

УДК 621.431.75

РАЗРАБОТКА ОДНОСЕКЦИОННОГО РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ-ДЕМОНСТРАТОРА НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОЙ КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА

© 2014 А.Н. Костюченков, А.А. Зеленцов, П.В. Семенов, В.П. Минин

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

В настоящее время в Российской Федерации отсутствует производство авиационных двигателей в классе мощностей 100-300 л.с. Одним из наиболее перспективных решений проблемы создания малоразмерных отечественных авиадвигателей является разработка двигателей на основе принципа модульности. Он заключается в разработке унифицированной силовой части и создании на базе неё многосекционных или многоцилиндровых двигателей для обеспечения необходимых мощностных характеристик. Наиболее просто данная задача решается при создании роторно-поршневых двигателей (РПД). В статье рассматривается современная методика расчёта односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора, включающая постановку целевых технических показателей, расчёт основных геометрических параметров роторно-статорной группы, оценку рабочих характеристик двигателя с учётом газодинамики и механических потерь, моделирование рабочего процесса с учётом геометрических особенностей РПД и учётом теплоотдачи в стенки камеры сгорания. На основании проведенных расчётов выполняется трёхмерная модель двигателя, для которой проводятся прочностные и теплофизические расчёты. Расчёт геометрии проводится аналитическими методами. Рабочие характеристики определяются с помощью современных программных комплексов. На основе разработанной методики создан проект двигателя-демонстратора мощностью 100 л.с. В дальнейшем данную методику планируется применить при создании мощностного ряда авиационных роторно-поршневых двигателей мощностью 200 и 300 л.с. на основе принципа модульности.

Роторно-поршневой двигатель, модульный принцип, современная методика расчёта.

Введение. В настоящее время в Российской Федерации отсутствует производство двигателей в классе мощностей 100-300 л.с. Это подтверждает проведённый Центральным институтом авиационного моторостроения имени П.И. Баранова анализ рынка малой авиации и авиационных поршневых двигателей. Для обеспечения легкомоторной авиации двигателями необходимо создание модельных рядов в указанном диапазоне мощностей. Одним из наиболее перспективных решений этой проблемы является создание двигателей на основе принципа модульности. Он заключается в разработке унифицированной силовой части и создании на базе неё многосекционных или многоцилиндровых двигателей для обеспечения необходимых мощностных характеристик. Наиболее просто данная задача решается при создании роторно-поршневых двигателей на базе унифицированной роторно-статорной группы. РПД, по сравне-

нию с кривошипно-шатунными двигателями, обладают лучшими массогабаритными характеристиками.

На сегодняшний день существует значительный дефицит современных публикаций, затрагивающих вопросы создания роторно-поршневых двигателей.

В связи с этим была поставлена задача по обобщению и систематизации имеющейся информации, а также созданию современной методики, основанной на использовании новейших программных средств, позволяющих определять геометрическую размерность, а также оценивать характеристики рабочего процесса и тепловое состояние деталей и узлов роторно-поршневых двигателей. Отработка новой методики была проведена в рамках проекта создания односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора мощностью 100 л.с.

Выбор основных параметров разрабатываемого односекционного ро-

торно-поршневого двигателя-демонстратора. В качестве значений целевых характеристик односекционного РПД были выбраны следующие:

- эффективная мощность двигателя N_e должна составлять 100 л.с.;
- удельный расход g_e не более 230 г/(л.с.·ч);
- максимальная рабочая частота вращения эксцентрикового вала n_{\max} — 6800 об/мин.

Указанные значения являются лишь ориентировочными и в дальнейшем могут уточняться.

Расчёт геометрии роторно-поршневого двигателя. Геометрия РПД полностью определяется четырьмя величинами: эксцентриситетом e (или радиусом одной из шестерён $R=3e$ или $r=2e$), параметром c (или производящим радиусом a), высотой рабочей полости H и расстоянием между теоретическим и действительным контурами рабочей полости k [1, 2]. Рабочий объём РПД, а, следовательно, и эффективная мощность, зависит от всех четырёх величин. Указанные величины не могут выбираться независимо друг от друга.

В качестве одного из главных параметров была выбрана величина производящего радиуса a , от которого зависят основные геометрические и кинематические соотношения в РПД и который в значительной степени определяет радиальный габарит двигателя. Также были заданы радиус шестерни R , расположенной в роторе, и высота рабочей полости H .

Вышеперечисленные параметры позволяют определить максимальную (1) и минимальную (2) площади поперечного сечения рабочей камеры, максимальный (3) и минимальный (4) объёмы рабочей камеры в роторе, а также рабочий объём роторно-поршневого двигателя (5) [3].

$$F_{T\max} = e^2 \left[\frac{\pi}{3} + 6\sqrt{c^2 - 1} \right] + 2(2 + c^2) \arcsin\left(\frac{R}{a}\right) + 9 \frac{c\sqrt{3}}{2}, \quad (1)$$

$$F_{T\min} = e^2 \left[\frac{\pi}{3} + 6\sqrt{c^2 - 1} \right] + 2(2 + c^2) \arcsin\left(\frac{R}{a}\right) - 9 \frac{c\sqrt{3}}{2}, \quad (2)$$

$$V_{\max} = HF_{T\max}, \quad (3)$$

$$V_{\min} = HF_{T\min}, \quad (4)$$

$$V_B = \frac{V_{\max} - \varepsilon V_{\min}}{\varepsilon - 1}, \quad (5)$$

где $\varepsilon = 9,5$ — степень сжатия, выбранная таким образом, чтобы была обеспечена работа двигателя без детонации; $c=a/R$ — параметр формы рабочей камеры РПД.

Определив основные геометрические параметры, а также значения характеристик, влияющих на КПД разрабатываемого односекционного роторно-поршневого двигателя - демонстратора, можно перейти к расчёту рабочих характеристик двигателя.

Предварительный расчёт рабочих характеристик РПД. Для подтверждения правильности подбора геометрических параметров необходимо провести расчёт характеристик рабочего процесса односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора. Расчёт проводится в нульмерной постановке с помощью специализированного программного комплекса с учётом предварительно подобранных значений геометрии двигателя.

Данная программа позволяет проводить расчёты двигателей практически любой конфигурации: как с привычным кривошипно-шатунным механизмом, так и с роторно-поршневым механизмом. Расчётная схема создаётся с помощью блоков, которые отвечают за конкретный узел двигателя. Между собой блоки соединяются линиями, имитирующими трубопроводы (впускные и выпускные). Схема расчёта рабочих характеристик разрабатываемого односекционного роторно-

поршневого двигателя-демонстратора представлена на рис. 1.

Для каждого обозначенного на рис. 1 элемента задаётся перечень параметров, позволяющих корректно имитировать соответствующий элемент системы двигателя.

Основными элементами схемы являются двигатель и рабочая секция роторно-

но-поршневого двигателя, соответственно позиции 1 и 2. Для двигателя задаётся частота вращения эксцентрикового вала и указывается тип работы, а именно, роторно-поршневой. Имеется возможность задать порядок работы секций, но в случае односекционного РПД этого не требуется.

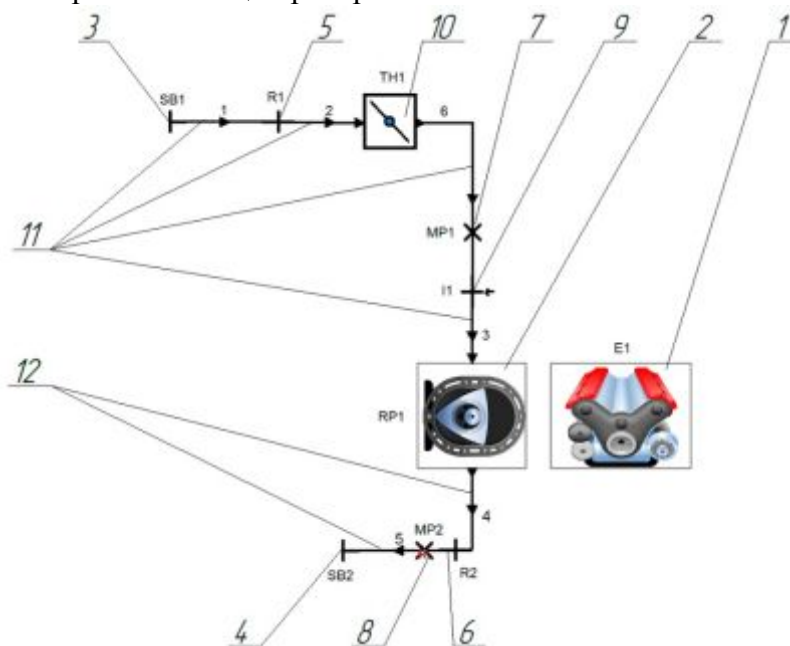


Рис. 1. Расчётная схема роторно-поршневого двигателя: 1 – блок, задающий имитацию работы двигателя, 2 – блок, имитирующий секцию РПД, 3 и 4 – граничные элементы, обеспечивающие данные для расчётной модели на входе и выходе, 5 и 6 – элементы, задающие потери давления на впуске и выпуске, 7 и 8 – точки измерения параметров в трубопроводах, 9 – форсунка, 10 – дроссель, 11 – впускные трубопроводы, 12 – выпускные трубопроводы

В качестве параметров рабочей секции задаются следующие величины: рабочий объём, степень сжатия, высота рабочей полости, среднее давление газов в картере двигателя. Для описываемого случая указанные величины приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров рабочей секции РПД

Наименование параметра	Значение
Рабочий объём, см ³	654
Степень сжатия	9,5
Высота рабочей полости, мм	80
Среднее давление газов в картере, бар	1

Для роторно-поршневого двигателя в рассматриваемом программном комплексе изменение объёма рабочей камеры

в зависимости от частоты вращения эксцентрикового вала выражается через величину нормализованного объёма V_{norm} — объёма, приведённого к единице. Рассчитывается данная величина с помощью формул

$$V_{cch} = V_h \left[0,5(1 - \cos 2\varphi) + \frac{1}{\varepsilon - 1} \right] - \frac{V_h}{\varepsilon - 1}, \quad (6)$$

$$V_{norm} = \frac{V_{cch}}{V_h}, \quad (7)$$

где V_{cch} — объём камеры сгорания; V_h — максимальный рабочий объём РПД.

Поскольку секция роторно-поршневого двигателя состоит из трёх рабочих камер, то в каждой из них необходимо задать изменение рабочего объёма, а также параметры теплоотдачи и скорости

тепловыделения, для которой выбрана функция Вибе:

$$x = 1 - \exp \left[-a \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right],$$

где a — параметр, характеризующий полноту сгорания; φ — момент начала сгорания; φ_z — длительность сгорания; m — показатель характера сгорания. Характеристика скорости тепловыделения приведена на рис. 2. В качестве зависимости, описывающей теплоотдачу в рабочей камере роторно-поршневого двигателя, принимается формула Лоренца.

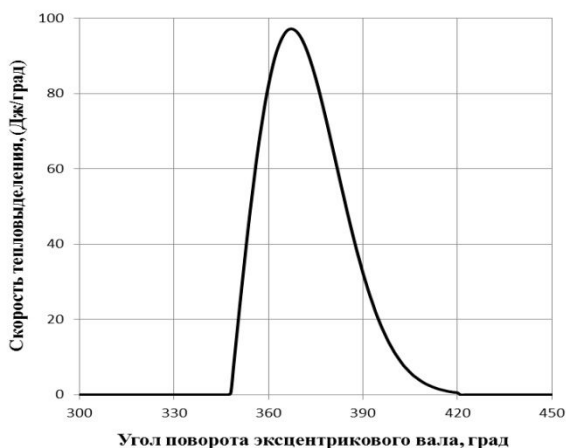


Рис. 2. Закон изменения скорости тепловыделения по Вибе

Для корректного описания указанных процессов необходимо задать температуры рабочих стенок, которые образуют рабочую камеру (рис. 3): поверхность статора S_1 , ограниченная двумя смежными вершинами ротора, и боковая поверхность в крышке S_2 . Площади поверхностей S_1 и S_2 определяются согласно формулам

$$S_1 = L \cdot H, \tag{8}$$

$$S_2 = \frac{V_{cch}}{H}, \tag{9}$$

где L — длина кривой AB , вычисляемая для каждого положения ротора через интеграл, взятый по траектории рабочей камеры (эпитрохоиде).

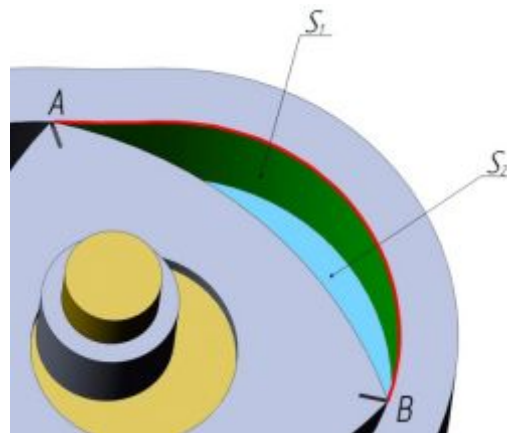


Рис. 3. Площади рабочей камеры роторно-поршневого двигателя, участвующие в расчёте процесса теплоотдачи

Элементы 3 и 4 на рис. 1 позволяют задать значения давлений и температуры на впуске и выпуске, соответственно. Элемент 10 имитирует работу дросселя, позволяя проводить расчёты для различных режимов работы двигателя.

Для труб 11 и 12 задаётся длина, диаметр сечений, коэффициент потерь, параметр теплопередачи, температура стенки, а также давление и температура воздуха внутри трубы.

Проведение предварительного термодинамического расчёта в нульмерной постановке позволяет оценить такие рабочие характеристики роторно-поршневого двигателя, как мощность, крутящий момент и удельный расход топлива в зависимости от частоты вращения эксцентрикового вала и различных величинах открытия дроссельной заслонки (рис. 4-6).

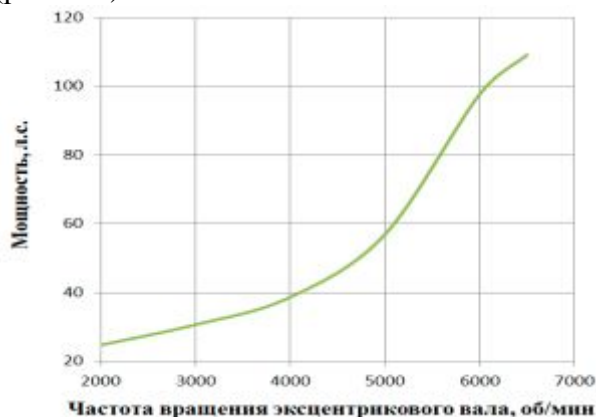


Рис. 4. Зависимость мощности роторно-поршневого двигателя от частоты вращения эксцентрикового вала при полном открытии дроссельной заслонки

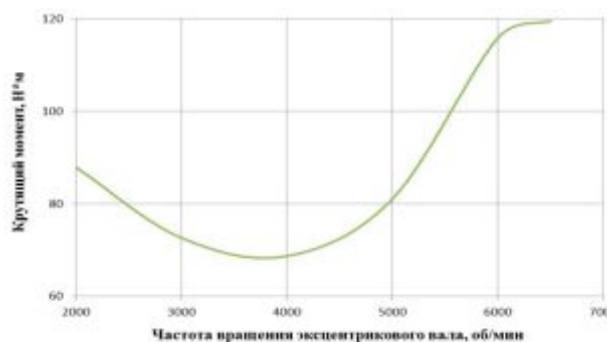


Рис. 5. Зависимость крутящего момента роторно-поршневого двигателя от частоты вращения эксцентрикового вала при полном открытии дроссельной заслонки



Рис. 6. Зависимость удельного расхода топлива роторно-поршневого двигателя при полном открытии дроссельной заслонки

Моделирование сгорания топливовоздушной смеси в РПД. Нульмерный расчёт рабочих характеристик является оценочным. С помощью него можно лишь в первом приближении оптимизировать фазы наполнения и сгорания.

Для моделирования газо- и термодинамических процессов с целью совершенствования конструктивных и регулировочных параметров, в частности роторно-поршневого двигателя, необходимо выполнить расчёты в трёхмерной постановке.

Моделирование указанных процессов в РПД затруднено его геометрическими особенностями. Необходимо вести расчёт в изолированном сегменте, объём которого изменяется по сложному закону, определяемому формой ротора и внутренней поверхностью статора. При этом сегмент постоянно совершает сложное движение. Современные программные комплексы не позволяют учитывать подобные изменения объёмов с одновременным изменением положения.

В связи с этим было предложено моделирование перемещения сегмента, который соответствует одной камере сгорания роторно-поршневого двигателя. Упрощённая модель сегмента показана на рис. 7.

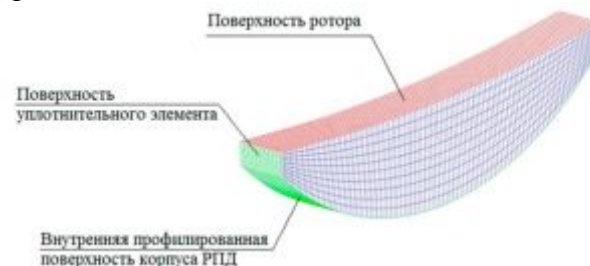


Рис. 7. Сегмент камеры сгорания роторно-поршневого двигателя

В различные моменты времени, соответствующие определённым углам поворота ротора, сетка переразбивается «вручную» с шагом в 1° сразу в трёхмерном представлении или путём предварительного создания двухмерной сетки и последующего её выдавливания в объёмную сетку. Геометрические модели, соответствующие различным углам поворота ротора, подготавливаются заранее в виде объёмного тела или двухмерного эскиза в программе твёрдотельного моделирования. Поворот сектора на необходимый угол может быть выполнен как при подготовке твёрдотельной модели, так и уже непосредственно в программе трёхмерного моделирования газовой динамики после разбиения на контрольные объёмы. Первый способ удобнее использовать в случае построения трёхмерной сетки, второй оптимален при предварительном разбиении двухмерного эскиза.

В результате разбиения получается набор сеток с необходимым шагом по углу поворота ротора, которые необходимо объединить во время задания параметров расчёта. Для этого при задании исходных данных указываются заранее подготовленные сетки и соответствующие им моменты времени с выбранным шагом. В качестве типа расчёта задаётся расчёт с шагом по времени (Time step). Дополнительно указываются модули, которые

описывают сгорание, перенос частиц и выделение продуктов реакции. Граничными условиями служат температуры всех поверхностей.

Начальные условия приведены в табл. 2. В качестве модели сгорания принимается модель Магнуссена-Хьертагера с коэффициентами $A=3$, $B=1$. Модель воспламенения — от свечи зажигания, момент зажигания соответствует $\varphi=7^\circ$ поворота ротора, продолжительность подачи искры — 1° поворота ротора. В качестве модели турбулентности используется стандартная $k-\varepsilon$ модель [4].

Таблица 2 - Начальные условия расчёта

Наименование параметра	Значение
Давление, Па	500000
Плотность, кг/м ³	1,36
Температура, К	450
Кинетическая энергия турбулентности, м ² /с ²	10
Масштаб турбулентности, м	0,001
Частота вращения свежего заряда, мин ⁻¹	3000
Тип топлива	Бензин
Коэффициент избытка воздуха	1

На рис. 8-12 приведены результаты расчёта в трёхмерной постановке: температурное поле рабочего тела в расчётном объёме для угла поворота ротора равного 18° ; зависимости давления, температуры, скорости тепловыделения и теплового потока в стенку от угла поворота ротора. Скачкообразное изменение давления и температуры соответствует срабатыванию свечи зажигания, что подтверждается изменением скорости тепловыделения в расчётном объёме.

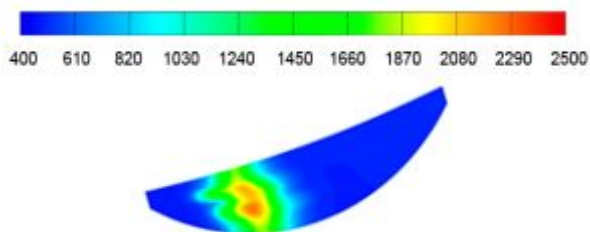


Рис. 8. Температурное поле рабочего тела в расчётном объёме

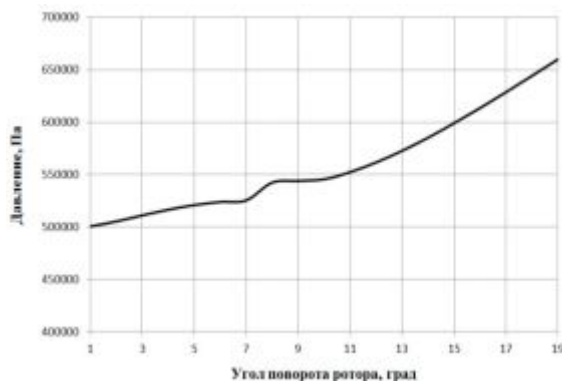


Рис. 9. Зависимость давления рабочего тела от угла поворота ротора

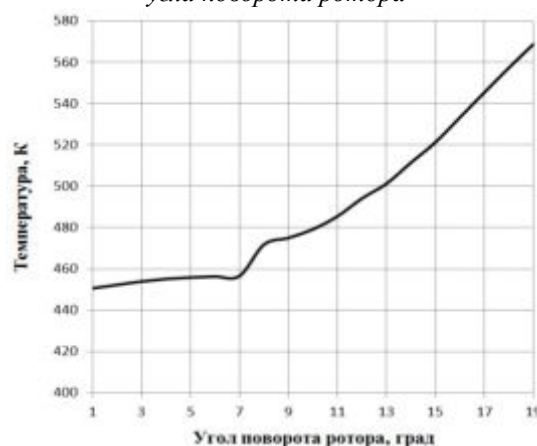


Рис. 10. Зависимость температуры рабочего тела от угла поворота ротора

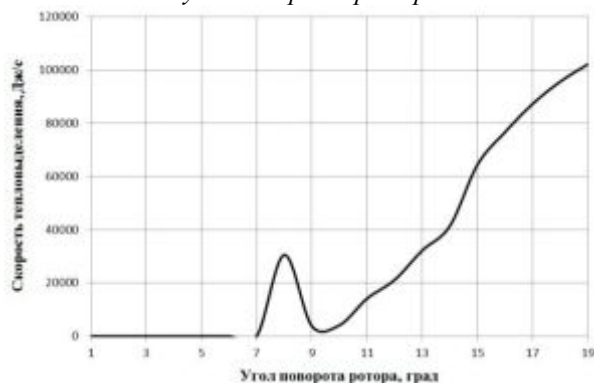


Рис. 11. Зависимость скорости тепловыделения от угла поворота ротора

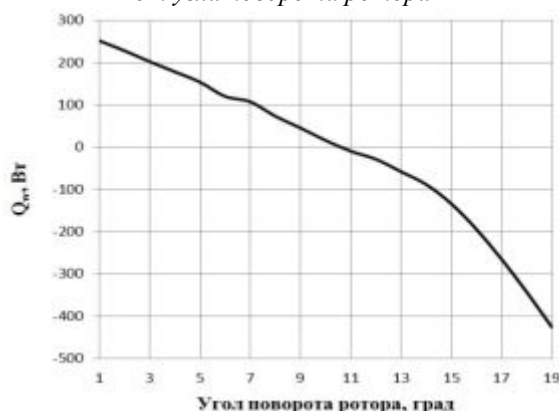


Рис. 12. Величина теплового потока в стенке сектора в зависимости от угла поворота ротора

На основе результатов проведённых термодинамических расчётов было определено тепловое состояние деталей роторно-поршневого двигателя. На рис. 13 приведено распределение температуры в роторе.

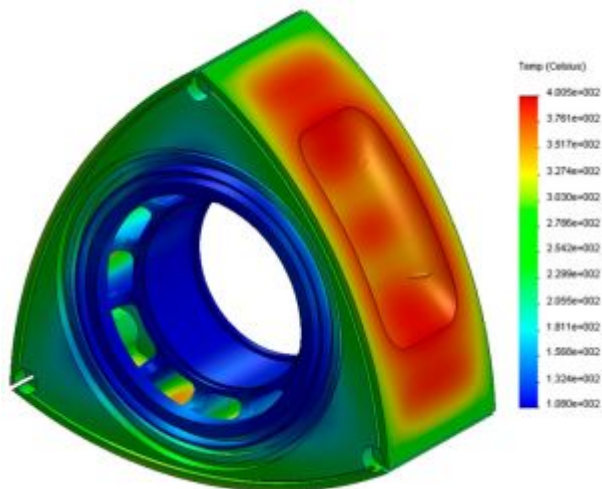


Рис. 13. Тепловое состояние ротора

Модель односекционного роторно-поршневого двигателя. На основе описанной методики был разработан проект односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора мощностью 100 л.с.

Была создана трёхмерная модель РПД (рис. 14-16), по которой впоследствии были выполнены рабочие чертежи деталей двигателя: крышек, ротора, статора, эксцентрикового вала. Проведён подбор подшипников и элементов уплотнений. Выполнена предварительная оценка массовых характеристик деталей двигателя.

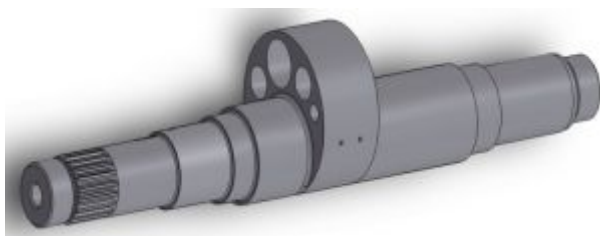


Рис. 14. Трёхмерная модель эксцентрикового вала



Рис. 15. Трёхмерная модель разработанного роторно-поршневого двигателя



Рис. 16. Трёхмерная модель ротора

Заключение. Анализ результатов расчётов существующих конструкций по предложенной методике свидетельствует о её высокой степени точности. Совокупность описанных мер позволяет проводить полный расчёт характеристик роторно-поршневых двигателей, в том числе многосекционных.

Проект односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора, разработанный с помощью предлагаемой методики, подтверждает её прикладной характер. В дальнейшем данную методику планируется применить при создании авиационных роторно-поршневых двигателей мощностью 200 и 300 л.с. на основе принципа модульности.

Библиографический список

1. Бениович В.С., Апазиди Г.Д., Бойко А.М. Ротопоршневые двигатели. М.: Машиностроение, 1968. 153 с.
2. Yamamoto K. Rotary Engine. Japan, Sankaido Co., Ltd., 1981. 68 p.
3. Ханин Н.С., Чистозвонов С.Б. Автомобильные роторно-поршневые двигатели. М.: МАШГИЗ, 1964. 186 с.
4. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.

Информация об авторах

Костюченков Александр Николаевич, кандидат технических наук, начальник сектора перспективных авиационных поршневых двигателей, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: piston@ciam.ru. Область научных интересов: разработка авиационных поршневых двигателей, исследование систем поршневых двигателей.

Зеленцов Андрей Александрович, кандидат технических наук, научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: piston@ciam.ru. Область научных интересов: разработка авиационных поршневых двигателей, исследование систем поршневых двигателей, оценка рабочих характеристик поршневых двигателей.

Семёнов Павел Владимирович, младший научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: piston@ciam.ru. Область научных интересов: разработка авиационных поршневых двигателей, исследование систем поршневых двигателей, проблемы прочности и ресурса авиационных поршневых двигателей.

Минин Владимир Петрович, инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: piston@ciam.ru. Область научных интересов: разработка авиационных поршневых двигателей, исследование систем поршневых двигателей.

DEVELOPMENT OF A SINGLE-SECTION DEMONSTRATOR ROTARY ENGINE ON THE BASIS OF A MODERN COMPLEX DESIGN PROCEDURE

© 2014 A.N. Kostyuchenkov, A.A. Zelentsov, P.V. Semenov, V.P. Minin

State Research Center of Russian Federation "Central institute of aviation motors", Moscow, Russian Federation

There is no manufacture of aviation engines in power range of 100-300 hp. One of the most perspective decisions of the domestic low-sized aviation engines developing is creation of engines on the basis of modularity principle. This principle consists in designing of the unified power part and creation on the basis of it multisection or multicylinder engines for maintenance necessary performance. Most simply given problem dares at creation of rotary engines. The paper presents modern design procedure of single rotary engine. This procedure includes statement of target engineering performance, calculation of the basic dimensions of rotary engine, engine performance assessment subject to gas dynamics and mechanical losses, simulation of working process subject to basic dimensions of rotary engine and heat transfer into combustion chamber wall. 3D-model of rotary engines is created on the basis of calculations mentioned above. Calculation of engine geometry is carried out by

analytical methods. Performance of rotary engine is calculated by using modern software. The 100 hp single rotary engine project was developed on the basis of this design procedure. In future this design procedure will be applied for developing 200 hp and 300 hp aviation rotary engines.

Rotary engine, modular approach, modern design procedure.

References

1. Beniovich V.S., Apazidi G.D., Boyko A.M. Rotoporshnevie dvigateli [Rotary engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. 153 p.
2. Yamamoto K. Rotary Engine. Japan, Sankaido Co., Ltd., 1981. 68 p.
3. Hanin N.S., Chistozvonov S.B. Avtomobilnie roturno-porshnevie dvigateli [Automotive rotary engines]. Moscow: MASHGIZ Publ., 1964. 186 p.
4. Kavtaradze R.Z. Teoriya porshnevihi dvigateley. Specialnie glavi [Theory of piston engines. Special volumes]. Moscow: Bauman Tech. University Publ., 2008. 720 p.

About the authors

Kostyuchenkov Alexander Nikolaeovich, Candidate of Science (Engineering), chief of sector perspective aviation piston engines, State Research Center of Russian Federation “Central institute of aviation motors”, Moscow. E-mail: piston@ciam.ru. Area of Research: development of aviation piston engines, research of piston engines systems.

Zelentsov Andrey Alexandrovich, Candidate of Science (Engineering), researcher, State Research Center of Russian Federation “Central institute of aviation motors”, Moscow. E-mail: piston@ciam.ru. Area of Research: development of aviation piston engines, research of piston engines systems,

estimation of piston engines performance.

Semenov Pavel Vladimirovich, junior researcher, State Research Center of Russian Federation “Central institute of aviation motors”, Moscow. E-mail: piston@ciam.ru. Area of Research: development of aviation piston engines, research of piston engines systems, problems of durability and resource of aviation piston engines.

Minin Vladimir Petrovich, engineer, State Research Center of Russian Federation “Central institute of aviation motors”, Moscow. E-mail: piston@ciam.ru. Area of Research: development of aviation piston engines, research of piston engines systems.