

УДК 621.43

Разработка демонстратора авиационного роторно-поршневого двигателя в классе мощности 100 л.с.

Минин В.П., Костюченков А.Н., Замышляев В.А.

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Россия

Development of the aircraft rotary-piston engine-demonstrator in a class of 100 hp.

Minin V.P., Kostyuchenkov A.N., Zamyshlyayev V.A.

CIAM, Russia

Рассмотрены вопросы применения роторно-поршневых двигателей в легкомоторной авиации и БПЛА. Приведена разработка демонстратора авиационного роторно-поршневого двигателя мощностью 100 л.с. с использованием собственной методики расчета. Описаны испытания созданного демонстратора роторно-поршневого двигателя и приведены их результаты.

Ключевые слова: Поршневой двигатель, роторно-поршневой двигатель, авиация, БПЛА, расчетная методика, испытания.

The problems of the rotary-piston engine in light aircraft and UAVs. The development of the 100 hp demonstrator aircraft rotary-piston engine using special calculation methodology. Describes of the testing of new-created demonstrator rotary-piston engine and provides the results.

Keywords: Piston engine, rotary-piston engine, Wankel engine, light aviation, UAVs, calculation methodology, testing.

В настоящее время в России отсутствуют современные отечественные АПД для легких самолетов, винтокрылых ЛА и БЛА различных типов, поэтому большинство разрабатываемых легких пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов (ЛА) оснащаются авиационными двигателями зарубежного производства. Требуемое для обеспечения конкурентоспособности на перспективном уровне улучшение показателей отечественных авиационных ДВС нового поколения может быть достигнуто только при условии внедрения комплекса конструктивно-технологических мероприятий. Одним из таких мероприятий может быть создание блочно-модульных силовых установок на базе роторно-поршневых двигателей.

За годы интенсивного применения РПД, в различных видах транспортных средств, четко выявились их плюсы и минусы по сравнению с традиционными поршневыми двигателями. Основными преимуществами авиационных РПД являются:

- малая удельная масса и компактность;
- значительно более высокая равномерность крутящего момента по сравнению с поршневым двигателем; [1]
- низкий уровень шума и вибраций, особенно в многосекционных конструкциях;
- возможность работы на различных видах топлива (многотопливность);
- возможность уменьшения лобового сечения мотогондол;
- большие резервы в использовании турбонаддува.

Недостатки:

- снижение КПД (по сравнению с четырехтактными АПД);
- повышенная токсичность выхлопных;
- высокая неравномерность теплового состояния корпусных деталей.

Несмотря на ряд недостатков, положительные качества этих двигателей, позволяют заявлять о перспективности их применения в качестве энергетических установок в различных областях техники, а исследования, направленные на совершенствование РПД, сохраняют свою актуальность.

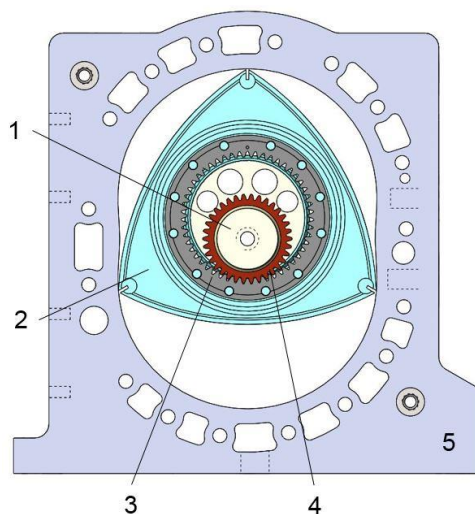


Рис. 1. Схема РПД. 1-Эксцентриковый вал; 2-Ротор; 3-Шестерня ротора; 4-Неподвижная (малая) шестерня; 5-Статор.

Двигатель Ванкеля (схема представлена на рис.1) работает по четырехтактному циклу Отто. Изменение рабочих объёмов обеспечивается за счет вращения трохоидального треугольного ротора (2), в почти эллиптическом (эпитрохоидальном) корпусе-статоре (5). Уплотнения в вершинах ротора постоянно находятся в контакте с рабочей поверхностью корпуса, они отделяют камеры сгорания друг от друга. Ротор обкатывает малую шестерню (4) и вращается на эксцентрик вала (1), зубцы необходимы для синхронизации орбитального и осевого вращений ротора. Малая шестерня жестко закреплена на боковом корпусе двигателя, а большая (3), с внутренним зацеплением, установлена на одном из оснований ротора. Эксцентрик вала проходит через центр малой шестерни и служит в качестве выходного вала. За один оборот ротора эксцентрик вала совершает три оборота.

Кривая рабочей поверхности вместе с тремя гранями ротора образует три отдельные камеры, объем которых постоянно меняется, что делает ее полезной в качестве двигателя или насоса. В каждой из трех камер осуществляется один такт четырехтактного цикла Отто в любой момент времени. [2]

Выходной (эксцентрик вала) вал вращается в три раз быстрее ротора, а на один оборот ротора приходится три рабочих такта, это означает, что в роторном двигателе мы имеем один рабочий такт при полном повороте выходного вала. Это объясняет, почему двигатель Ванкеля такой компактный по сравнению со схожими по мощности поршневыми моторами (рис. 2).

Отсутствие поступательно-движущихся частей определяет низкую вибрационную активность РПД. На вал крепятся два противовеса, которые теоретически полностью уравнивают массы эксцентрика и ротора.

Авиационные РПД.

Для авиации, прежде всего беспилотной, РПД интересны своими положительными качествами: компактными габаритами, низким удельным весом и низкими вибрационными характеристиками.



Рис. 2. Сравнение авиационных РПД Mistral G300 (300 л.с.)
и ПД Lycoming (260 л.с.)

За рубежом ведутся работы по созданию и производству РПД авиационного назначения: Англия (UAV, Cubewano); Швейцария (MISTRAL); Австрия (Austro engine); США (Pratt Whitney). Современный уровень развития технологии позволяет решать любые технические вопросы производства РПД. Приемлемый ресурс и топливная экономичность с лёгкостью обеспечиваются современными двигательными системами.

Наиболее широкое применение нашли двигатели компании UAV в БПЛА из более чем 30 стран, в том числе Китая и Израиля. Швейцарская компания Mistral производит РПД в диапазоне мощностей 200-360 л.с. для пилотируемых ЛА. [3]

Работы в направлении РПД в СССР проводились во многих научных институтах и КБ. Наиболее успешными были работы СКБ РПД АвтоВАЗ. За 25 лет работ спроектированы, созданы образцы и организовано мелкосерийное производство автомобильных и авиационных двигателей в диапазонах мощностей 40...270 л.с. К сожалению, большинство организаций прекратило работы по роторной тематике.

На сегодняшний день, единственной организацией в России, проводящей работы по тематике авиационных РПД является ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова». За последние годы разработана комплексная методика создания роторно-поршневых двигателей [4], включающая постановку целевых техниче-

ских 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 от 50 до 300 л.с. на основе принципа модульности.

Создание односекционного РПД-демонстратора.

В ходе работ в рамках НИР «Перспектива» был разработан проект односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора мощностью 100 л.с.

Создана трёхмерная модель РПД (рис. 3) по которой были выполнены рабочие чертежи деталей двигателя: крышек, ротора, статора, эксцентрикового вала. Проведён подбор подшипников и элементов уплотнений. Выполнена предварительная оценка массовых характеристик деталей двигателя.

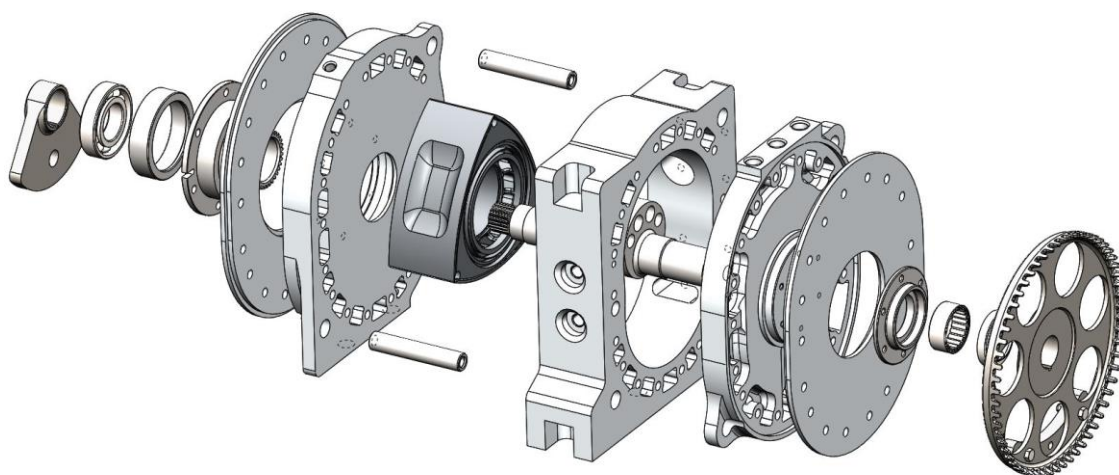


Рис. 3. Трёхмерная модель РПД.

Корпусные детали двигателя изготовлены из алюминиевого сплава Д16Т. На рабочие поверхности нанесено защитное керамическое покрытие на основе оксида алюминия.

При разработке двигателя-демонстратора рассматривались системы охлаждения жидкостного типа кольцевой и осевой схем (рис. 4 и 6 соответственно).

При кольцевой схеме вход и выход охлаждающей жидкости расположены на статоре, жидкость следует через полость, напоминающую незамкнутое кольцо и проходящую вдоль рабочей поверхности. Кольцевая схема позволяет сократить продольные габариты статорной группы двигателя и его вес, упростить конструкцию боковых и разделительных крышек (корпусов) двигателя, однако, значительно усложняется конструкция статора, требующая изготовления с помощью литья по выплавляемой модели. Такая схема отлично подходит для двигателей небольших размерностей: 50-150 см³ на секцию, применение ее для секций бóльших размерностей приводит к уменьшению жесткости рабочей поверхности. Возникновение искажений на рабочей поверхности, максимальная высота которых достигает 50 мкм (желтые зоны на рис. 5), приводит к перетечкам газов между камерами сгорания в горячей зоне и, как следствие, к сильному падению КПД двигателя, увеличению расхода топлива и повышению токсичности выхлопных газов.

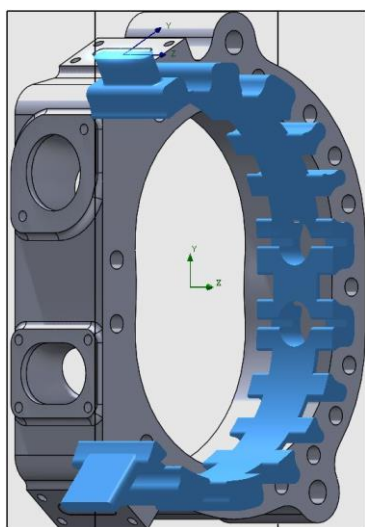


Рис. 4. Кольцевая схема системы охлаждения.

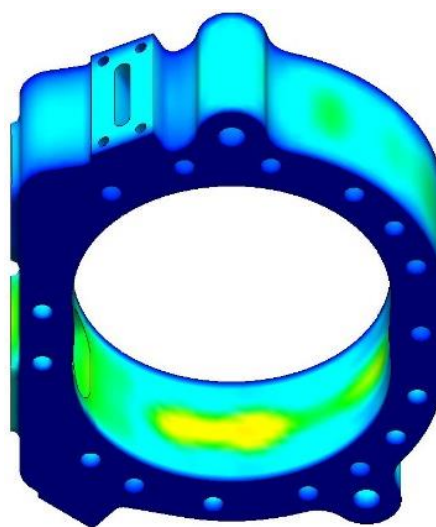


Рис. 5. Картина деформаций статора от тепловых нагрузок.

Осевая схема системы охлаждения (рис. 6) характеризуется движением жидкости по каналам в статоре, расположенным вдоль продольной оси двигателя. Вход и выход охлаждающей жидкости находится в боковых крышках, если секция одна, и в средних крышках (корпусах) для многосекционных двигателей. Применение такой схемы позволяет создать статор относительно простой конструкции, который можно изготовить как при помощи литья, так и с помощью мехобработки. Тепловые деформации в виде выпуклостей присутствуют на рабочей поверхности, расположены строго над каналами охлаждения, максимальная высота не превышает 35 мкм (рис. 7). Такая форма деформаций позволяет избежать перетечек между камерами сгорания, т.к. нигде не происходит частичного отрыва уплотнительной лопатки от рабочей поверхности. Первоначальная конфигурация каналов для осевой схемы была доработана (рис. 8). Изменение конфигурации каналов позволило увеличить теплоотвод от статора и снизить тепловые деформации рабочей поверхности до максимальной отметки в 10 мкм в области отверстия верхней свечи (рис. 9).

По результатам прочностных расчетов выявлено, что, для рассматриваемого односекционного РПД с рабочим объемом 654 см³ и корпусом из алюминиевого сплава Д16Т, наименее подвержен деформациям вариант с доработанной осевой схемой охлаждения.

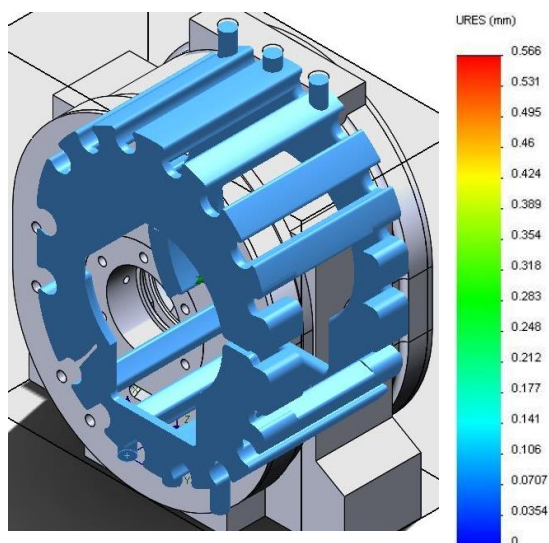


Рис. 6. Осевая схема системы охлаждения.

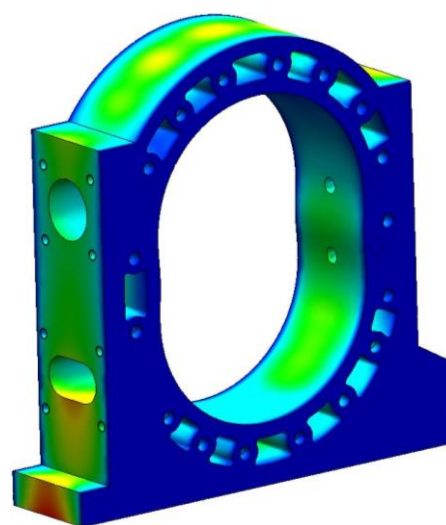


Рис. 7. Картина деформаций статора от тепловых нагрузок.

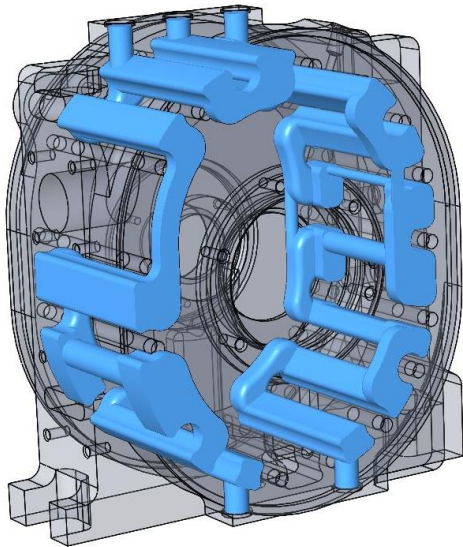


Рис. 8. Вид принятой, после доработок, осевой схемы системы охлаждения

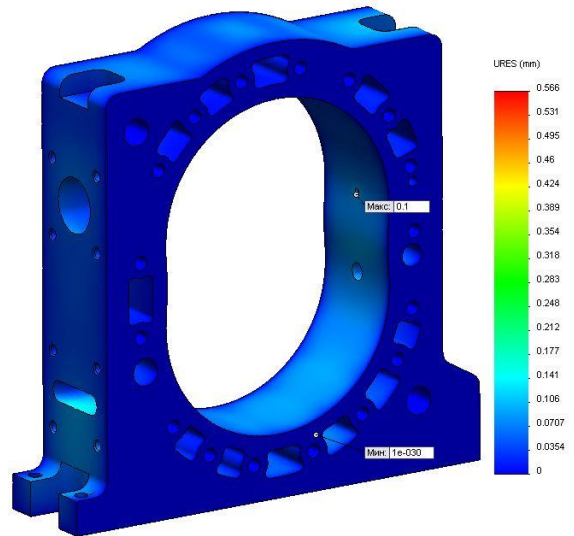


Рис. 9. Деформации статора с доработанной системой охлаждения

В рамках подготовки к экспериментальным работам были созданы стендовые системы, обеспечивающие работоспособность РПД-демонстратора (смазки, охлаждения, топливопитания и управления).

Масло в системе имеет рабочую температуру от 90°C до 110°C и, помимо смазки подшипников и боковых рабочих поверхностей, обеспечивает до 50% теплоотвода от ротора и до 10% от горячей части статора. Для поддержания необходимой температуры масла используется 19-ти рядный масляный радиатор с принудительным обдувом.

Испытания масляной системы в составе РПД проводились на установке У-336 ЦИАМ. Была подтверждена работоспособность форсунки в эксцентриковом валу (рис. 10). Также подтверждена работоспособность системы: насос обеспечивает расчетное давление масла на входе в двигатель в диапазоне 2 – 3.2 бар; отработавшее масло свободно покидает внутреннее пространство двигателя самотеком. Также были выявлены течи между корпусом и неподвижной шестерней и в сальнике коренного радиально-упорного подшипника, которые были устранены при подготовке РПД к следующей серии испытаний.



Рис. 10. Вид масляной струи, подающейся для охлаждения ротора.

На данный момент проведен комплекс холодных испытаний РПД совместно со стендовыми системами.

Первым этапом серии испытаний является холодная прокрутка РПД с установленными торцевыми уплотнениями.

Этап проводился в течение 2х часов, прокрутка осуществлялась стендовым устройством при частоте вращения вала, не превышающей 600 об/мин. По завершению этапа произведен внешний осмотр РПД, который не выявил утечек масла и ненадежности каких-либо креплений. Разбор роторной машины и осмотр внутренних полостей показал отсутствие царапин и задиров на рабочих поверхностях боковых крышек, подшипник скольжения ротора без царапин и задиров, торцевые уплотнения ротора не имеют износа.

Второй этап серии испытаний - холодные прокрутки с установленными торцевыми и радиальными уплотнениями ротора.

РПД собран с установкой всей группы уплотнений ротора. Смонтирован на динамометрическом стенде установки У-336 ЦИАМ с системой смазки. Перед запуском объекта взята проба масла. Прокрутка осуществлялась стендовым устройством при частоте вращения не превышающей 1000 об/мин циклами по 2.5 часа. Общая наработка по второму этапу составила 10 часов. После каждого цикла прокрутки проводился визуальный внешний осмотр РПД и внутренний осмотр рабочих поверхностей с помощью эндоскопа.

После второго этапа испытаний проведен разбор двигателя и осмотр рабочих поверхностей и группы уплотнений, взята проба отработавшего масла. Осмотр торцевых уплотнений показал их минимальный износ, максимальное значение $\Delta=0,009$ мм. Осмотр радиальных уплотнений показал результаты, представленные в таблице 1. Анализ отработавшего масла показал наличие примесей алюминия и углерода. Остаток «шершавого» нерабочего слоя покрытия явился причиной повышенного износа радиальных уплотнений даже в условиях обильной смазки. Выполнена финишная доводка рабочей поверхно-

Таблица 1
Результаты замера износа радиальных уплотнений

Элемент \ Замер	Начальный, мм			После 10 ч работы, мм			Среднее значение Δ , мм
Апекс 1	5,300	4,465	5,290	5,253	4,437	5,270	0,035
Апекс 2	5,290	4,470	5,290	5,240	4,432	5,268	0,036
Апекс 3	5,305	4,475	5,325	5,264	4,443	5,295	0,037

сти.

Испытание РПД в компрессорном режиме с целью определения параметров сжатия и вибрационных характеристик – третий этап серии.

Двигатель полностью собран и смонтирован со всеми системами на динамометрическом стенде установки У-336 ЦИАМ. Проведен предварительный прогрев РПД с помощью стендового устройства до стабилизации температуры охлаждающей жидкости и масла при частоте вращения не превышающей 500 об/мин.

Замеры параметров проводились в диапазоне оборотов от 500 до 1000 об/мин с шагом 100. Результаты испытаний представлены на графиках ниже.



Рисунок 11. График зависимости расхода воздуха от оборотов.

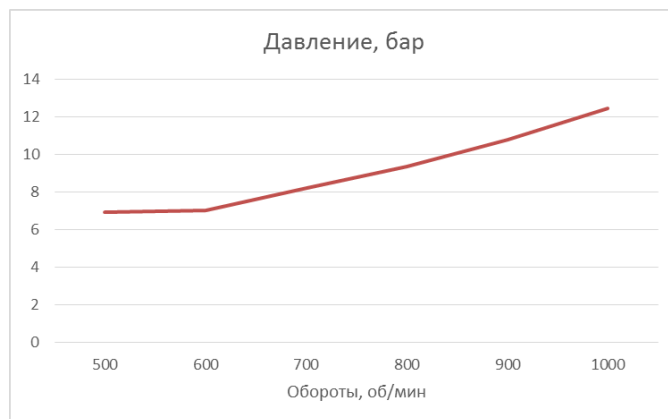


Рис. 12. График зависимости давления от оборотов.



Рис. 13. График зависимости виброскорости от оборотов.

В результате проведенной работы спроектирован и изготовлен роторно-поршневой двигатель-демонстратор. Результаты холодных прокруток выявили незначительные конструкционные недостатки и позволили устранить их до этапа предварительных доводочных испытаний РПД-демонстратора.

Литература:

1. Kenichi Yamamoto. Rotary Engine. Published by Sankaido CO.Ltd. Tokyo- Japan, 1981. – 67 с.
2. John B. Hege. The Wankel rotary engine: a History. McFarland & Company, Inc., Publishers. Jefferson, North Carolina, and London. 2006. – 11 с.
3. Е.П. Кочеров. К вопросу о развитии тематики роторно-поршневых двигателей за рубежом и в России. / Е.П. Кочеров, В.А. Кононов, В.В. Окорочков, В.М. Окорочкова, К.П. Иванова// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, №3(27), 2011. – с. 207-214.
4. А.Н. Костюченков. Разработка односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора на основе современной комплексной методики расчёта /А.Н. Костюченков, А.А. Зеленцов, П.В. Семенов, В.П. Минин// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, №5(47), часть 2, 2014. – с. 173-181.