

## **ВИБОР КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА САМОЛЕТОВ ТРАНСПОРТНОЙ КАТЕГОРИИ**

### **SELECTION CRITERIA FOR EVALUATING THE AIR CONDITIONING SYSTEM EFFECTIVENESS OF TRANSPORT CATEGORY AIRPLANES**

*В соответствии со сформулированными требованиями к критерию для оценки эффективности системы кондиционирования воздуха современных самолетов транспортной категории определена форма критерия эффективности как глобального векторного критерия, компоненты которого отражают эффективность создания микроклиматических условий для отдельных групп потребителей системы. Показано, что локальные критерии эффективности системы кондиционирования воздуха должны определяться в виде интегрального критерия, учитывающего вероятностный характер ожидаемых условий эксплуатации.*

*Ключевые слова:* система кондиционирования воздуха, критерий эффективности, микроклиматические условия, самолеты транспортной категории

#### **Актуальность исследования**

Функция самолета транспортной категории — перевозка пассажиров и грузов в широком спектре климатических условий и под воздействием быстро изменяющихся в больших пределах условий и параметров окружающей атмосферы в полете, может быть реализована только при создании на борту самолета определенных микроклиматических условий, как для его потребителей, так для систем и элементов самого самолета. Эти условия обеспечиваются в процессе кондиционирования атмосферного воздуха, за счет организации ряда сложных газогидродинамических и тепловых взаимодействий, реализация которых требует значительных затрат ресурсов самолета — энергетических, весовых и информационных, и существенно влияет на аэродинамическое качество и взлетную массу самолета, требуемую длину взлетно-посадочной полосы.

В процессе проектирования авиационных систем кондиционирования воздуха важнейшее значение имеет не только создание требуемых микроклиматических условий, но и оценка эффективности проектируемой системы. От того, по какому критерию сравнивается эффективность альтернатив систем кондиционирования воздуха в процессе проектирования, зависят как параметры и характеристики самой системы, так и затраты бортовых ресурсов на ее функционирование и, соответственно, технико-экономические характеристики в целом самолета.

Ряд последних исследований и публикаций [1] посвящен разработке методов анализа эффективности создания микроклиматических условий, а также проектно-конструкторским разработкам систем кондиционирования воздуха для современных самолетов транспортной категории [2, 3], которые обеспечивают снижение расхода ресурсов самолета, в первую очередь энергетических, на кондиционирование воздуха.

Современные работы, посвященные проектированию авиационных систем кондиционирования воздуха [4-

6], отражают методологический подход, основанный на изолированном анализе подсистем и элементов систем кондиционирования воздуха, который предполагает, что характеристики системы полностью определяются свойствами ее отдельных составляющих, и не рассматривает организацию систем кондиционирования воздуха на макроуровне. При таком подходе, когда большое число отношений в системах кондиционирования воздуха является определяющим для свойств системы в целом, в процессе проектирования не удается провести объективный анализ интегральных свойств систем кондиционирования воздуха, в том числе эффективности системы.

#### **Цель исследования**

Целью работы является формирование подхода к решению проблемы выбора критерия эффективности для сравнения альтернатив структурно-функциональной организации систем кондиционирования воздуха современных самолетов транспортной категории, который характеризует систему в целом.

#### **Требования к критерию эффективности**

Как было показано в работе [7], системы кондиционирования воздуха современных самолетов транспортной категории относятся к классу сложных технических систем, следовательно, в основу проектирования систем кондиционирования воздуха должен быть положен системный подход [8-11]. Поэтому требуемые свойства критерия эффективности как одной из системных характеристик систем кондиционирования воздуха, должны определяться, исходя из положений системного подхода, которые применительно к системам кондиционирования воздуха формулируются следующим образом: 1) структурно-функциональная организация систем кондиционирования воздуха может быть сформирована по отношениям между входными воздействиями и требуемыми микроклиматическими условиями; 2) ресурсы, необходимые

для реализации процесса кондиционирования воздуха, качество создаваемых микроклиматических условий и соответственно эффективность систем кондиционирования воздуха определяются структурно-функциональной организацией системы; 3) функциональные характеристики систем кондиционирования воздуха могут быть определены через системные связи, отражающие потоки энергии, вещества и информации.

В соответствии с этим определим требуемые свойства критерия для оценки эффективности систем кондиционирования воздуха.

1) Критерий должен иметь исчисляемую величину и выражаться через количественное значение ожидаемой выгоды от использования систем кондиционирования воздуха, способствующей выполнению назначения системы, и затрат на ее создание и функционирование.

2) В соотношении для оценки значения критерия эффективности должны входить основные проектные параметры систем кондиционирования воздуха, для которых проводится анализ и оптимизация системы.

3) Критерий должен отражать эффективность системы кондиционирования воздуха в течение всего ее жизненного цикла.

4) Соотношения для оценки значения критерия эффективности должны быть определены при формировании концепции структурно-функциональной организации систем кондиционирования воздуха.

5) Критерий должен определяться значениями локальных критериев эффективности достижения частных целей функционирования системы, а также эффективности ее подсистем и отдельных режимов функционирования.

## Системные свойства организации систем кондиционирования воздуха

С целью выбора типа и определения структуры критерия эффективности необходимо провести анализ системных свойств и особенностей структурно-функциональной организации систем кондиционирования воздуха. Для этого рассмотрим систему как преобразование входных воздействий в выходные величины. На причинно-следственном уровне она может быть представлена как функциональная система  $\Sigma$ , в виде отношения между входными  $A$  и выходными  $Z$  объектами

$$\Sigma : A \rightarrow Z . \quad (1)$$

Цель функционирования систем кондиционирования воздуха как составной части самолета транспортной категории состоит в создании и поддержании на борту самолета для ее потребителей строго определенных микроклиматических условий, т.е. системы кондиционирования воздуха должна обеспечивать эквифинальность требуемых микроклиматических условий, а также поддерживать их динамическое равновесие в быстро изменяющихся условиях окружающей среды.

Реализация функции системы кондиционирования воздуха возможна только, если к системе подводятся от внешних источников энергия, вещество и информация, то есть она является открытой системой. Таким обра-

зом, выходом системы кондиционирования воздуха должна быть реализация микроклиматических условий в соответствии с требованиями потребителей системы. Потребители систем кондиционирования воздуха могут быть классифицированы по группам — в соответствии с типом требуемых для них микроклиматических условий. К однотипным группам потребителей систем кондиционирования воздуха относятся — люди (пассажиры и экипаж), а также транспортируемые грузы, системы и элементы самого самолета. Каждая из выделенных групп потребителей характеризуется подобием требуемых микроклиматических условий, и они для разных групп могут существенно отличаться.

Следовательно, выходные объекты систем кондиционирования воздуха определяются наборами микроклиматических условий, которые реализуются для разных групп потребителей и характеризуются совокупностью свойств, отражающих: физиологические условия жизнедеятельности для людей; условия функционирования блоков радиоэлектронного оборудования, систем и элементов конструкции самолета; условия размещения транспортируемых грузов и багажа. Создание микроклиматических условий и является целью функционирования систем кондиционирования воздуха.

Проведенный анализ показывает, что к входным объектам системы кондиционирования воздуха следует отнести — окружающую атмосферу, самолет, внешние источники энергии, вещества и информации, а также ее потребителей (рисунок 1).

Также установлены интегральные свойства системы кондиционирования воздуха, характеризующие систему в целом — динамичность, многомерность, эквифинальность, многорежимность, открытость, целенаправленность, воспроизводимость микроклиматических условий, рисунок 2.

Для реализации отношения (1) должно быть введено множество функциональных элементов системы кондиционирования воздуха и связей, отражающих внутреннюю организацию системы и задающих необходимые для ее реализации материальные, энергетические и информационные ресурсы. При этом она определяется не как отношение собственно объектов, а в виде причинно-следственных связей наблюдаемых свойств объектов, характеризуемых определенным набором физических переменных, которые образуют пространство состояний системы.

Переменные состояния, формирующие пространство состояний системы, позволяют представить ее динамику в виде траектории движения системы в пространстве состояний, которая определяется семействами функций систем кондиционирования воздуха, преобразующих входное воздействие и начальное состояние системы в ее текущее состояние (семейство функций перехода состояний) и выход (семейство реакций). Эти семейства функций не только устанавливают взаимосвязь свойств объектов систем кондиционирования воздуха, но и для их построения должны быть известны условия однозначности, определяющие необходимые для реализации системы ресурсы.

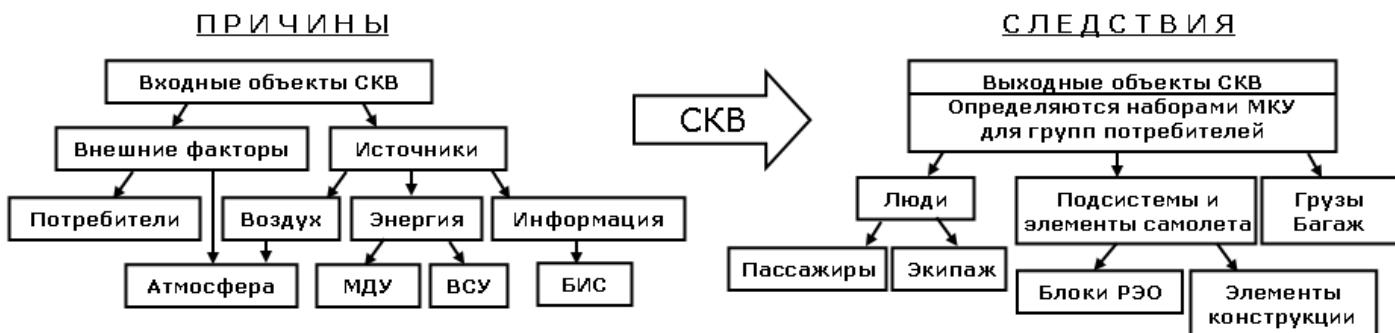


Рисунок 1 — Входные и выходные объекты систем кондиционирования воздуха



Рисунок 2 — Системные свойства, характеризующие системы кондиционирования воздуха в целом.

### Выбор типа критерия эффективности

Так как внутренняя организация системы кондиционирования воздуха, реализующая отношения между входными и выходными объектами не однозначна, множеству альтернатив систем кондиционирования воздуха  $\Pi_{\Sigma}$ , отличающихся свойствами  $\sigma$ , которые определяют понятие цели функционирования системы, может быть поставлено в соответствие множество значений эффективности систем кондиционирования воздуха  $\Pi_E$ .

Численно эффективность систем кондиционирования воздуха оценивается значением критерия эффективности, определяемого характеристической функцией:

$$\varepsilon : \Sigma \times \Sigma \rightarrow R^+$$

где  $\varepsilon$  — характеристическая функция  $\varepsilon(\sigma, \sigma^* \in \Pi_E)$ , которая представляет меру соответствия данной системы  $\Sigma \in \Pi_{\Sigma}$  целевой системе  $\Sigma^* \in \Pi_{\Sigma}$ .

Количественно целевые свойства систем кондиционирования воздуха выражаются через численные значения ожидаемой выгоды от использования систем кондиционирования воздуха, которая способствует выполнению назначения системы, и затрат ресурсов на ее создание и функционирование. Предполагаемая выгода представляет микроклиматические условия, создаваемые системой для разных групп потребителей в ожидаемых условиях эксплуатации, которые делают возможным

транспортировку пассажиров и грузов, а также обеспечивают работоспособность экипажа и нормальное функционирование бортового оборудования и элементов конструкции самолета.

Затраты ресурсов в основном определяются: установочной массой, габаритами и компоновочными характеристиками системы; энергетическими и информационными ресурсами самолета, расходами воздуха, обеспечивающими нормальное функционирование системы кондиционирования воздуха; затратами на проектирование, производство (в том числе комплектацию агрегатами) и эксплуатацию системы.

Ресурсы самолета, необходимые для обеспечения функционирования системы кондиционирования воздуха, представлены основными проектными параметрами системы и определяются для расчетных условий, в которые входят условия и параметры окружающей атмосферы, этап полета или наземной подготовки, режим работы маршевых двигателевых установок и нагрузка потребителей. Эти расчетные условия могут достаточно редко встречаться в эксплуатации самолета транспортной категории и быть очень непродолжительными, но требовать значительных ресурсов самолета, которые без необходимости используются при других условиях.

Например, максимальные энергетические ресурсы самолета для обеспечения функционирования системы кондиционирования воздуха требуются на этапе взлета самолета в жарких условиях при работе маршевых дви-

гательных установок на взлетном режиме при максимальной коммерческой загрузке самолета. Для этих же условий определяются основные проектные параметры самолета — площади несущих поверхностей, взлетная масса, требуемая длина взлетно-посадочной полосы и другие. Поэтому эффективность самолета в целом может быть существенно повышена за счет организации системы кондиционирования воздуха, обеспечивающей минимальное использование бортовых ресурсов именно на кратковременном этапе взлета [12].

Проведенный анализ показывает, что система кондиционирования воздуха является многоцелевой, поэтому, ее эффективность должна оцениваться в виде глобального критерия эффективности, определяемого как сумма векторов  $\varepsilon_i$ , локальных критериев:

$$\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i,$$

где значения  $\varepsilon$  образуют единое векторное пространство  $\Pi_\varepsilon$ , ортогональным базисом которого является система локальных критериев эффективности, характеризующих достижение  $i$ -й цели функционирования системы кондиционирования воздуха, и размеры которого определяются требуемыми значениями  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N$ .

Выбор наиболее эффективной системы кондиционирования воздуха сводится к подбору таких значений  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N$ , при которых  $\varepsilon = \varepsilon_{\max}$  и удовлетворяются требования осуществимости  $\varepsilon_{\max} \in \Pi_\varepsilon$  и оптимальности  $\varepsilon_{\max} \geq \forall \varepsilon \in \Pi_\varepsilon$ .

Оптимальное значение глобального критерия эффективности  $\varepsilon_0$  ищется на границе  $\Pi_{\varepsilon_0}$  (область Парето) пространства  $\Pi_\varepsilon$ , которая характеризуется тем, что принадлежащие к ней альтернативы  $\varepsilon$  не могут быть одновременно улучшены по всем локальным критериям эффективности  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N$ , поэтому  $\varepsilon_0 \in \Pi_{\varepsilon_0}$  представляют компромиссное решение.

Ортогональный базис пространства  $\Pi_\varepsilon$  определяется на основании множества локальных оценок качества системы, определенных техническим заданием, а также дополнительных оценок, заданных проектировщиком системы. При этом граница  $\Pi_{\varepsilon_0} \subseteq \Pi_\varepsilon$  находится на осях базиса как область удовлетворительных значений локальных критериев эффективности  $\varepsilon_i$ , заданных ТЗ, а отображение  $\varepsilon_i$  на  $i$ -ю ось базиса пространства  $\Pi_\varepsilon$  может быть определено соотношением

$$|\varepsilon_i| = \kappa_i \varepsilon_i + \kappa_{i_0},$$

где  $\kappa_i$  — масштабирующий весовой коэффициент,  $\kappa_{i_0}$  — дополнительный коэффициент, задаваемый проектировщиком.

Таким образом, установлено общее направление решения проблемы выбора типа критерия эффективности систем кондиционирования воздуха, как глобального критерия в векторной форме, которое однако не исчерпыва-

ет решение задачи определения структуры критерия эффективности, для чего необходимо учитывать особенности системных свойств организации систем кондиционирования воздуха.

Так как система кондиционирования воздуха является системой многоцелевой, то  $\Pi_\varepsilon$  представляет множество альтернатив, служащих достижению  $i$ -й локальной цели функционирования системы, характеризуемой свойствами  $\sigma_i$ , при этом локальный критерий эффективности оценки  $\varepsilon_i$  также имеет глобальный характер. Учитывая иерархичность организации систем кондиционирования воздуха, многорежимность ее функционирования, динамику и случайный характер внешних воздействий, оценка критерия эффективности  $\varepsilon_i$  в интегральном виде может быть определена следующим образом

$$\varepsilon_i(\Sigma_i) = \int_{\Pi_{\sigma_i}} \varepsilon_i[\Sigma_i(\sigma_i)] f_i(\sigma_i) d\sigma_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

где  $\Pi_{\sigma_i}$  — пространство существования системы кондиционирования воздуха за время использования, которое представлено множеством возможных реализаций свойств  $\sigma_i$ , определяющих понятие  $i$ -й цели функционирования системы кондиционирования воздуха  $\Pi_{\sigma_i} = \{\sigma_i\}$ ,  $f_i(\sigma_i)$  — функция внешних условий, которая характеризует воздействие окружающей среды на состояние системы кондиционирования воздуха.

При этом максимум  $\varepsilon_i$  соответствует максимуму функции, определенной выражением (2).

## Выводы

- Сформулированы требования к критерию оценки эффективности систем кондиционирования воздуха современных самолетов транспортной категории, как одной из системных характеристик системы кондиционирования воздуха.

- Определена форма критерия для оценки эффективности систем кондиционирования воздуха как глобального векторного критерия, компоненты которого отражают эффективность создания микроклиматических условий для отдельных групп потребителей системы.

- Установлено, что локальные критерии эффективности СКВ должны определяться в виде интегрального критерия, учитывающего вероятностный характер ожидаемых условий эксплуатации.

- Полученные результаты могут служить основой для выбора критерия оценки эффективности систем кондиционирования воздуха современных самолетов транспортной категории в процессе проектирования.

## Література

1. Leo, T.J. A thermoeconomic analysis of a commercial aircraft environmental control system [Электронный ресурс] / T.J. Leo, I. Perez-Grande // Applied Thermal Engineering, 25, 2005. — pp. 309–325. — Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com>. — Название с экрана.
2. Brasseur, A. Inside the 747-8 New Environmental Control System [Электронный ресурс] / A. Brasseur, Leppert W., Pradille A. // AERO magazine, issue 45, Quarter 01, 2012. — pp. 19—25. — Режим доступа: <http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine>. — Название с экрана.
3. Sinnott, M. 787 No-Bleed Systems: Saving Fuel and enhancing operational efficiencies [Электронный ресурс] / Sinnott M. // AERO magazine, issue 28, Quarter 04, 2007. — pp. 6—11. — Режим доступа: <http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine>. — Название с экрана.
4. Дьяченко Ю.В. Системы жизнеобеспечения летательных аппаратов: учеб. пособие / Ю.В. Дьяченко, В.А. Спарин, А.В. Чичиндаев; под ред. Ю.В. Дьяченко. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 512 с.
5. Антонова Н.В. Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха: учеб. пособие / Н.В. Антонова, Л.Д. Дубровин, Е.Е. Егоров и др.; под ред. Ю.М. Шустрова. — М.: Машиностроение, 2006. — 284с.
6. Щербаков А. В. Автоматическое регулирование авиационных систем кондиционирования воздуха / А. В. Щербаков. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 290 с.
7. Хлистун А.И. Проблемы и методы проектирования авиационных систем кондиционирования воздуха / А.И. Хлистун, Ю.Н. Рыкунич // Пром. теплотехника. — 2006. — №1. — С. 52-60.
8. Bertalanffy L. von. General system theory: Foundations, development, applications / L. von Bertalanffy. — 17-th paperback printing, 2009. — N.Y.: George Braziller, Inc. — 1969. — 295 p.
9. Месарович М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Я. Такахара. — Пер. с англ. — М.: Мир, 1978. — 312 с.
10. Клір Дж. Систематологія. Автоматизація розв'язання системних задач / Дж. Клір. — Пер. с англ. — М.: Радіо і свяйзь, 1990. — 554 с.
11. Згуровский М.З. Системный анализ: Проблемы, методология, приложения / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. — К.: Наук. думка, 2005. — 744 с.
12. Антонов О.К. Планеры. Самолеты / О.К. Антонов; отв. ред. Б.Е. Патон. — К: Наук. думка, 1990. — 504 с.

## References

1. Leo T.J. A thermoeconomic analysis of a commercial aircraft environmental control system [Electronic resource] / T.J. Leo, I. Perez-Grande // Applied Thermal Engineering, 25, 2005. — pp. 309–325. — The access regime: <http://www.sciencedirect.com>. — Title Screen.
2. Brasseur A. Inside the 747-8 New Environmental Control System [Electronic resource] / A. Brasseur, Leppert W., Pradille A. // AERO magazine, issue 45, Quarter 01, 2012. — pp. 19—25. — The access regime: <http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine>. — Title Screen.
3. Sinnott M. 787 No-Bleed Systems: Saving Fuel and enhancing operational efficiencies [Electronic resource] / Sinnott M. // AERO magazine, issue 28, Quarter 04, 2007. — pp. 6—11. — The access regime: <http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine>. — Title Screen.
4. Dyachenko Y.V. Life-supporting systems of flight vehicle: study guide / Y.V. Dyachenko, V.A Sparin, A.V Chichindaev; edited by Y.V. Dyachenko. — Novosibirsk: publ. of NGTU, 2003. — 512 p.
5. Antonova N.V. Designing of aviation air-conditioning systems: study guide / N.V. Antonova, L.D. Dubrovin, E.E. Egorov, etc.; edited by Y.M. Shustrov. — M.: Mashinostroenie, 2006. — 284 p.
6. Shcherbakov A.V. Automatic control of aviation air-conditioning systems / A.V. Shcherbakov. — M.: publ. of MGTU a name N.E. Bauman, 2010. — 290 p.
7. Khlystun A.I. Problems and methods of designing of aviation air conditioning systems / A.I. Khlystun, J.N. Rykunich // Industrial heating engineering. — 2006. — №1. — pp. 52—60.
8. Bertalanffy L. von. General system theory: Foundations, development, applications / L. von Bertalanffy. — 17-th paperback printing, 2009. — N.Y.: George Braziller, Inc. — 1969. — 295 p.
9. Mesarovic M.D. General systems theory: Mathematical foundations / M.D. Mesarovic, Y. Takahara. — Translated from English.- M.: Mir, 1978. — 312 p.
10. Klir G.J. Architecture of systems problem solving / G.J. Klir. — Translated from English. — M.: Radio i Svyaz, 1990. — 554 p.
11. Zgurovsky M.Z. System Analysis: Problems, methodology, application / M.Z. Zgurovsky, N.D. Pankratova. — K.: Naukova Dumka, 2005. — 744 p.
12. Antonov O.K. Gliders. Planes / O.K. Antonov; responsible editor B.E. Paton. — K: Naukova Dumka, 1990. — 504 p.

Наодійшила 15.11.2013 року

**УДК 629.7.048**

**ВИБІР КРИТЕРІЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ  
СИСТЕМИ КОНДИЦІОНАВАННЯ ПОВІТРЯ  
ЛІТАКІВ ТРАНСПОРТНОЇ КАТЕГОРІЇ**

**O.I. Хлистун**

У відповідності зі сформульованими вимогами до критерію для оцінки ефективності системи кондиціювання повітря сучасних літаків транспортної категорії, визначено форму критерія ефективності як глобального векторного критерія, компоненти якого відображають ефективність створення мікрокліматичних умов для окремих груп споживачів системи. Показано, що локальні критерії ефективності системи кондиціювання повітря повинні визначатися у вигляді інтегрального критерія, який враховує імовірнісний характер очікуваних умов експлуатації.

*Ключові слова:* система кондиціювання повітря, критерій ефективності, мікрокліматичні умови, літаки транспортної категорії.

**UDC 629.7.048**

**SELECTION CRITERIA FOR EVALUATING  
THE AIR CONDITIONING SYSTEM  
EFFECTIVENESS OF TRANSPORT CATEGORY  
AIRPLANES**

**O.I. Khlystun**

In accordance with the formulated requirements to the criteria for evaluating the effectiveness of the air conditioning system of modern transport category airplanes, it is specified the form of the criteria of efficiency as a global vector criteria, the components of which reflect the efficiency of production of micro-climatic conditions for certain groups of users of the system. It is shown that the local performance criteria air conditioning system should be defined as integral criteria that take into account the probabilistic nature of the expected operating conditions of system.

*Key words:* air conditioning system, criteria of efficiency, micro-climatic conditions, transport category airplanes.