

УДК 629.7.083

В.В. ГРИГОРЬЕВ, А.В. ЕЛАНСКИЙ, А.И. ПОПУГА

ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СХЕМЫ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВЫСОКОЙ ТОПЛИВНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

В статье изложены и обоснованы возможные пути по улучшению топливной эффективности двигателей. Кратко рассмотрены схемы авиационных двигателей, концепция которых направлена на снижение расхода топлива. В качестве наиболее перспективных схем выбраны следующие: ТРДД со сверхвысокой степенью двухконтурности и схема «открытый ротор». Представлены преимущества и недостатки схемы «открытый ротор» с тянущим и толкающим винтовентиляторами в том числе с учетом компоновки двигательной установки с планером самолета. Проведен анализ, который позволяет выбрать направление для дальнейших исследований и научно-технических работ.

**Ключевые слова:** ТРДД со сверхвысокой степенью двухконтурности, «открытый ротор», цена топлива, топливная эффективность, винтовентилятор, биротативная турбина.

### Введение

Перед разработчиками авиадвигателей всегда стоит задача по получению минимальных расходов топлива.

Немаловажное влияние на это оказывает стоимость авиационного топлива, т.к. составляет существенную часть прямых эксплуатационных расходов (ПЭР) (рис. 1) [1]. Взглянув на динамику изменения мировых цен на нефть, видно тенденцию к увеличению ее стоимости (рис. 2) [2]. А это напрямую влияет на увеличение стоимости авиационного топлива. Все это делает проблему снижения расхода топлива все более острой. Кроме того, снижение расхода топлива позволит уменьшить количество вредных выбросов таких как  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$ .

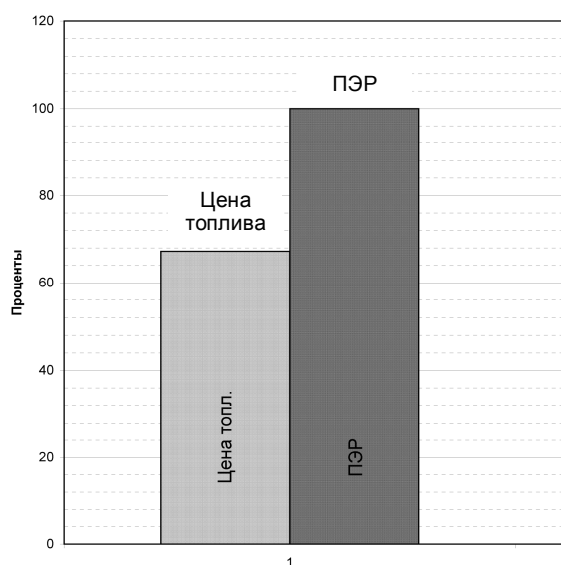


Рис. 1. Доля цены топлива при расчете ПЭР



Рис. 2. Изменение мировых цен на нефть

Общепризнано, что снижению расхода топлива способствует увеличение КПД двигательной установки, однако существует граница после которой затраты на увеличение КПД могут превысить потенциальную выгоду от снижения расхода топлива.

В качестве альтернативы повышению КПД узлов была предложена концепция по увеличению степени двухконтурности двигателя. Развитием этой концепции стали два конструктивных направления:

- первое – ТРДД со сверхвысокой степенью двухконтурности и приводом вентилятора непосредственно от турбины низкого давления или через редуктор;
- второе – схема двигателя «Открытый ротор» (Open Rotor).

### ТРДД со сверхвысокой степенью двухконтурности и приводом вентилятора через редуктор

Проведенные в ГП «Ивченко-Прогресс» расчетно-конструкторские исследования показали, что

повышение на 1% эффективности компрессоров и турбин трехвального ТРДД со степенью двухконтурности  $m=6$  с одновременным повышением степени сжатия воздуха от  $\pi_{к\Sigma}^* = 25$  до  $\pi_{к\Sigma}^* = 35$  и температуры газа перед турбиной на 100 К позволит улучшить крейсерскую экономичность, при оптимальном сочетании параметров, на ~5%. В то же время повышение степени двухконтурности до  $m = 10...13$  при сохранении эффективности узлов и уровня параметров термодинамического цикла позволит снизить удельный расход топлива на ~7,5...10% (рис. 3) [3].

Применение редуктора обеспечивает оптимальную частоту вращения вентилятора при использовании малоступенчатой быстроходной турбины (рис. 4.).

Расчеты и сопоставление удельных масс различных двигателей, проведенные в ГП «Ивченко-Прогресс» и СНТК им. Н.Д. Кузнецова показали, что градиент роста массы ТРДД при увеличении степени двухконтурности у двигателей с безредукторным приводом вентилятора заметно больший,

чем у ТРДД с редуктором. При степенях двухконтурности более 7...8 редукторная схема ТРДД обеспечивает меньшую удельную массу двигателя по сравнению с безредукторной за счет уменьшения количества ступеней турбины вентилятора.

Это значит, что на базе одного и того же газогенератора – наиболее сложной и требующей большого объема доводки части двигателя, можно разработать ТРДД с высокой экономичностью за счет применения вентилятора большого диаметра, приводимого через редуктор. Эти выводы подтверждены также материалами фирмы Snecma Moteurs (рис. 5). Кроме того, в безредукторной схеме ТРДД при увеличении степени двухконтурности заметно растет количество лопаток турбины низкого давления и масса двигателя (рис. 5).

На рис. 6 представлена зависимость трудоемкости изготовления ТРДД в классе тяги 10 тс с редуктором и без редуктора от степени двухконтурности, которая является следствием изменения числа деталей в указанных схемах двигателей.

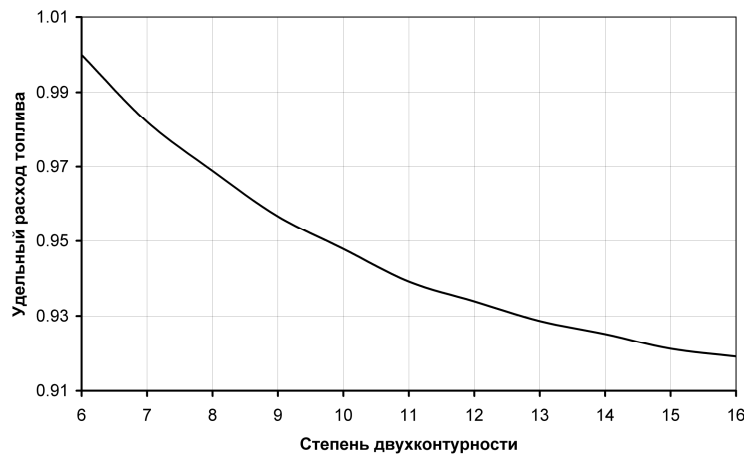


Рис. 3. Зависимость удельного расхода топлива от степени двухконтурности неустановленного двигателя

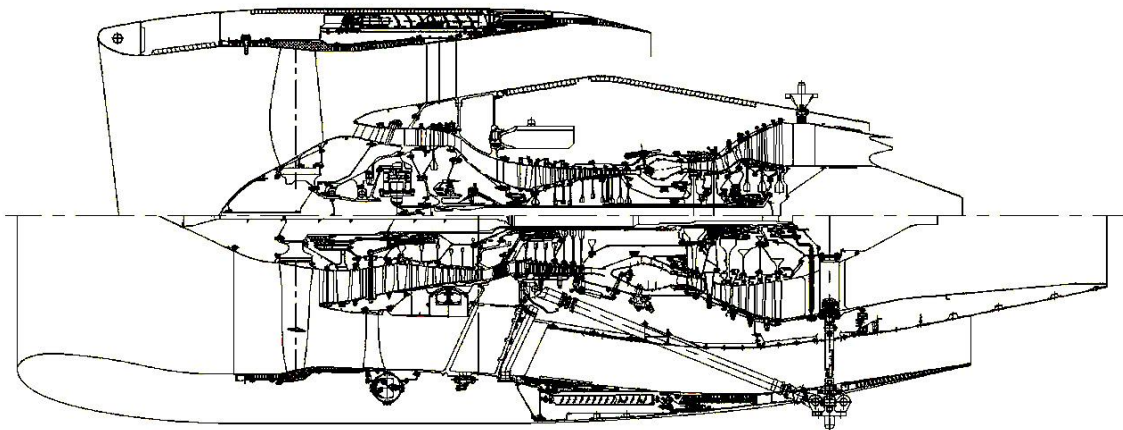


Рис. 4. Схемы ТРДД с редуктором и без редуктора

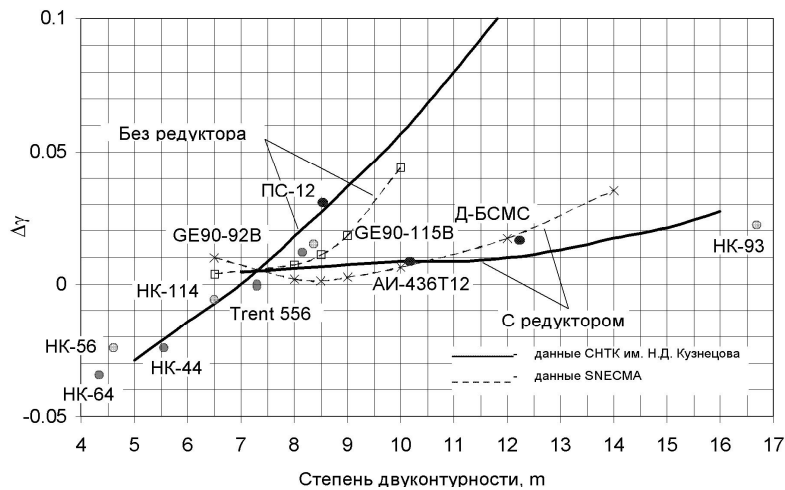


Рис. 5. Сравнение изменения удельной массы ТРДД с редуктором и без редуктора

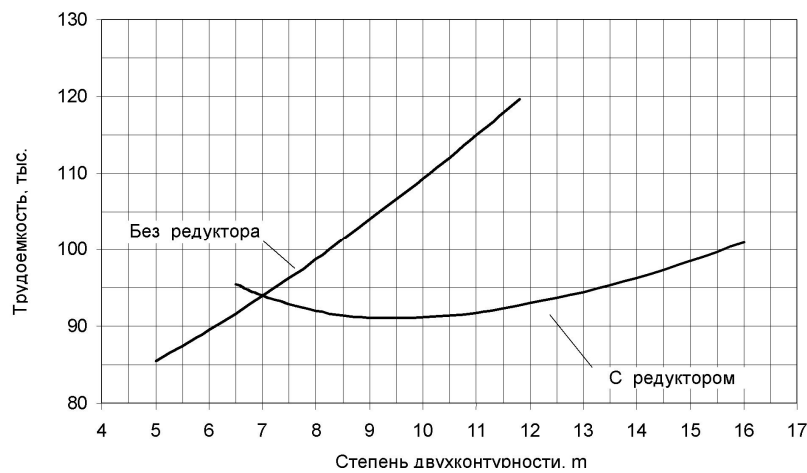


Рис. 6. Сравнение трудоемкости изготовления двигателей различной степени двухконтурности

Таким образом применение конструктивной схемы – ТРДД со сверхвысокой степенью двухконтурности с редукторным приводом вентилятора, позволит обеспечить снижение удельного расхода топлива на 7,5...10% по сравнению с находящимися в эксплуатации ТРДД этого класса тяги. В ТРДД со сверхвысокой двухконтурностью появляется увеличенный объем подкапотного пространства, что позволяет разместить в нем основные приводные и неприводные агрегаты с коробкой приводов. Это заметно уменьшает мидель мотогондолы и ее длину. Еще один путь уменьшения поверхности мотогондолы, а также длины тракта наружного контура – применение реверсивного устройства с выдвигающимися направляющими решетками. В целом указанные конструктивные особенности позволят снизить мидель мотогондолы на 3,5%, площадь ее наружной поверхности – на 30%, относительную длину тракта наружного контура – в два раза.

Стоит также отметить, что у короткой мотогондолы есть и слабые места. Еще предстоит решить

проблемы интеграции двигательной установки с пилоном самолета.

### «Открытый ротор»

Другой многообещающей редукторной схемой двигателя является – схема «Открытый ротор» (рис. 7).

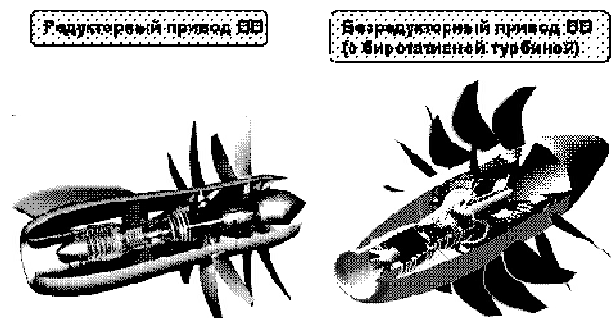


Рис. 7. Схемы ТРДД с редуктором и без редуктора

Данная схема является развитием ТВД, экономичность которых всегда была выше чем у других конструктивных схем. Но у ТВД есть существенный недостаток - скорость полета самолета с такими двигателями не превышала 0,6 Маха (рис. 8).

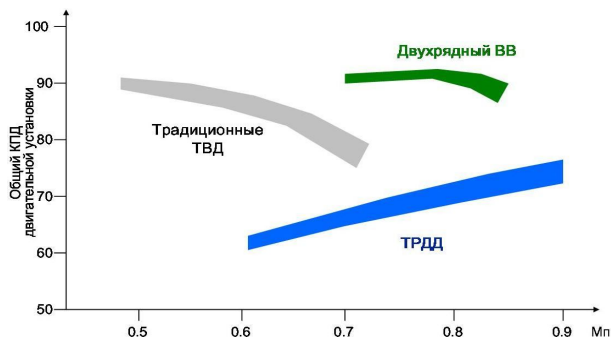


Рис. 8. Области применения двигательных установок различных схем

Частичным решением этой проблемы стало применение стреловидных лопастей воздушного винта, за счет чего были уменьшены потери в скачке уплотнения. Последующим шагом было добавление еще одного венца лопастей воздушного винта, который вращался в противоположную сторону. Это позволило компенсировать потери от закрутки потока, произведенной в первой ступени винта. Такой винт назвали винтовентилятором (ВВ).

Двигатель Д-27 разработки ГП «Ивченко-Прогресс» является представителем схемы ТВВД, которая фактически является схемой «открытый ротор» с тянущим винтовентилятором, который прошел государственные испытания в 2012 году. Его аналоги фирмы General Electric не продвинулись дальше летных испытаний [4], а фирмы Rolls-Royce и Snecma в общеевропейской программе Clean Sky 2 планируют провести летные испытания только в 2017 году.

В отличие от ТРДД у схемы «открытый ротор», при равных степенях двухконтурности и одинаковых газогенераторах, будут отсутствовать потери на обтекание капотов наружного контура. Это обуславливает более высокий КПД двигательной установки в целом.

Различают схемы с толкающим и тянущим винтовентилятором, а также с прямым приводом винтовентилятора от биротативной турбины и приводом винтовентилятора через редуктор.

В зависимости от расположения двигателей на самолете можно получить дополнительные преимущества. На данный момент рассматриваются два варианта компоновки двигателя с самолетом (рис. 9).

Первый – двигатель с тянущим винтовентилятором крепится под крылом самолета. Это позволя-

ет получить дополнительную подъемную силу, за счет обтекания крыла потоком от винтовентилятора и меньший диаметр винтовентилятора за счет уменьшения относительной втулки винта. Недостатком является ограниченное количество лопастей из-за малой втулки винта и сложность обеспечения равномерного поля давлений на входе в двигатель из-за влияния расположенного впереди ВВ.

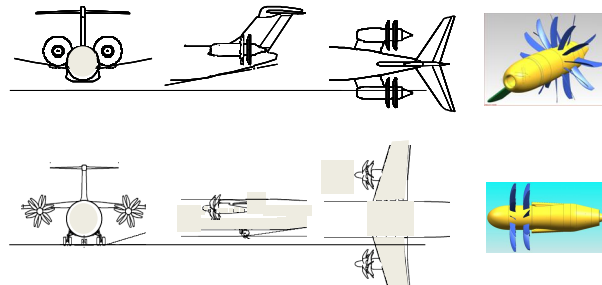


Рис. 9. Компоновка двигателей схемы «открытый ротор» с самолетом

Второй – расположение двигателя с толкающим винтовентилятором в хвостовой части фюзеляжа. Это позволяет существенно снизить влияние винтовентилятора на аэродинамические плоскости самолета. В этом случае винтовентилятор может приводиться как через редуктор, так и непосредственно при помощи биротативной турбины (рис. 10). Касаемо способа привода винтовентилятора, то как один так и другой имеют свои сильные и слабые стороны.

Так например прямой привод винтовентилятора от биротативной турбины позволяет получить следующий ряд преимуществ:

- равные моменты и мощности переднего и заднего рядов ВВ;
- упрощение маслосистемы и систем охлаждения масла;
- уменьшение длины СУ;
- независимость движителя от газогенератора (автономная центровка, нет влияния перекосов и т.д.);
- ожидаемое уменьшение уровня вибраций;
- отсутствие ограничений по мощности.

В то же время есть и ряд проблем:

- невозможность отдельной оптимизации параметров ВВ и биротативной турбины;
- создание надежного механизма поворота лопастей ВВ с минимальными габаритами;
- эффективное воздушно-газовое уплотнение в биротативной турбине на большом радиусе и др.

Основным недостатком привода ВВ через редуктор является размещение редуктора в горячей части и отвод выхлопных газов в обход редуктора (рис. 11) или перед лопастями ВВ.

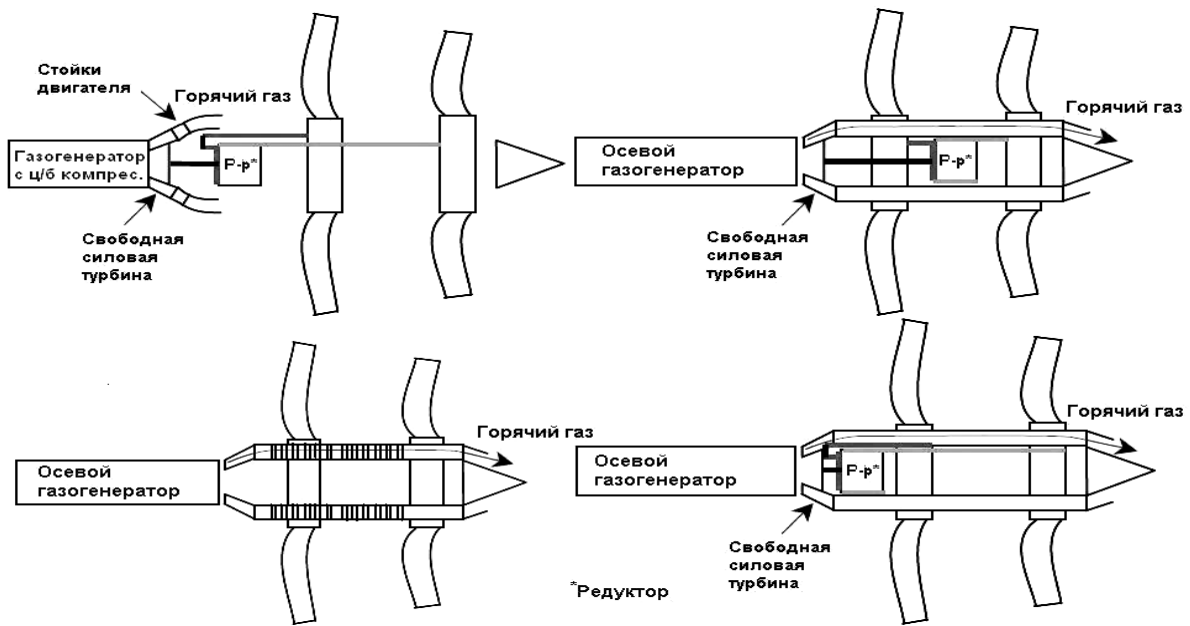


Рис. 10. Схемы ТВВД с толкающим двухрядным ВВ

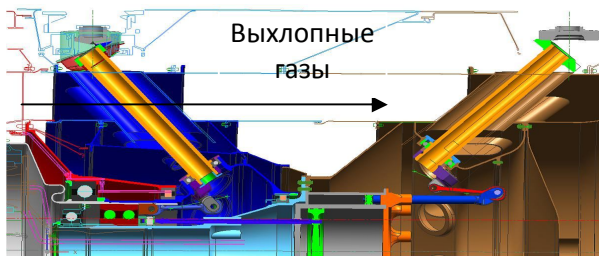


Рис. 11. Пример конфигурации механизма управления шагом ВВ с редуктором

При этом сопло и центральное тело получают вращающиеся и возникают дополнительные проблемы с балансировкой и повышенные вибрации. Общим недостатком применения двухрядного ВВ является повышенный шум и необходимость применения специальных методов его снижения (рис. 12). Как показывают результаты исследований фирмы Rolls-Royce [5], для уменьшения шума ВВ необходимо увеличивать количество лопастей (рис. 13).



Рис. 12. Проблемы акустики двигателей с «Открытым ротором»

Однако за последние годы мировая двигателестроительная промышленность продемонстрировала

прогресс в деле разработки «тихих» открытых роторов; ВВ прошли испытания в аэродинамических трубах, были развиты численные методы газовой динамики (CFD) и созданы инструменты для выполнения аэроакустических расчетов. Однако для оценки шума в полете необходимо проведение летных испытаний полноразмерных двигателей [6].

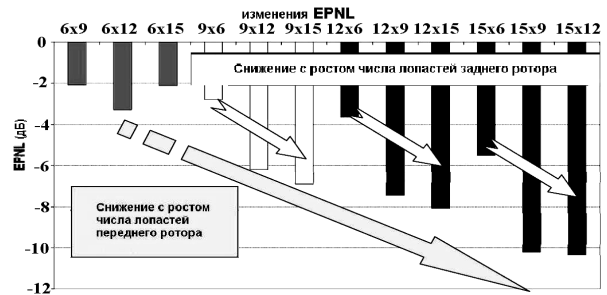


Рис. 13. Влияние числа лопастей на уровень шума

Кроме того, для получения достоверных характеристик ТВВД расчетным методом необходимо в математическую модель двигателя интегрировать двумерную методику расчета винтовентилятора (например основанную на импульсной теории воздушного винта Сабинина-Юрьева) с возможностью расчета при изменении шага ВВ и учета влияния числа Маха на аэродинамические характеристики ВВ.

Исходя из вышеизложенного очевидно, что схемы типа «открытый ротор» имеют ряд сложностей в их разработке и применении. Кроме проблем, сходных для всех типов двигателей, особенности схемы ТВВД обуславливают специфические, которые необходимо решить в ходе создания научно-технического задела.

## Вывод

Таким образом, применив схему ТРДД со сверхвысокой степенью двухконтурности с приводом вентилятора через редуктор или схему «Открытый ротор», двигатель получит ряд преимуществ:

- малоступенчатая высокооборотная турбина низкого давления с минимальным количеством деталей;
- возможность снижения расхода топлива на 7,5-10% относительно существующих ТРДД и на 10-20% при одновременном улучшении параметров цикла;
- запас относительно существующих норм по допустимым величинам эмиссии вредных веществ в атмосферу.

## Литература

1. Григорьев, В.В. Разработка ТРДД со сверхвысокой степенью двухконтурности для перспективного ближне-среднемагистрального самолета с оптимизацией конструктивной схемы и параметров компрессора [Текст]: пояснительная записка выпускной работы магистра / В.В. Григорьев. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2009. – 120 с.

2. Динамика цен на нефть в 21 веке. Статистика и тенденции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oilru.com/dynamic.phtml>. – 23.5.2013

3. Трехвальный турбореактивный двухконтурный двигатель АИ-436Т12. Техническое предложение [Текст]. – М.: ФГУП ММП «Салют»; Запорожье, ГП «Ивченко-Прогресс»; Уфа, ОАО УМПО, 2005. – 594 с.

4. Larsson, L. Conceptual Desing and Mission [Text] / L. Larsson, T.s Grönstedt, K. G. Kyprianidis // ASME Turbo Expo, June 2011: Analysis for a Geared Turbofan and an Open Rotor Configuration GT2011-46451.

5. Installation. effects on contra-rotating open rotor noise [Text] / J. Ricouard, E. Julliard, M. Omais, V. Regnier, A.B. Parry, S. Baralon // AIAA Paper 2010-3795, 16<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Stockholm, Sweden, June 7–9, 2010.

6. Kingan, M.J. Counter-Rotation Propeller Tip Vortex Interaction Noise [Text] / M.J. Kingan, R.H. Self // AIAA Paper 2009-3135, 15<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30<sup>th</sup> AIAA Aeroacoustics Conference), Miami, FL, May 11–13, 2009.

Поступила в редакцию 1.06.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. С.В. Елифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ПЕРСПЕКТИВНІ СХЕМИ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ З ВИСОКОЮ ПАЛИВНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ

*В.В. Григор'єв, О.В. Єланський, А.І. Попуга*

В даній статті викладені та обґрунтовані можливі шляхи покращення паливної ефективності двигунів. Коротко розглянуті схеми авіаційних двигунів, концепція яких спрямована на зниження витрат палива. В якості найбільш перспективних схем обрані наступні: ТРДД з надвисоким ступенем двоконтурності та схема «відкритий ротор». Представлені переваги та недоліки схеми «відкритий ротор» з тянущим і штовхаючим гвинтовентиляторами в тому числі з урахуванням компоновки рухової установки з планером літака. Проведено аналіз, який дозволяє вибрати напрямок для подальших досліджень та науково-технічних робіт.

**Ключові слова:** ТРДД з високим ступенем двоконтурності, «відкритий ротор», ціна палива, паливна ефективність, гвинтовентилятор, біротативна турбіна.

## CONCEPTUAL SCHEMES OF AIRCRAFT ENGINES WITH HIGH FUEL EFFICIENCY

*V.V. Grygoriev, A.V. Yelansky, A.I. Popuga*

In this article the probable ways of fuel efficiency improvement of engine have been represented and substantiated. A brief discussion of aircraft engine schemes, conception of which directed to decrease fuel consumption has been made. In capacity of most perspective next schemes have been chosen: turbofan with superhigh bypass ratio and open rotor scheme. Advantages and disadvantages of open rotor scheme with tractor and pusher propfans including the subject to integration of powerplant with airframe have been represented. The analysis that allows to choose direction for further investigations and research efforts has been performed.

**Key words:** turbofan with superhigh bypass ratio, open rotor, fuel price, fuel efficiency, propfan, counterrotating turbine.

**Григор'єв Владимир Валерьевич** – инженер-конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

**Єланський Александр Витальевич** – начальник бригады перспективных разработок ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

**Попуга Андрей Иванович** – ведущий конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.