

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551956>

Анализ энергоэффективности системы кондиционирования воздуха пассажирского самолета энтропийно-статистическим методом

И.В. Тищенко^{1, 2}, С.А. Абалакин², В.И. Меркулов^{1, 2}, А.А. Жаров¹, А.В. Борисенко¹¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация;² ПАО НПО «Наука», Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Конструкторы авиационной техники стремятся повысить топливную эффективность самолетов, в том числе, за счет повышения эффективности авиационных систем кондиционирования воздуха (СКВ) путем уменьшения потерь во входящих в нее агрегатах.

Цель работы — выполнить энтропийно-статистический анализ системы кондиционирования воздуха пассажирского самолета для оценки потерь эффективности в агрегатах, входящих в нее.

Материалы и методы. Разработана статическая математическая модель системы кондиционирования воздуха с регулированием влагосодержания для расчета параметров системы на различных эксплуатационных режимах, для одного из которых выполнен энтропийно-статистический анализ.

Результаты. С помощью энтропийно-статистического анализа рассмотрены основные агрегаты системы, проведена оценка их влияния на общую эффективность системы кондиционирования воздуха, определены достоинства приведенного метода энтропийно-статистического анализа для таких систем. Математическая модель разработана в программном комплексе Matlab Simulink.

Заключение. Разработана статическая математическая модель системы кондиционирования воздуха с трехколесным турбохолодильным агрегатом и «петлевой» системой влагоотделения на высоком давлении. Проведен энтропийно-статистический анализ системы. Выполнена оценка влияния входящих в систему агрегатов на эффективность системы в целом.

Ключевые слова: энтропийно-статистический анализ; система кондиционирования воздуха самолета.

Как цитировать:

Тищенко И.В., Абалакин С.А., Меркулов В.И., Жаров А.А., Борисенко А.В. Анализ энергоэффективности системы кондиционирования воздуха пассажирского самолета энтропийно-статистическим методом // Холодильная техника. 2021. Т. 110, № 4. С. 215–224. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551956>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551956>

Analysis of the energy efficiency of an environmental control system of a passenger aircraft by using the entropy-statistical method

Igor V. Tishchenko^{1, 2}, Sergey A. Abalakin², Vladislav I. Merkulov^{1, 2},
Anton A. Zharov¹, Artem V. Borisenko¹

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;

² RPA "Nauka", Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Aviation designers are striving to increase fuel efficiency of aircraft, including by increasing the efficiency of aircraft environmental control systems by reducing losses in its components.

AIM: This study performs an entropy-statistical analysis of the environmental control system of a passenger aircraft assesses efficiency losses in the units included in it.

MATERIALS AND METHODS: A static mathematical model of an environmental control system with moisture content control was developed to calculate the system parameters in various operating modes, for which an entropy-statistical analysis was performed.

RESULTS: Using entropy-statistical analysis, the main units of the system were examined, their influence on the overall efficiency of the environmental control system was assessed, and the advantages of the given method of entropy-statistical analysis for such systems were outlined. The mathematical model was developed using the Matlab Simulink software package.

CONCLUSIONS: A static mathematical model of an environmental control system with a three-wheel air cycle machine unit and a "loop" high-pressure dehumidification system was developed. An entropy-statistical analysis of the system was performed. The influence of the units included in the system on the efficiency of the system as a whole was assessed.

Keywords: entropy-statistical analysis; aircraft environmental control system.

To cite this article:

Tishchenko IV, Abalakin SA, Merkulov VI, Zharov AA, Borisenko AV. Analysis of the energy efficiency of an environmental control system of a passenger aircraft by using the entropy-statistical method. *Refrigeration Technology*. 2021;110(4):215–224. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF551956>

ОБОСНОВАНИЕ

В современной авиации невозможно представить себе пассажирские самолеты без современной системы кондиционирования воздуха (СКВ). Данные системы решают различные задачи в области жизнеобеспечения и комфортного существования человека во время полета самолета. Параметры окружающей среды при эксплуатации самолета меняются в широком диапазоне. СКВ предназначена для регулирования таких параметров воздуха как температура, давление, расход, влагосодержание. На различных режимах полета она может работать как в режиме охлаждения, так и в режиме обогрева. При проектировании СКВ необходимо соблюдать следующие требования к ним: массогабаритные показатели, надежность, эффективность. Эти параметры существенно влияют на итоговую стоимость СКВ, затраты на ее обслуживание, эксплуатацию.

Существует большое количество возможных вариантов схемных решений СКВ. В данной статье анализируется схема с трехколесным турбохолодильным агрегатом (турбохолодильником) с петлевым влагоотделением на высоком давлении. Влага имеет большое влияние на эффективность работы СКВ [1]. Но, помимо этого, она так же влияет на конструктивные особенности и варианты режимов работы СКВ. Наличие влаги при работе СКВ на отрицательных температурах приводит к ухудшению эффективности теплообменных аппаратов вследствие их обмерзания, что вынуждает вводить дополнительные агрегаты для решения этой проблемы, а также ограничивает диапазон рабочих режимов. Схема СКВ с петлей влагоотделения на высоком давлении является одним из вариантов борьбы с негативным влиянием влаги на СКВ. Ниже приведено описание математической модели подобной схемы для пассажирского самолета. Математические модели часто применяют для холодильных и криогенных систем [2, 3]. Рассматриваемая в настоящей работе модель позволяет проводить статический расчет СКВ на всех эксплуатационных режимах. На основе этой модели был проведен энтропийно-статистический анализ системы на выбранном режиме полета самолета. Данный метод был разработан в МГТУ им. Н.Э.Баумана [4]. На основе указанного метода активно проводят анализы различных криогенных систем [5–7]. Энтропийно-статистический метод анализа системы позволяет

определить влияние эффективности отдельных агрегатов из состава СКВ на эффективность СКВ в целом.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Основной целью настоящей статьи является выполнение энтропийно-статистического анализа системы кондиционирования воздуха пассажирского самолета для оценки потерь эффективности в агрегатах, входящих в нее.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

СКВ пассажирского самолета — это система, предназначенная для регулирования температуры, расхода и влагосодержания воздуха, подаваемого в самолет. В данной статье рассматривается работа СКВ с трехколесным турбохолодильным агрегатом (турбохолодильником) и петлевой схемой влагоотделения на высоком давлении. Схема СКВ, анализ которой проводится в статье, представлена на рис. 1.

Источником сжатого воздуха в СКВ является компрессор газотурбинного двигателя (ГТД) самолета.

По рабочему тракту воздух поступает в первичный теплообменный аппарат (ТОА1), где происходит его охлаждение заборным воздухом. Пройдя его, рабочий воздух поступает в компрессорную ступень турбохолодильника (К), где происходит его дополнительное сжатие для улучшения, в последствии, отделения влаги. После этого, воздух поступает во вторичные теплообменный аппарат (ТОА2), где так же происходит теплообмен с заборным воздухом. Продувка первичного и вторичного теплообменных аппаратов (ТОА1 и ТОА2) обеспечивается за счет работы ступени вентилятора (В) турбохолодильника или набегающим потоком воздуха.

Далее воздух поступает в так называемую «петлю», состоящую из двух теплообменных аппаратов (ТОА3 и ТОА4), детандерной ступени турбохолодильника (Т) и влагоотделителя (ВО). В данной «петле» охлаждение рабочего воздуха по горячему тракту происходит за счет того же потока воздуха, после его охлаждения в детандерной ступени турбохолодильника. Рабочий воздух поступает в перегреватель (ТОА3), а затем в конденсатор (ТОА4). В данных теплообменных аппаратах происходит конденсация влаги, которая затем отделяется во влагоотделителе (ВО).

Условные обозначения

P	давление (кПа)	R_в	газовая постоянная для воздуха (287 Дж×кг ⁻¹ ×К ⁻¹)
T	температура (К)	k	показатель адиабаты для воздуха (1,41)
i	Энтальпия (Дж×кг ⁻¹)	S	Энтропия (Дж×кг ⁻¹ ×К ⁻¹)
G	Расход воздуха (кг×с ⁻¹)	η	КПД узла

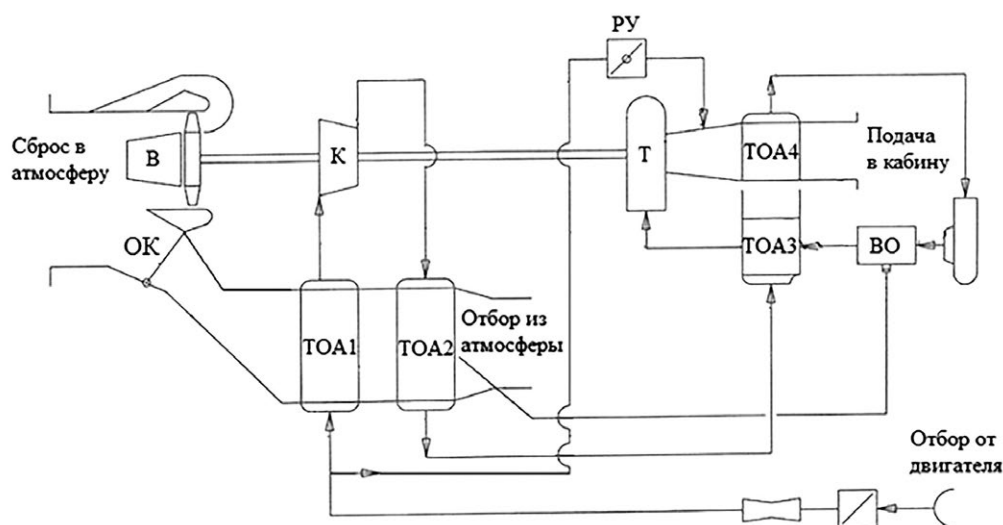


Рис. 1. Схема СКВ. В — ступень вентилятора турбохолодильника; ВО — влагоотделитель; К — компрессорная ступень турбохолодильника; ОК — обратный клапан; РУ — регулирующее устройство для перепуска рабочего воздуха; Т — детандерная ступень турбохолодильника; TOA 1 — первичный теплообменный аппарат; TOA 2 — Вторичный теплообменный аппарат; TOA 3 — перегреватель; TOA 4 — конденсатор.

Fig. 1. ACS scheme. V — air cycle machine fan stage; VO — water collector; K — compressor stage of the air cycle machine; OK — check valve; RU — control device for bypassing working air; T — expander stage of the air cycle machine; TOA 1 — primary heat exchanger; TOA 2 — secondary heat exchanger; TOA 3 — reheater; TOA 4 — condenser.

Дабы избежать попадания оставшейся влаги в ступень детандера, а также предотвратить преждевременную конденсацию последней, рабочий воздух поступает в перегреватель по холодному тракту, где подогревается, обеспечивая отвод теплоты от горячего тракта, и поступает в детандерную ступень (Т) турбохолодильного агрегата. В детандерной ступени (Т) происходит расширение и охлаждение рабочего потока воздуха, а совершаемая им при этом работа по валу турбохолодильного агрегата передается на компрессорную ступень (К) и ступень вентилятора (В). После этого основная часть потока воздуха поступает по холодному тракту в конденсатор (TOA4) обеспечивая тем самым отвод теплоты от горячего тракта. Отведенная влага во влагоотделителе (ВО) поступает на впрыск в продувочный тракт вторичного теплообменника СКВ, увеличивая тем самым эффективность охлаждения в первичном и вторичном теплообменниках (TOA1 и TOA2).

Система кондиционирования воздуха может работать в двух режимах: охлаждения и обогрева. В режиме обогрева происходит регулирование температуры воздуха на выходе путем отвода горячего потока через регулирующее устройство (РУ) и подачи его на смешивание с потоком, выходящим из детандерной ступени (Т) турбохолодильного агрегата. К преимуществам данной схемы можно отнести небольшое количество агрегатов, необходимых для создания «петли», простоту, надежность, высокую технологичность агрегатов «петли», а так же применения в качестве хладагента в петле рабочего воздуха.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для анализа работы СКВ была разработана математическая модель системы в среде Matlab Simulink. В модели производится термодинамический расчет системы. Аналогичные расчеты систем и агрегатов проводились в работах [8–10]. Модель рассчитывает параметры узловых точек СКВ и некоторых параметров её узлов, в частности. Применение данной среды было обусловлено возможностью легкой замены составляющих агрегатов СКВ и тем самым унификации модели под аналогичные схемы. В данной схеме используются математические модели аппаратов с учетом характеристик работы их реальных аналогов. В модели использован метод последовательных итераций для расчета всей схемы в целом. Указанная модель учитывает влияние фазового перехода влаги на температуру рабочего воздуха (в частности, в ней учтено влияние фазового перехода при впрыске влаги в продувочный контур вторичного теплообменного аппарата, в иных теплообменных аппаратах в рабочем тракте и ступени детандера). Работа модели разделена на два блока. Блок № 1 рассчитывает работу первичного и вторичного теплообменных аппаратов, ступень компрессора, а также продувочный контур со ступенью вентилятора. Блок № 2 рассчитывает работу «петли» системы, включающей в себя перегреватель, конденсатор, влагоотделитель и ступень турбины. Каждый блок имеет свои итерационные параметры. Блок № 1 последовательно рассчитывает

параметры основных узловых точек и подбирает расход продувочного воздуха. Блок № 2 определяет параметры узловых точек, количество отведенной влаги и мощность, отведённую от детандерной ступени турбохолодильника.

Координация работы этих двух блоков идет так же через подбор параметров (входное давление, частота вращения вала турбохолодильного агрегата, регулировка обвода воздуха, если СКВ работает на режиме обогрева). Таким образом, расчет всей системы на каком-либо режиме происходит за счет множества последовательных итераций. В результате расчета математическая модель выдает параметры в каждой из своих точек, которые в дальнейшем и будут использованы для анализа работы всей системы в целом. Пример рассчитанной схемы приведен на рис. 2.

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

При разработке и производстве СКВ важно иметь подробное представление о работе такой системы.

Удельная холодопроизводительность цикла:

$$q_{\text{ц}} = (i_A - i_2) \cdot \frac{G_2}{G_0} + (i_2 - i_6) \cdot \frac{G_6}{G_0} + (i_{17} - i_{19}) \cdot \frac{G_{19}}{G_0} = 42,189 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Минимальная удельная работа цикла:

$$l_{\text{min}} = q_{\text{ц}} \cdot \left(\frac{T_A}{T_A - T_{20}} \cdot \ln \left(\frac{T_A}{T_{20}} \right) - 1 \right) + q_{\text{ц}} \cdot \left(\frac{T_A}{T_{20} - T_{19}} \cdot \ln \left(\frac{T_{20}}{T_{19}} \right) - 1 \right) = 9,512 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Реальная удельная работа двигателя:

$$l_{\text{реал}} = \frac{k}{k-1} \cdot R_{\text{в}} \cdot T_A \cdot \frac{\left(\frac{P_0}{P_A} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{\text{дв}}} = 160,881 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Действительное значение холодильного коэффициента

$$\varepsilon = \frac{q_{\text{ц}}}{l_{\text{реал}}} = 0,262.$$

Удельные работы, необходимые для компенсации производства энтропий:

- для двигателя

$$\Delta l_{\text{дв}} = \frac{k}{k-1} \cdot R_{\text{в}} \cdot T_A \cdot \left[\left(\frac{P_0}{P_A} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{дв}}} - 1 \right) = 45,419 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

- для первичного теплообменного аппарата

$$\Delta l_{\text{тоал}} = T_A \cdot \left[(S_9 - S_8) \cdot \frac{G_9}{G_0} - (S_1 - S_2) \cdot \frac{G_2}{G_0} \right] = 18,923 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Для каждой СКВ необходимо проводить свой термодинамический расчет и анализ работы такой системы. В большинстве случаев эффективность работы СКВ анализируют по её энергопотреблению (а точнее, в основном по потреблению горячего воздуха). В МГТУ им. Н.Э. Баумана активно используется метод энтропийно-статистического анализа, с помощью которого можно подробно проанализировать работу СКВ на режимах охлаждения. Данный метод позволяет определить узлы, потери в которых имеют наибольшее влияние на эффективность СКВ, а также позволяет оценить перспективу улучшения этих узлов. В данной статье этот метод применен для анализа наземного режима охлаждения самолета, как наиболее нагруженного для СКВ. Методика расчета взята на основе работы [4]. Результаты расчета наземного режима СКВ по математической модели представлены в таблице 1.

Расчёт показателей цикла по рабочему тракту осуществлялся по следующим формулам:

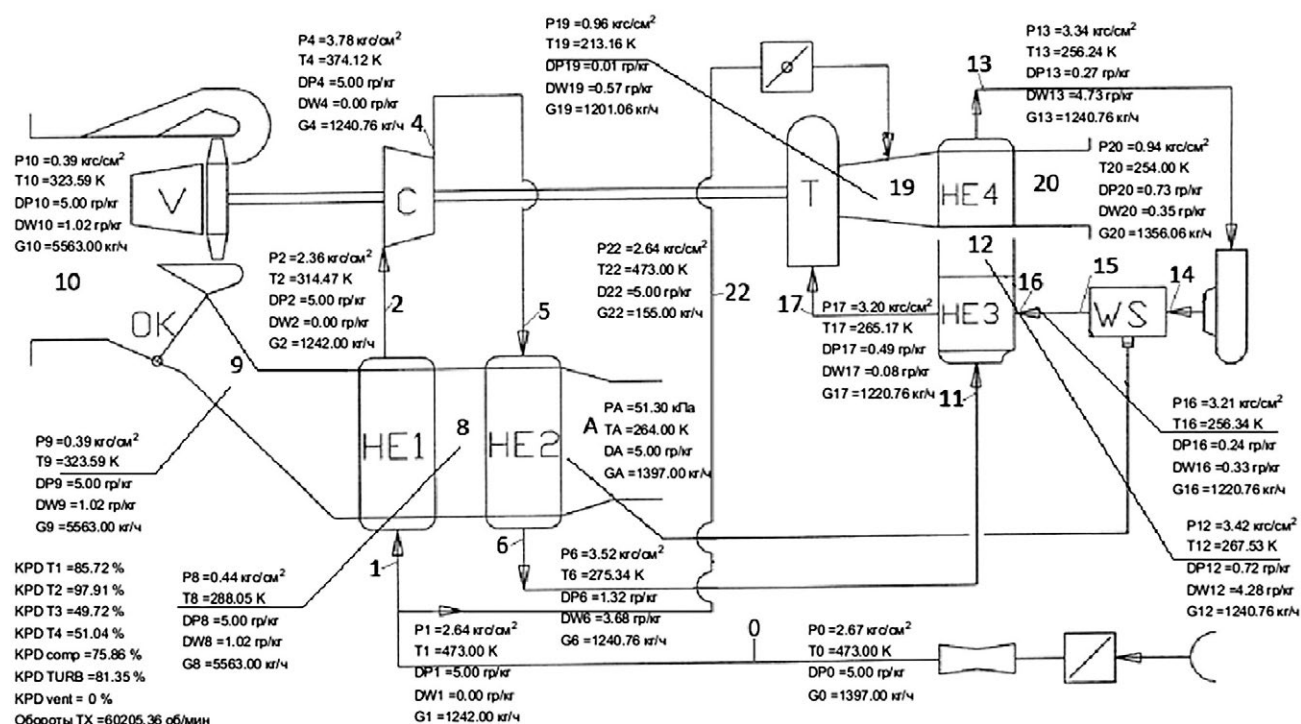


Рис. 2. Расчетная схема с точками.

Fig. 2. Design diagram with points.

Таблица 1. Расчетные параметры СКВ

Table 1. Calculated Parameters of ECS

№	Давление, кПа	Температура, К	Расход, кг/ч	Влагосодержание в виде пара, г/кг сух. возд.	Влагосодержание в виде капель, г/кг сух. возд.	Энтальпия, кДж/кг	Энтропия, кДж/кг*К
Параметры Атмосферы							
A	101,301	310	1185	18	-	310,303	6,898
Линия рабочего потока							
0	304,65	473	1185	18	0	475,463	7,010
1	302,425	473	1185	18	0	475,465	7,012
2	280,602	378,994	1185	18	0	379,681	6,808
4	375,503	424,192	1183,8	18	0	425,504	6,838
6	348,652	314,583	1183,8	14,764	3,236	314,413	6,557
12	338,705	311,004	1183,8	12,522	5,478	310,818	6,553
13	329,388	298,716	1183,8	6,351	11,658	298,425	6,521
16	316,235	299,136	1163,8	6,931	0,816	298,88	6,534
17	315,514	305,103	1163,8	7,681	0,066	304,907	6,554
19	103,193	256,906	1144,1	0,916	6,832	256,887	6,704
20	101,301	275,423	1144,1	4,516	3,232	275,513	6,779
Продувочная линия							
7	101,301	299,561	2788	22,45	0	299,796	6,864
8	99,639	348,887	2788	22,45	0	349,498	7,022
9	98,791	389,104	2788	22,45	0	390,154	7,135
10	101,3	396,283	2788	22,45	0	397,425	7,146

- для вторичного теплообменного аппарата

$$\Delta l_{\text{тоа2}} = T_A \cdot \left[(S_8 - S_7) \cdot \frac{G_8}{G_0} - (S_4 - S_6) \cdot \frac{G_6}{G_0} \right] = 28,268 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ;$$

- для компрессора

$$\Delta l_{\text{комп}} = \frac{k}{k-1} \cdot R_b \cdot T_2 \cdot \left[\left(\frac{P_4}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{комп}}} - 1 \right) = 12,306 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ;$$

- для влагоотделителя

$$\Delta l_{\text{влаг}} = T_A \cdot (S_{16} - S_{13}) \cdot \frac{G_{16}}{G_0} = 4,021 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ;$$

- для учета теплообмена с окружающей средой

$$\Delta l_{\text{мним}} = [T_A \cdot (S_A - S_{20}) - (i_a - i_{20})] \cdot \frac{G_{20}}{G_0} = 2,025 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ;$$

- для перегревателя

$$\Delta l_{\text{тоа3}} = T_A \cdot \left[(S_6 - S_{12}) \cdot \frac{G_{12}}{G_0} - (S_{16} - S_{17}) \cdot \frac{G_{17}}{G_0} \right] = 7,261 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ;$$

- для конденсатора

$$\Delta l_{\text{тоа4}} = T_A \cdot \left[(S_{20} - S_{19}) \cdot \frac{G_{19}}{G_0} - (S_{12} - S_{13}) \cdot \frac{G_{13}}{G_0} \right] = 12,341 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ;$$

- для детандера

$$\Delta l_{\text{дет}} = \frac{k}{k-1} \cdot R_b \cdot T_{17} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{19}}{P_{17}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot (1 - \eta_{\text{турб}}) = 17,659 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ;$$

- для учёта гидравлических потерь в трубопроводе перед первичным теплообменным аппаратом

$$\Delta l_{\text{гидр}} = T_A \cdot (S_1 - S_0) \cdot \frac{G_1}{G_0} = 0,654 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ;$$

Суммарная работа цикла

$$\Delta l_{\text{сум}} = l_{\text{min}} + \Delta l_{\text{тоа1}} + \Delta l_{\text{тоа2}} + \Delta l_{\text{комп}} + \Delta l_{\text{влаг}} + \Delta l_{\text{мним}} + \Delta l_{\text{дет}} + \Delta l_{\text{тоа3}} + \Delta l_{\text{тоа4}} + \Delta l_{\text{гидр}} ,$$

$$\Delta l_{\text{сум}} = 158,388 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} .$$

Погрешность расчета

$$\frac{l_{\text{реал}} - l_{\text{сум}}}{l_{\text{реал}}} = 1,25\%$$

Рабочий цикл представлен на T-S диаграмме на рис. 3, а соотношение работ для компенсации прироста энтропии на рис. 4.

ВЫВОДЫ

В результате настоящего исследования была разработана статическая математическая модель СКВ с трёхкоплексным турбохолодильным агрегатом и «петлевой» системой влагоотделения на высоком давлении. Данная модель позволяет быстро проводить расчеты системы на различных режимах полета, что упрощает разработку такой системы. По разработанной математической модели был

проведен энтропийно-статистический анализ наземного режима, как наиболее нагруженного режима работы СКВ, и на его основе была проведена оценка влияния различных узлов на эффективность системы в целом. Результаты проведенного анализа показывают, что наибольшие значения удельной работы для компенсации производства энтропии получены в компрессоре двигателя, первичном и вторичном теплообменниках, детандерной ступени турбохолодильника.

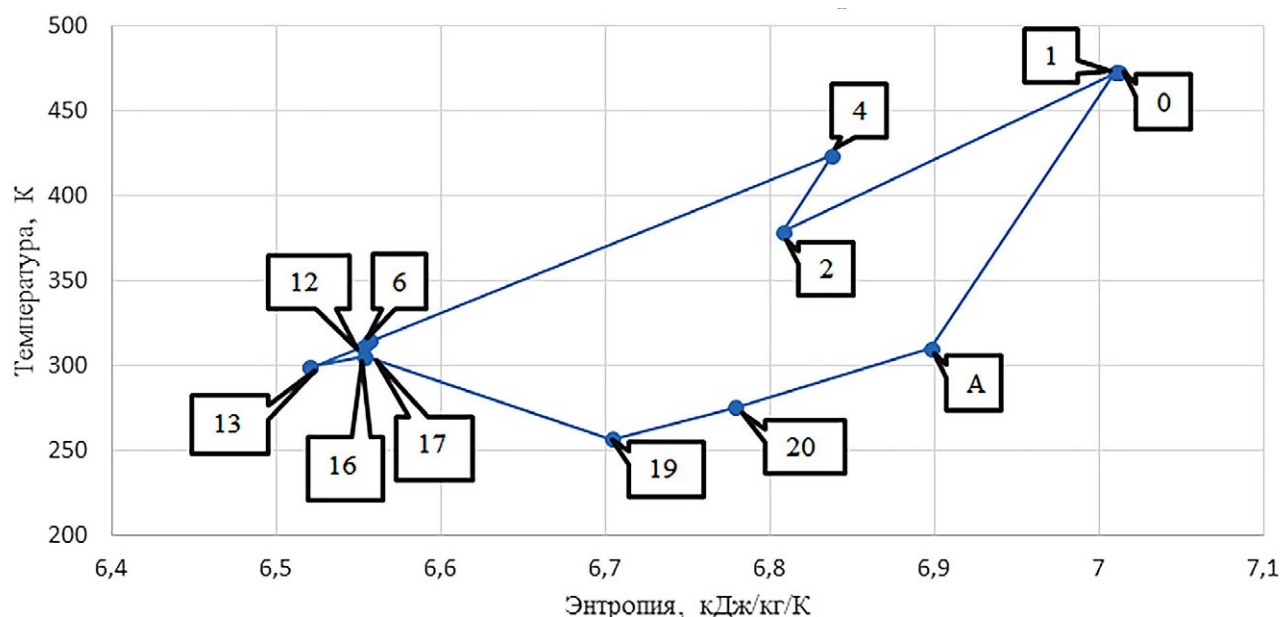


Рис. 3. Рабочий цикл в T-S диаграмме.

Fig. 3. Duty cycle in the T-S diagram.

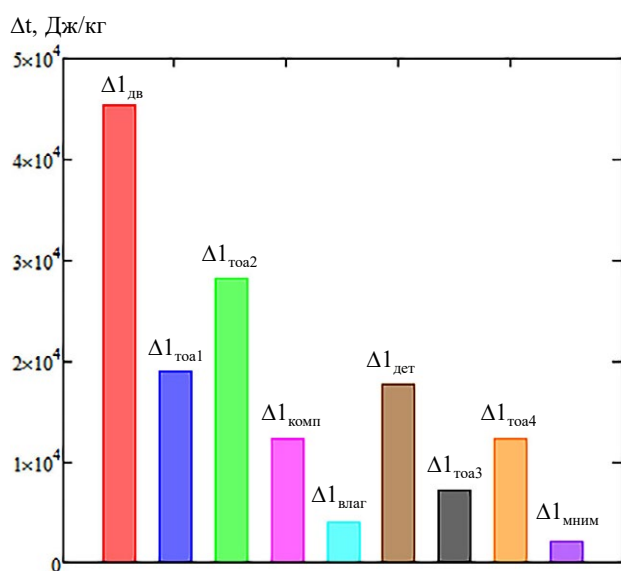


Рис. 4. Соотношение работ для компенсации прироста энтропии по узлам.

Fig. 4. Ratio of work required to compensate for the increase in entropy across units.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contributions. All authors made a substantial contribution to the conceptual development and preparation of this article and read and approved the final version before publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонова Н.В., Дубровин Л.Д., Егоров Е.Е. и др. Проектирование авиационных систем кондиционирования. М.: Машиностроение, 2006.
2. Strizhenov E.M., Chugaev S.S., Zherdev A.A. Mathematical Model of The Process of Circuit Charging of an Adsorption Methane Storage System // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019. Vol. 54, N. 9–10. P. 760–770. doi: 10.1007/s10556-019-00545-5
3. Navasardyan E.S., Antonov E.A., Arkharov I.A., et al. Modeling of Processes in Microcryogenic Gas Cooler // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 51, N. 9. P. 649–655. doi: 10.1007/s10556-016-0101-0
4. Архаров А.М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014.
5. Arkharov A.M., Semenov V.Y., Krasnonosova S.D. An Entropy-Statistical Analysis of a Natural Gas Liquefaction Plant with External Nitrogen Cooling Cycle // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 51, N. 11–12. P. 725–735. doi: 10.1007/s10556-016-0113-9
6. Arkharov A.M., Semenov V.Y., Krasnonosova S.D. Methodology of Statistical Entropy Analysis of Small-Scale Natural Gas Liquefiers // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 51, N. 9. P. 665–673. doi: 10.1007/s10556-016-0103-y
7. Gareeva D.T., Lavrov N.A. Entropy Production and Energy Loss During Mixing of Gases // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 51, N. 11–12. P. 759–764. doi: s10556-016-0118-4
8. Tishchenko I.V., Zharov A.A., Nikolaev V.S., et al. Mathematical modeling of plate-fin heat exchanger in aircraft environmental control system // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2195. P. 020074 doi: 10.1063/1.5140174
9. Zharov A.A., Leonov V.P., Tishchenko I.V., et al. Designing a turbomachine of environmental control system for missile-carrier aircraft of air launch systems // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2171. P. 030012. doi: 10.1063/1.5133178
10. Меркулов В.И., Тищенко И.В., Абалакин С.А. Энтропийно-статистический анализ цикла системы кондиционирования воздуха самолета // *Известия МГТУ "МАМИ"*. 2020. Т. 14, № 3. С. 29–35. doi: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-29-35

REFERENCES

1. Antonova NV, Dubrov LD, Egorov EE, et al. *Design of aviation air conditioning systems*. Moscow: Mashinostroyeniye; 2006. (In Russ.)
2. Strizhenov EM, Chugaev SS, Zherdev AA. Mathematical Model of The Process of Circuit Charging of an Adsorption Methane Storage System. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019;54(9–10):760–770. doi: 10.1007/s10556-019-00545-5
3. Navasardyan ES, Antonov EA, Arkharov IA, et al. Modeling of Processes in Microcryogenic Gas Cooler. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016;51(9):649–655. doi: 10.1007/s10556-016-0101-0
4. Arkharov AM. Fundamentals of cryology. *Entropy-statistical analysis of low-temperature systems*. Moscow: MG TU im NE Bauman; 2014. (In Russ.)
5. Arkharov AM, Semenov VY, Krasnonosova SD. An Entropy-Statistical Analysis of a Natural Gas Liquefaction Plant with External Nitrogen Cooling Cycle. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016;51(11–12):725–735. doi: 10.1007/s10556-016-0113-9
6. Arkharov AM, Semenov VY, Krasnonosova SD. Methodology of Statistical Entropy Analysis of Small-Scale Natural Gas Liquefiers. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016;51(9):665–673. doi: 10.1007/s10556-016-0103-y
7. Gareeva DT, Lavrov NA. Entropy Production and Energy Loss During Mixing of Gases. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016; 51(11–12):759–764. doi: 10.1007/s10556-016-0118-4
8. Tishchenko IV, Zharov AA, Nikolaev VS, et al. Mathematical modeling of plate-fin heat exchanger in aircraft environmental control system. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2195:020074 doi: 10.1063/1.5140174
9. Zharov AA, Leonov VP, Tishchenko IV, et al. Designing a turbomachine of environmental control system for missile-carrier aircraft of air launch systems. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2171:030012. doi: 10.1063/1.5133178
10. Merkulov VI, Tishchenko IV, Abalakin SA. Entropy-statistical analysis of the air conditioning cycle of an aircraft. *Izvestiya MG TU MAMI*. 2020;14(3):29–35. doi: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-29-35

ОБ АВТОРАХ

* Тищенко Игорь Валерьевич,

канд. техн. наук;
адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,
Лефортовская наб., д. 1;
ORCID: 0000-0001-6094-8723;
eLibrary SPIN: 5630-4301;
e-mail: iv.tishchenko@bmstu.ru

Абалакин Сергей Александрович,

ведущий инженер-конструктор;
ORCID: 0009-0001-9193-1147;
eLibrary SPIN: 7580-9545;
e-mail: sserviuss@gmail.com

AUTHORS' INFO

* Igor V. Tishchenko,

Cand. Sci. (Engineering);
address: 1 Lefortovskaya Naberezhnaya, 105005 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0001-6094-8723;
eLibrary SPIN: 5630-4301;
e-mail: iv.tishchenko@bmstu.ru

Sergey A. Abalakin,

Principal Design Engineer;
ORCID: 0009-0001-9193-1147;
eLibrary SPIN: 7580-9545;
e-mail: sserviuss@gmail.com

Меркулов Владислав Иванович,

д-р техн. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-3455-3709;
eLibrary SPIN: 8409-8754;
e-mail: merkulov@bmstu.ru

Жаров Антон Андреевич,

канд. техн. наук;
ORCID: 0000-0001-9945-0850;
eLibrary SPIN: 8581-1809;
e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Борисенко Артем Витальевич,

канд. техн. наук;
ORCID: 0000-0002-4818-3702;
eLibrary SPIN: 2859-5006;
e-mail: borart@bmstu.ru

Vladislav I. Merkulov,

Dr. Sci. (Engineering), Professor;
ORCID: 0000-0002-3455-3709;
eLibrary SPIN: 8409-8754;
e-mail: merkulov@bmstu.ru

Anton A. Zharov,

Cand. Sci. (Engineering);
ORCID: 0000-0001-9945-0850;
eLibrary SPIN: 8581-1809;
e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Artem V. Borisenko,

Cand. Sci. (Engineering);
ORCID: 0000-0002-4818-3702;
eLibrary SPIN: 2859-5006;
e-mail: borart@bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author