

УДК 629.7.048

Исследование установки охлаждения воздуха с двухступенчатым расширением для электрической системы кондиционирования пассажирского самолета

Л.А. Гришина, А.Ю. Паневин

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Studying an air cooling unit with the two-stage expansion for the passenger aircraft electrical air conditioning system

L.A. Grishina, A.Yu. Panevin

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Повышение энергетической эффективности авиационных систем кондиционирования воздуха — одна из основных задач, решаемых при их проектировании. В электрической системе кондиционирования воздуха уменьшение энергетических затрат на ее функционирование достигается не только использованием электроприводного автономного компрессора, но и выбором рациональной подсистемы охлаждения воздуха, отобранного от него. Разработана установка охлаждения воздуха с двухступенчатым расширением для авиационной электрической системы кондиционирования воздуха пассажирского самолета с помощью математической модели. Исследованы влияние эффективности теплообменных аппаратов, мощности, вырабатываемой ступенями турбины турбохолодильника, и расхода воздуха через обводные заслонки на температуры воздуха на выходе из установки охлаждения.

EDN: EJYQVH, <https://elibrary/ejqvvh>

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха, установка охлаждения воздуха, электроприводной автономный компрессор, турбина турбохолодильника, двухступенчатое расширение

Increasing energy efficiency in the aviation air conditioning systems appears to be one of the main problems to be solved in their design. In the electric air conditioning systems, reducing the energy costs to ensure the system operation is achieved not only by using an electric-driven autonomous compressor, but also by selecting the rational air cooling subsystem that takes air out of it. An air cooling unit with the two-stage expansion for the passenger aircraft electric air conditioning system was developed using a mathematical model. The paper studies the influence of heat exchangers efficiency, power generated by the turbo-refrigerator turbine stages, and the air flow through the bypass dampers on the outlet air temperature from the cooling unit.

EDN: EJYQVH, <https://elibrary/ejqvvh>

Keywords: air conditioning system, air cooling unit, electric-driven autonomous compressor, turbo-refrigerator turbine, two-stage expansion

Авиационная система кондиционирования воздуха (СКВ) состоит из подсистем отбора, охлаждения, распределения и регулирования давления воздуха в гермокабине. Использование электроприводного автономного компрессора в электрических СКВ позволяет упростить конструкцию подсистем отбора и охлаждения путем создания минимально допустимого давления, а следовательно, и температуры отбираемого воздуха для потребности системы кондиционирования [1].

Наибольшее влияние на параметры автономного компрессора (АК) оказывает выбор структурной схемы охлаждения воздуха электрической СКВ. Чтобы уменьшить массогабаритные характеристики АК, необходимо снизить требования к степени повышения давления воздуха на нем.

В авиационных СКВ преимущественно применяют системы охлаждения с воздушным циклом. Наиболее распространенными являются установки охлаждения воздуха (УОВ) с трехколесным турбоохладителем (ТХ), использующим одноступенчатое расширение воздуха, и петлевой схемой влагоотделения в линии высокого давления. В публикациях [2–4] приведены результаты моделирования работы УОВ с трехколесным ТХ в программном комплексе MATLAB/Simulink.

Математическое моделирование агрегатов различных структурных схем подсистем охла-

ждения с одноступенчатым расширением, входящих в состав авиационной СКВ, рассмотрено в монографии [5]. Наибольшее внимание уделено исследованию влияния атмосферных условий и параметров полета на эффективность системы.

Исследования рациональных подсистем охлаждения в составе электрических СКВ приведены в работах [6–9]. При анализе схем охлаждения воздушного цикла для электрической СКВ предпочтительнее использовать ТХ с двухступенчатым расширением (с четырехколесным ТХ) [9].

Принципиальная схема УОВ с четырехколесным ТХ и влагоотделением в линии высокого давления по схеме «петля» в составе авиационной системы кондиционирования воздуха приведена на рис. 1. Здесь и далее введены следующие обозначения: ТО1 и ТО2 — первичный и вторичный теплообменные аппараты (далее теплообменники); ТО-ПД — теплообменник-подогреватель; ТО-К — теплообменник-конденсатор; ВД — влагоотделитель; К — компрессор ТХ; Т1 и Т2 — первая и вторая ступени турбины ТХ; ДТ1, ДТ2 — датчики температуры; КО — клапан обратный; РУ1, РУ2 — обводные заслонки; М — электропривод; ВЗ — воздухозаборник продувочного тракта теплообменников; ФС — форсунка; В — вентилятор ТХ.

Так как вторая ступень турбины является крайним агрегатом подсистемы охлаждения, и

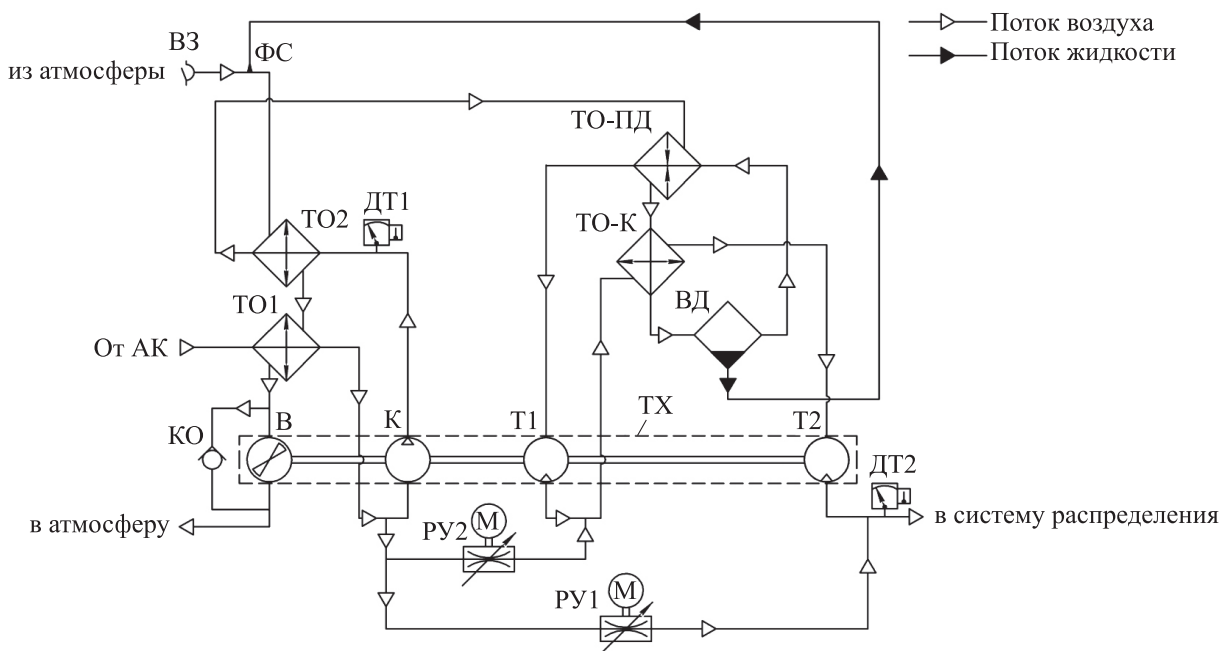


Рис. 1. Принципиальная схема УОВ с четырехколесным ТХ

воздух далее не подогревается в ТО-К, как в трехколесной схеме, уменьшаются необходимые перепады температур на ступенях турбины ТХ, что позволяет снизить потребную степень сжатия воздуха на АК [10].

В статье [11] дана оценка рассматриваемой подсистемы охлаждения по критериям стартовой массы. В публикациях [12, 13] исследованы параметры агрегатов УОВ с четырехколесным ТХ, входящих только в петлевую схему влагоотделения, не затрагивая часть системы с основным блоком теплообменников и разгрузочными устройствами турбины ТХ.

Выполнено сравнение схем охлаждения с одно- и двухступенчатым расширением с точки зрения энергетических затрат на их функционирование [14]. Дана оценка термодинамической эффективности схемы охлаждения с одноступенчатым расширением воздуха [15].

Анализ работ отечественных и зарубежных специалистов, выявил, что в приведенных публикациях неполно отражены исследования агрегатного состава УОВ с четырехколесным ТХ для авиационных СКВ, особенно электрических систем.

Цель статьи — разработка авиационной УОВ с четырехколесным ТХ с помощью математической модели для исследования проектных параметров и состава агрегатов подсистемы охлаждения электрической СКВ пассажирского самолета.

При построении математической модели приняты следующие допущения: режим работы УОВ — стационарный; воздух по тракту УОВ — сухой; массовый расход воздуха в УОВ — постоянная величина ($G = \text{const}$); изменением теплоемкости воздуха при постоянном давлении пренебрегаем в силу его малости; впрыск воды в продувочную линию теплообменников не учитываем; гидравлические потери как по длине, так и местные, обусловленные наличием агрегатов, не принимаем во внимание.

Разработка авиационной УОВ с четырехколесным ТХ с помощью математической модели. Математическая модель УОВ с четырехколесным ТХ представляет собой систему уравнений для определения выходных термодинамических параметров агрегатов, входящих в состав УОВ.

Одним из основных элементов систем охлаждения воздушного цикла является теплообменник. Температура воздуха на выходе из теплообменников УОВ по горячей и холодной ли-

ниям определяется через их эффективность, представляющую собой отношение фактического теплосъема к максимальному [10].

Температура воздуха за первичным теплообменником (рис. 2) определяется следующими выражениями:

- по горячей линии

$$T_2^{\text{TO1}} = T_1^{\text{TO1}} - \eta_{\text{TO1}} (T_1^{\text{TO1}} - T_5^{\text{TO1}});$$

- по холодной линии

$$T_6^{\text{TO1}} = T_5^{\text{TO1}} - \frac{\eta_{\text{TO1}} (T_5^{\text{TO1}} - T_1^{\text{TO1}})}{n},$$

где T_1^{TO1} — температура воздуха на входе в первичный теплообменник по горячей линии, К; η_{TO1} — коэффициент полезного действия (КПД) первичного теплообменника, определяющий его эффективность; T_5^{TO1} — температура торможения набегающего потока воздуха на входе в первичный теплообменник по холодной линии, К; n — отношение водяных эквивалентов охлаждающего и охлаждаемого воздуха, принятое равным трем [10].

Температура воздуха за вторичным теплообменником (см. рис. 2) вычисляется следующим образом:

- по горячей линии

$$T_4^{\text{TO2}} = T_3^{\text{TO2}} - \eta_{\text{TO2}} (T_3^{\text{TO2}} - T_6^{\text{TO2}});$$

- по холодной линии

$$T_7^{\text{TO2}} = T_6^{\text{TO2}} - \frac{\eta_{\text{TO2}} (T_6^{\text{TO2}} - T_3^{\text{TO2}})}{n},$$

где T_3^{TO2} и T_6^{TO2} — температура воздуха на входе во вторичный теплообменник по горячей и холодной линии, К; η_{TO2} — КПД вторичного теплообменника.

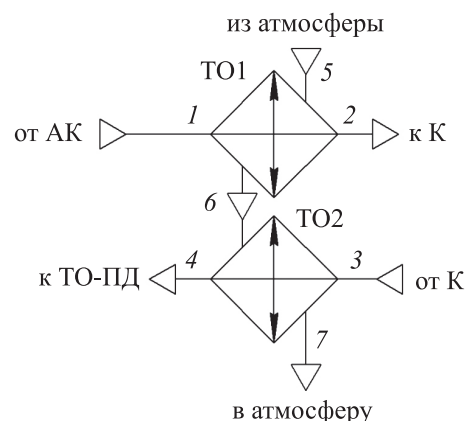


Рис. 2. Расчетная схема первичного и вторичного теплообменников

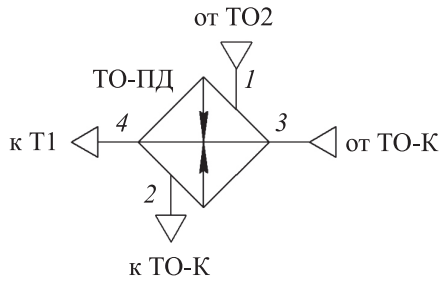


Рис. 3. Расчетная схема теплообменника-подогревателя

Температура воздуха на выходе из теплообменника-подогревателя (рис. 3) определяется следующими выражениями:

- по горячей линии

$$T_{2\text{под}} = T_{1\text{под}} - \eta_{\text{под}} (T_{1\text{под}} - T_{3\text{под}});$$

- по холодной линии

$$T_{4\text{под}} = T_{3\text{под}} - \eta_{\text{под}} (T_{3\text{под}} - T_{1\text{под}}),$$

где $T_{1\text{под}}$ и $T_{3\text{под}}$ — температура воздуха на входе в теплообменник-подогреватель по горячей и холодной линии, К; $\eta_{\text{под}}$ — КПД теплообменника-подогревателя.

Температура воздуха на выходе из теплообменника-конденсатора (рис. 4) вычисляется следующим образом:

- по горячей линии

$$T_{2\text{кон}} = T_{1\text{кон}} - \eta_{\text{кон}} (T_{1\text{кон}} - T_{3\text{кон}});$$

- по холодной линии

$$T_{4\text{кон}} = T_{3\text{кон}} - \eta_{\text{кон}} (T_{3\text{кон}} - T_{1\text{кон}}),$$

где $T_{1\text{кон}}$ и $T_{3\text{кон}}$ — температура воздуха на входе в теплообменник-конденсатор по горячей и

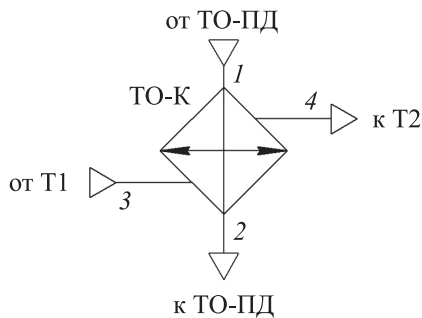


Рис. 4. Расчетная схема теплообменника-конденсатора

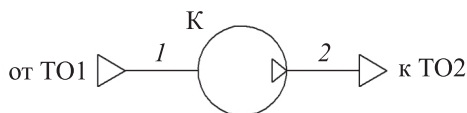


Рис. 5. Расчетная схема компрессора ТХ

холодной линии, К; $\eta_{\text{кон}}$ — КПД теплообменника-конденсатора.

Температура воздуха на выходе из компрессора ТХ (рис. 5)

$$T_{2\text{к}} = T_{1\text{к}} \left[1 + \frac{1}{\eta_{\text{к}}} \left(\pi_{\text{к}}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right],$$

где $T_{1\text{к}}$ — температура воздуха на входе в компрессор ТХ, К; $\eta_{\text{к}}$ — КПД компрессора ТХ; $\pi_{\text{к}}$ — степень сжатия воздуха в компрессоре ТХ; k — показатель адиабаты.

Мощность компрессора ТХ

$$N_{\text{к}} = C_p G_{\text{к}} (T_{2\text{к}} - T_{1\text{к}}),$$

где C_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг·К); $G_{\text{к}}$ — массовый расход воздуха через компрессор ТХ, кг/с.

Часть мощности, развиваемая турбиной ТХ, отводится как вентилятору, так и компрессору ТХ, установленным на одном валу, поэтому можно записать

$$N_{\text{к}} = n_{\text{к}} (N_{\text{ТХ1}} + N_{\text{ТХ2}}),$$

где $n_{\text{к}}$ — доля мощности, приходящаяся на компрессор ТХ; $N_{\text{ТХ1}}$ и $N_{\text{ТХ2}}$ — мощность первой и второй ступени турбины ТХ, Вт.

Температура воздуха на выходе из первой ступени турбины ТХ (рис. 6)

$$T_2^{\text{ТХ1}} = T_1^{\text{ТХ1}} \left[1 - \eta_{\text{ТХ1}} \left(1 - \pi_{\text{ТХ1}}^{\frac{k-1}{k}} \right) \right],$$

где $T_1^{\text{ТХ1}}$ — температура воздуха на входе в первую ступень турбины ТХ, К; $\eta_{\text{ТХ1}}$ — ее КПД; $\pi_{\text{ТХ1}}$ — степень понижения давления воздуха на первой ступени турбины ТХ.

Мощность первой ступени турбины ТХ

$$N_{\text{ТХ1}} = C_p G_{\text{ТХ1}} (T_1^{\text{ТХ1}} - T_2^{\text{ТХ1}}),$$

где $G_{\text{ТХ1}}$ — массовый расход воздуха через первую ступень турбины ТХ, кг/с.

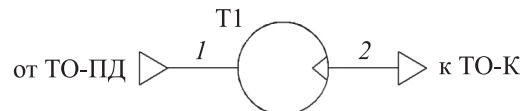


Рис. 6. Расчетная схема первой ступени турбины ТХ

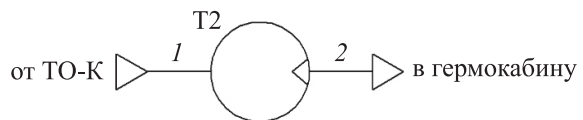


Рис. 7. Расчетная схема второй ступени турбины ТХ

Температура воздуха на выходе из второй ступени турбины ТХ (рис. 7)

$$T_2^{TX2} = T_1^{TX2} \left[1 - \eta_{TX2} \left(1 - \pi_{TX2}^{\frac{k-1}{k}} \right) \right],$$

где T_1^{TX2} — температура воздуха на входе во вторую ступень турбины ТХ, К; η_{TX2} — КПД второй ступени турбины ТХ; π_{TX2} — степень понижения давления воздуха во второй ступени турбины ТХ.

Степень расширения воздуха во второй ступени турбины ТХ

$$\pi_{TX2} = \frac{p_{TX2}}{p_{каб}},$$

где p_{TX2} — давление воздуха перед второй ступенью турбины ТХ, $p_{TX2} = p_{компр} \pi_k / \pi_{TX1}$ ($p_{компр}$ — давление воздуха за АК, Па), Па; $p_{каб}$ — давление воздуха в гермокабине согласно программе регулирования давления, Па.

Мощность второй ступени турбины ТХ

$$N_{TX2} = C_p G_{TX2} (T_1^{TX2} - T_2^{TX2}),$$

где G_{TX2} — массовый расход воздуха через вторую ступень турбины ТХ, кг/с.

Температура воздуха после смешения воздушных потоков разной температуры через обводные заслонки (рис. 8) в УОВ определяется следующими выражениями:

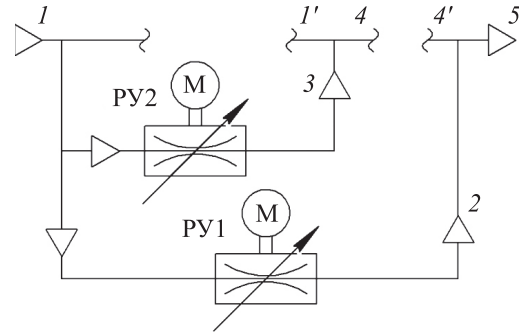


Рис. 8. Расчетная схема обводных заслонок УОВ

- для обводной заслонки РY1

$$T_5^{PY1} = \frac{G_4^{PY1} T_4^{PY1} + G_2^{PY1} T_1^{PY1}}{G_5^{PY1}};$$

- для обводной заслонки РY2

$$T_4^{PY2} = \frac{G_1^{PY2} T_1^{PY2} + G_5^{PY2} T_1^{PY2}}{G_4^{PY2}},$$

где G_4^{PY1} , G_2^{PY1} , G_5^{PY1} , G_1^{PY2} , G_3^{PY2} и G_4^{PY2} — массовый расход воздуха через линию 4', 2, 5, 1', 3 и 4 соответственно, кг/с; T_4^{PY1} , T_1^{PY1} и T_1^{PY2} — температура воздуха в линии 4', 1 и 1' соответственно, К.

Расчетная схема УОВ с четырехколесным ТХ приведена на рис. 9.

Система уравнений, описывающая работу агрегатов УОВ, имеет следующий вид:

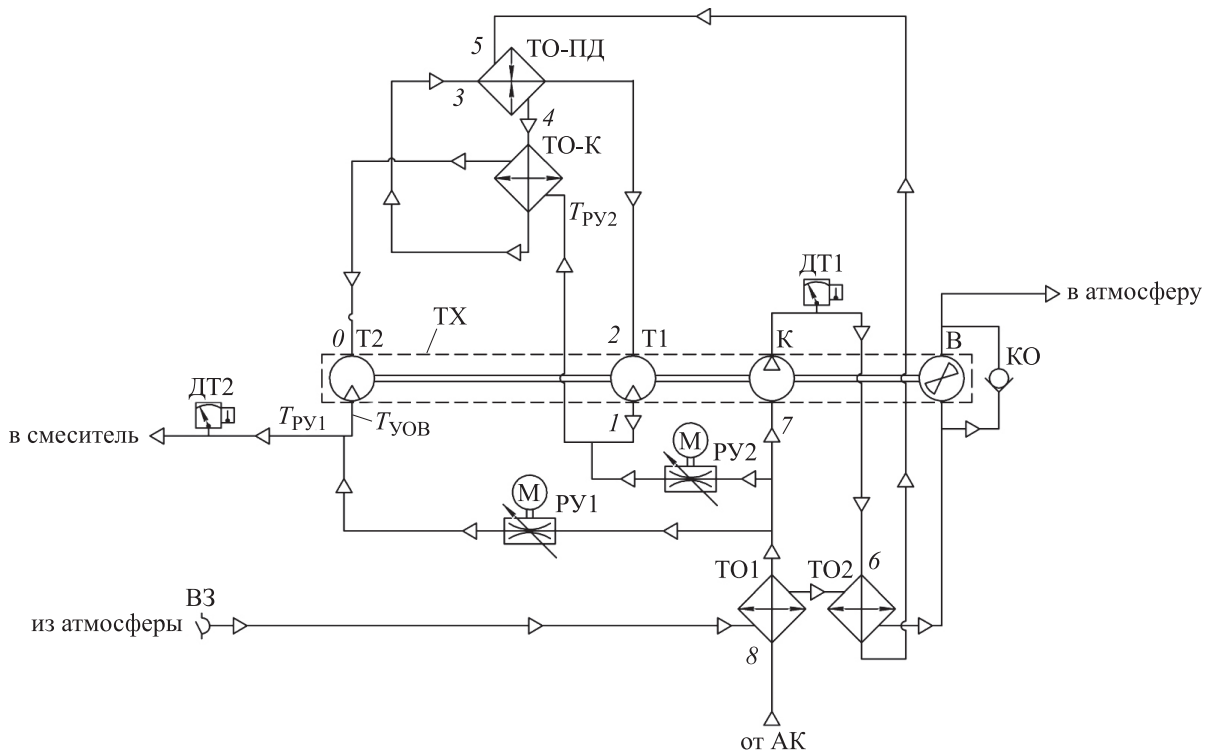


Рис. 9. Расчетная схема УОВ с четырехколесным ТХ

$$\left\{ \begin{aligned} \pi_{\text{ТХ2}} &= \frac{p_{\text{ТХ2}}}{p_{\text{каб}}}; \\ p_{\text{ТХ2}} &= \frac{p_{\text{компр}} \pi_{\text{к}}}{\pi_{\text{ТХ1}}}; \\ T_{\text{УОВ}} &= T_0 \left[1 - \eta_{\text{ТХ2}} \left(1 - \pi_{\text{ТХ2}}^{\frac{k-1}{k}} \right) \right]; \\ N_{\text{ТХ2}} &= C_p (G_{\Sigma} - G_{\text{РУ1}}) (T_0 - T_{\text{УОВ}}); \\ T_0 &= T_{\text{РУ2}} - \eta_{\text{кон}} (T_{\text{РУ2}} - T_4); \\ T_1 &= T_2 \left[1 - \eta_{\text{ТХ1}} \left(1 - \pi_{\text{ТХ1}}^{\frac{k-1}{k}} \right) \right]; \\ N_{\text{ТХ1}} &= C_p (G_{\Sigma} - G_{\text{РУ2}} - G_{\text{РУ1}}) (T_2 - T_1); \\ N_{\text{ТХ1}} &= N_{\text{ТХ2}}; \\ T_2 &= T_3 - \eta_{\text{под}} (T_3 - T_5); \\ T_3 &= T_4 - \eta_{\text{кон}} (T_4 - T_{\text{РУ2}}); \\ T_4 &= T_5 - \eta_{\text{под}} (T_5 - T_3); \\ T_5 &= T_6 - \eta_{\text{ТО2}} (T_6 - T_{\text{окр2}}); \\ T_6 &= T_7 \left[1 + \frac{1}{\eta_{\text{к}}} \left(\pi_{\text{к}}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right]; \\ N_{\text{к}} &= C_p (G_{\Sigma} - G_{\text{РУ2}} - G_{\text{РУ1}}) (T_6 - T_7); \\ N_{\text{к}} &= 0,75 (N_{\text{ТХ1}} + N_{\text{ТХ2}}); \\ T_7 &= T_8 - \eta_{\text{ТО1}} (T_8 - T_{\text{окр1}}); \\ T_{\text{окр2}} &= T_{\text{окр1}} - \frac{\eta_{\text{ТО1}} (T_{\text{окр1}} - T_8)}{3}; \\ T_{\text{окр3}} &= T_{\text{окр2}} - \frac{\eta_{\text{ТО2}} (T_{\text{окр2}} - T_8)}{3}; \\ T_{\text{РУ2}} &= \frac{(G_{\Sigma} - G_{\text{РУ2}} - G_{\text{РУ1}}) T_1 + G_{\text{РУ2}} T_7}{(G_{\Sigma} - G_{\text{РУ1}})}; \\ T_{\text{РУ1}} &= \frac{(G_{\Sigma} - G_{\text{РУ1}}) T_{\text{УОВ}} + G_{\text{РУ1}} T_7}{G_{\Sigma}}, \end{aligned} \right.$$

где индексы «0»–«8» температуры воздуха соответствуют номеру узловой точки (см. рис. 9); $T_{\text{УОВ}}$ — температура воздуха на выходе из УОВ, К; G_{Σ} , $G_{\text{РУ1}}$ и $G_{\text{РУ2}}$ — массовый расход воздуха

на входе в УОВ, через заслонку РУ1 и РУ2 соответственно, кг/с; $T_{\text{РУ2}}$ и $T_{\text{РУ1}}$ — температура воздуха после смешения воздушных потоков через обводные заслонки РУ2 и РУ1, К; $T_{\text{окр2}}$ и $T_{\text{окр3}}$ — температура продувочного воздуха перед и после вторичного теплообменника, К; $T_{\text{окр1}}$ — температура торможения набегающего потока на входе в продувочный тракт теплообменников, К.

Узловые точки между агрегатами служат для связывания расчета: выходные параметры воздуха за предыдущим агрегатом являются начальными данными расчета для следующего [5].

Исходные данные для расчета УОВ с четырехколесным ТХ при работе на максимальное охлаждение воздуха (стоянка самолета на земле в солнечный безветренный жаркий день с полной загрузкой салона пассажирами) и максимальный обогрев (полет на крейсерской высоте ночью в холодный день с частичной загрузкой салона пассажирами) приведены в таблице. При работе УОВ на максимальное охлаждение воздуха обводные заслонки полностью закрыты.

Для авиационных СКВ одним из основных параметров эффективности является холодопроизводительность, показывающая способность системы создавать минимально возможные температуры воздуха для сокращения его расхода, отбираемого от источника наддува гермокабины [5].

Результаты численных экспериментов приведены на рис. 10–13.

Зависимость температуры воздуха на выходе из УОВ $T_{\text{УОВ}}$ от КПД первичного $\eta_{\text{ТО1}}$ и вторичного $\eta_{\text{ТО2}}$ теплообменников при $\eta_{\text{под}} = \eta_{\text{кон}} = 0,5$ показана на рис. 10. Видно, что минимальная температура воздуха на выходе из УОВ достигается при теоретически максимальном КПД вторичного теплообменника и минимальном КПД первичного.

Исходные данные для расчета УОВ с четырехколесным ТХ

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$T_{\text{окр1}}$, К	328,0/227,7	$G_{\text{РУ2}}$, кг/с	0/0...0,3	k	1,4/1,4
T_8 , К	440,5/431,1	$\eta_{\text{ТХ1}}$	0,87/0,87	C_p , Дж/(кг·К)	1009/1009
G_{Σ} , кг/с	0,87/0,67	$\eta_{\text{ТХ2}}$	0,87/0,87	$p_{\text{компр}}$, кПа	223,7/170,6
$G_{\text{РУ1}}$, кг/с	0/0...0,3	$\eta_{\text{к}}$	0,75/0,75	$p_{\text{каб}}$, кПа	101,3/80,3

Примечание. В числителе дроби указаны значения при работе УОВ на максимальное охлаждение воздуха, в знаменателе — на максимальный обогрев.

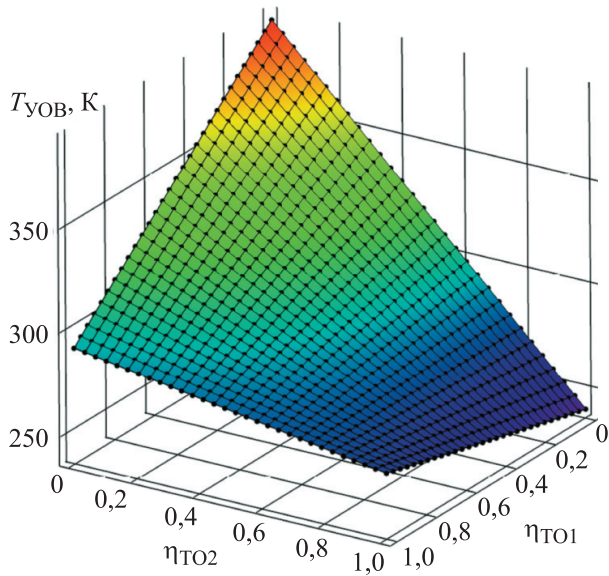
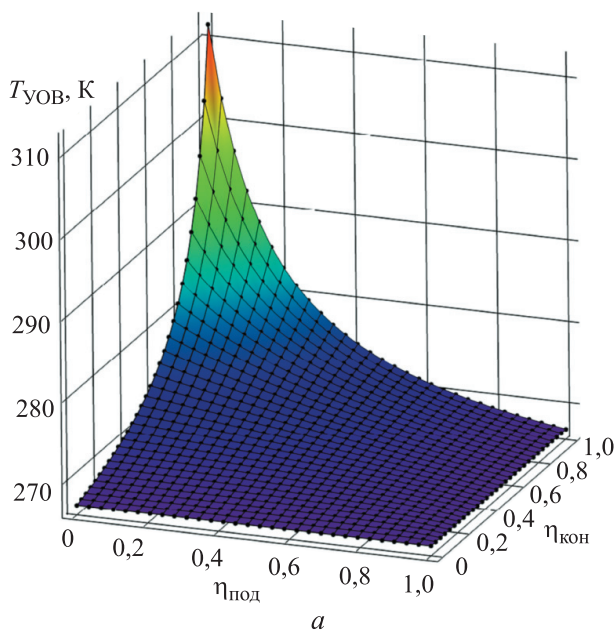


Рис. 10. Зависимость температуры на выходе из УОВ $T_{УОВ}$ от КПД первичного $\eta_{ТО1}$ и вторичного $\eta_{ТО2}$ теплообменников при $\eta_{под} = \eta_{кон} = 0,5$

Зависимости температур воздуха на выходе из УОВ $T_{УОВ}$ (а) и за теплообменником-конденсатором T_3 (б) от КПД теплообменника-подогревателя $\eta_{под}$ и теплообменника-конденсатора $\eta_{кон}$ при $\eta_{ТО1} = \eta_{ТО2} = 0,85$ приведены на рис. 11, а. Видно, что минимальная температура воздуха за УОВ устанавливается при минимальном КПД $\eta_{под}$ и максимальном КПД $\eta_{кон}$.



В то же время минимальная температура за теплообменником-конденсатором, которая свидетельствует об эффективном осушении воздуха, достигается при стремлении КПД теплообменника-подогревателя к нулю, а КПД теплообменника-конденсатора к теоретически максимально возможному значению (рис. 11, б).

Зависимости температур воздуха на выходе из УОВ $T_{УОВ}$ и за компрессором ТХ T_3 от распределения мощности, вырабатываемой турбиной ТХ, между компрессором и вентилятором ТХ $N_k / (N_{ТХ1} + N_{ТХ2})$ при $\eta_{ТО1} = \eta_{ТО2} = 0,85$ и $\eta_{под} = \eta_{кон} = 0,5$ приведены на рис. 12.

С увеличением доли мощности, приходящейся на компрессор ТХ, температура воздуха на выходе из УОВ падает, а температура за компрессором ТХ растет. При распределении всей мощности турбины на компрессор ТХ температура за ним не превышает 200°C допустимых из соображения теплостойкости конструкционных материалов УОВ.

Это свидетельствует о возможности упрощения ТХ путем удаления из схемы вентилятора. Для повышения эффективности первичного и вторичного теплообменников в случаях, когда скорость набегающего потока воздуха недостаточно велика с целью интенсификации в них теплообмена, необходимо установить автономный вентилятор с электроприводом в продувочном контуре.

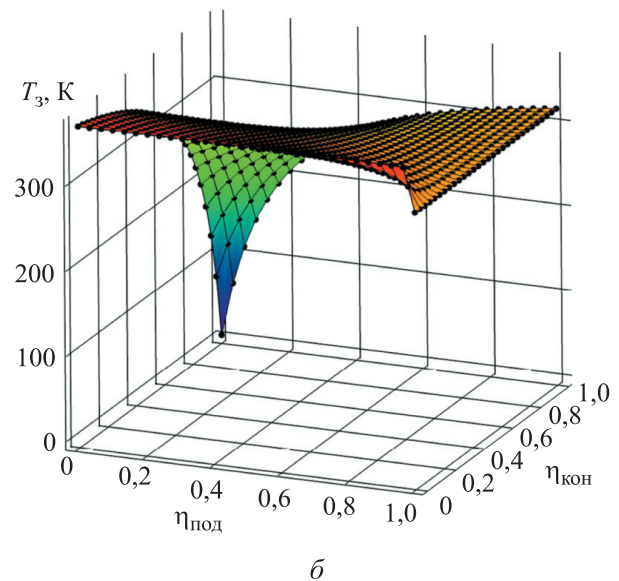


Рис. 11. Зависимости температур на выходе из УОВ $T_{УОВ}$ (а) и за теплообменником-конденсатором T_3 (б) от КПД теплообменника-подогревателя $\eta_{под}$ и теплообменника-конденсатора $\eta_{кон}$ при $\eta_{ТО1} = \eta_{ТО2} = 0,85$

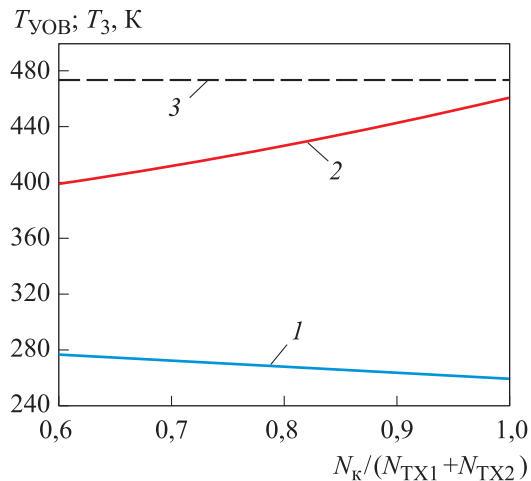


Рис. 12. Зависимости температуры на выходе из УОВ $T_{УОВ}$ (1) и за компрессором ТХ T_3 (2) от распределения мощности, вырабатываемой турбиной ТХ, между компрессором и вентилятором ТХ $N_k / (N_{ТХ1} + N_{ТХ2})$ при $\eta_{ТО1} = \eta_{ТО2} = 0,85$ и $\eta_{ПОД} = \eta_{КОН} = 0,5$: 3 — предел теплостойкости материалов, применяемых в УОВ, ограниченный температурой 200°C

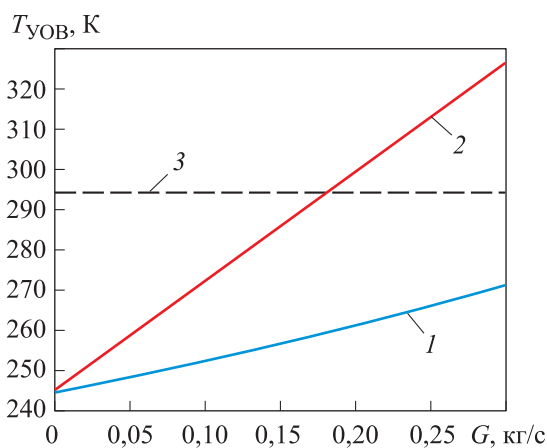


Рис. 13. Зависимость температуры воздуха на выходе из УОВ $T_{УОВ}$ при открытии обводных заслонок РУ2 (1) и РУ1 (2) от расхода воздуха через них G для $\eta_{ТО1} = \eta_{ТО2} = \eta_{ПОД} = \eta_{КОН} = 0,5$: 3 — температура воздуха, необходимая для подачи в пассажирский салон при его обогреве

Зависимость температуры воздуха на выходе из УОВ $T_{УОВ}$ при открытии обводных заслонок РУ2 и РУ1 от расхода воздуха через них G для $\eta_{ТО1} = \eta_{ТО2} = \eta_{ПОД} = \eta_{КОН} = 0,5$ приведена на рис. 13.

Как видно из рисунка, подмешиванием горячего воздуха через обводные заслонки можно увеличить его температуру на выходе из узла охлаждения до потребной при обогреве гермокабины. Причем при сильном переохлаждении воздуха открывается заслонка РУ1, а при незначительном — РУ2.

Выводы

1. Для функционирования УОВ с четырехколесным ТХ необходимы меньшие степени сжатия воздуха на АК, чем для работы УОВ с трехколесным ТХ, наиболее распространенных в гражданской авиации.

2. Исследование математической модели УОВ с четырехколесным ТХ в составе авиационной электрической СКВ показало следующее:

- при теоретически возможном КПД вторичного теплообменника, равном единице, необходимость в первичном теплообменнике отпадает; однако его присутствие является необходимым, что связано с допустимой температурой воздуха за компрессором ТХ;

- КПД теплообменника-конденсатора и теплообменника-подогревателя желательно устанавливать в интервале $0,4 \dots 0,6$ из соображений эффективной осушки воздуха, предотвращения обмерзания теплообменника-конденсатора и необходимого перепада температур на ступенях турбины ТХ;

- при увеличении доли мощности, вырабатываемой турбиной ТХ, приходящейся на компрессор ТХ, снижается температура воздуха на выходе из УОВ; при этом температура и давление воздуха за компрессором ТХ находятся в диапазоне допустимых значений, вследствие чего для конструктивного упрощения ТХ и уменьшения его массы вентилятор ТХ, представляющий собой разгрузочное устройство турбины ТХ, может быть автономным, т. е. не связанным с ней механически;

- при функционировании СКВ на обогрев гермокабины для поддержания заданной температуры воздуха за УОВ применяют обводные заслонки: при сильном переохлаждении воздуха — заслонку РУ1, а при незначительном — РУ2.

Литература

- [1] Паневин А.Ю. Анализ и расчетная оценка применения электроприводного автономного компрессора для системы кондиционирования воздуха в концепции более элек-

- трического среднемагистрального пассажирского самолета. *XLIX Гагаринские чтения*. Москва, Перо, 2023, с. 47–48.
- [2] Jennions I., Ali F., Miguez M.E. et al. Simulation of an aircraft environmental control system. *Appl. Therm. Eng.*, 2020, vol. 172, art. 114925, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114925>
- [3] Xiong P. *Aircraft environmental control systems modeling for configuration selection*. Master's thesis. Cranfield University, 2013. 136 p.
- [4] Perez L.D. Modeling and simulation of an aircraft environmental control system. Master's thesis. *École Polytechnique de Montréal*, 2016. 144 p.
- [5] Дьяченко Ю.В., Горбачев М.В., Пашенко Н.И. *Термодинамика циклов авиационных систем кондиционирования воздуха*. Новосибирск, Изд во НГТУ, 2011. 240 с.
- [6] Каллиоппин А.К., Савельев Р.С., Смагин Д.И. Основные тенденции развития систем кондиционирования воздуха перспективных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 6, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1627>
- [7] Смагин Д.И., Старостин К.И., Савельев Р.С. и др. Анализ конкурирующих вариантов систем кондиционирования воздуха без отбора воздуха от двигателей на этапе концептуального проектирования комплекса бортовых систем пассажирских самолетов. *Computational nanotechnology*, 2019, т. 6, № 3, с. 86–91, doi: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2019-6-3-86-91>
- [8] Смагин Д.И., Старостин К.И., Савельев Р.С. и др. Методика определения проектных параметров центробежного воздушного компрессора на основе математической модели безотборной системы кондиционирования воздуха. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и технические науки*, 2020, № 10, с. 115–121, doi: <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2020.10.28>
- [9] Гришина Л.А., Паневин А.Ю. Выбор рациональной структурной схемы охлаждения воздуха и формирование потребных параметров отбора электрифицированной системы кондиционирования воздуха. *Сб. тез. работ 22 й Межд. конф. Авиация и космонавтика*. Москва, Перо, 2023, с. 41–42.
- [10] Шустров Ю.М. *Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха*. Москва, Машиностроение, 2006. 382 с.
- [11] Старостин К.И. Выбор оптимальной структуры и параметров агрегатов петлевой схемы влагоотделения. *Труды МАИ*, 2013, № 67. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=41577>
- [12] Старостин К.И., Шустров Ю.М. Исследование работы петлевой схемы влагоотделения на влажном воздухе. *Вестник МАИ*, 2013, т. 20, № 1, с. 7–15.
- [13] Старостин К.И. Математическое моделирование авиационных систем кондиционирования воздуха с учетом влажности. *Вестник МАИ*, 2009, т. 16, № 2, с. 141–145.
- [14] Alvarenga M., Andrade C., Zaparoli E. A thermodynamic analysis of three and four wheel air cycle machines for aeronautical applications. *IREME*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 190–200, doi: <https://doi.org/10.15866/ireme.v9i2.5543>
- [15] Дьяченко Ю.В., Пашенко Н.И. Оценка термодинамической эффективности авиационной системы кондиционирования воздуха. *Научный вестник НГТУ*, 2010, № 1, с. 185–190.

References

- [1] Panevin A.Yu. [Analysis and computational evaluation of the application of an electric-driven autonomous compressor for the air conditioning system in the concept of a more electric medium-haul passenger aircraft]. *XLIX Gagarynskie chteniya* [XLIX Gagarin Readings]. Moscow, Pero, 2023, pp. 47–48. (In Russ.).
- [2] Jennions I., Ali F., Miguez M.E. et al. Simulation of an aircraft environmental control system. *Appl. Therm. Eng.*, 2020, vol. 172, art. 114925, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114925>
- [3] Xiong P. *Aircraft environmental control systems modeling for configuration selection*. Master's thesis. Cranfield University, 2013. 136 p.

- [4] Perez L.D. *Modeling and simulation of an aircraft environmental control system*. Master's thesis. École Polytechnique de Montréal, 2016. 144 p.
- [5] Dyachenko Yu.V., Gorbachev M.V., Pashchenko N.I. *Termodinamika tsiklov aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Thermodynamics of cycles of aviation air conditioning systems]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU Publ., 2011. 240 p. (In Russ.).
- [6] Kalliopin A.K., Savelyev R.S., Smagin D.I. Main trends in designing air conditioning systems for future-technology vehicles. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2017, no. 6, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1627> (in Russ.).
- [7] Smagin D.I., Starostin K.I., Savelyev R.S. et al. Analysis of competing variants of air conditioning systems without air extraction from engines at the stage of passenger aircraft onboard systems conceptual design. *Computational nanotechnology*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 86–91, doi: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2019-6-3-86-91> (in Russ.).
- [8] Smagin D.I., Starostin K.I., Savelyev R.S. et al. Method for determining the design parameters of a centrifugal air compressor based on a mathematical model of a non-selective air conditioning system. *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki. Ser. Estestvennyye i tekhnicheskie nauki* [Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Ser. Natural and Technical Sciences], 2020, no. 10, pp. 115–121, doi: <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2020.10.28> (in Russ.).
- [9] Grishina L.A., Panevin A.Yu. [Selection of rational structural scheme of air cooling and formation of required selection parameters of electrified air conditioning system]. *Sb. tez. rabot 22-y Mezhd. konf. Aviatsiya i kosmonavtika* [Abs. 22nd Int. Conf. Aviation and Cosmonautics]. Moscow, Pero Publ., 2023, pp. 41–42. (In Russ.).
- [10] Shustrov Yu.M. *Proektirovanie aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Design of aviation air conditioning systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 382 p. (In Russ.).
- [11] Starostin K.I. Optimal choice of the high pressure water separation structure and parameters. *Trudy MAI*, 2013, no. 67. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=41577> (in Russ.).
- [12] Starostin K.I., Shustrov Yu.M. Research on functioning of high-pressure water separation loop scheme during humid air processing. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2013, vol. 20, no. 1, pp. 7–15. (In Russ.).
- [13] Starostin K.I. Mathematical modelling of aviation air conditioning systems with consideration of humidity. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2009, vol. 16, no. 2, pp. 141–145. (In Russ.).
- [14] Alvarenga M., Andrade C., Zapparoli E. A thermodynamic analysis of three and four-wheel air cycle machines for aeronautical applications. *IREME*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 190–200, doi: <https://doi.org/10.15866/ireme.v9i2.5543>
- [15] Dyachenko Yu.V., Pashchenko N.I. Estimation of thermodynamic efficiency of an aviation central air of air. *Nauchnyy vestnik NGTU* [Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University], 2010, no. 1, pp. 185–190. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 15.05.2024

Информация об авторах

ГРИШИНА Лариса Андреевна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры 101 «Проектирование и сертификация авиационной техники». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125080, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе д. 4, e-mail: petrolar88@yandex.ru).

ПАНЕВИН Александр Юрьевич — аспирант кафедры 101 «Проектирование и сертификация авиационной техники». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125080, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: A.panev99@yandex.ru).

Information about the authors

GRISHINA Larisa Andreevna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department 101 Design and Certification of the Aviation Equipment. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125080, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Shosse, Bldg. 4, e-mail: petrolar88@yandex.ru).

PANEVIN Aleksandr Yurievich — Postgraduate, Department 101 Design and Certification of the Aviation Equipment. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125080, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Shosse, Bldg. 4, e-mail: A.panev99@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гришина Л.А., Паневин А.Ю. Исследование установки охлаждения воздуха с двухступенчатым расширением для электрической системы кондиционирования пассажирского самолета. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 1, с. 112–122.

Please cite this article in English as:

Grishina L.A., Panevin A.Yu. Studying an air cooling unit with the two-stage expansion for the passenger aircraft electrical air conditioning system. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 1, pp. 112–122.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Автоматизированное проектирование элементов летательных аппаратов в программном комплексе Ansys с использованием языка программирования APDL-Fortran»

Авторы: С.В. Резник, Д.В. Сапронов

Рассмотрены основы автоматизированного проектирования в программном комплексе Ansys. Приведены постановки и алгоритмы решения задач автоматизированного проектирования элементов летательных аппаратов в программном комплексе Ansys с использованием языка программирования APDL-Fortran. Представлены особенности работы в модуле для создания композиционных материалов Ansys Composite PrePost.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 24.03.01 «Ракетные комплексы и космонавтика» и 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов», изучающих дисциплину «Основы автоматизированного проектирования».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>