

УДК 621.43

Оценка перспектив использования турбокомпаундных ДВС в авиации

С.И. Барышников, А.Н. Костюченков, А.А. Зеленцов

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

Estimated Perspectives of Turbocompound ICE in Aviation

Barishnikov S.I., Kostyuchenkov A.N., Zelentsov A.A.

CIAM

При создании двигателей внутреннего сгорания в числе основных задач находятся снижение удельной массы двигателей и удельного эффективного расхода топлива. Особенно остро эти задачи стоят в авиамоторостроении, где к поршневым двигателям предъявляются значительно более жесткие требования по данным параметрам.

В настоящее время основным методом повышения эффективности ДВС является совершенствование рабочего процесса, при этом использование турбокомпаундных систем позволяет реализовывать остаточную энергию выхлопных газов.

В ходе работы был проведен расчет и анализ безнаддувного авиационного поршневого двигателя (АПД) мощностью 100 л.с. с силовой турбиной, которая механически связывается с коленчатым валом. В ходе расчетов было рассмотрено влияние различных способов организации газообмена в компаундных двигателях на рабочий процесс, проведено сравнение основных параметров с базовыми двигателями. По результатам расчетов был определен прирост мощности до 15% и улучшение экономичности вплоть до 9%.

Таким образом, была подтверждена перспективность использования турбокомпаундной схемы в составе АПД.

Ключевые слова: Турбокомпаунд, двигатели внутреннего сгорания, силовая турбина, наддув, газообмен, авиационные поршневые двигатели, коэффициент полезного действия.

Основной задачей при создании двигателей является обеспечение высоких эффективных показателей. Для авиационного поршневого двигателя (АПД) ключевыми параметрами являются удельный эффективный расход топлива, обеспечивающий дальность полета, и его удельная масса, характеризующая весовые параметры и совершенство конструкции.

Традиционно существует три пути повышения коэффициента полезного действия (КПД) и мощности двигателя. Они проистекают из условий его теплового баланса – располагаемая энергия в приблизительно в равных долях распределяется между эффективной мощностью, отводом в систему охлаждения и энергией выхлопных газов. Основным путем повышения КПД является улучшение протекания процессов смесеобразования и сгорания. С каждым годом этот процесс позволяет совершать небольшие шаги по улучшению двигателей. Идея понижения теплоотвода в систему охлаждения за счет теплоизоляции камер сгорания была популярна в 90-х годах прошлого века. В настоящий момент в силу ряда причин этот путь признан несостоятельным.

Таким образом, основным способом радикально увеличить основные показатели ДВС (двигателя внутреннего сгорания) является использование энергии выхлопных газов. Турбонаддув уже давно применяется во всех областях поршневого двигателестроения. Компаунд является относительно новым веянием. Исторически первыми компаундными двигателями были авиационные ДВС. Они демонстрировали высокие показатели даже по нынешним временам, так например, удельный расход бензинового АПД ВД-4К составлял 217 г/кВт*ч (160 г/л.с.ч.). К сожалению, их появление происходило на фоне бурного развития реактивных двигателей и повышения

скоростей полета ЛА, а потому в авиации по большей части отказались от использования АПД.

В настоящем исследовании необходимо произвести первичную оценку эффективности использования компаундных систем и перспектив их применения.

Турбокомпаунд стал следующим логическим шагом развития поршневых двигателей после внедрения турбонаддува. Повышая основные целевые характеристики (мощность, экономичность), компаунд в совершенстве дополняет газотурбинный наддув. Его внедрение становится возможным с постепенным развитием технологий производства и, как следствие, ростом эффективности турбин.

Основной трудностью при использовании компаундной схемы является создаваемое турбиной противодействие, ведущее к снижению наполнения и эффективности поршневой части. Одной из основных задач данного исследования будет поиск оптимума эффективности совместной работы турбины и АПД. В настоящий момент главной проблемой на пути внедрения турбокомпаундных двигателей является снижение их эффективности при уходе с режима номинальной мощности. Также существуют проблемы связанные с колебательными процессами и влиянием инерции на эффективную работу турбины [1]. Таким образом, большинство проблем сводятся к необходимости обеспечения эффективной работы на значительном диапазоне режимов работы двигателей. В АПД данная проблема несколько сглаживается, поскольку типовой полетный цикл как правило подразумевает практически постоянную работу на одном (нескольких достаточно схожих) режимах.

Существует множество различных схем компаундных двигателей [2-4]. Их можно разделить по следующим критериям: типу двигателя, наличию наддува и типу трансмиссии.

В рамках настоящего исследования рассматривался безнаддувный бензиновый двигатель с механической трансмиссией (схема представлена на рисунке 1). Отсутствие наддува обусловлено необходимостью произвести сравнительную оценку влияния компаундной схемы как на двигатели с наддувом, так и на двигатели без него. Вместе с тем, зачастую двигатели малой размерности (HKS-700E, Rotax 912iS) не используют наддув с целью повышения мощности. Таким образом, установка компаундной турбины на них позволит обеспечить создание компаундных двигателей на базе уже существующих. Наконец, в бензиновых двигателях наддув повышает риск детонации.

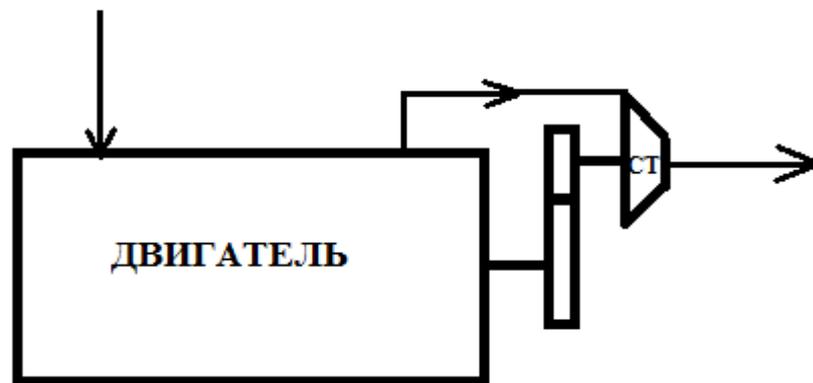


Рисунок 1 – Схема компаундного двигателя

Бензиновый АПД становится предпочтительным решением в данном случае. К его дополнительным преимуществам можно отнести высокие температуры выхлопа, что предполагает возможность реализации большей работы на силовой турбине, а также более высокие частоты вращения коленчатого вала, что позволяет облегчить механическую трансмиссию за счет снижения передаточного числа. Также, стоит упомянуть, что за счет сравнительно низкой эффективности поршневой части бензинового двигателя (по сравнению с дизелями), использование компаундной схемы позволит добиться большего относительного прироста эффективности.

В качестве исходного был выбран авиационный поршневой двигатель мощностью 73кВт (100 л.с.) – как показывают исследования [5], на меньших мощностях выигрыш от использования компаундной схемы становится минимальным. Параметры этого двигателя представлены в таблице 1. 3D модель двигателя с силовой турбиной с механической связью представлена на рисунке 2.

Таблица 1

Параметры двигателей

Величина	АПД-100
Ход поршня, S , (мм)	61
Диаметр цилиндра, D , (мм)	84
Число цилиндров	4
Номинальная мощность, N_e , (кВт)	74
Степень сжатия	10.5
Тип топлива	Бензин
Наддув	Нет

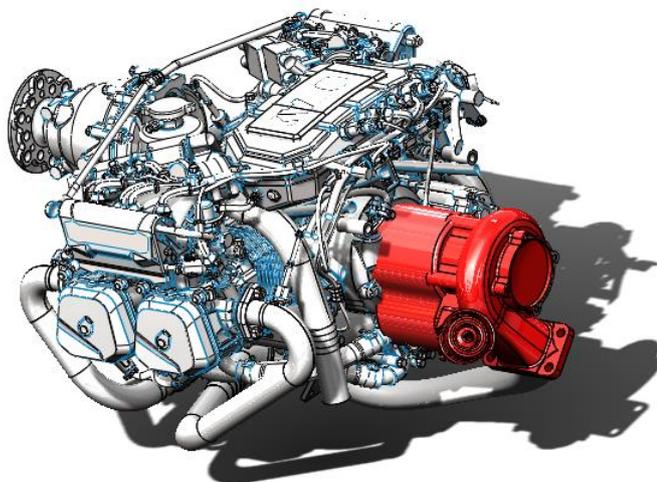


Рисунок 2 – Модель двигателя с силовой турбиной

Для оценки полученного прироста параметров проведена идентификация базовых двигателей с целью обеспечения соответствия модели реальному двигателю. На основе полученных моделей проведена параметрическая оптимизация по основным параметрам. Целевым параметром будет удельный эффективный расход топлива (КПД). В числе основных расчет-

ных параметров будут использоваться фазы газораспределения (углы начала и окончания впуска и выпуска), степень понижения давления в силовой турбине, угол опережения зажигания.

В качестве компаундных систем рассматривались системы по данным, соответствующим турбинам НПО «Турботехника» и фирмы Garret. В качестве расчетной высоты использовалась $H=6$ км.

На рисунках 3–5 представлены результаты:

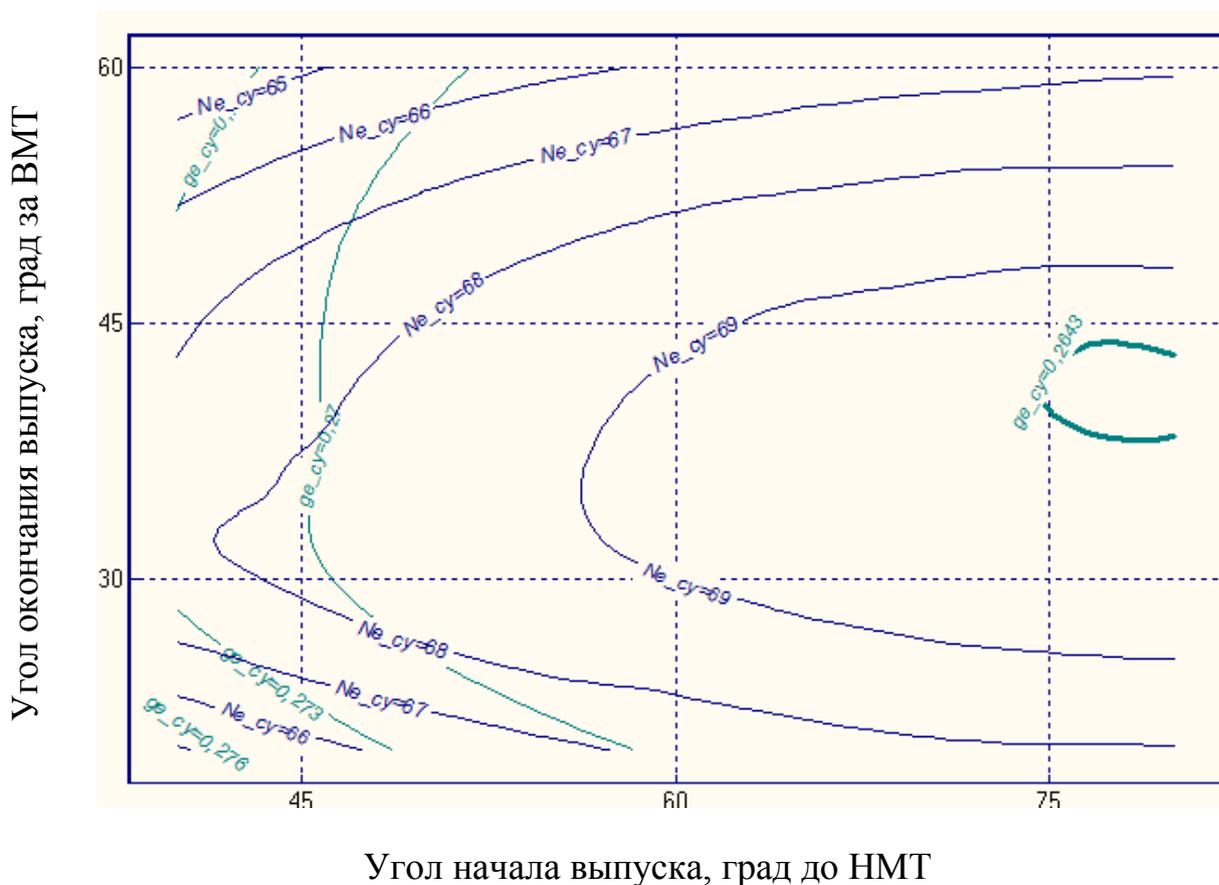
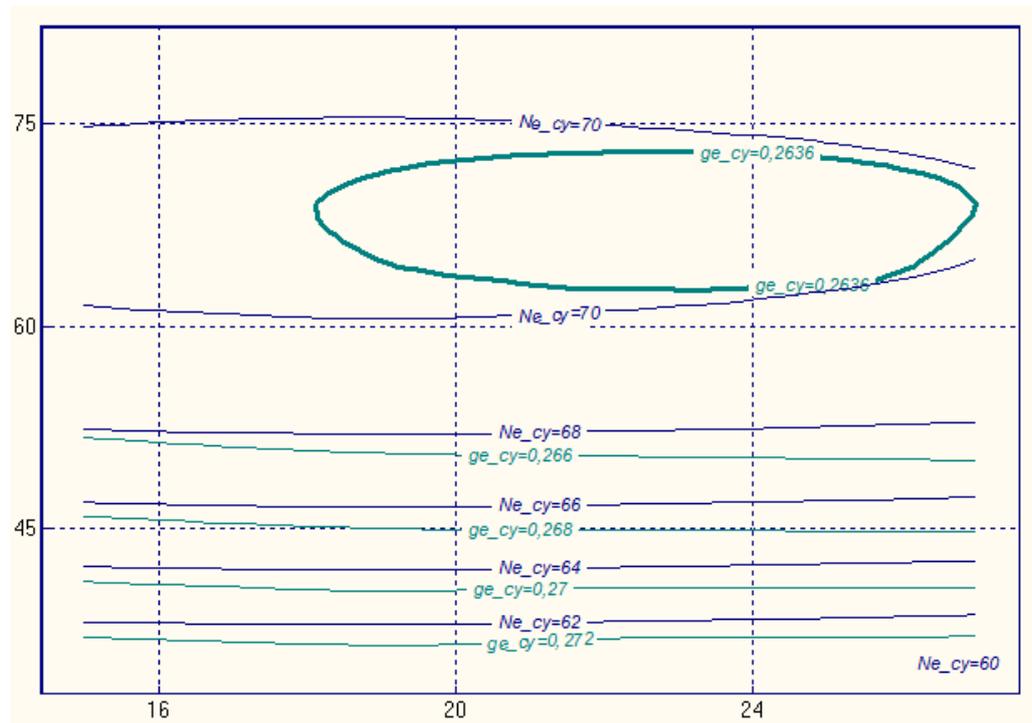


Рисунок 3 – Определение фаз выпуска АПД-100

Угол окончания впуска, град за НМГ



Угол начала впуска, град до ВМГ

Рисунок 4 – Определение фаз впуска АПД-100

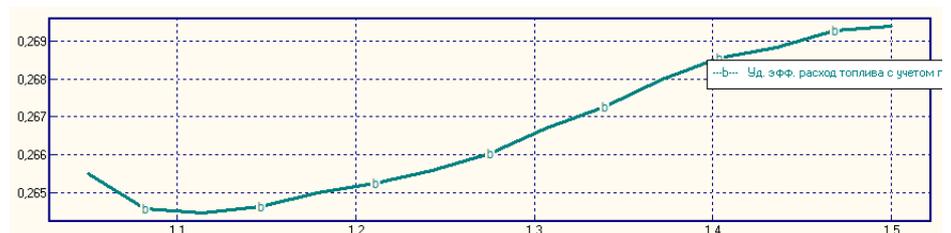
Эффективная мощность, кВт



Степень понижения давления в турбине, -

Рисунок 5 – Определение оптимальной степени понижения давления по мощности

Удельный эффективный расход топлива, г/кВт*ч



Степень понижения давления в турбине, -

Рисунок 6 – Определение степени понижения давления в силовой турбине АПД-100

В ходе расчетов получены результаты, представленные в таблицах

2–3:

Таблица 2
Результаты расчета АПД-100

	Базовый двигатель	Компаундный двигатель (данные «Турботехники»)		Компаундный двигатель (данные «Гаррет»)	
	Знач.	Знач.	Отн., %	Знач.	Отн., %
Ne, кВт	74.11	80.747	8.9	81.237	9.6
КПД, %	28.99	30.86	6.4	31	6.5
ge, г/кВт*ч	282	265	6.02	264	6.3

Таблица 3
Результаты расчета АПД-100 на высоте 6 км

	Базовый двигатель	Компаундный двигатель	
	Знач.	Знач.	Отн., %
Ne, кВт	32.18	37.05	15
КПД, %	23.45	25.77	9.8
ge, г/кВт*ч	349	317.5	9.1

Как можно наблюдать, прирост мощности составляет практически 10%, а эффективности – 6,5%. Отдельно следует отметить достаточно не-большой разброс значений при различных турбинах. Особенно существенным выглядит выигрыш на больших высотах за счет снижения противо-давления на турбине.

Для оценки прироста удельной мощности были сформированы принципиальные модели турбины и редуктора (рисунок 5).



Рисунок 7 – Модель зубчатой передачи

По предварительной оценке масса редуктора составила 4,5 кг, масса турбины – 5,4 кг. В таблице 4 представлены результаты расчета удельных показателей двигателя.

Таблица 4
Результаты расчета удельных показателей АПД-100

	Базовый двигатель	Компаундный двигатель	
	Знач.	Знач.	Отн., %
Ne, кВт	74.11	81.237	+9.6
Масса, кг	70	79.9	+14
Удельный вес, кг/кВт	0,944	0,983	-4

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

- 1) Прибавка к экономичности в наземных условиях может составить вплоть до 6,5%
- 2) В высотных условиях возможно достичь прироста мощности до 15%, к экономичности – до 9.8%
- 3) Использование системы на безнаддувных двигателях малой мощности приводит к незначительному возрастанию удельного веса.

Таким образом, компаундные двигатели представляются перспективным направлением развития авиационных поршневых двигателей.

Список литературы

- [1] A. Greszler. «Diesel Turbo-Compound Technology». ICCT/NESCCAF workshop - Improving the fuel economy of heavy-duty eets II, 2008.
- [2] C.J Chadwell and M. Walls. «Analysis of a Superturbocharged Down-sized Engine Using 1-D CFD Simulation». SAE Technical Paper 2010-01-1231, 2010.
- [3] C. Klarhoefer and G. Winkler. «Compounding a Passenger Car Diesel with a Pos-itive Displacement Expander». IMechE 3th International Conference of Turbo-charging and Turbochargers, pp. 123-127, London, 1986.
- [4] Bayindir KC et al. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: power-train configurations, powertrain control techniques and electronic control units. Energy Convers Manage 2011; 52:1305–13.
- [5] Бердник А.Н. Исследование систем газотурбинного наддува четырехтактных дизелей в зависимости от среднего эффективного давления. – Автореферат диссертации кандидата технических наук. – Хабаровск.: ХГТУ, 2002. – 21 с.