

# ЭНТРОПИЙНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИКЛА СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА САМОЛЕТА

д.т.н. Меркулов В.И.<sup>1</sup>, к.т.н. Тищенко И.В.<sup>2</sup>, Абалакин С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

SA.Abalakin@gmail.com

*В большинстве современных самолетов повсеместно применяются системы кондиционирования воздуха, для обеспечения комфортным условий полета пассажиров и экипажа, а также для охлаждения оборудования аппарата. Самолетостроение развивается с каждым годом, и требования к таким системам повышаются. Предварительные расчеты и анализы таких систем имеют ключевое значение в их разработке. Подобные расчеты позволяют определить весь дальнейший путь разработки системы и предотвратить множество ошибок. Также они помогают регулярно улучшать показатели систем, в частности их энергетические характеристики. Основными требованиями к системам являются надежность, энергоэффективность и массо-габаритные параметры. Именно об анализе эффективности системы и ее отдельных узлов написана эта работа. Помимо этого рассмотрено отдельно влияние сторонних факторов на эффективность системы, в частности – наличие влаги в потоке рабочего воздуха. В данной статье рассмотрены результаты термодинамического расчета и анализа энтропийно-статистическим методом системы кондиционирования воздуха на различных режимах работы. Рассмотрены эффективность системы в целом и проанализировано влияние несовершенства каждого из ее узлов в частности. В качестве исходных параметров для расчета систем взяты стандартные параметры работы таких систем на самолетах. Для анализа выбрана система с двухколесным турбохолодильным агрегатом с влагоудалением на тракте высокого давления. Приведена принципиальная схема рассматриваемой системы, даны формулы расчета минимально необходимой работы для компенсации производства энтропии по узлам системы. Для вычислений использовались программные комплексы MathCAD, Coolprop и Matlab.*

**Ключевые слова:** энтропийно-статистический метод, метод термодинамического анализа, система кондиционирования воздуха, СКВ, самолет.

**Для цитирования:** Меркулов В.И., Тищенко И.В., Абалакин С.А. Энтропийно-статистический анализ цикла системы кондиционирования воздуха самолета // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. № 3 (45). С. 29–35. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-29-35.

## **Введение**

В наше время практически все самолеты оснащены современными системами кондиционирования воздуха (СКВ). Задачами таких систем являются обеспечение комфортного существования человека во время пребывания в самолете. Они регулируют такие параметры воздуха как температура, давление, расход, влагосодержание и т.д. На различных режимах полета СКВ могут работать как в режиме охлаждения, так и в режиме обогрева. При проектировании СКВ основные требования предъявляются к массогабаритным параметрам, надежности, эффективности. Этими параметрами обуславливается итоговая стоимость СКВ, затраты на ее обслуживание и т.д.

Одной из основных проблем при работе СКВ является наличие влаги в рабочем потоке

воздуха. Влага имеет большое влияние на эффективность работы СКВ [4]. В данной статье приведена схема СКВ для пассажирского самолета с отделением влаги на линии высокого давления. На основе проведенного теплогидравлического расчета одного из режимов работы СКВ проведен энтропийно-статистический анализ, с помощью которого и показано общее влияние влаги на эффективность всего цикла, а также влияние узлов СКВ. Данный метод был разработан в МГТУ им. Н.Э. Баумана, пример описания его методики можно найти в работе [1]. На основе данного метода активно проводят анализы различных криогенных систем [2, 3]. Энтропийно-статистический метод анализа системы позволяет определить влияние производства энтропии в отдельных агрегатах на эффективность всей СКВ.

### Цель исследования

Целью исследования является анализ влияния влаги на эффективность работы СКВ самолета энтропийно-статистическим методом, а также влияние на неэффективности работы основных узлов СКВ.

### Описание системы

СКВ самолета – автоматическая система, предназначенная для регулировки температуры и расхода воздуха, подаваемого в кабину. Данная система работает за счет подачи сжатого воздуха, источником которого могут являться двигатели самолета или вспомогательная силовая установка. Давление такого воздуха может достигать до 3 МПа, а температура достигать 600 °С. Задачей СКВ является охлаждение воздуха и обеспечение всех необходимых параметров потока воздуха на выходе из системы. Применение отбора сжатого воздуха от двигателя было обусловлено его простотой и надежностью. Пример распространенной схемы СКВ приведен на рис. 1.

Данная система работает следующим образом. Сжатый воздух, отобранный от двигателя через регулятор избыточного давления (КР), поступает в рабочий тракт системы. Его предварительное охлаждение происходит в те-

плообменных аппаратах системы (АТ) продувочным воздухом, отбираемым из атмосферы. Влага, сконденсировавшаяся при охлаждении рабочего воздуха, удаляется во влагоотделителе (ВД), чтобы предохранить детандерную ступень турбохолодильника от разрушения. Сконденсировавшаяся влага поступает в тракт продувочного воздуха, охлаждая последний и повышая эффективность теплоотвода в теплообменных аппаратах. Далее рабочий поток воздуха поступает в детандерную ступень турбохолодильного аппарата, где расширяется и охлаждается, совершая работу, которая передается на ступень вентилятора турбохолодильного агрегата. Ступень вентилятора в свою очередь и обеспечивает продувку теплообменных аппаратов. Далее рабочий воздух подается в воздухораспределительную сеть.

### Описание влияния влаги в потоке рабочего воздуха на работу СКВ и метода энтропийно-статистического анализа цикла

Наличие влаги в потоке рабочего воздуха СКВ имеет целый ряд негативных факторов. Непосредственный фазовый переход жидкости в потоке рабочего воздуха сильно снижает эффективность СКВ в целом и может приве-

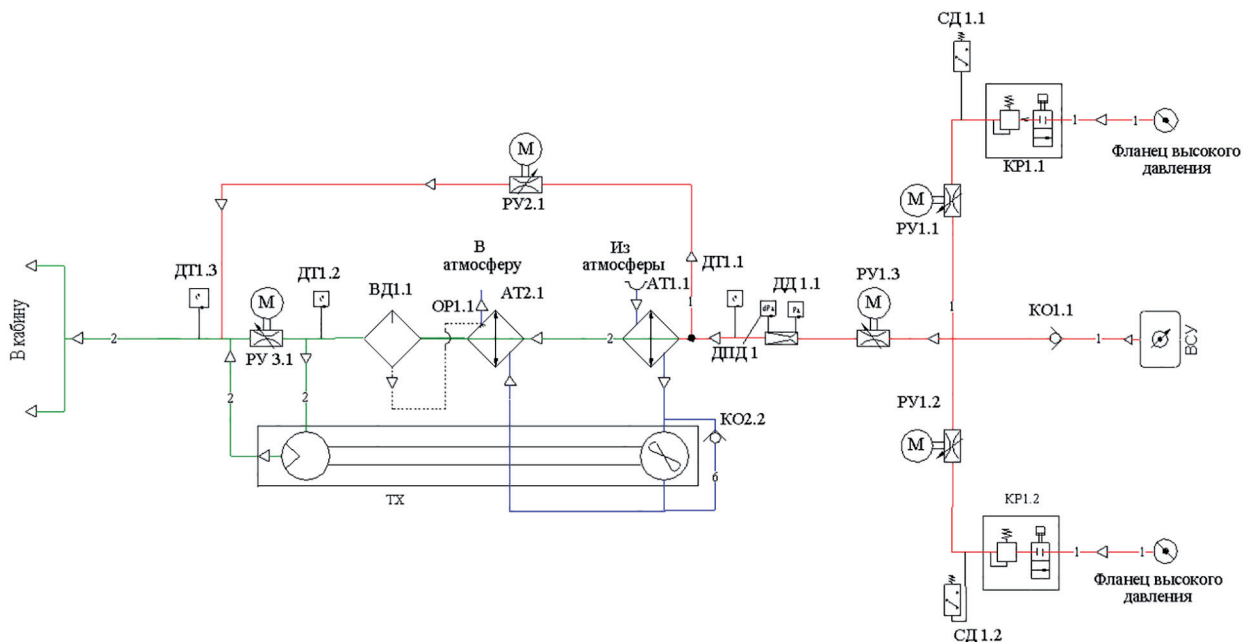


Рис. 1. Существующая схема СКВ с автоматическим регулированием:

АТ – воздухо-воздушный теплообменник; ВД – влагоотделитель; ВСУ – вспомогательная силовая установка; ДД – датчик давления; ДПД – датчик перепада давления; ДТ – датчик температуры; КО – обратный клапан; КР – регулятор избыточного давления; ОР – ороситель; РУ – регулирующие устройства/заслонки; СД – сигнализатор давления; ТХ – турбохолодильник

сти к выходу из строя некоторых ее агрегатов в частности. Температура воздуха в СКВ после расширения в детандерной ступени турбохолодильника часто достигает значений существенно ниже 0 °С, что в свою очередь приводит к обмерзанию тракта на выходе из детандерной ступени турбохолодильника. Капельная влага при попадании в детандерную ступень турбохолодильника вызывает эрозию лопаток соплового аппарата и входных кромок колеса. Также наличие влаги может привести к образованию тумана в салоне самолета.

В данной статье приведен анализ влияния влаги на эффективность системы, а также, приведено влияние на нее несовершенства узлов СКВ. Анализ проводится методом энтропийно-статистического анализа, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для этого был проведен тепловлажностный расчет работы системы на наземном режиме, являющемся самым нагруженным режимом для СКВ дозвукового пассажирского самолета в целом. При расчете использовалась математическая модель системы, расчет которой построен на характеристиках агрегатов, применяемых в существующей СКВ. Математическая модель разработана в среде *Matlab* и проверена на актах реальных испытаний СКВ. Расчет и анализ проводились при следующих допущениях:

- не учитывались утечки рабочего воздуха в СКВ;
- влияние потерь в регуляторе избыточно высокого давления на эффективность в данной статье не разбиралось и учтено совместно с влиянием двигателя (занижен КПД компрессора двигателя);
- прирост энтропии в результате несовершенства ступени вентилятора в турбохолодильнике в данном сравнении учтен как влияющий на тепловую эффективность теплообменных аппаратов;
- влияние конденсации влаги в тракте СКВ учитывается как внешний теплоприток в рабочую среду.

Для каждого фактора, влияющего на эффективность СКВ, оценивается работа, необходимая для компенсации производства энтропии этим самым фактором. В качестве идеального цикла для сравнения был выбран обратный цикл Брайтона как наиболее подходящий в данном случае. Для удобства считаем систему условно замкнутой (т.е. воздух, прошедший

кабину самолета и выпущенный в окружающую среду, считается нагретым до температуры окружающей среды и снова поступившим в двигатель).

Схема цикла представлена на рис. 2.

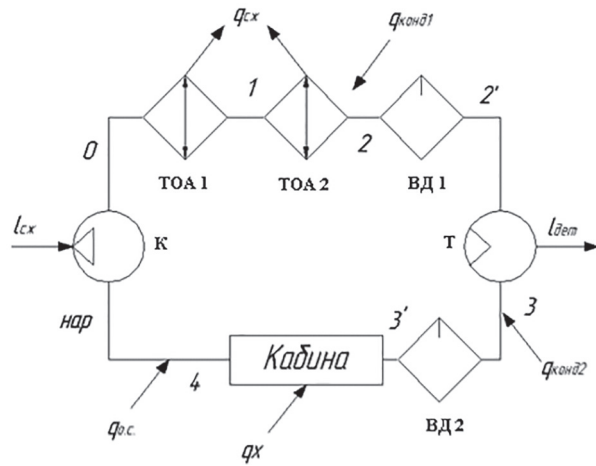


Рис. 2. Схема анализируемого цикла:

ТОА – теплообменный аппарат;  
ВД – влагоотделитель; К – с компрессор двигателя;  
Т – детандерная ступень турбохолодильного агрегата

Результаты тепловлажностного расчета цикла приведены в таблице 1.

Энтропийно-статистический анализ проводился в следующей последовательности:

1. Определение теоретической холодопроизводительности цикла:

$$q_{хт} = i_{нар} - i_{сух} = 55,57 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где  $i_{нар}$  – энтальпия воздуха в окружающей среде;  $i_{зсух}$  – энтальпия сухого воздуха на входе в кабину.

При расчете теоретической холодопроизводительности не учитывается влияние конденсации влаги после второго теплообменного аппарата, т.к. эта влага отводится из продувочного потока воздуха теплообменного аппарата, увеличивая эффективность продувки, по сути «возвращая холод».

2. Недорекуперация после второго теплообменного аппарата:

$$q_{нд} = (T_{2сух} - T_{впрыск}) \cdot C_p = 3,923 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где  $T_{впрыск}$  – температура продувочного потока воздуха после впрыска влаги;  $C_p$  – теплоемкость воздуха.

Таблица 1

Параметры точек

Точка	Температура, град	Давление, кПа	Влагосодержание, гр/кг		Энтальпия, кДж/кг	Энтропия, кДж/(кг*К)
			Пар	Жидкость		
нар	37	101,3	18		310,5	6,9
			18	0		
0	269,9	425	18		547,7	7,1
			18	0		
1	135,9	421,7	18		410	6,8
			18	0		
2	44,7	413,3	18		317,5	6,5
			14,933	3,067		
2'	44,7	395,2	15,086		317,6	6,5
			14,933	0,153		
3	-18,2	120	4,3		254,9	6,7
			4,462	10,624		
3'	4,3	120	4,3		277,5	6,7
			4,462	0,531		
4	29	101,3	18		302,4	6,9
			18	0		

3. Теплопритоки от влаги:

$$q_{\text{конд}} = r_0 \cdot d_{\text{конд}},$$

где  $r_0$  – теплота фазового перехода воды.

4. Теплоприток от окружающей среды (после кабины самолета):

$$q_{\text{ос}} = i_{\text{нар}} - i_{\text{каб}}.$$

5. Реальная холодопроизводительность:

$$q_{\text{ц}} = q_{\text{хт}} - q_{\text{ос}} - q_{\text{нд}} - q_{\text{конд1}} - q_{\text{конд2}} = 11,339 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

6. Коэффициент отношения холодопроизводительностей:

$$y = \frac{q_{\text{хт}}}{q_{\text{ц}}} = 4,901.$$

7. Минимальная работа цикла:

$$i_{\text{мин}} = (i_{\text{нар}} - i_{\text{зсух}}) \times \left( \frac{T_{\text{нар}}}{T_{\text{каб}} - T_{\text{зсух}}} \cdot \ln \left( \frac{T_{\text{каб}}}{T_{\text{зсух}}} \right) \right) = 6,45 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

8. Реальная работа двигателя:

$$i_{\text{дв}} = (i_0 - i_{\text{нар}}) = 237,24 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

9. Работа изотермического сжатия:

$$l_{\text{сж}} = R_{\text{в}} \cdot T_{\text{нар}} \cdot \ln \left( \frac{P_0}{P_{\text{нар}}} \right) = 127,65 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

10. Адиабатная работа сжатия:

$$l_{\text{ад}} = C_{\text{р}} \cdot T_{\text{нар}} \cdot \left[ \left( \frac{P_0}{P_{\text{нар}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = 163,12 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

11. Работа, необходимая для компенсации производства энтропии в теплообменниках:

$$\Delta l_{\text{тоа}} = T_{\text{нар}} \cdot \frac{S_0 - S_2}{y} = 31,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

12. Работа, необходимая для компенсации производства энтропии во влагоотделителе:

$$\Delta l_{\text{влаг}} = T_{\text{нар}} \cdot \frac{S_2 - S_2}{y} = 0,82 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

13. Работа, необходимая для компенсации нагрева потока в кабине:

$$\Delta l_q = T_{\text{нар}} \cdot \frac{q_{\text{хт}}}{y} \cdot \left( \frac{1}{T_{\text{ср}}} - \frac{1}{T_{\text{каб}}} \right) = 0,497 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

14. Коэффициент удельных затрат изотермической работы сжатия:

$$\varphi_{\text{из}} = \frac{l_{\text{из}}}{q_{\text{хт}}} = 2,297.$$

15. Работа, необходимая для компенсации испарения влаги:

$$\Delta l_{\text{вл}} = q_{\text{конд}} \cdot \varphi_{\text{из}}.$$

16. Работа, необходимая для компенсации недорекуперации:

$$\Delta l_{нд} = q_{нд} \cdot \varphi_{из} = 9,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

17. Суммарная работа для изотермического сжатия:

$$l_{sum} = l_{min} + \Delta l_{гоа} + \Delta l_{дет} + \Delta l_{влаж} + \Delta l_{вл1} + \Delta l_{вл2} + \Delta l_{нд} + \Delta l_q = 132,69 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

18. Потери изотермической работы:

$$\Delta l_{терм} = C_p \cdot (T_{0ад} - T_{вырыск}) - T_{нар} \cdot (S_0 - S_2) + q_{вл1} + q_{вл2} = 36,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

19. Потери адиабатной работы (в эти потери включены как затраты на неадиабатное сжатие в двигателе, так и потери в регуляторе избыточного давления):

$$\Delta l_{ад} = l_{ад} \cdot \left( \frac{1}{\eta_{ад}} - 1 \right) = 74,07 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

20. Итоговая работа сжатия:

$$l_{сж} = l_{sum} + \Delta l_{терм} + \Delta l_{ад} = 242,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Данный расчет имеет погрешность из-за упрощений расчета, применения данно-

го показателя теплоемкости воздуха и т.д. Погрешность составляет 2,29 % (отличие полученной работы от реальной работы двигателя) и является приемлемой для анализа.

Схема цикла в T-S диаграмме представлена на рис. 3.

Исходя из энтропийно-статистического анализа можно сделать сравнение влияния всех факторов на эффективность системы. Их можно оценить по диаграмме, приведенной на рис. 4.

### Вывод

Исходя из сравнения затрат можно заключить, что основные потери эффективности цикла вызваны влиянием неадиабатности сжатия в двигателе совместно с потерями в регуляторе избыточного давления, теплопритоки от влаги, а также потери в теплообменных аппаратах. Суммарные потери от теплопритока при конденсации влаги в потоке рабочего воздуха сравнимы с потерями в двигателе и регуляторе избыточного давления. Для уменьшения влияния этих факторов возможно введение дополнительных отборов от иных ступеней сжатия компрессора двигателя или введение в систему отдельного электрокомпрессора для отбора воздуха из окружающей среды [5]. Также повысить эффективность системы могут дополнительные агрегаты, уменьшающие влагосодержание воздуха.

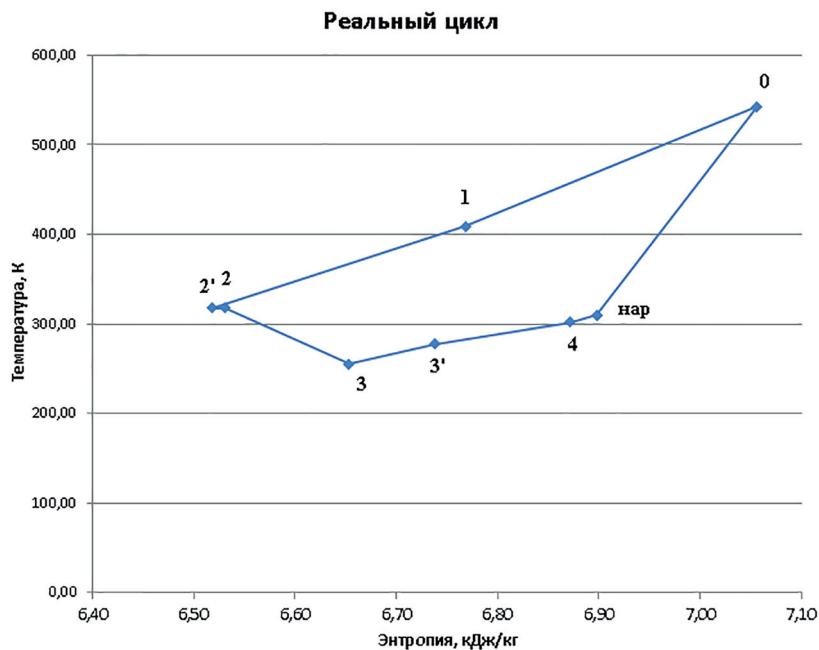


Рис. 3. T-S диаграмма холодильного цикла



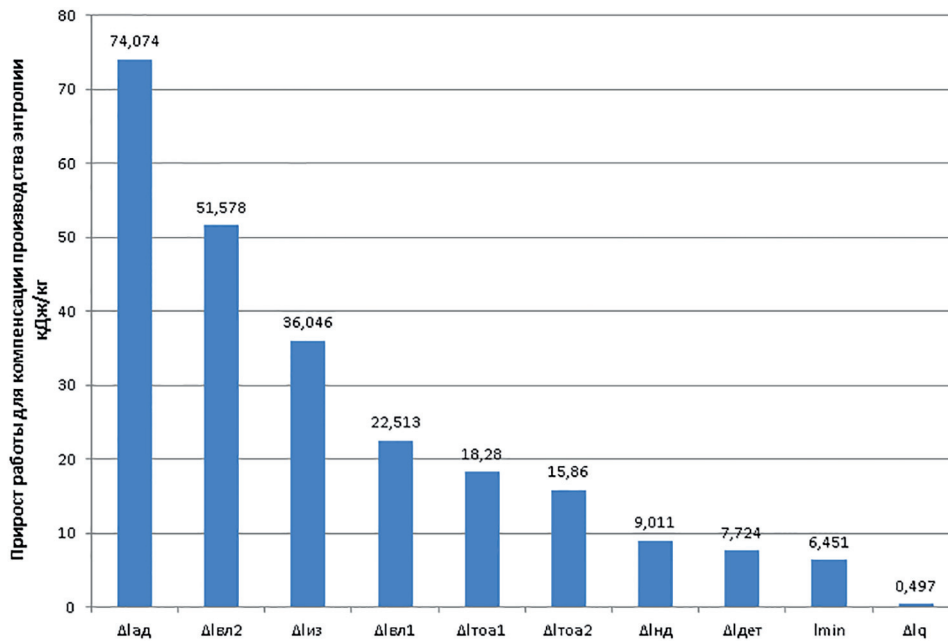


Рис. 4. Сравнение затрат работ

### Заключение

По итогам проведенного анализа можно сделать вывод, что применение энтропийно-статистического анализа возможно для анализа циклов охлаждения авиационных СКВ. Данный анализ показывает влияния всех факторов на эффективность работы системы и позволяет выявить наиболее затратные из них. В результате данного анализа можно заключить, что основными источниками энергетических потерь в СКВ являются потери в двигателе, регуляторе избыточного давления, а также потери от конденсации влаги в потоке рабочего воздуха.

### Литература

1. Архаров А.М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014.
2. Arkharov A.M., Semenov V.Y., Krasnonosova S.D (2016). An Entropy-Statistical Analysis of a Natural Gas Liquefaction Plant with External Nitrogen Cooling Cycle. *Chemical and Petroleum Engineering*, 51 (11–12) 725–735.
3. Arkharov A.M., Semenov V.Y., Krasnonosova S.D (2016). Methodology of Statistical Entropy Analysis of Small-Scale Natural Gas Liquefiers. *Chemical and Petroleum Engineering*, 51 (9) 665–673
4. Шустров Ю.М., Антонова Н.В., Дубровин Л.Д. Проектирование систем кондиционирования

воздуха. Издательство «Машиностроение». 2006.

5. Меркулов В.И., Тищенко И.В., Абалакин С.А. Применение электрокомпрессоров в системах кондиционирования воздуха вертолетов. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2019. № 2 (40). С. 59–66.
- 6.

### References

1. Arkharov A.M. *Osnovy kriologii. Entropiyno-statisticheskiy analiz nizkotemperaturnykh sistem* [Fundamentals of cryology. Entropy-statistical analysis of low-temperature systems]. Izdatel'stvo MGTU im.N.E.Baumana Publ.. 2014.
2. Arkharov A.M., Semenov V.Y., Krasnonosova S.D (2016). An Entropy-Statistical Analysis of a Natural Gas Liquefaction Plant with External Nitrogen Cooling Cycle. *Chemical and Petroleum Engineering*, 51 (11–12) 725–735.
3. Arkharov A.M., Semenov V.Y., Krasnonosova S.D (2016). Methodology of Statistical Entropy Analysis of Small-Scale Natural Gas Liquefiers. *Chemical and Petroleum Engineering*, 51 (9) 665–673
4. Shustrov Yu.M., Antonova N.V., Dubrovin L.D. i dr. *Proyektirovaniye sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Air conditioning system design]. Izdatel'stvo Mashinostroyeniye Publ.. 2006.
5. Merkulov V.I., Tishchenko I.V., Abalakin S.A. The use of electrocompressors in helicopter air conditioning systems. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2019. No 2 (40), pp. 59–66. (in Russ.).

## ENTROPY-STATISTICAL ANALYSIS OF THE AIR CONDITIONING CYCLE OF AN AIRCRAFT

DSc in Engineering **V.I. Merkulov**<sup>1</sup>, PhD in Engineering **I.V. Tishchenko**<sup>2</sup>, **S.A. Abalakin**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

SA.Abalakin@gmail.com

*Most modern aircrafts widely use air conditioning systems in order to ensure comfortable flight conditions for passengers and crew, as well as to cool the equipment of the aircraft. The aircraft industry is developing every year and the requirements for such systems are growing. Preliminary calculations and analysis of such systems are of key importance in their development. Such calculations will help to determine the entire further path of system development and prevent many errors. They also help to regularly improve the performance of systems, in particular, their energy characteristics. The main requirements for systems are reliability, energy efficiency, and weight-and-dimensional characteristics. The paper is devoted to analysis of the efficiency of the system and its individual units. In addition, there is considered separately the influence of third-party factors on the efficiency of the system, in particular, the presence of moisture in the working air flow. This article discusses the results of thermodynamic calculation and analysis by the entropy-statistical method of the air conditioning system in various operating modes. The efficiency of the system as a whole is considered and the influence of imperfection of each of its units in particular is analyzed. The standard parameters of the operation of such systems on airplanes were taken as the initial parameters for calculating the systems. For the analysis, a system with a two-wheel turbo-cooling unit with moisture removal on the high-pressure path was selected. A schematic diagram of the system is given, formulas for calculating the minimum required work to compensate the production of entropy for the units of the system are presented. To ensure the calculations, the software complexes MathCAD, Coolprop and Matlab were used.*

**Keywords:** entropy-statistical method, method of thermodynamic analysis, air conditioning system, ACS, aircraft.

**Cite as:** Merkulov V.I., Tishchenko I.V., Abalakin S.A. Entropy-statistical analysis of the air conditioning cycle of an aircraft. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2020. No 3 (45), pp. 29–35 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-29-35.