

Закономерности изменения потерь механической энергии при оптимизации работы, передаваемой в наружный контур ТРДД со смешением потоков

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»

Предложена модель расчета полного давления перед соплами суммарных потерь механической энергии при энергообмене между контурами ТРДД со смешением потоков. С помощью этой модели получены зависимости полного давления перед соплами суммарных потерь механической энергии от степени повышения давления вентилятора наружного контура, показано наличие минимума суммарных потерь механической энергии при энергообмене между контурами, который совпадает с максимумом полного давления перед соплом. Выполнен анализ структуры суммарных потерь механической энергии при энергообмене между контурами, который позволил объяснить наличие минимума суммарных потерь механической энергии при энергообмене между контурами ТРДД со смешением потоков и обосновать условие оптимальности распределения работы между ними.

Ключевые слова: потери механической энергии, ТРДД со смешением потоков, вентилятор, турбина вентилятора, камера смешения, газогенератор.

Известно [1, 2], что для ТРДД существует оптимальная степень повышения давления в наружном контуре $\pi_{\epsilon_{IIonm}}^*$, обеспечивающая максимум удельной тяги $P_{y\delta}$ и минимум удельного расхода топлива $c_{y\delta}$.

Для ТРДД со смешением потоков (рис. 1) не удастся получить простую формулу для вычисления $\pi_{\epsilon_{IIonm}}^*$, поэтому обычно используются рекомендации [1, 2], что $\pi_{\epsilon_{IIonm}}^*$ обеспечивается при примерном равенстве полных давлений потоков на входе в камеру смешения:

$$P_I^* \approx P_{II}^* \quad (1)$$

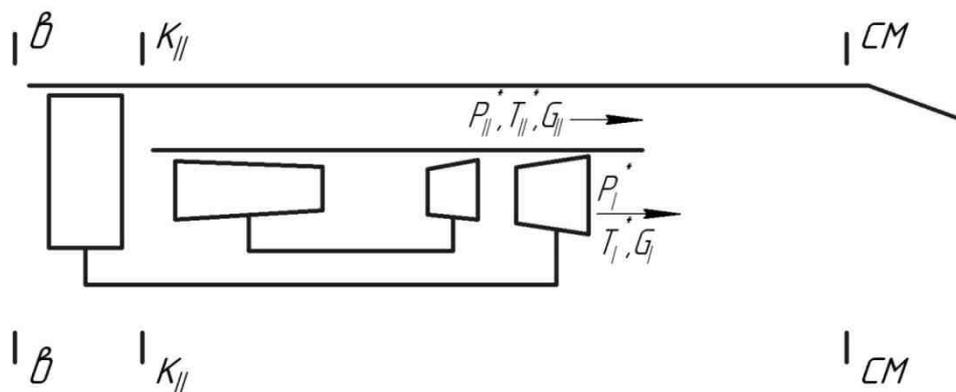


Рис. 1. Схема ТРДД со смешением потоков

При отсутствии окружающей составляющей скорости потоков в камере смешения статическое давление сохраняется постоянным по радиусу, поэтому условие

(1) может быть записано в виде примерного равенства приведенных скоростей потоков на входе в камеру смешения

$$\lambda_I \approx \lambda_{II}. \quad (2)$$

При соблюдении условия (2) скорости потоков оказываются разными вследствие разных температур потоков в наружном и внутреннем контурах, что не обеспечивает минимума потерь механической энергии при смешении потоков в камере смешения.

При полном смешении потоков максимум $P_{y\delta}$ обеспечивается при максимуме полного давления перед соплом P_{cm}^* .

В работах [1, 2] отмечается, что величина P_{cm}^* определяется не только потерями механической энергии при смешении потоков в камере смешения, а всеми потерями при передаче работы из внутреннего контура в наружный с последующим смешением потоков. Поэтому максимуму P_{cm}^* должен соответствовать минимум суммарных потерь механической энергии $L_{r\Sigma}$.

Целями настоящей статьи являются:

– установление закономерностей изменения суммарных потерь механической энергии $L_{r\Sigma}$ и полного давления перед соплом ТРДД со смешением потоков P_{cm}^* в зависимости от величины работы, передаваемой из внутреннего контура в наружный, с последующим установлением взаимосвязи между $L_{r\Sigma}$ и P_{cm}^* ;

– анализ структуры суммарных потерь механической энергии при энергообмене между контурами в ТРДД со смешением потоков и закономерностей ее изменения в зависимости от величины передаваемой работы.

1. Расчетные соотношения

Пусть задан генератор свободной работы (ГСР) ТРДД со смешением потоков (вентилятор и компрессор внутреннего контура, камера сгорания, турбина компрессора и турбина вентилятора внутреннего контура, являющаяся частью турбины вентилятора), изображенный на рис. 2. Тогда параметры потока в сечении ТВ1–ТВ1, которое является условной границей между турбинами вентилятора внутреннего и наружного контуров, будут неизменными.

Величина работы, передаваемой в наружный контур от турбины вентилятора L_{BII}^* , варьируется.

При передаче работы в наружный контур имеются потери механической энергии в проточной части турбины вентилятора наружного контура, вне проточной части (из-за трения ротора в газовой среде вне проточной части и трения в опорах), в проточной части вентилятора наружного контура, канале наружного контура, камере смешения.

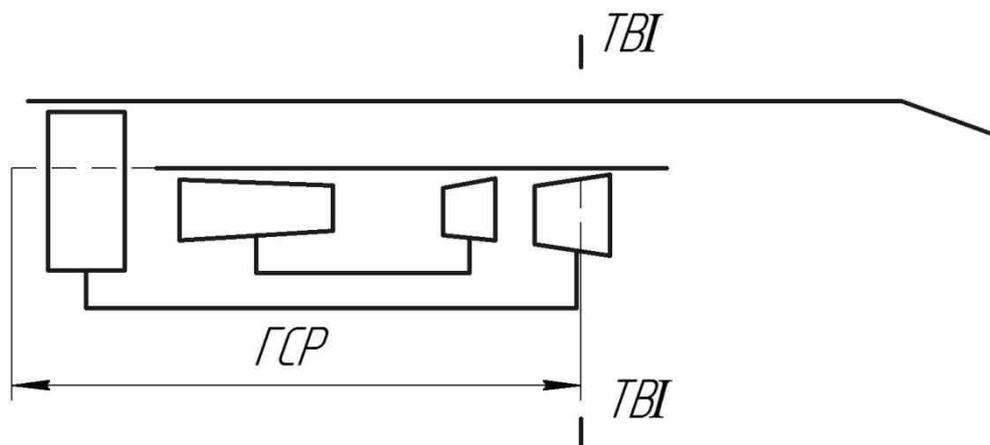


Рис. 2. Схема генератора свободной работы ТРДД со смешением потоков

Величины потерь механической энергии можно вычислить известным КПД лопаточных машин, механическому КПД турбовентилятора наружного контура $\eta_{мехII}$ и коэффициенту восстановления полного давления в канале наружного контура. Определение потерь в камере смешения возможно при использовании некоторых допущений, описанных в работе [3]. В частности, удельные потери механической энергии в расчете на 1 кг воздуха, проходящего через ТРДД, с достаточной степенью точности определяются по формулам:

– в вентиляторе наружного контура

$$L_{r_{BII}} = L_{BII}^* \left(1 - \eta_{BII}^* \right) \frac{m}{1+m}; \quad (3)$$

– вне проточной части

$$L_{r_{мех}} = \frac{1}{1+m} \left(L_{TBII}^* - L_{BII}^* m \right) = \frac{1}{1+m} L_{TBII}^* \left(1 - \eta_{мехII} \right); \quad (4)$$

– в турбине вентилятора наружного контура

$$L_{r_{TBII}} = L_{TBII}^* \left(1 - \eta_{TBII}^* \right) \frac{1}{1+m}; \quad (5)$$

– в канале наружного контура

$$L_{r_{II}} = \frac{m}{1+m} \left[-\frac{n_{IIконт}}{n_{IIконт} - 1} R(T_{II} - T_{кII}) - \frac{c_{II}^2 - c_{кII}^2}{2} \right] \quad (6)$$

Показатель политропы в канале наружного контура $n_{IIконт}$ определяется по статическим параметрам потока:

$$n_{IIконт} = \frac{\ln \left(\frac{P_{II}}{P_{кII}} \right)}{\ln \left(\frac{P_{II}}{P_{кII}} \right) - \ln \left(\frac{T_{II}}{T_{кII}} \right)} \quad (7)$$

Для определения статических параметров на входе и выходе канала наружного контура необходимо задаться скоростью потока в этих сечениях ($c_{кII}$ и c_{II}) и коэффициентом восстановления полного давления σ_{II} .

Удельные потери механической энергии в камере смешения определяются по формуле, полученной для цилиндрической камеры смешения со «скользящими» стенками с использованием допущения о политропности процессов в смешивающихся струях[3]:

$$L_{rcm} = \frac{1}{1+m} \left[-\frac{n_I}{n_I-1} R(T_{cm} - T_I) + m \left(-\frac{n_{II}}{n_{II}-1} \right) R(T_{cm} - T_{II}) + \left(\frac{c_I^2}{2} + m \frac{c_{II}^2}{2} \right) - (1+m) \frac{c_{cm}^2}{2} \right]. \quad (6)$$

Суммарные удельные потери механической энергии определяются по формуле

$$L_{r\Sigma} = L_{rTBII} + L_{r_{mex}} + L_{r_{BII}} + L_{r_{II}} + L_{rcm}. \quad (7)$$

2. Анализ полученных результатов

С помощью разработанной модели выполнено расчетное исследование влияния энергообмена между контурами ТРДД со смешением потоков на суммарные потери механической энергии $L_{r\Sigma}$ и полное давление перед соплом ТРДД

со смешением потоков p_{cm}^* и оценены величины потерь в его элементах.

В качестве объекта был выбран ТРДД с неизменным генератором свободной работы (вентилятор внутреннего контура, компрессор, камера сгорания, турбина компрессор и часть турбины вентилятора, обеспечивающая привод вентилятора внутреннего контура) и неизменной степенью двухконтурности $m = 5,9$, но с изменяющейся величиной работы, передаваемой в наружный контур.

Поскольку величина этой работы связана со степенью повышения давления

в наружном контуре $L_{BII}^* = C_p T_6^* \left(\frac{\pi_{BII}^{*\kappa} - 1}{\eta_{BII}^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$, то удобно в качестве меры переда-

ваемой работы использовать величину π_{BII}^* .

Генератор свободной работы характеризуется температурой газов перед турбиной $T_I^* = 1510 \text{ K}$ и общей степенью повышения давления в компрессорах $\pi_{к\Sigma}^* = 20,6$.

На рис. 3 показаны зависимости p_{cm}^* и удельных суммарных потерь механической энергии $L_{r\Sigma}$, отнесенных к единице массы поступающего в ТРДД воздуха, от π_{BII}^* . Эти зависимости иллюстрируют наличие минимума суммарных потерь

механической энергии при энергообмене между контурами при $\pi_{\text{вII}}^*$ и его совпадение с максимумом $p_{\text{см}}^*$.

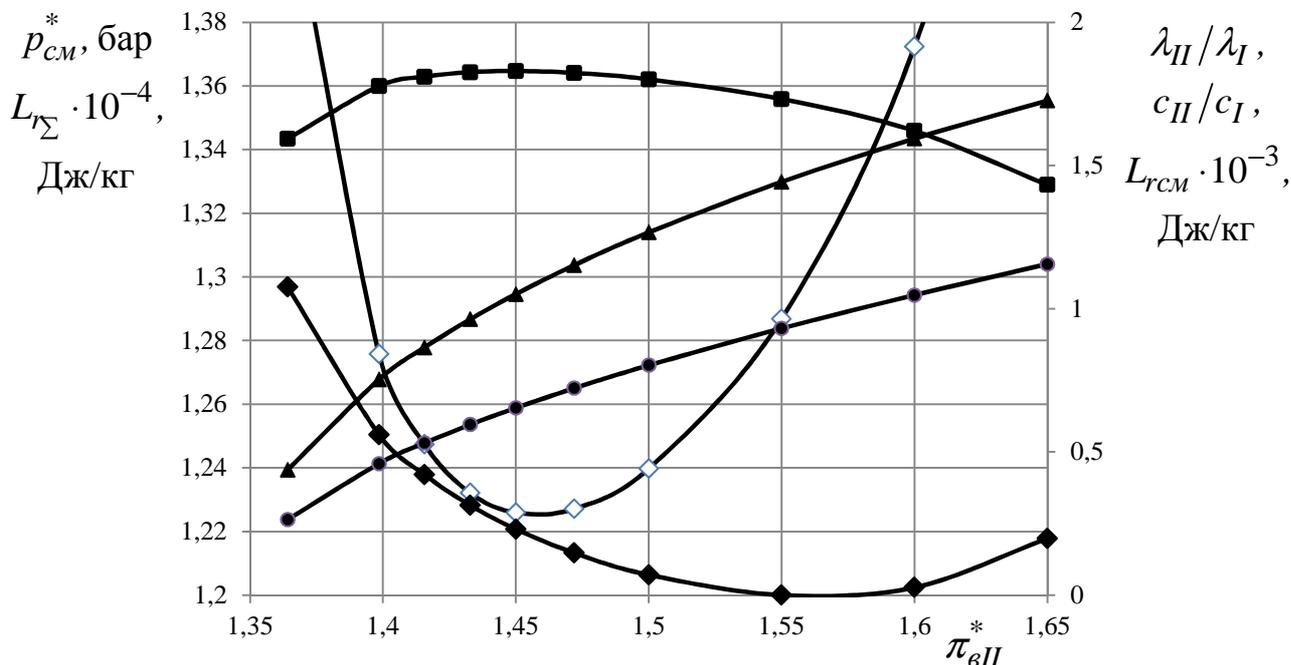


Рис. 3 – Зависимости $L_{r\Sigma}$, $p_{\text{см}}^*$, $\frac{\lambda_{II}}{\lambda_I}$, $\frac{c_{II}}{c_I}$, L_{rcm} от $\pi_{\text{вII}}^*$:

—▲— $\frac{\lambda_{II}}{\lambda_I}$; —■— $p_{\text{см}}^*$; —◆— L_{rcm} ; —◇— $L_{r\Sigma}$; —●— $\frac{c_{II}}{c_I}$.

На этом же рисунке в качестве иллюстрации связей величин отношений c_{II}/c_I и λ_{II}/λ_I с минимумами $L_{r\Sigma}$ и L_{rcm} , показаны зависимости удельных потерь в камере смешения L_{rcm} , отношений скоростей и приведенных скоростей потоков на входе в камеру смешения (c_{II}/c_I и λ_{II}/λ_I) от $\pi_{\text{вII}}^*$. В частности, видно, что $L_{rcm_{\text{min}}} = 0$ при $c_{II}/c_I = 1$, а $L_{r\Sigma_{\text{min}}}$ обеспечивается при $\lambda_{II}/\lambda_I \approx 1$. Полученные закономерности совпадают с известными результатами в работах [1, 2].

На рис. 4 представлены зависимости, которые позволяют оценить составляющие суммарных потерь. Из рисунка видно, что минимум $L_{r\Sigma}$ не совпадает с минимумом L_{rcm} вследствие зависимости величины потерь в турбине вентилятора наружного контура и вентиляторе наружного контура от $\pi_{\text{вII}}^*$ (т.е. величины $L_{\text{вII}}^*$).

Минимум $L_{r\Sigma}$ обусловлен противоположным изменением потерь в камере

смешения L_{rcm} и потерь в вентиляторе наружного контура и его турбине ($L_{r_{BII}} + L_{r_{TBII}}$) при увеличении π_{BII}^* .

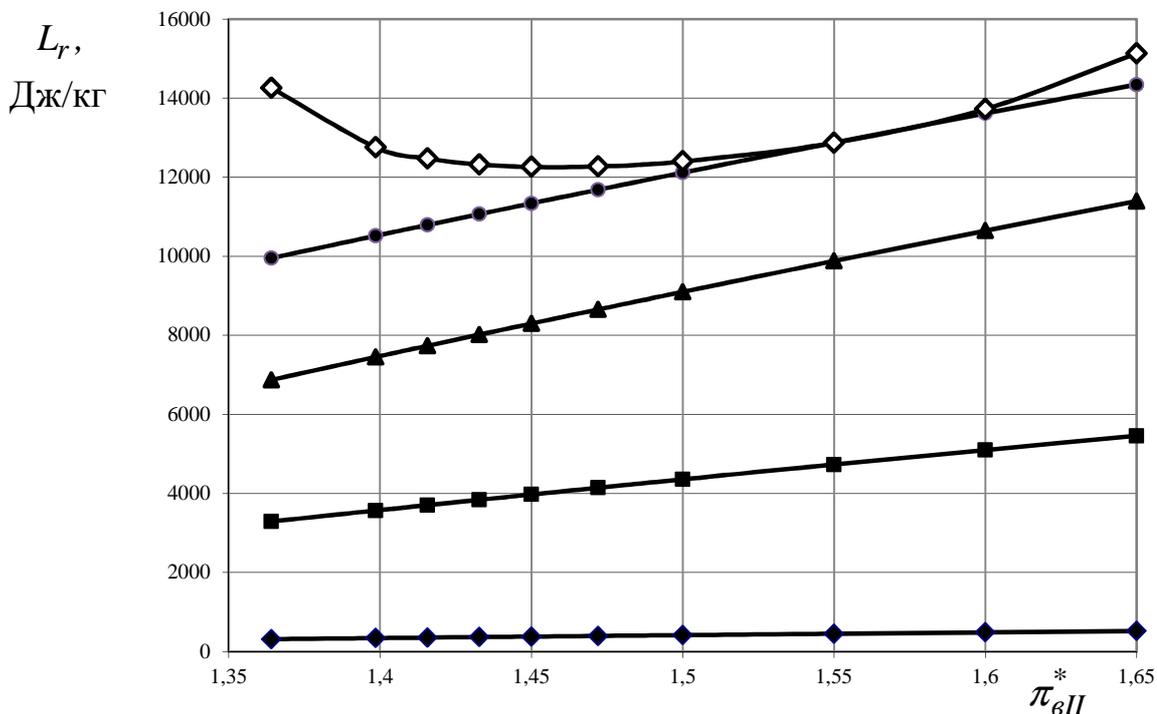


Рис. 4. Зависимости потерь при энергообмене между контурами ТРДД от π_{0II}^*

\blacklozenge — $L_{r_{mex}}$; \blacksquare — $L_{r_{mex}} + L_{r_{TBII}}$; \blacktriangle — $L_{r_{mex}} + L_{r_{TBII}} + L_{r_{BII}}$;
 \bullet — $L_{r_{mex}} + L_{r_{TBII}} + L_{r_{BII}} + L_{r_{II}}$; \diamond — $L_{r_{\Sigma}}$.

На рис. 5 показаны эти же зависимости в относительном виде, с помощью которых можно оценить вклад элементов ТРДД в суммарные потери механической энергии при энергообмене между контурами $L_{r_{\Sigma}}$.

Из представленных данных видно, что основная доля потерь приходится на вентилятор и турбину вентилятора наружного контура. Потери в камере смешения возрастают по мере отклонения от $c_{II}/c_I = 1$ и являются небольшими. В области $L_{r_{\Sigma min}}$ (при $\lambda_{II}/\lambda_I \approx 1$) $L_{rcm} \approx 0,08L_{r_{\Sigma}}$.

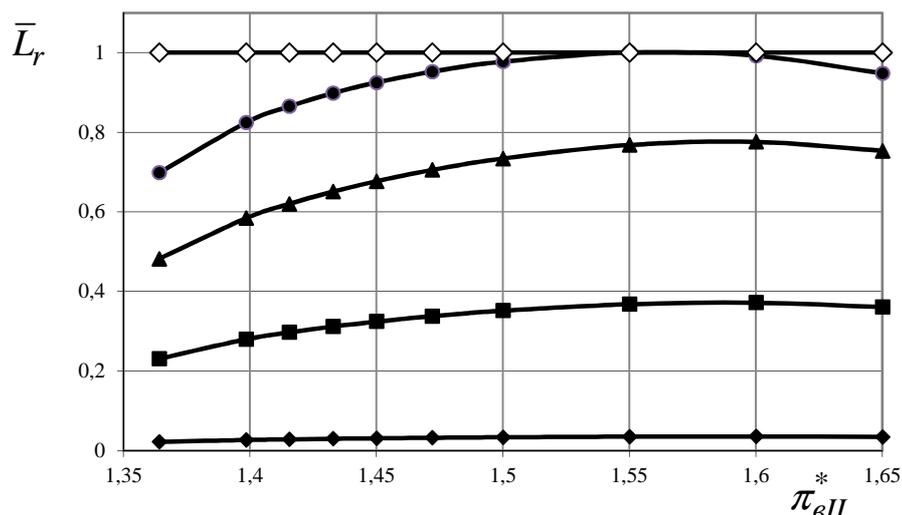


Рис.5. Относительные потери при энергообмене между контурами ТРДД:

\blacklozenge — $\bar{L}_{r_{mex}}$; \blacksquare — $\bar{L}_{r_{mex}} + \bar{L}_{r_{TBII}}$; \blacktriangle — $\bar{L}_{r_{mex}} + \bar{L}_{r_{TBII}} + \bar{L}_{r_{BII}}$;
 \bullet — $\bar{L}_{r_{mex}} + \bar{L}_{r_{TBII}} + \bar{L}_{r_{BII}} + \bar{L}_{r_{II}}$; \diamond — $\bar{L}_{r_{\Sigma}}$.

Заключение

В статье предложена модель расчета потерь механической энергии при энергообмене между контурами ТРДД со смешением потоков, выполнено расчетное исследование влияния передаваемой работы на потери, получено наличие минимума суммарных потерь механической энергии при энергообмене между контурами при π_{6II}^* , подтверждены известные взаимосвязи минимума потерь в камере смешения с соотношением скоростей смешивающихся потоков и минимума суммарных потерь с максимумом полного давления за камерой смешения и соотношением приведенных скоростей смешивающихся потоков $\lambda_{II}/\lambda_I \approx 1$, объяснено несоответствие максимума p_{cm}^* и минимума L_{rcm} (при $c_{II}/c_I = 1$), а также оценены доли потерь в элементах ТРДД со смешением потоков при энергообмене между контурами ТРДД.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности оптимизации работы, передаваемой в наружный контур, с помощью минимизации суммарных потерь $L_{r_{\Sigma}}$ при энергообмене между контурами ТРДД, что иногда предпочтительнее, чем оптимизация по p_{cm}^* .

Список литературы

1. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей [Текст] / В. П. Деменченков, Л. Н. Дружинин, А. Л. Пархомов и др.; под ред. С. М. Шляхтенко, В. А. Сосунова. – М. : Машиностроение, 1979. – 700 с.
2. Нечаев, Ю. Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей [Текст]: в 2 ч. / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров. – М.: Машиностроение, 1978. – Ч. 2 – 336 с.

3. Кислов, О. В. Определение потерь механической энергии при смешении потоков в ТРДД [Текст] / О. В. Кислов, М. А. Шевченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: – Х., 2016. – Вып. 71. – с. 171-178.

Поступила в редакцию 06.12.2016

Закономірності змінення втрат механічної енергії при оптимізації роботи, що передається в зовнішній контур ТРДД зі змішуванням потоків

Запропоновано модель розрахунку повного тиску перед соплом і сумарних утрат механічної енергії під час енергообміну між контурами ТРДД зі змішуванням потоків. З допомогою цієї моделі отримано залежності повного тиску перед соплом і сумарних втрат механічної енергії від ступеня підвищення тиску вентилятора зовнішнього контуру, показано наявність мінімуму сумарних утрат механічної енергії при енергообміні між контурами, який збігається з максимумом повного тиску перед соплом. Виконано аналіз структури сумарних утрат механічної енергії під час енергообміну між контурами, який дав змогу пояснити наявність мінімуму сумарних утрат механічної енергії під час енергообміну між контурами ТРДД зі змішуванням потоків і обґрунтувати умову оптимальності розподілу роботи між ними.

Ключові слова: утрати механічної енергії, ТРДД зі змішуванням потоків, вентилятор, турбіна вентилятора, камера змішування, газогенератор.

Laws of change of mechanical energy loss while optimizing the work passed in the outer contour of the turbofan with mixed flows

The model for calculating of the total pressure upstream of the nozzle and the total losses of mechanical energy at the energy exchange between the contours turbofan with mixed flows are proposed. With the help of this model dependences of the total pressure upstream of the nozzle and the total losses of mechanical energy from the pressure ratio of the outer contour fan are obtained. Presence of the minimum of total losses of mechanical energy at the energy exchange between the contours is shown, which coincides with the maximum of total pressure before the nozzle. The analysis of the structure of the total losses of mechanical energy at the energy exchange between the contours is made, which allowed to explain the presence of the minimum of total losses of mechanical energy at the energy exchange between contours and to prove optimality condition of the work distribution between the contours of turbofan with mixed flows.

Keywords: loss of mechanical energy, turbofan with mixed flows, fan, fan turbine, a mixing chamber, a gas generator.

Сведения об авторах:

Кислов Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент, каф. 201 «Теория авиационных двигателей», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Шевченко Михаил Анатолиевич – студент, каф. 201 «Теория авиационных двигателей», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.