

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НАДДУВА ТУРБОКОМПАУНДНОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Филиппов А.С., д.т.н. Каминский В.Н., к.т.н. Каминский Р.В., Титченко А.Ю., Костюков Е.А.
Московский политехнический университет, Москва, Россия
asf_trb@inbox.ru

Требования к современным двигателям непрерывно ужесточаются с точки зрения обеспечения экономических и экологических параметров. Термодинамический анализ показывает, что приблизительно 30–40 % энергии топлива выбрасывается в окружающую среду выхлопными газами. По этой причине, получение дополнительной энергии от отработавших газов является перспективным способом существенно улучшить термический КПД двигателя. К способам получения дополнительной энергии от отработавших газов относятся: турбонаддув, турбокомпаунд, цикл Брайтона, цикл Ренкина и термоэлектрические генераторы. Эти методы показали увеличение термического КПД двигателя, которые варьируются от 2 до 20 %, в зависимости от конструкции системы, качества рекуперации энергии, эффективности компонентов. В данной работе будет раскрываться тема одного из перспективных вариантов энергосбережения в поршневых двигателях. К сожалению, тема турбокомпаунда ДВС в России слабо изучена, отсутствуют методики по разработке данных систем, рекомендации по подбору агрегатов. Целью данной работы является создание турбокомпаундной системы наддува двигателя авиационного назначения. В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие задачи: изучен отечественный и международный опыт создания систем наддува турбокомпаундных поршневых двигателей; разработана методика создания систем турбокомпаундного наддува для двигателей внутреннего сгорания; разработаны рекомендации по согласованию совместной работы турбокомпрессора и силовой турбины, а также системы турбокомпаунда с двигателем; разработаны рекомендации по выбору способа регулирования турбокомпаундных систем наддува. Разработанная методика позволила спроектировать турбокомпаундную систему наддува для дизельного авиационного поршневого двигателя АПД-500 мощностью 368 кВт. Были определены требуемые характеристики лопаточных машин и выбраны требуемые типоразмеры. Выбор ТКР производился наложением расходной характеристики двигателя АПД-500 на характеристику компрессорной ступени ТКР. Произведен расчет параметров силовой турбины, определено необходимое передаточное число редуктора силовой турбины.

Ключевые слова: турбокомпаунд, система турбонаддува, силовая турбина, методика расчета, поршневой двигатель.

Введение

С быстрым ростом цен на топливо и с увеличением требований экологических норм появляется необходимость повышения эффективности двигателей. Термодинамический анализ показывает, что приблизительно 30–40 % энергии топлива выбрасывается в окружающую среду выхлопными газами. По этой причине, получение дополнительной энергии от отработавших газов является перспективным способом существенно улучшить термический КПД двигателя. К способам получения дополнительной энергии от отработавших газов относятся: турбонаддув, турбокомпаунд, цикл Брайтона, цикл Ренкина и термоэлектрические генераторы. Эти методы показали увеличе-

ние термического КПД, которые варьируются от 2 до 20 %, в зависимости от конструкции системы, качества рекуперации энергии, эффективности компонентов и реализации.

Глобальная задача, стоящая перед человечеством, – рациональное использование сырьевых и энергетических ресурсов. О важности решения данной задачи писали сотни авторов. В данной работе будет раскрываться тема одного из перспективных вариантов энергосбережения в поршневых двигателях – турбокомпаунд. Данный метод нельзя назвать новым, еще 70-х годах отечественные ученые из университета НАТИ исследовали пути улучшения параметров тракторных дизелей. А в 1976 году был опубликован технический отчет НАТИ,

в работе расчетно-теоретически обосновано применение турбокомпаунда на поршневом двигателе [1].

Зарубежные компании также проводили работы по данной тематике. В 1990 году компания *Scania* опубликовала исследования, показавшие, что применение турбокомпаунда позволяет использовать до 20 % энергии выхлопных газов. Вскоре было начато серийное производство шестицилиндрового двигателя *Scania DTC11*. Благодаря использованию турбокомпаунда двигатель *Scania DTC11* имел эффективный КПД 46 %. По данным *Caterpillar* [2], используя силовую турбину на 14,6-литровом дизеле, они достигли снижения удельного эффективного расхода топлива на 4,7 % за 50000 миль испытаний в загородном цикле в США. По результатам исследований компании *Cummins* [3], применив радиальную силовую турбину, они улучшили этот параметр на 6 % при максимальной нагрузке и на 3 % при частичных нагрузках. Отсюда можно сделать вывод о перспективности данного метода. Однако данная тема мало исследуется в РФ в настоящее время, отсутствуют методики по расчету и разработке турбокомпаунда, рекомендации по подбору агрегатов.

Существуют два основных типа турбокомпаунда: механический (в котором осуществлена прямая связь силовой турбины через приводную систему с маховиком двигателя) и электрический (в нем энергия ОГ преобразовывается в электрическую посредством генератора, далее это электричество может быть использовано для подкрутки двигателя либо для иных потребителей [4]). Для данной работы выбран именно механический способ, позволяющий увеличить КПД дизеля с турбонаддувом с 40 до 46 % [5]. Однако, у данного метода имеются свои недостатки, а именно, в более поздних публикациях [6] доказано, что на режиме холостого хода и малых нагрузках система является «потребителем» энергии, тем самым увеличивается расход топлива на данных режимах. На рис. 1 представлено исполнение механического турбокомпаунда.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является создание турбокомпаундной системы наддува двигателя авиационного назначения.

В соответствии с поставленной целью сформулированы следующие задачи:

- изучить отечественный и международный опыт создания систем наддува турбокомпаундных поршневых двигателей;
- разработать методику создания систем турбокомпаундного наддува для двигателей внутреннего сгорания;
- разработать рекомендации по согласованию совместной работы турбокомпрессора и силовой турбины, а также системы турбокомпаунда с двигателем;
- разработать рекомендации по выбору способа регулирования турбокомпаундных систем наддува.

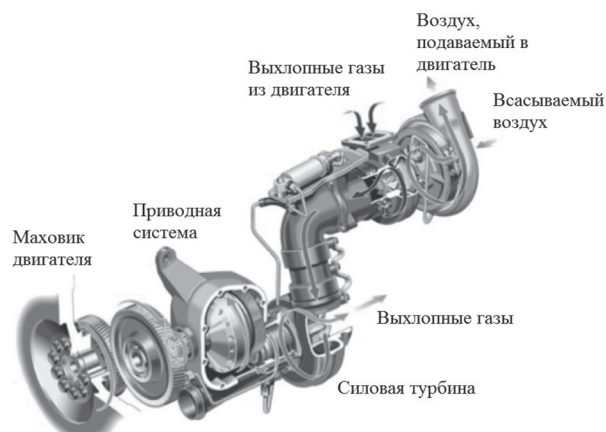


Рис. 1. Механический турбокомпаунд

Применение разработанной методики не только позволяет существенно уменьшить затраты времени и средств при разработке систем турбокомпаунда, но и заметно снизить риск допущения ошибки при расчете благодаря автоматизированной системе расчетов и разработанным рекомендациям.

Объект исследования

Система турбокомпаундного наддува высокофорсированного дизеля авиационного назначения АПД-500 мощностью 368 кВт. Конструктивные и технические параметры двигателя, представлены в таблице 1.

Методика расчета

Разработанная методика расчета позволяет рассчитать газодинамические характеристики турбокомпрессора и силовой турбины, необходимые для обеспечения заданных параметров двигателя в соответствии с требованиями технического задания. Расчет системы наддува компаундного дизельного двигателя в целом является оптимизационным выбором

Таблица 1

Конструктивные и технические параметры АПД-500

Наименование параметра	Значение
Диаметр цилиндра, м	0,086
Ход поршня, м	0,088
Степень сжатия	16,5
Число цилиндров	12
Применимость	Авиационный
Мощность двигателя на взлетном режиме без учета силовой турбины, кВт	368
Частота вращения коленчатого вала на взлетном режиме, об/мин	4000
Мощность двигателя на крейсерском режиме без учета силовой турбины, кВт	338
Частота вращения коленчатого вала на крейсерском режиме, об/мин	3750
Максимальное разрежение на входе в ТКР, кПа	3
Максимальное противодавление на выходе из силовой турбины, кПа	3
Максимальное гидравлическое сопротивление в ОНВ, кПа	5
Количество ТКР, шт	2
Количество силовых турбин, шт	1
Количество ОНВ, шт	1
Максимально допустимая температура отработавших газов, °С	750

комбинаций турбинной ступени ТКР и силовой турбины, чтобы обеспечить максимальные эффективные параметры ТКР и силовой турбины на расчетных точках. В качестве расчетных точек выбраны характерные точки характеристики двигателя.

Для удобства проведения расчетов была разработана программа «Параметры наддува компаундного дизельного двигателя».

В программе реализовано упрощенное моделирование цикла ДВС, позволяющее оценить:

- расход воздуха и степень повышения давления, необходимые для достижения заданных параметров двигателя;
- располагаемые параметры газа до и после турбины ТКР и силовой турбины.

На первом этапе расчета на основании имеющихся технических данных двигателя и информации, приведенной в технической литературе, или эмпирических формул, полученных на основании статистического анализа экспериментальных данных различных двигателей, формируется характеристика двигателя.

Для расчета параметров системы наддува должны быть заданы основные параметры двигателя, параметры окружающей среды, параметры рабочего тела, параметры охладителя наддувочного воздуха, ТКР и силовой турбины.

Уточняемые параметры рабочего процесса дизеля по результатам расчета параметров системы наддува:

- 1) коэффициент наполнения η_v ;
- 2) коэффициент избытка воздуха α ;
- 3) индикаторный КПД двигателя η_i ;
- 4) относительная теплоотдача в стенки цилиндра q_w .

Расчет необходимого давления наддува начинается с характерного режима двигателя, для которого задается минимально допустимое значение коэффициента избытка воздуха. По результатам расчета, на основе ограничения максимальной температуры газа перед турбиной ТКР 700 °С уточняется коэффициент избытка воздуха. При отсутствии заданного расхода топлива по ВСХ, используя эмпирическую зависимость, уточняем индикаторный КПД η_i двигателя.

Эффективные параметры ТКР и силовой турбины, учитывая взаимовлияние их на параметры двигателя, многократно уточняются в процессе итерации исходя из опытных универсальных характеристик. Универсальная характеристика компрессора представляет собой семейство кривых (веток), отображающих функциональные зависимости расхода воздуха и адиабатического КПД при разных окружных скоростях. При отсутствии требуемой характеристики компрессорной ступени, используя одну опытную характеристику, путем масштабирования по приведенному расходу воздуха с сохранением параметров по адиабатическому КПД и степени повышения давления, можно создать бесконечное множество характери-

стик, изменяя лишь коэффициент масштабирования.

Выбор характеристик производится на основе совмещения характеристик компрессора, турбины и требуемой расходной характеристикой двигателя. Выбор характеристик производится в два этапа. В первую очередь совмещаются характеристики компрессора с расходной характеристикой двигателя.

Выбор компрессорной ступени заключается в обеспечении прохождения расходной характеристики двигателя через максимальный адиабатический КПД компрессорной ступени, при этом необходимо обеспечить запас 5–10 % по расходу воздуха от границы помпажа на участке от минимально устойчивой частоты вращения двигателя до частоты, соответствующей левой границе полки постоянного крутящего момента для исключения режима помпажа.

Универсальная характеристика турбины представляет собой семейство кривых (веток), отображающих функциональные зависимости параметров при разных окружных скоростях. По аналогии с компрессорной ступенью, можно создать бесконечное множество характеристик, изменяя коэффициент масштабирования по приведенному расходу газа, при отсутствии требуемой характеристики турбинной ступени.

Турбинная ступень выбирается из условия получения необходимой мощности на привод компрессора. Следует отметить, расходная характеристика двигателя должна располагаться выше экспериментальных характеристик турбины для обеспечения требуемой мощности на привод компрессора.

После определения параметров наддува на характерном режиме двигателя и выбора универсальных характеристик для турбокомпрессора и силовой турбины при заданном значении эквивалентного проходного сечения силовой турбины рассчитываются параметры наддува в остальных точках, принимая во внимание закон изменения исходных параметров от оборотов коленчатого вала и с учетом выбранных универсальных характеристик.

Выбор величины эквивалентного проходного сечения силовой турбины на характерном режиме двигателя определяется в зависимости от конфигурации турбинной ступени ТКР и силовой турбины. Уменьшение эквивалентного проходного сечения силовой турбины

приводит к увеличению мощности силовой турбины за счет увеличения сопротивления после турбины ТКР. В этом случае для достижения требуемой мощности на привод компрессора снижается пропускная способность и степень понижения давления в турбинной ступени ТКР, что приводит к уменьшению эффективного КПД. С другой стороны, степень понижения давления в силовой турбине повышается, что приводит к увеличению мощностного КПД.

Поэтому, как только будет завершена оценка для одного эквивалентного проходного сечения силовой турбины на характерном режиме двигателя, вся процедура повторяется с другим значением для того, чтобы найти оптимальное сочетание конфигурации турбинной ступени ТКР и силовой турбины.

Результаты расчета и подбор агрегатов наддува

Краткий перечень параметров, полученных в результате расчета системы турбокомпаунда для двигателя АПД-500 представлен в таблице 2.

Выбор ТКР производился наложением расходной характеристики двигателя АПД-500 на характеристику компрессорной ступени ТКР. На рис. 2 и 3 представлены экспериментальные характеристики компрессорной и турбинной ступеней ТКР, удовлетворяющие расходные характеристики двигателя АПД-500.

На рис. 4 представлены характеристики силовой турбины, удовлетворяющие расходным характеристикам двигателя АПД-500.

Необходимое передаточное отношение для редуктора силовой турбины для крейсерского и взлетного режимов составило 13,5 и 13,7 соответственно. По результатам расчета мощность и мощностной КПД силовой турбины составляют:

- взлетный режим – $N_{TC} = 55,8$ кВт и $\eta_{TC} = 0,70$;
- крейсерский режим – $N_{TC} = 42,6$ кВт и $\eta_{TC} = 0,70$.

Определен типоразмер ТКР и силовой турбины для компаундного двигателя АПД-500. Турбокомпрессор типоразмера ТКР 80 с двухзаходным нерегулируемым корпусом турбины и колесом турбины размерности 60 мм.

Силовая турбина – осерадиальная турбинная ступень с нерегулируемым однозаходным корпусом турбины и типоразмером колеса турбины 120 мм.

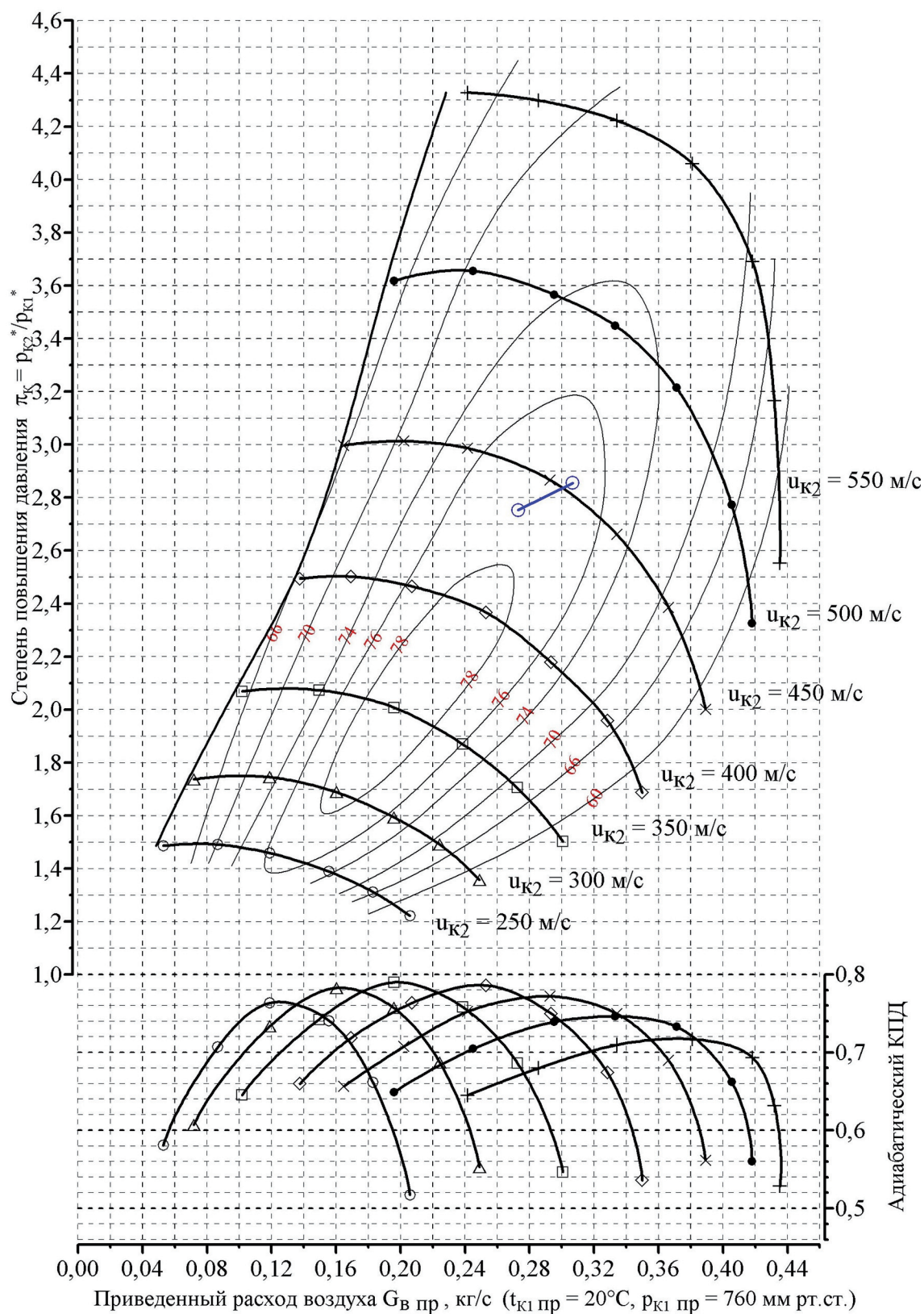


Рис. 2. Характеристики компрессора ТКР 80 с расходной характеристикой двигателя АПД-500

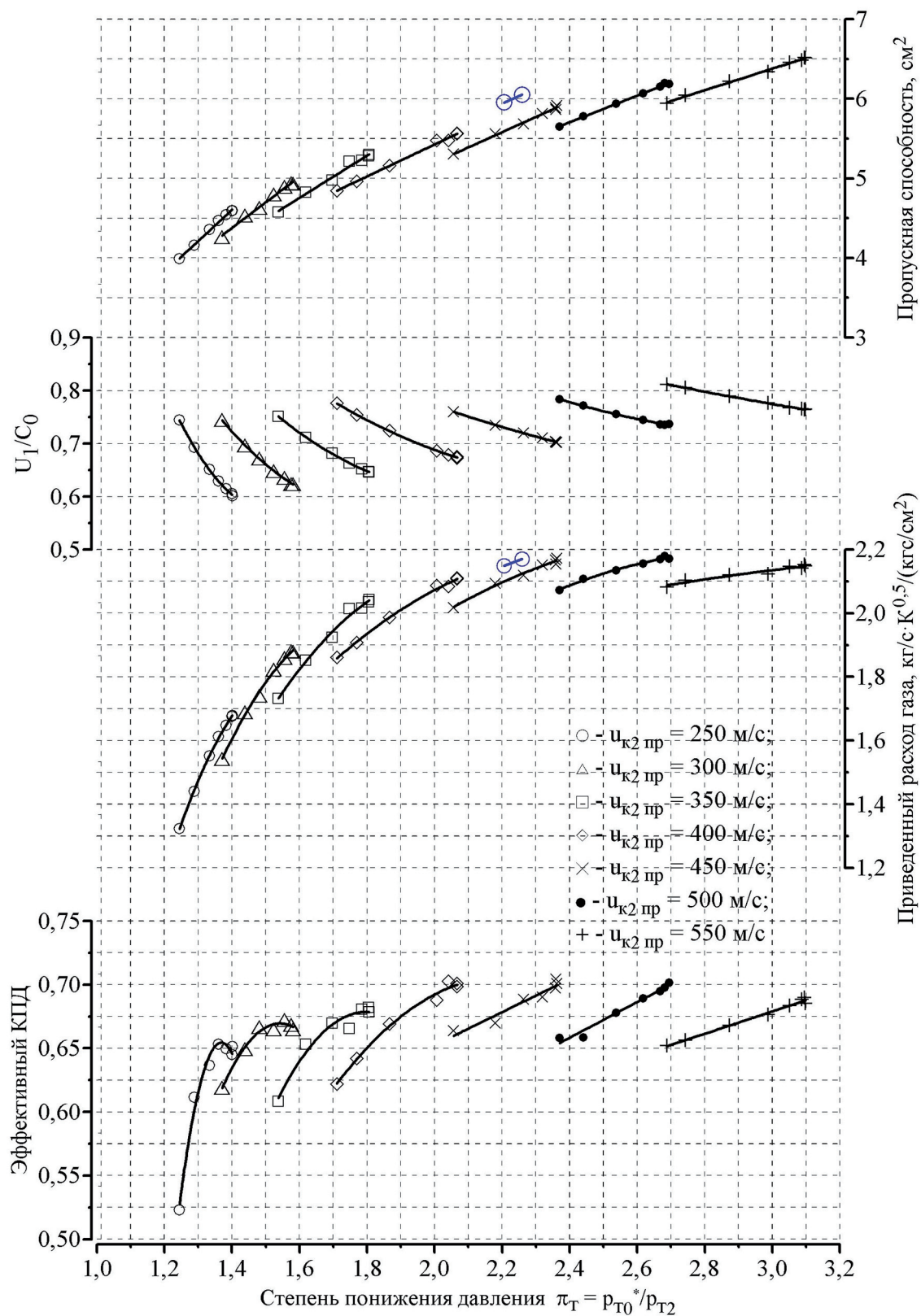


Рис. 3. Характеристики турбины ТКР 60 с расходной характеристикой двигателя АПД-500

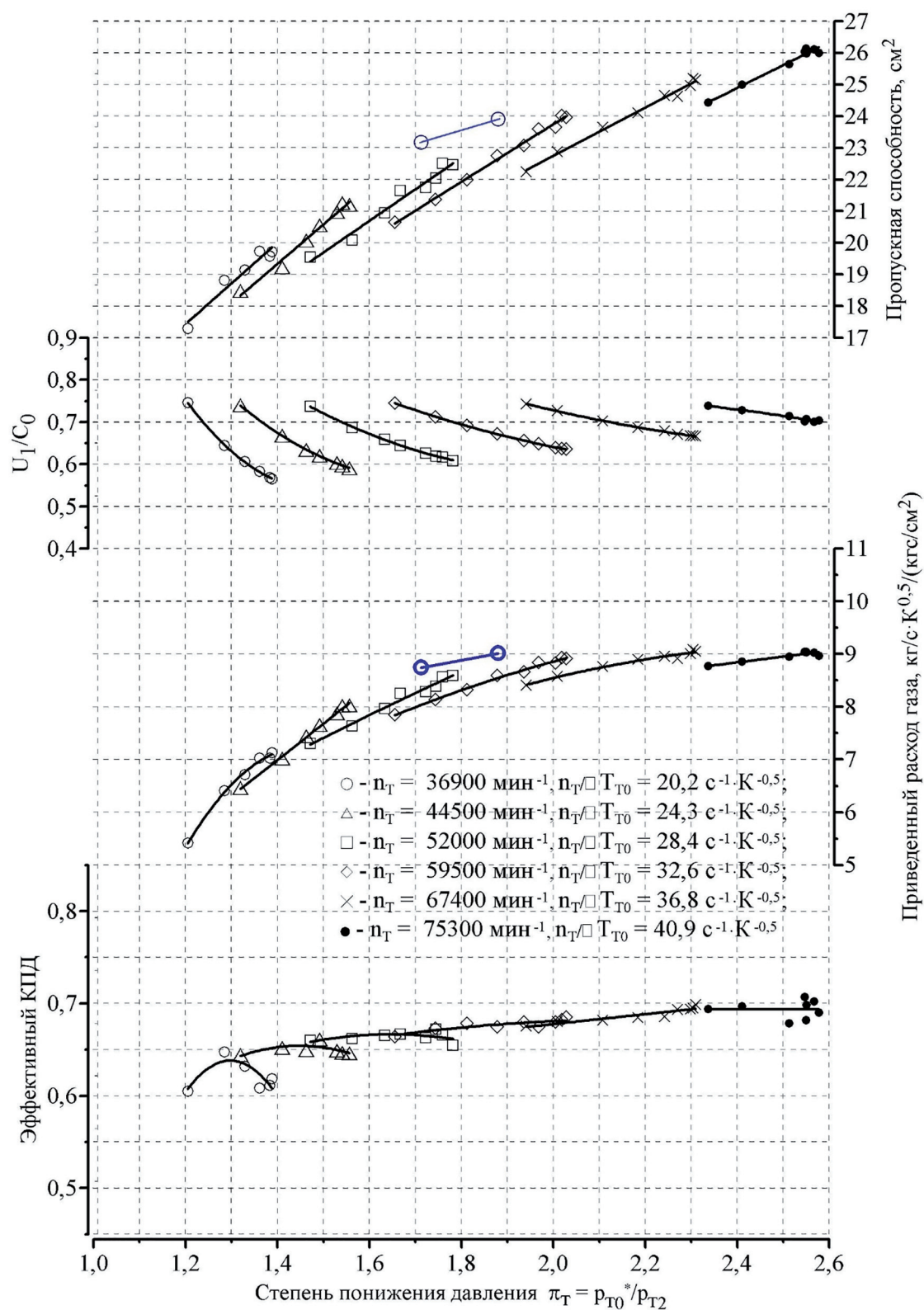


Рис. 4. Характеристики турбины ТКР 120 с расходной характеристикой двигателя АПД-500

Таблица 2

Расчетные параметры двигателя АПД-500 с турбокомпаундом

Наименование параметра	Частота вращения, об/мин	
	3750	4000
Мощность, кВт	338	368
Крутящий момент, Н·м	861,2	879,1
Удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч	0,227	0,233
Степень повышения давления в компрессоре	2,752	2,855
Адиабатический КПД компрессора ТКР	0,77	0,77
Расход воздуха через двигатель, кг/с	0,5202	0,5825
Степень понижения давления в турбине ТКР	2,206	2,259
Расход газа через турбину ТКР, кг/с	0,2708	0,3031
Эффективный КПД турбины ТКР	0,680	0,680
Мощность турбины ТКР, кВт	33,93	39,58
Степень понижения давления в силовой турбине	1,517	1,679
Расход газа через силовую турбину, кг/с	0,5416	0,6063
Приведенный расход воздуха через компрессор ТКР, кг/с	0,273	0,307
Необходимое передаточное отношение для редуктора силовой турбины	13,5	13,7
Мощность силовой турбины, кВт	42,6	55,8
Мощность силовой установки (Двигатель+ТС с механическим приводом), кВт	376,3	418,3
Крутящий момент силовой установки (Двигатель+ТС с мех. приводом) Н·м	958,87	999,10
Удельный эффективный расход топлива силовой установки (Двигатель+ТС с механическим приводом), кг/кВт·ч	0,204	0,205

Выводы

Проведенные расчеты с применением разработанной методики продемонстрировали:

1. Увеличение мощности двигателя с 368 кВт (без турбокомпаунда) до 418,3 кВт (с турбокомпаундом) при 4000 об/мин.
2. Увеличение крутящего момента двигателя с 879,1 Н·м (без турбокомпаунда) до 999,1 Н·м (с турбокомпаундом) при 4000 об/мин.
3. Снижение удельного эффективного расхода топлива с 0,233 г/кВт·ч (без турбокомпаунда) до 0,205 г/кВт·ч (с турбокомпаундом) при 4000 об/мин.

Заключение

Разработанная методика расчета систем наддува турбокомпаундного поршневого двигателя позволяет спроектировать и выбрать требуемые агрегаты. Результаты расчета показывают, что применение силовой турбины в газовом тракте после турбокомпрессора позволяет увеличить мощность и крутящий момент двигателя, а также снизить расход топлива.

В дальнейшем для апробации разработанной методики необходимо провести моторные испытания системы.

Литература

1. Каминский В.Н. Исследование путей создания высокофорсированных и экономичных тракторных дизелей. Этап 1.3. Расчетно-теоретические работы по обоснованию выбора схемы и объекта макетного образца турбопоршневого двигателя // НАТИ, Москва, 1976.
2. Tennant D.W.H., Walsham B.E. (1989) The Turbocompound Diesel Engine, SAE Paper No. 890647. Power Boost-Light, Medium and Heavy Duty Engines Number: SP-0780; Published: 1989-02-01.
3. Brands M.C., Werner J., Hoehne J.L. (1981), 'Vehicle Testing of Cummins Turbo Compound Diesel Engine', SAE Technical Paper 810073, SAE 1981Transactions Number: V90-A; Published: 1982-08-01.
4. D.T. Hountalas, C.O. Katsanos, D.A. Kouremenos. Study of Available Exhaust Gas Heat Recovery Technologies for HD Diesel Engine Applications. International Journal of Alternative Propulsion, Vol. 1, No. 2/3, 2007. (Cit. on pp. 85, 88, 89).
5. Жуков В.А., Курин М.С. Использование вторичных энергетических ресурсов в турбокомпаундном двигателе // Альтернативный киловатт, Рыбинск, 2010. № 4. С. 26–29

6. A.T.C. Patterson, R.J. Tett, J. McGuire. Exhaust Heat Recovery Using Electro-Turbogenerator. SAE Technical Paper 2009-01-1604, 2009. (Cit. on p. 91).
3. Brands, M.C., Werner J., and Hoehne J.L. (1981), 'Vehicle Testing of Cummins Turbo Compound Diesel Engine', SAE Technical Paper 810073, SAE 1981Transactions Number: V90-A; Published: 1982-08-01.
4. D.T. Hountalas, C.O. Katsanos, and D.A. Kouremenos / Study of Available Exhaust Gas Heat Recovery Technologies for HD Diesel Engine Applications". International Journal of Alternative Propulsion, Vol. 1, No. 2/3, 2007. (Cit. on pp. 85, 88, 89).
5. Kurin M.S. The use of secondary energy resources in a turbocompound engine // Zhukov V.A., Kurin M.S. / Alternative kilowatt, Rybinsk, 2010. No. 4. S. 26–29.
6. A.T.C. Patterson, R.J. Tett, and J. McGuire. 'Exhaust Heat Recovery Using Electro-Turbogenerator'. SAE Technical Paper 2009-01-1604, 2009. (Cit. on p. 91).

References

1. Kaminsky V.N. Study of ways to create highly accelerated and economical tractor diesel engines. Stage 1.3. Calculation and theoretical work on the justification of the choice of the circuit and the object of the prototype of a turbo-piston engine // NATI, Moscow, 1976.
2. Tennant, D. W. H., and Walsham, B. E. (1989), 'The Turbocompound Diesel Engine', SAE Paper No. 890647. Power Boost-Light, Medium and Heavy Duty Engines Number: SP-0780; Published: 1989-02-01.

DEVELOPMENT OF A BOOST SYSTEM TURBOCOMPAUND PISTON ENGINE

A.S. Filippov, DSc in Engineering **V.N. Kaminsky**, PhD in Engineering **R.V. Kaminsky**, **A.Yu. Titchenko**, **E.A. Kostyukov**
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia
asf_trb@inbox.ru

The requirements for modern engines are constantly being tightened in terms of ensuring economic and environmental parameters. Thermodynamic analysis shows that approximately 30–40 % of fuel energy is emitted into the environment by exhaust gases. For this reason, obtaining additional energy from exhaust gases is a promising way to significantly improve the thermal efficiency of the engine. Methods for generating additional energy from exhaust gases include: turbocharging, turbocompound, Brighton cycle, Rankine cycle and thermoelectric generators. These methods showed an increase in thermal efficiency, which vary from 2–20 %, depending on the design of the system, the quality of energy recovery, component efficiency and implementation. In this work theme of one of the promising options for energy saving in piston engines will be revealed. Unfortunately, the topic turbocompounding in Russia is poorly studied, there are no methods for developing these systems, recommendations for selecting boost units. The aim of this work is to create a turbocompound system for boosting an aircraft engine. In accordance with the goal, the following tasks are formulated and solved: studied domestic and international experience in creating turbocharging systems for turbocharged piston engines; a methodology has been developed for creating turbocharged boost systems for internal combustion engines; recommendations were developed to coordinate the joint operation of a turbocompressor and a power turbine, as well as a turbocompound system with an engine; developed recommendations for choosing a method for regulating turbocompound boost systems. Based on the developed methodology and recommendations, the calculation of the pressurization parameters of the APD-500 diesel aircraft piston engine with a power of 368 kW was performed. The required characteristics of the blade machines were determined and the required sizes were selected. The choice of turbocharger was made by superimposing the flow characteristics of the APD-500 engine on the characteristics of the compressor stage of the turbocharger. The parameters of the power turbine were calculated, the required gear ratio of the power turbine gearbox was determined.

Keywords: turbocompound, turbocharging system, power turbine, calculation methodology, piston engine.