

## Исследование влияния энергообмена между контурами на удельные параметры ТРДД

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

Исследовано три схемы ТРДД на базе единого генератора свободной работы (ГСР): с камерой смешения; без смешения потоков; с теплообменным аппаратом для передачи теплоты из внутреннего контура в наружный. Разработана методика исследования влияния энергообмена на удельные параметры ТРДД, позволяющая на этапе проектирования ТРДД проводить сравнительную оценку различных схем. На основании разработанной методики проведено численное исследование семейства ТРДД различных схем. Выполнено сравнение исследованных схем ТРДД, отображены их достоинства и недостатки.

**Ключевые слова:** оптимизация ТРДД, ТРДД с отдельным истечением потоков, ТРДД со смешением потоков, ТРДД с воздухо-воздушным теплообменником (ВВТ).

Оптимизация работы, передаваемой в наружный контур ТРДД различных схем, одна из наиболее актуальных задач в области проектирования ТРДД. Чаще всего авиационные ТРДД оптимизируются, ориентируясь на удельные параметры ТРДД [1–4].

Известно [1–4], что передача энергии в наружный контур ТРДД осуществляют с помощью вентилятора либо с помощью вентилятора и энергообмена в камере смешения ТРДД (рис. 1, а, б).

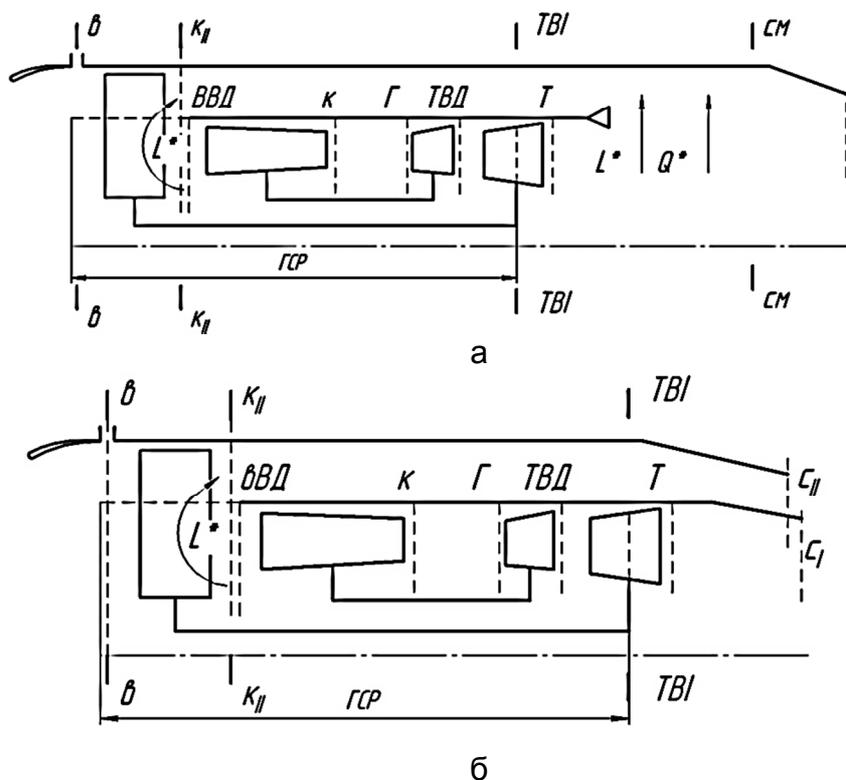


Рис. 1. Схематичное изображение передачи энергии из внутреннего контура в наружный в ТРДД:  
а – со смешением потоков; б – с раздельным истечением потоков.

Однако, возможен и третий способ энергообмена между контурами - передача работы в наружный контур с помощью вентилятора, а теплоты – с помощью теплообменного аппарата, расположенного перед соплами ТРДД (рис. 2).

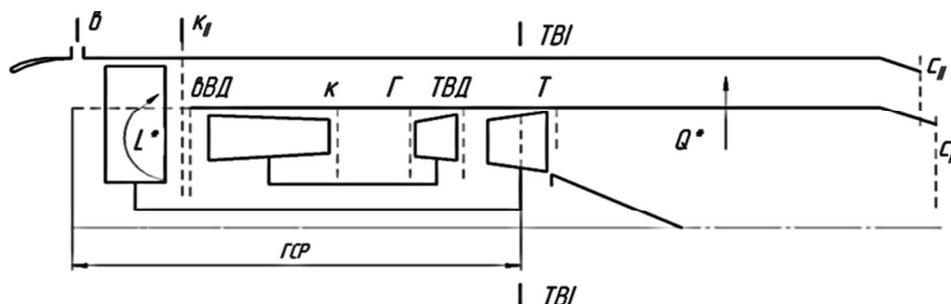


Рис. 2. Схематичное изображение передачи энергии из внутреннего контура в наружный в ТРДД с воздухо-воздушным теплообменником

Хотя проблеме оптимизации работы, передаваемой в наружный контур ТРДД, посвящено большое количество работ [1–7], оптимизации энергообмена между контурами ТРДД с теплообменным аппаратом уделено недостаточно внимания.

Теоретически передача теплоты  $Q$  из внутреннего в наружный контур ТРДД позволяет увеличить работу цикла  $L_{cy}$ . Это увеличение происходит, если прирост работы цикла в наружном контуре вследствие получения теплоты  $Q$  превышает потери работы цикла во внутреннем контуре, обусловленные отводом теплоты  $Q$ . По причине одинаковости теплот в контурах, для увеличения  $L_{cy}$  необходимо, чтобы эффективность преобразования теплоты в работу в цикле наружного контура  $n-kII-II-cII$  (термический КПД наружного контура  $\eta_{II}$ ) превышала эффективность преобразования отданной в теплообменнике теплоты в работу во внутреннем контуре (термический КПД  $\eta_{I}$  «потерянного» во внутреннем контуре цикла  $a-b-I-cI$  (рис. 3). Поскольку  $\eta_i = 1 - \frac{1}{\pi^k}$ , для увеличения  $L_{cy}$  требуется более высокое давление в холодном тракте ВВД.

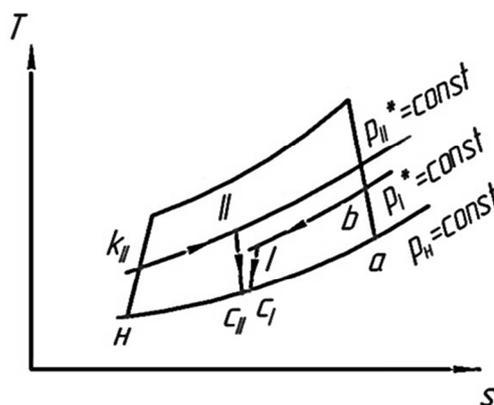


Рис. 3. Цикл ТРДД с отдельным истечением потоков и теплообменом между контурами

С другой стороны, прирост работы цикла в наружном контуре и уменьшение - во внутреннем контуре приводит к изменению скоростей истечения из контуров, а поэтому и к изменению тягового КПД. Для получения максимума полного КПД требуется оптимизация работы, передаваемой в наружный контур. При этом величина оптимальной степени повышения давления в наружном контуре будет отличаться от соответствующих величин в других схемах ТРДД.

Кроме того, в реальном ТРДД дополнительное влияние оказывают потери и величина передаваемой в ВВТ теплоты.

Следовательно, оптимизация ТРДД при различных способах энергообмена остается актуальной задачей.

**Целью настоящей статьи является** исследование влияния энергообмена между контурами на удельные параметры ТРДД при различных способах передачи энергии в наружный контур.

### 1. Расчетные соотношения

Исследование влияния энергообмена между контурами на удельные параметры ТРДД различных схем целесообразно осуществить, используя математическое моделирование.

Объектом исследования является семейство ТРДД с неизменным генератором свободной работы (вентилятор и компрессор внутреннего контура, камера сгорания, турбина компрессора и турбина вентилятора внутреннего контура, т.е. часть турбины вентилятора). Генератор свободной работы изображен на рис. 1 и 2. Параметры ГСР и потока на выходе из ГСР – неизменны (степень подогрева рабочего тела  $T_G^*/T_B^* = 5,25$ , общая степень повышения давления в компрессорах  $\pi_{\kappa\Sigma}^* = 20,6$ ,  $T_{ТВИ}^* = 1065K$ ,  $p_{ТВИ}^* = 341100Па$ ). Но величина работы

$L_{ВИ}^*$ , передаваемой в наружный контур от турбины вентилятора, варьируется при заданных степенях двухконтурности ТРДД.

Поскольку величина этой работы связана со степенью повышения давления

в наружном контуре формулой  $L_{ВИ}^* = C_p T_B^* \left( \frac{\pi_{ВИ}^{*\kappa} - 1}{\eta_{ВИ}^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ , то удобно в качестве ме-

ры передаваемой работы использовать величину  $\pi_{ВИ}^*$ .

Математическая модель ТРДД включает в себя уравнения неразрывности, энергии для газового потока и закона об изменении количества движения, условия совместной работы элементов ТРДД, а также формулы для удельной тяги и удельного расхода топлива для ТРДД со смешением и без смешения потоков, для скоростей истечения из сопел [1–4].

Для исключения влияния рабочего процесса в соплах на удельные параметры ТРДД, процесс в соплах принимается идеальным ( $\varphi_c = 1$ ).

В схеме ТРДД с ВВТ определение температур и давлений перед соплами ( $T_I^*$ ,  $p_I^*$ ,  $T_{II}^*$ ,  $p_{II}^*$ ) имеет свои особенности.

Для вычисления температур на выходе из ВВТ, необходимо знать фактическое количество теплоты, которое передано наружному контуру ТРДД от внутреннего  $Q$ . Величина  $Q$  задается с помощью коэффициента  $\eta_h$  по формуле  $Q = \eta_h Q_{max}$ ,  $\eta_h$  является отношением фактически переданной теплоты к максимально возможной теплоте ( $Q_{max}$ ), передаваемой в наружный контур ТРДД (до выравнивания температур потоков в контурах).

Для определения  $Q_{max}$  необходимо знать начальную и конечную температуры по горячему тракту ВВТ. Начальная температура за турбиной  $T_I^* = T_{ТВИ}^* - \frac{L_{ВП}^*(1+m)}{C_p \eta_{мехП}}$ , а конечная температура соответствует температуре

$$T_{см}^* = \frac{T_I^* + mT_{II}^*}{1+m}, \text{ где } T_{II}^* = T_{\epsilon}^* + \frac{L_{ВП}^*}{C_p} - \text{температура воздуха в наружном контуре.}$$

Максимально возможное количество теплоты, передаваемое из внутреннего контура ТРДД в наружный, определяется как  $Q_{max} = C_p(T_I^* - T_{см}^*)$ .

При неполном теплообмене температуры газа во внутреннем и наружном контурах на выходе из ВВТ определяются по формулам

$$T_I^{*'} = T_I^* - \frac{Q_{max} \eta_h}{C_p},$$

$$T_{II}^{*'} = T_{II}^* + \frac{Q_{max} \eta_h}{C_p m}.$$

При расчете полного давления на выходе из ВВТ ( $p_I^{*'}$  и  $p_{II}^{*'}$ ) потери давления в каналах теплообменника учитываются с помощью коэффициента восстановления полного давления  $\sigma_{ввтI}$  и  $\sigma_{ввтII}$ .

## 2. Результаты расчетных исследований

С помощью этой модели выполнено расчетное исследование влияния энергообмена между контурами на удельные параметры ТРДД.

Полученные зависимости  $\bar{R}_{y\delta} = \frac{R_{y\delta}}{R_{y\delta 0}}$  и  $\bar{C}_{y\delta} = \frac{C_{y\delta}}{C_{y\delta 0}}$  от  $\pi_{\epsilon II}^*$  при разных степенях двухконтурности представлены на рис. 4 и 5. Здесь  $R_{y\delta}$  и  $C_{y\delta}$  - удельная тяга и удельный расход топлива ТРДД,  $R_{y\delta 0}$  и  $C_{y\delta 0}$  - удельная тяга и удельный расход топлива базового ТРДД.

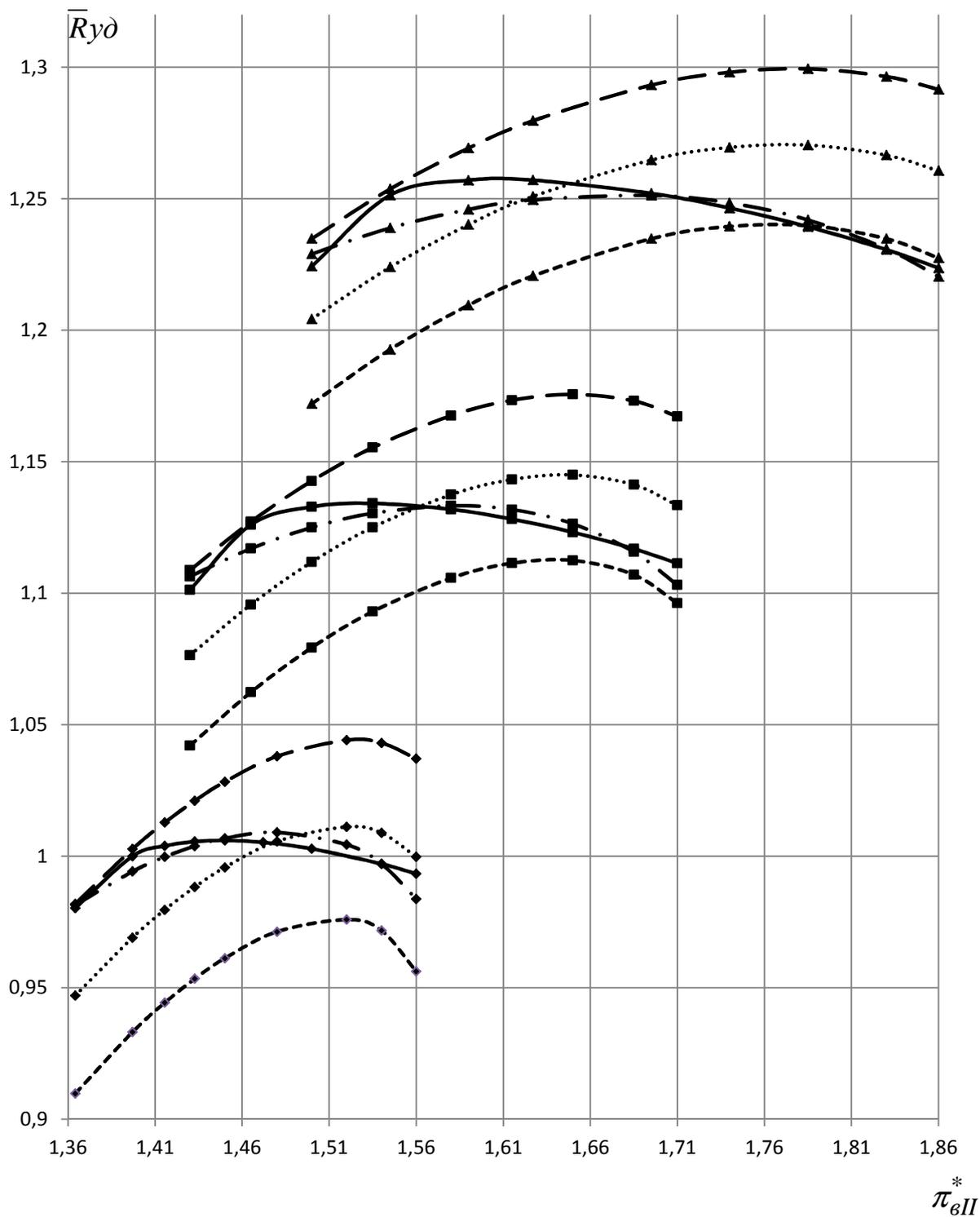


Рис. 4. Изменение относительной удельной тяги  $\bar{R}_{y\partial}$  в зависимости от  $\pi_{6II}^*$  при различных  $m$ :

———— -  $R_{y\partial TRDDcm}$ ; — — — — -  $R_{y\partial TRDD}$ ; — — — — -  $R_{y\partial TRDD}$  с ВВТ;  
 ..... -  $R_{y\partial TRDD}$  с ВВТ ( $\sigma_{ВВТ}=0,98$ ); - - - - -  $R_{y\partial TRDD}$  с ВВТ ( $\sigma_{ВВТ}=0,96$ );  
 ◆ -  $m = 5,9$ ; ■ -  $m = 4,5$ ; ▲ -  $m = 3,5$ .

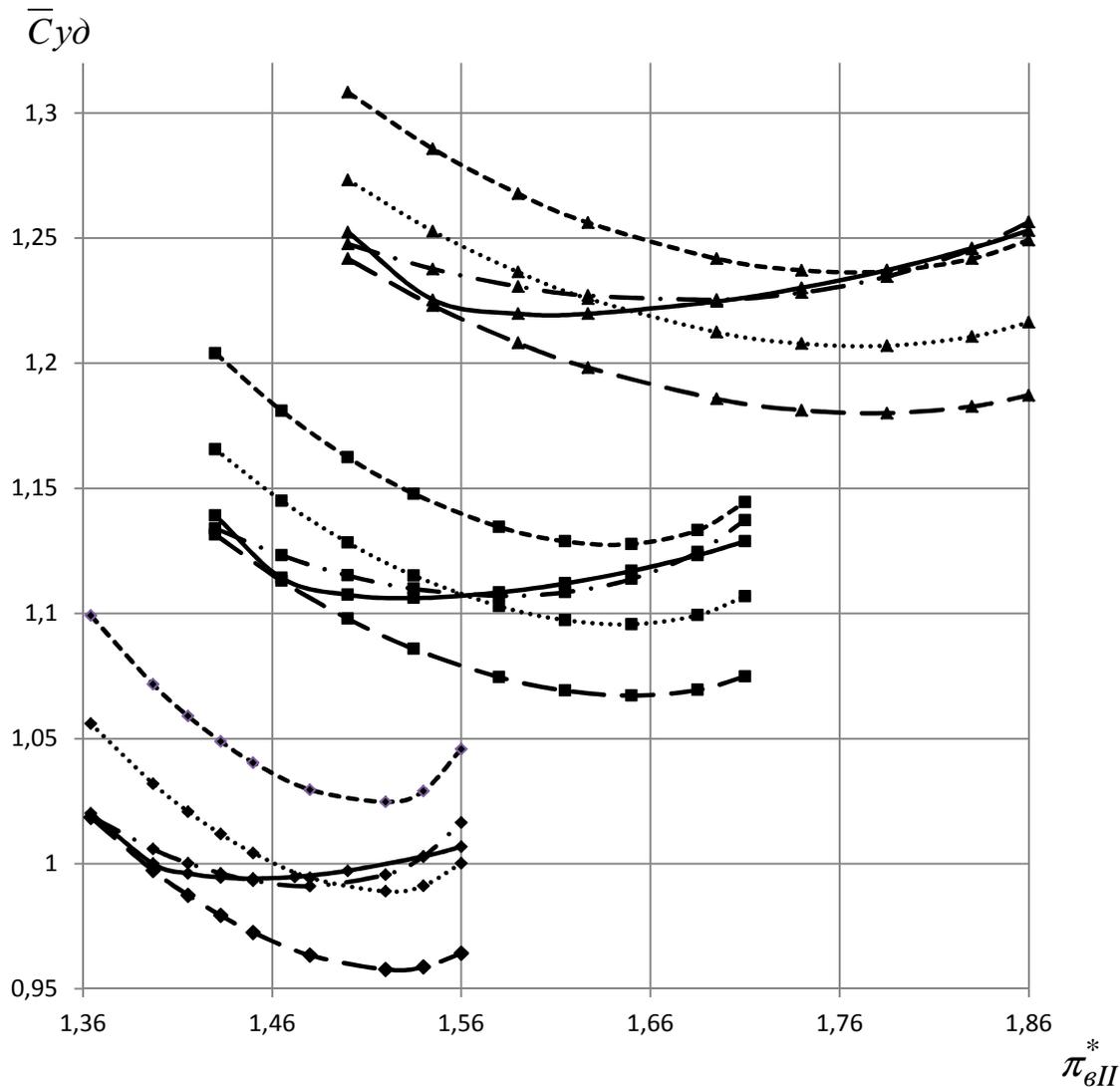


Рис. 5. Изменение относительного удельного расхода топлива  $\bar{C}_{y\delta}$  в зависимости от  $\pi_{6II}^*$  при различных  $m$ :

———— -  $C_{y\delta TRDD_{см}}$ ; — · — · — -  $C_{y\delta TRDD}$ ; — — — — -  $C_{y\delta TRDD с ВВТ}$ ;  
 ..... -  $C_{y\delta TRDD с ВВТ(\sigma_{ВВТ}=0,98)}$ ; - - - - -  $C_{y\delta TRDD с ВВТ(\sigma_{ВВТ}=0,96)}$ ;  
 ◆ -  $m = 5,9$ ; ■ -  $m = 4,5$ ; ▲ -  $m = 3,5$ .

Из рисунков 4 и 5 видно следующее:

- максимум  $R_{y\delta}$  и минимум  $C_{y\delta}$  в ТРДД со смешением потоков достигается при заметно меньшем  $\pi_{6II}^*$ , чем  $\pi_{6IIopt}^*$  для двигателя без камеры смешения и с ВВТ;
- с ростом  $m$  как  $R_{y\delta}$ , так и  $C_{y\delta}$  монотонно уменьшаются.

Результаты расчета, представленные на рис. 4, 5 позволяют построить зависимости  $C_{y\delta min}$  и  $\pi_{6IIopt}^*$  от  $m$  для разных схем ТРДД (рис. 6).

Сравнение ТРДД со смешением и без смешения потоков показывает, следующее:

- ТРДД со смешением более экономичен при  $m < 4,5$  и менее экономичен при  $m > 4,5$ ;
- в ТРДД со смешением потоков  $\pi_{\epsilon_{IIopt}}^*$  меньше, чем в ТРДД с отдельным истечением.

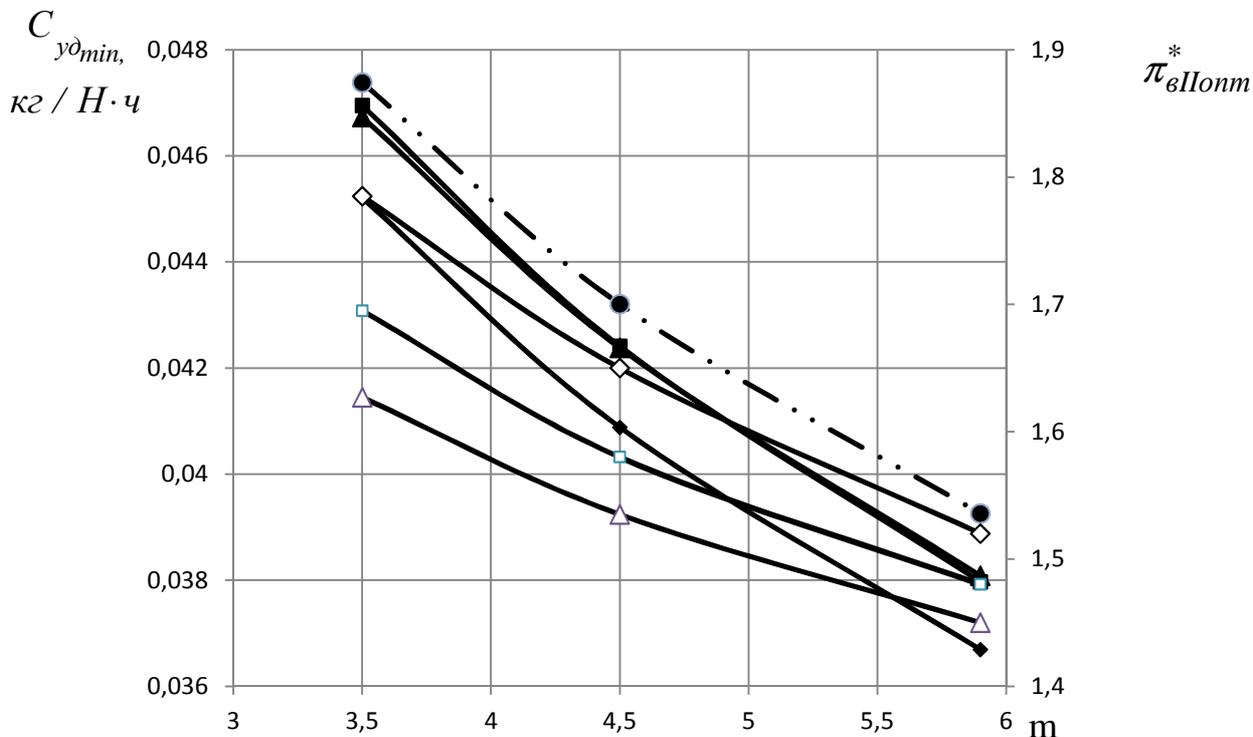


Рис. 6. Зависимость удельного расхода топлива  $C_{удmin}$  и  $\pi_{\epsilon_{IIopt}}^*$  от  $m$ :

- ◇— -  $\pi_{\epsilon_{IIopt}}^*$  ТРДД с ВВТ ; —□— -  $\pi_{\epsilon_{IIopt}}^*$  ТРДД ; —△— -  $\pi_{\epsilon_{IIopt}}^*$  ТРДДсм ;
- ◆— -  $C_{удTRDD}$  с ВВТ ; —■— -  $C_{удTRDD}$  ; —▲— -  $C_{удTRDDcm}$  ;
- ...●— -  $C_{удTRDD}$  с ВВТ ( $\sigma_{ВВТ}=0,96$ ) .

Схема ТРДД с ВВТ при  $\eta_h = 0,9$  и отсутствии потерь полного давления в теплообменнике имеет преимущества в  $\bar{R}_{уд}$  и  $\bar{C}_{уд}$  по сравнению с другими схемами (3...5 %).

Однако при наличии потерь полного давления в ВВТ ( $\sigma_{ввт} = 0,96$ ) ТРДД с ВВТ проигрывают в экономичности другим рассмотренным схемам ТРДД, поэтому применение ВВТ в ТРДД становится нерациональным.

Кроме того,  $\pi_{\epsilon_{IIopt}}^*_{ВВТ}$  больше, чем в других схемах, что является недостатком ТРДД с ВВТ. Имеются недостатки и самого ВВТ, более подробно описанные в работах [8–10].

## Выводы

В статье предложены методики исследования влияния различных способов энергообмена между контурами на удельные параметры ТРДД, выполнено расчетное исследование влияния передаваемой работы на удельные параметры ТРДД при энергообмене между контурами.

1. Для исследуемых схем определены  $\pi_{\epsilon_{IIonm}}^*$ , при которых достигается максимум  $R_{y\delta}$  и минимум  $C_{y\delta}$ .

2. Максимум  $R_{y\delta}$  в ТРДД со смешением потоков достигается при заметно меньшем  $\pi_{\epsilon_{IIonm}}^*$ , чем для двигателя без камеры смешения  $\pi_{\epsilon_{IIonm_{pu}}}^*$  и с ВВТ

$\pi_{\epsilon_{IIonm_{c\ BBT}}}^*$ . Установлено соотношение  $\pi_{\epsilon_{IIonm_{cm}}}^* < \pi_{\epsilon_{IIonm_{pu}}}^* < \pi_{\epsilon_{IIonm_{c\ BBT}}}^*$ .

4. При отсутствии потерь давления в ВВТ можно получить улучшение удельных параметров ТРДД. Однако удельные параметры интенсивно уменьшаются по мере увеличения потерь полного давления в ВВТ и уменьшении количества передаваемой в наружный контур теплоты. При величине потерь полного давления в ВВТ, характерных для современных ТРДД, ТРДД с ВВТ проигрывают по удельным параметрам ТРДД со смешением и без смешения потоков.

5. Для рассмотренного ГСР ТРДД со смешением потоков при  $\pi_{\epsilon_{IIonm}}^*$  более экономичен, чем ТРДД без смешения потоков, при степени двухконтурности  $m \leq 4,5$  и, наоборот, при  $m > 4,5$ .

## 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. – 432 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. Кулагин, В. В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. [Текст] учебник: в 3 кн. / [В. В. Кулагин]; под ред. В. В. Кулагина. – М. : Машиностроение, 2003. – Кн. 1: Основы теории ГТД. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. – 2003. – 616 с.
4. Теория и расчет воздушно–реактивных двигателей [Текст] : учебник. / В. М. Акимов, В.И. Бакулев, Р. И. Курзинер и др.; под ред. С. М. Шляхтенко, – М. : Машиностроение, 1987. – 568 с.
5. Максимов, А. А. Оптимизация по экономичности параметров ТРДД без смешения потоков и форсажных устройств в системе силовой установки [Текст] / Максимов, А. А., Флоров, И. Ф. // Тр. ЦИАМ: - М., 1975, – Вып. – № 632, 24 с.
6. Холщевников, К. В. Оптимизация термодинамических параметров турбореактивных двухконтурных двигателей (ТРДД) [Текст] / К. В. Холщевников // Тр. ЦИАМ: - М., 1968, – Вып. № 454, 8 с.
7. Медведев, В. В. Анализ термодинамического цикла ТРДД со смешением потоков [Текст] / В. В. Медведев // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун - та: - М., 2012. – Вып. 3(34). – С. 330 - 338.

8. Тихонов, А. М. Регенерация тепла в авиационных ГТД [Текст] / А. М. Тихонов – М. : Машиностроение, 1977. – 108 с.

9. Кравченко, И. Ф. Исследование вариантов воздухо–воздушного теплообменника для охлаждения турбины газотурбинного двигателя [Текст] / И. Ф. Кравченко, В. А. Шкабура, А. В. Еланский // Авиационная космическая техника и технология: – Харьков, 2013. – Вып. 101. – С. 78–82.

10. Воздухо-воздушный теплообменник для системы охлаждения опор авиационного двигателя ПС-90А [Текст] / А.А. Иноземцев, А. Н. Семенов, В. О. Рубинов и др. // Журн. «Двигатель». – 2008. - № 1. – С. 18 - 20

Поступила в редакцию 06.03.2017

### **Дослідження впливу енергообміну між контурами на питомі параметри ТРДД**

Досліджено три схеми ТРДД на базі єдиного генератора вільної роботи: з камерою змішування; без змішування потоків; з теплообмінним апаратом для передачі теплоти з внутрішнього контура в зовнішній. Розроблено методику дослідження впливу енергообміну на питомі параметри ТРДД, що дозволяє на етапі проектування ТРДД проводити порівняльне оцінювання різних схем. На підставі розробленої методики проведено числове дослідження сімейства ТРДД різних схем. Виконано порівняння досліджених схем ТРДД, відображено їхні переваги й недоліки.

**Ключові слова:** оптимізація ТРДД, ТРДД з роздільним витіканням потоків, ТРДД зі змішуванням потоків, ТРДД з повітря-повітряним теплообмінником.

### **Investigation of Influence of Energy Exchange between Turbofan Engine Channels on its Specific Parameters**

The three schemes of the turbofan engine based on a common generator of free work were investigated: with a mixing chamber; without flows mixing; with a heat exchanger for heat transferring from the internal channel to outer one. A technique for studying of the energy exchange influence on the specific parameters of the turbofan engine was developed, which allows to appraise comparatively various schemes of the turbofan engine at the design phase. Based on the developed technique, a numerical study of the turbofan engine family of various schemes was carried out. The comparison of the investigated schemes was performed, their advantages and disadvantages were displayed.

**Key words:** optimization of the turbofan engine; turbofan engine without flows mixing; turbofan engine with flows mixing; turbofan engine with air-to-air heat exchanger.

#### **Сведения об авторах:**

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

**Шевченко Михаил Анатольевич** – ассистент каф. 201 «Теории авиационных двигателей», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.