

## Основные тенденции развития систем кондиционирования воздуха перспективных летательных аппаратов

© А.К. Каллиоппин, Р.С. Савельев, Д.И. Смагин

Московский авиационный институт,  
Москва, 125993, Россия

*Рассмотрено наиболее перспективное направление развития авиационных систем кондиционирования воздуха для современных летательных аппаратов с целью оптимизации затрат энергии и увеличения топливной эффективности — замена отбора воздуха от маршевых двигателей на электропроводные компрессоры. На примере самолета Boeing 787 Dreamliner определены основные преимущества и риски структурной схемы системы кондиционирования воздуха. Проведен сравнительный анализ нескольких вариантов структурных схем системы кондиционирования воздуха без отбора воздуха от двигателей, по результатам которого дана оценка возможности внедрения в проекты ближнее среднемагистральных гражданских самолетов. Определены ключевые требования к конфигурации бортовых систем для достижения максимального экономического эффекта.*

**Ключевые слова:** система кондиционирования воздуха, электроприводной компрессор, пароконденсационный цикл, «более электрический» самолет, воздушный цикл, топливная эффективность

**Введение.** Полеты современных летательных аппаратов (ЛА) происходят на больших высотах и скоростях, что формирует высокие требования к безопасности и комфорту экипажа и пассажиров. Один из способов достижения показателей безопасности и комфорта — улучшение бортовых систем кондиционирования воздуха (СКВ).

Авиационные СКВ предназначены для создания и поддержания в объеме гермокабины нормируемых параметров воздуха (давления, температуры, относительной влажности, скорости движения воздуха и т. д.), обеспечивающих комфортные условия для экипажа и пассажиров в полете и на земле, а также необходимые тепловые режимы работы бортового оборудования. Для работы такой системы требуется источник сжатого воздуха на борту самолета [1]. Структурная схема типовой СКВ приведена на рис. 1.

В подавляющем большинстве СКВ современных ЛА в качестве источника сжатого воздуха используется компрессор авиационного двигателя. Воздух, отбираемый от компрессора двигателя, поддерживает необходимое давление и вентилирует гермокабину. Кроме того, его используют в качестве рабочего тела в системе охлаждения СКВ, в которой реализуется цикл воздушной холодильной машины (цикл Джоуля).

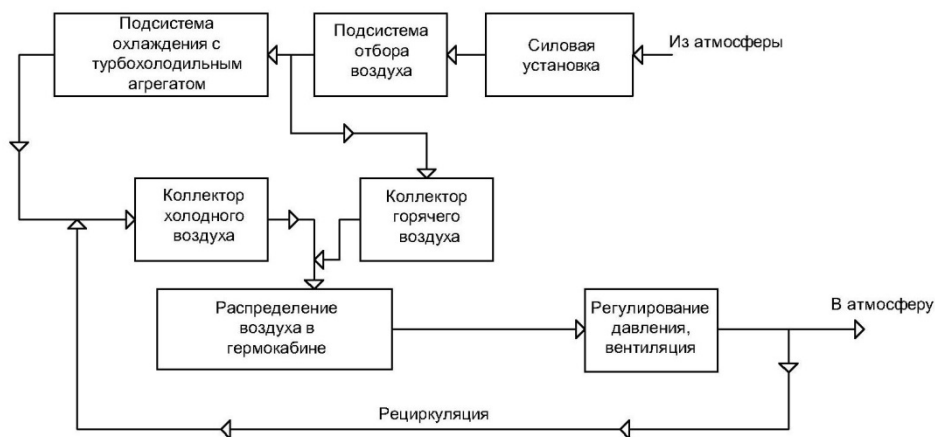


Рис. 1. Структура типовой СКВ

Использование воздушной холодильной машины определяет уровень давления воздуха в точке отбора от компрессора двигателя ЛА — почти в 10 раз выше требуемого для наддува гермокабины. Из-за эксплуатации самолета в различных режимах, в том числе режимах малого газа работы двигателей, приходится использовать заведомо высокие ступени отбора, чтобы обеспечить надлежащую работоспособность холодильной машины на режимах малого газа работы двигателей ЛА. В силу этого на большинстве режимов эксплуатации ЛА приходится дросселировать давление за выбранной ступенью отбора, что в совокупности с низким коэффициентом полезного действия (КПД) системы охлаждения воздушного цикла делает применяемые сегодня СКВ весьма энергетически затратными, а значит — энергетически неэффективными [2].

Ключевая задача создания перспективных СКВ — повышение их энергоэффективности (снижение затрат энергии на функционирование системы во всем диапазоне высот и скоростей полета). Это приведет к увеличению топливной эффективности всего самолета. Наиболее рациональным решением, основанным на исследовании влияния функционирования СКВ на топливную эффективность самолета, является разработка структурной схемы СКВ, не использующей отбираемый от компрессоров двигателей воздух.

**Концепция СКВ без отбора воздуха от двигателя.** В 1960–1970-х гг. в ряде проектов зарубежных самолетов в качестве источников наддува использовали специальные кабинные нагнетатели. По результатам эксплуатации нескольких экземпляров было сделано следующее заключение: применение независимых кабинных нагнетателей невыгодно в сравнении с вариантом отбора сжатого воздуха от компрессора двигателя, поскольку они увеличивают массу системы наддува, ее объем и лобовое сопротивление самолета, усложняют

конструкцию и условия эксплуатации. По сравнению с компрессором двигателя ЛА используемые центробежные компрессоры имели более низкий КПД и были менее надежны [3]. На рис. 2 показана структурная схема СКВ с независимыми нагнетателями.

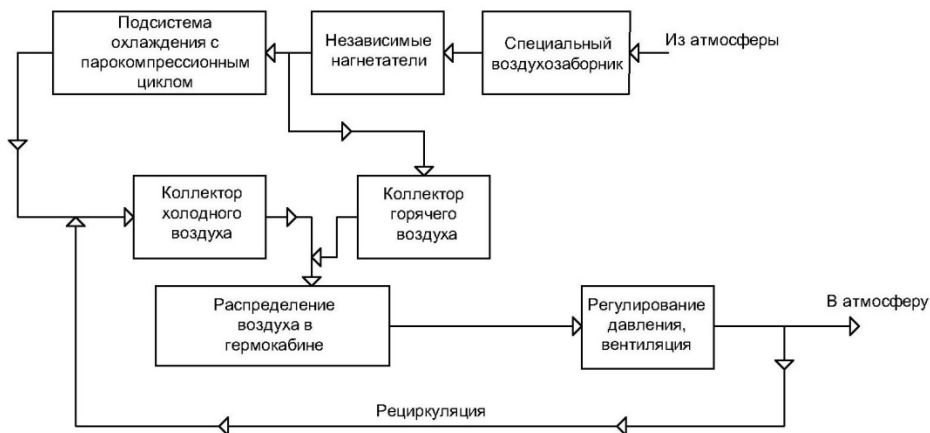


Рис. 2. Вариант структурной схемы СКВ с независимыми нагнетателями

С начала 1990-х гг. в Европе и США были проведены многочисленные исследования в рамках концепции no-bleed systems (конфигурация бортовых систем без отбора воздуха от компрессора двигателя), их целью была разработка облика бортовых систем, не использующих отбираемый от двигателей воздух. Для СКВ как главного бортового потребителя сжатого воздуха был получен результат: использование электроприводных компрессоров для перспективных 500-местных самолетов по совокупности параметров (установочная масса элементов, компоновочные объемы, регулирование общего расхода) экономичнее в 6–7 раз относительно традиционной системы (при проведении расчетов были рассмотрены перспективные двигатели следующего поколения с генераторами заданной мощности) [4].

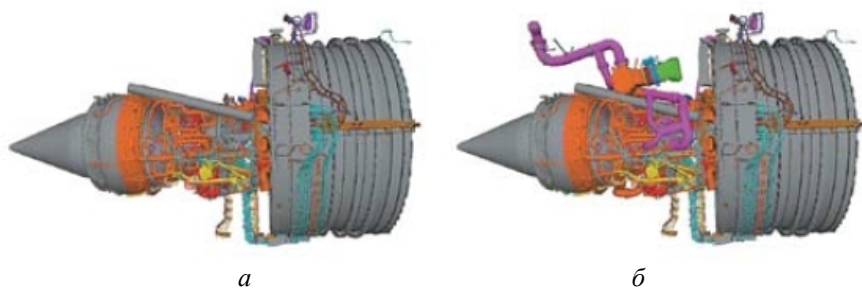
Совместными исследованиями NASA и фирмы Lockheed Martin установлено, что ЛА с тремя двигателями, у которых осуществляется отбор только механической мощности с вала, на скорости около 960 км/ч, высоте 11 000 м за 5 ч полета потребляют на 900 кг меньше топлива, чем ЛА с традиционным отбором сжатого воздуха. В авиадвигателе с отбором только механической мощности исключаются высокотемпературные трубопроводы из нержавеющей стали, предварительный охладитель и другие элементы традиционных систем [5].

**Исследования схем СКВ без отбора воздуха для пассажирских самолетов различных размерностей.** Единственный на сегодня пассажирский самолет, в СКВ которого не используется отбор воздуха

от двигателя в соответствии с концепцией no-bleed systems, — это Boeing B787.

По оценкам специалистов корпорации Boeing, полученным по результатам анализа эксплуатации этой модели самолета, исключение отбора сжатого воздуха от компрессоров двигателей приводит к более эффективной работе двигателей за счет снижения потребляемой мощности на уровне всего самолета. Прогнозируемое уменьшение потребления топлива в условиях рейса находится в диапазоне 2...3 % [6].

Конфигурация СКВ с исключением отбора воздуха позволяет существенно упростить обвязку двигателя благодаря отсутствию пневматической системы и связанных с ней узлов предварительного охлаждения, регулирующих клапанов и высокотемпературных трубопроводов, агрегатов и узлов. На рис. 3 представлена типовая обвязка маршевого двигателя с отсутствием отбора и традиционного двигателя с отбором воздуха (изображение заимствовано из промоматериалов компании Boeing).



**Рис. 3.** Обвязка маршевого двигателя:

*а* — двигатель без отбора воздуха; *б* — двигатель с отбором воздуха

Утверждение о большей экономичности СКВ без отбора воздуха от двигателя сделано специалистами компании Boeing на основании расчетной оценки процессов преобразования механической энергии: при подаче сжатого воздуха по трубопроводам через коллектор отбора воздуха от двигателя тратится больше энергии, чем расходуется на конвертацию механической энергии в электрическую в генераторе и обратно — в компрессоре. Для самолета размерности B787 и двигателей с генераторами, устанавливаемыми на такие самолеты, оценка верна. Однако для самолетов меньшей размерности количественная оценка процессов преобразования энергии требует прикладных исследований под каждый конкретный образец двигателя в соответствии с термодинамическими процессами и конструктивными особенностями [7]. Исследования целесообразности внедрения безотборных структурных схем СКВ в перспективные проекты ближне-среднемагистральных

самолетов были выполнены в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) в течение 2016 г.

В рамках выполненных работ смоделированы два варианта структурных схем СКВ без отбора сжатого воздуха от двигателя в составе комплекса бортовых систем перспективного ближне-среднемагистрального самолета и проведена сравнительная оценка с классической структурной схемой СКВ. В обоих вариантах структурных схем используются электроприводные воздушные компрессоры в качестве источников сжатого воздуха, различаются принципы построения установок охлаждения: турбохолодильные агрегаты и установки охлаждения с компрессионно-испарительным циклом [8].

Для сравнительного анализа в таблице приведены массовые и энергетические характеристики структурных схем СКВ: учтены только масса и энергопотребление подсистем отбора и воздухоподготовки вариантов.

#### Характеристики структурных схем СКВ

Характеристика	Классическая схема	Схема с компрессионно-испарительным циклом	Схема с турбохолодильными агрегатами
При КПД воздушных компрессоров 0,65			
Масса, кг	340	397,90	364,2
Энергопотребление, кВт	168,46	170,90	196
При КПД воздушных компрессоров 0,90			
Масса, кг	340	362	331
Энергопотребление, кВт	168,46	127,77	—
Примечание. Энергопотребление классической схемы рассчитано через затраты энергии на сжатие воздуха в компрессоре двигателя.			

Получены результаты, объясняющие фактическое отсутствие проектов внедрения безотборных СКВ в проекты ближне-среднемагистральных самолетов, несмотря на несомненный рыночный успех Boeing B787 Dreamliner.

1. Отказ от отбора сжатого воздуха требует существенного увеличения располагаемой электрической мощности, т. е. установки более мощных генераторов. Электропотребление СКВ без отбора воздуха (основные потребители — электроприводные компрессоры) ближне-среднемагистральных самолетов сравнимо с суммарным электропотреблением самолета аналогичного класса с классической схемой СКВ.

2. Для достижения максимизации показателей топливной эффективности самолета в целом недостаточно лишь установки новой СКВ и соответствующей мощности генераторов. Необходима новая структура большинства ключевых самолетных систем: системы электропитания, противообледенительной системы, системы управления и

других в соответствии с концепцией «более электрический самолет». Примером реализации такой конфигурации бортовых систем является Boeing B787 Dreamliner.

3. Необходимо создать и внедрить агрегатную базу с оптимальными весовыми и геометрическими характеристиками при заданных проектных параметрах. Данный фактор наиболее критичен для ближне-среднемагистральных самолетов.

**Заключение.** Интерес ведущих компаний-разработчиков к конфигурации СКВ с независимыми нагнетателями и парокompрессионными циклами охлаждения обусловлен ключевыми достоинствами, которыми обладает данная схема:

- упрощение обвязки двигателей;
- повышение термодинамического КПД циклов охлаждения и как следствие экономия топлива на работу системы охлаждения;
- повышение энергоэффективности за счет гибкого регулирования давления подаваемого воздуха на различных режимах полета;
- упрощение конструкции и увеличение весовой эффективности системы за счет более рациональной компоновки агрегатов и трубопроводов.

Эти достоинства удалось реализовать в самолете Boeing B787, однако он был создан в рамках концепции «более электрический самолет», что, в свою очередь, предъявляет целый ряд требований к внедрению в проекты других самолетов аналогичной или меньшей размерности.

Варианты СКВ без отбора воздуха от двигателя и с парокompрессионным циклом охлаждения целесообразно внедрять в новые проекты самолетов при условии реализации конфигурации бортовой системы электроснабжения, обеспечивающей заданный уровень энергопотребления.

На основании предварительных расчетов можно сделать вывод о том, что внедрение схемы СКВ с независимыми нагнетателями и исключение отбора воздуха от двигателей в проект перспективного ближнемагистрального пассажирского самолета приведет к снижению расхода топлива (с учетом влияния на систему электроснабжения) в интервале 0,7...0,9 %.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Антонова Н.В., Дубровин Л.Д., Егоров Е.Е. и др. *Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха*. Ю.М. Шустров, ред. Москва, Машиностроение, 2006, 384 с.
- [2] Полевой А.А. *Автоматизация холодильных установок и систем кондиционирования воздуха*. Санкт-Петербург, Профессия, 2010, 244 с.

- [3] Cronin M.J. Design aspect of systems in all electric aircraft. *SAE Technical Papers Series*, 1982, no. 821436, 11 p.
- [4] Воронович С., Каргапольцев В., Кутахов В. Полностью электрический самолет. *Авианорама*, 2009, № 2, с. 23–27.
- [5] Гарганеев А.Г., Харитонов С.А. Техничко-экономические оценки создания самолета с полностью электрифицированным оборудованием. *Доклады ТУСУРа*, 2009, № 2 (20), с. 179–184.
- [6] Nelson T. *B787 systems and performance*. Boeing, 2005, 36 p.
- [7] *Liebherr-Aerospace*, 2016. Germany, Liebherr-International Deutschland GmbH. URL: <https://www.liebherr.com/shared/media/aerospace-and-transportation/aerospace/downloads/magazines/aets-magazines-recent/liebherr-aerospace-magazine-2016-en.pdf> (дата обращения 20.12.2016).
- [8] Røyttä P. *Study of a vapor-compression air-conditioning system for jetliners*. Lappeenranta teknillinen yliopisto Digipaino, 2009, 86 p. URL: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/50267/isbn%209789522148339.pdf>

Статья поступила в редакцию 29.03.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Каллиопин А.К., Савельев Р.С., Смагин Д.И. Основные тенденции развития систем кондиционирования воздуха перспективных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 6.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1627>

**Каллиопин Александр Константинович** — канд. техн. наук, профессор, ведущий инженер научно-исследовательского отделения кафедры «Проектирование самолетов» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**Савельев Роман Сергеевич** — инженер научно-исследовательского отделения кафедры «Проектирование самолетов» Московского авиационного института (национального исследовательского университета). e-mail: [r\\_sr@inbox.ru](mailto:r_sr@inbox.ru)

**Смагин Денис Игоревич** — начальник лаборатории научно-исследовательского отделения кафедры «Проектирование самолетов» Московского авиационного института (национального исследовательского университета). e-mail: [79637587781@yandex.ru](mailto:79637587781@yandex.ru)

## Main trends in designing air conditioning systems for future-technology vehicles

© A.K. Kalliopin, R.S. Savelyev, D.I. Smagin

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia

*The article considers the most promising trend in designing aviation air conditioning systems for future-technology vehicles with the objective of optimizing energy consumption and increasing fuel efficiency – that is the replacement of air bleed from the main engines with electrically driven compressors. Using the Boeing 787 Dreamliner aircraft as an example we have analyzed the main advantages and risks of the air conditioning system's flow chart. The article gives a comparative analysis of several air conditioning systems' flow chart alternatives which operate without air bleed from the main engines. As a result of this analysis we assessed the possibility of implementing this flow chart into the short and medium haul aircraft projects. Much attention is given to key requirements for the configuration of on-board systems so that maximum economic effect could be achieved.*

**Keywords:** air conditioning system, electrically driven compressor, vapor compression cycle, "more electric" aircraft, air cycle, fuel efficiency

### REFERENCES

- [1] Antonova N.V., Dybrovin L.D., Egorov E.E. *Proektirovanie aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Designing aviation air-conditioning systems]. Yu.M. Shustrov, ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 384 p.
- [2] Polevoy A.A. *Avtomatizatsiya kholodilnykh ustanovok i sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Automation of cold-air units and air-conditioning systems]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2010, 244 p.
- [3] Cronin M.J. *SAE Technical Papers*, 1982, no. 821436, p. 11.
- [4] Voronovich S., Kargapol'tsev V., Kutakhov V. *Aviapanorama*, 2009, no. 2, pp. 23–27.
- [5] Gargeneev A.G., Haritonov S.A. *Doklady TUSURa — Proceedings of TUSUR University*, 2009, no. 2 (20), pp. 179–184.
- [6] Nelson T. *B787 systems and performance*. Boeing Publ., 2005, 36 p.
- [7] *Liebherr-Aerospace*, 2016. Germany, Liebherr-International Deutschland GmbH. Available at: <https://www.liebherr.com/shared/media/aerospace-and-transportation/aero-space/downloads/magazines/aets-magazines-recent/liebherr-aerospace-magazine-2016-en.pdf> (accessed December 20, 2016).
- [8] Røyttä P. *Study of a vapor-compression air-conditioning system for jetliners*. Lappeenranta Teknillinen Yliopisto Digipaino, 2009, 86 p. Available at: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/50267/isbn%209789522148339.pdf>

**Kalliopin A.K.**, Cand. Sc. (Eng.), Professor, Leading engineer of Research Sector, Department of Aircraft Design, Moscow Aviation Institute (National Research University).

**Savelyev R.S.**, engineer of Research Sector, Department of Aircraft Design, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: r\_sr@inbox.ru

**Smagin D.I.**, Head of the Research Sector Laboratory, Department of Aircraft Design, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: 79637587781@yandex.ru