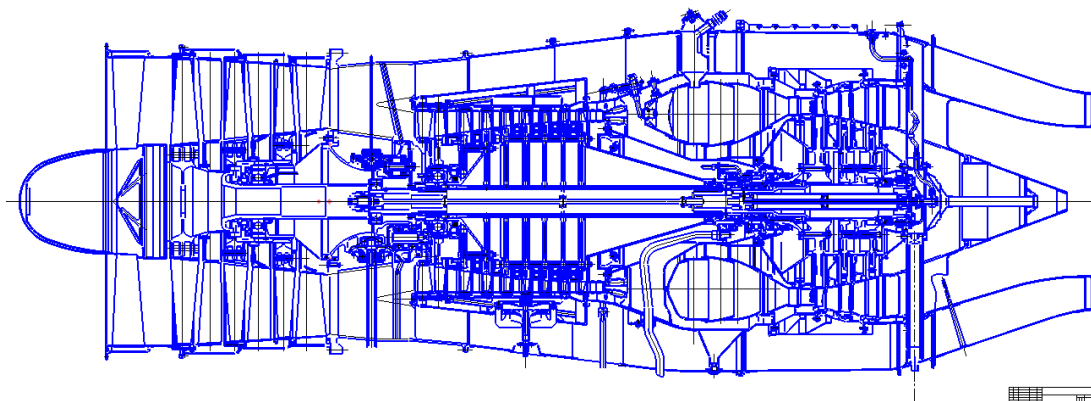


Рисунок 1 – Строение авиационного двигателя

Исторически первые авиационные двигатели были поршневыми. Они до сих пор применяются на лёгких и учебных самолётах, так как относительно просты и дешевы в производстве. Однако для нужд скоростной и тяжёлой авиации используются реактивные и газотурбинные двигатели.

Основные типы авиационных двигателей:

- поршневые: приводят во вращение воздушный винт, преобразуя тепловую энергию сгорающего топлива в механическую работу;
- газотурбинные двигатели: включают турбореактивные, турбовентиляторные, турбовинтовые;
- ракетные двигатели: используются на космических и некоторых военных летательных аппаратах, не требуют воздуха для сгорания;



Рисунок 2 – Радиальный звездообразный поршневой двигатель



Рисунок 3 – Газотурбинный турбовентиляторный авиационный двигатель

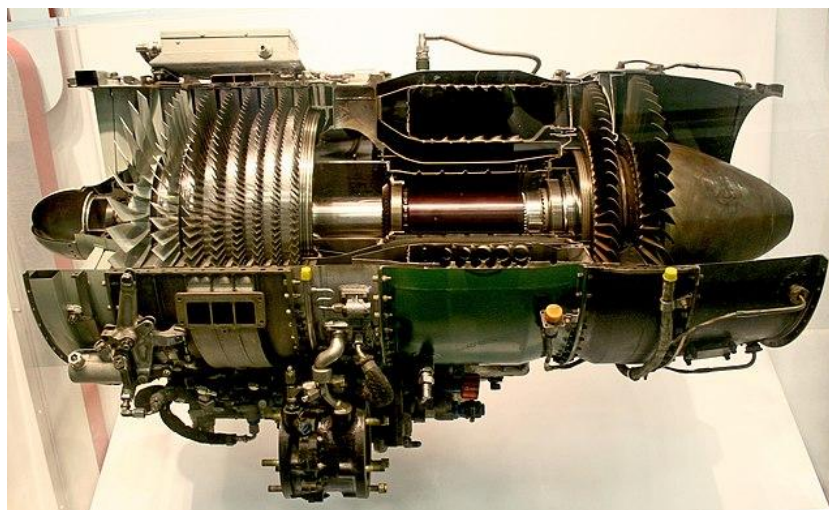


Рисунок 4 – Реактивный двигатель

Типовой газотурбинный реактивный двигатель включает несколько основных агрегатов: воздухозаборник, компрессор, камеру сгорания, турбину и реактивное сопло. Воздух поступает через воздухозаборник, сжимается компрессором до высокого давления, смешивается с топливом и сгорает в камере сгорания. Высокотемпературные газы вращают турбину, а энергия истекающих газов формирует реактивную тягу, двигая самолёт вперёд.

- Компрессор: сжимает воздух, повышая его давление до 10-35 атмосфер;
- Камера сгорания: смешивает сжатый воздух с топливом, возникает горение;
- Турбина: часть энергии горячих газов тратится на вращение компрессора;
- Сопло: оставшаяся энергия превращается в реактивную тягу.

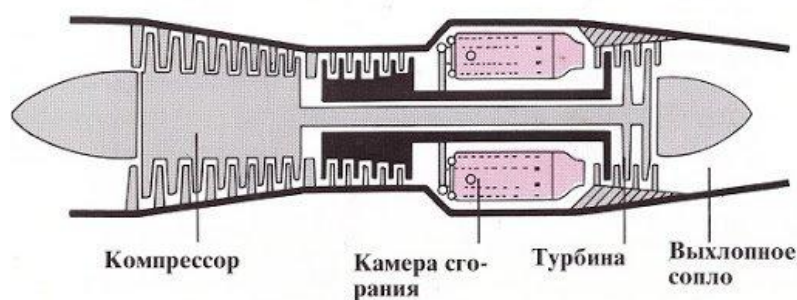


Рисунок 5 – Строение авиационного двигателя

В современных турбовентиляторных двухконтурных двигателях значительная часть воздуха обходит внутренний горячий тракт, создавая

дополнительную "холодную" тягу вентилятором. Такие двигатели эффективны и экономичны для гражданских лайнеров.

С каждым десятилетием авиационные двигатели становятся экономичнее, тише и экологичнее. В последние годы особое развитие получили двигатели с увеличенной степенью двухконтурности (отношение массы воздуха внешнего и внутреннего контуров), что обеспечивает увеличение тяги и снижение расхода топлива.

Материалы: активно внедряются композиты (угле- и металломатричные), жаропрочные сплавы и керамики для лопаток компрессоров и турбин;

- Аддитивные технологии: позволяют изготавливать детали сложной формы, снижают массу и стоимость;

- Цифровые системы управления: автоматизируют контроль параметров, делают двигатель более надёжным и эффективным.

Россия — одна из немногих стран, обладающих полным циклом разработки, производства и эксплуатации авиационных двигателей, гражданских и военных. Ключевые современные проекты:

- ПД-14: турбовентиляторный двигатель нового поколения, разрабатываемый для самолёта МС-21. Использует новейшие технологии и материалы, отличается повышенной экономичностью и сниженным уровнем шума;

ПД-8: двигатель для региональных летательных аппаратов;

Перспективный ПД-35: разрабатывается для широкофюзеляжных лайнеров и должен стать одним из самых мощных гражданских двигателей в мире;

Рассмотрим термодинамический расчет турбовентиляторного двигателя:

Таблица 1. Исходные данные

Полетные условия	
Высота	$H = 0 \text{ м}$
Температура наружного воздуха	$T_0 = 288,15 \text{ К}$
Давление наружного воздуха	$p_0 = 101325 \text{ Па}$
Параметры двигателя	
Степень повышения давления в компрессоре	$\pi_k = 25$
Температура газа перед турбиной	$T_g = 1450 \text{ К}$

Расход воздуха через двигатель	$G_v = 150 \text{ кг/с}$
Степень двухконтурности	$m = 8$
КПД и потери	
КПД компрессора	$\eta_k = 0,87$
Коэффициент восстановления в камере сгорания	$\eta_{kc} = 0,95$
КПД турбины	$\eta_t = 0,89$
Коэффициент скорости сопла	$\varphi = 0,98$
Термодинамические параметры	
$c_{pv} = 1005 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ $k_v = 1,4$	
$c_{pg} = 1150 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ $k_g = 1,33$	
Низшая теплота сгорания топлива $H_u = 43 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$	

Сечение 1 (вход в двигатель)

$$T_1 = T_0 = 288,15 \text{ К}$$

$$p_1 = p_0 * 0,98 = 99300 \text{ Па}$$

Сечение 2 (за компрессором)

- Показатель политропы сжатия

$$\eta_k = \frac{k_v - 1}{k_v} = \frac{1,4 - 1}{1,4} = 0,2857$$

Температура за компрессором

$$T_2 = T_1 \left[1 + \frac{\pi_k^{\frac{1}{\eta_k}} - 1}{\eta_k} \right] = 288,15 \left[1 + \frac{25^{0,2857} - 1}{0,87} \right] = 787,8 \text{ К}$$

Давление за компрессором

$$p_2 = p_1 * \pi_k = 99300 * 25 = 2482500 \text{ Па}$$

Относительный расход топлива

$$g_t = \frac{c_{pg}T_g - c_{pv}T_2}{H_u - c_{pg}T_g} = \frac{1150 * 1450 - 1005 * 787,7}{43 * 10^6 - 1150 * 1450} = 0,02119$$

Абсолютный расход топлива

$$G_t = \frac{G_v g_t}{1 + m} = \frac{150 * 0,02119}{1 + 8} = 0,353 \text{ кг/с}$$

Сечение 3 (за камерой сгорания)

$$T_3 = T_g = 1450 \text{ К} \quad p_3 = p_2 * \eta_{kc} = 2482500 * 0,95 = 2358375 \text{ Па}$$

Расход газа внутреннего контура

$$G_g = \frac{G_v}{1+m} + G_t = \frac{150}{9} + 0,353 = 17,02 \text{ кг/с}$$

Работа компрессора

$$L_k = c_{pv}(T_2 - T_1) = 1,005 * (787,7 - 288,15) = 502,1 \text{ Дж/кг}$$

Работа вентилятора

$$T_{2v} = T_1 * 1,15 = 331,4 \text{ } L_v = c_{pv}(T_{2v} - T_1) \frac{m}{1+m} = 38,6 \text{ Дж/кг}$$

Работа турбины

$$L_t = \frac{L_k + L_v}{G_g/G_v} = 4765,6 \text{ Дж/кг}$$

Температура за турбиной

$$T_4 = T_3 - \frac{L_t}{c_{pg}} = 488,1 \text{ К}$$

Давление за турбиной

$$p_4 = p_3 * 0,25 = 589 \text{ 594 Па}$$

Скорость истечения газов при горячем контуре

$$c_{5г} = \varphi \sqrt{2c_{pg}T_4 * \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_4}\right)\right]^{(k_g-1)/k_g}} = 617,8 \text{ м/с}$$

Холодный контур

$$c_{5х} = \varphi \sqrt{2c_{pv}T_{2v} * \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_{2v}}\right)\right]^{(k_v-1)/k_v}} = 235,1$$

Тяга горячего контура

$$R_g = \frac{G_v}{1+m} c_{5г} = 10,3 \text{ кН}$$

Тяга холодного контура

$$R_x = G_v \frac{m}{1+m} * c_{5х} = 31,3 \text{ кН}$$

Общая тяга

$$R = R_g + R_x = 41,6 \text{ кН}$$

Удельный расход топлива

$$C_{уд} = \frac{G_t * 3600}{R/1000} = 30,53 \text{ кг(Н * с)}$$

Внутренний КПД

$$\eta_i = \frac{G_g * \frac{c_{5г}^2}{2} + G_v \frac{m}{1+m} \frac{c_{5г}^2}{2}}{G_t H_u} = 45,7\%$$

При ступенчатом расчёте выявлено, что при степени двухконтурности $m = 8$ достигается оптимальный баланс тяги (41,6 кН), экономичности (удельный расход 30,53 кг/(кН·ч)) и внутреннего КПД (45,7%). Именно такие параметры лежат в основе современных двигателей семейства ПД-14, и аналогичных турбовентиляторных моторов.

Военное двигателестроение: разработки включают различные варианты для истребителей пятого поколения, стратегической и фронтовой авиации.

Сегодня авиационная промышленность должна выполнять не только технические, но и экологические задачи. Ведутся активные разработки по снижению выбросов оксидов азота, углерода, уменьшению шума. Новые камеры сгорания обеспечивают более полную переработку топлива и снижают образование вредных веществ на 30-50% по сравнению с моторами предыдущих поколений.

Другим трендом становится использование биотоплива, водорода, электрических и гибридных установок для малой региональной авиации. Это направление только формируется, но уже внедряется на прототипах легких и средних самолетов.

Краткосрочные перспективы двигателестроения связаны с повышением степени двухконтурности, внедрением новых композитных и керамических материалов, максимальной цифровизацией (интернет вещей в эксплуатации, предиктивное обслуживание на основе ИИ). В среднесрочной перспективе — создание гибридных и электрических двигателей для малой и региональной авиации. В долгосрочной — электрификация и даже гиперзвуковые воздушные двигатели, основанные на принципах прямоточного воздушно-реактивного двигателя.

Список литературы

1. Иноземцев А.А., Нерадько А.В., Медведев В.В., Коняев Е.А. "Авиационный двигатель ПС-90А" // Авиационная техника и технологии. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 54–68.
2. Лукасов В.В., Данилейко Г.И. Современные тенденции развития газотурбинных двигателей // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 90–101.
3. Григорьев В.А., Кузнецов С.П. Испытания авиационных двигателей: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2009. – 416 с.

4. Фельдман Е.Л., Черкасов Л.А., «Авиационный двухконтурный двигатель НК-86». — М.: Машиностроение, 1982.
5. Павловский «Вспомогательные силовые установки самолетов» — М.: Транспорт, 1977.
6. Орлов М.Ю., Горшкалев А.А., Корнеев С.С., Урлапкин В.В. «Авиационные двигатели внутреннего сгорания: монография». — Самара: Самарский университет, 2023.

References

1. Inozemtsev A.A., Neradko A.V., Medvedev V.V., Konyaev E.A. "PS-90A Aircraft Engine" // Aviation Engineering and Technology. - 2023. - Vol. 14, No. 2. - Pp. 54-68.
2. Lukasov V.V., Danileiko G.I. Modern Trends in the Development of Gas Turbine Engines // Problems of Mechanical Engineering and Automation. - 2022. - Vol. 19, No. 3. - Pp. 90-101.
3. Grigoriev V.A., Kuznetsov S.P. Testing of Aircraft Engines: a textbook for universities. - Moscow: Mashinostroenie, 2009. - 416 p.
4. Feldman E.L., Cherkasov L.A., "The NK-86 Bypass Aircraft Engine." Moscow: Mashinostroenie, 1982.
5. Pavlovsky, "Auxiliary Power Units of Aircraft." Moscow: Transport, 1977.
6. Orlov M.Yu., Gorshkalev A.A., Korneev S.S., Urlapkin V.V. "Aircraft Internal Combustion Engines: Monograph." Samara: Samara University, 2023.