

УДК 621.431.75

## АКТУАЛЬНОСТЬ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ РОТОРНО – ПОРШНЕВОЙ ТЕМАТИКИ

© 2014 В.В. Окорочков<sup>1</sup>, В.М. Окорочкова<sup>2</sup>, В.В. Шафранов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Открытое акционерное общество «Кузнецов», г. Самара

<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

<sup>3</sup>Открытое акционерное общество «АвтоВАЗ», г. Тольятти

Рассмотрены вопросы развития тематики роторно-поршневых двигателей и их применения в лёгкомоторной авиации, дистанционно пилотируемых летательных аппаратах (ДПЛА) и для привода генераторов, насосов, компрессоров и т.д. при наземном использовании за рубежом и в России. Приведена разработка проекта мощного ряда двигателей в диапазоне 8...200 л.с. с использованием материальной части трёх типоразмеров.

*Роторно-поршневые двигатели, модуль, ротор, статор, системы охлаждения и зажигания, легкомоторная авиация, ДПЛА, генератор, компрессор.*

Практически полное отсутствие производства отечественных авиационных поршневых двигателей (ПД) в нашей стране в настоящее время является одним из серьёзных факторов, сдерживающих развитие малой авиации и, в частности, беспилотных летательных аппаратов (ЛА). Особо остро это ощущается в об-

ласти дистанционно пилотируемых летательных аппаратах военного назначения, где по определению, должны использоваться отечественные комплектующие. В табл. 1 представлен неполный перечень отечественных ДПЛА, использующих поршневые двигатели. Ни на одном из ЛА нет двигателя, производимого в России.

Таблица 1 - Перечень отечественных ДПЛА с ПД

№№ п/п	Фирма	ДПЛА	Взлётная масса, кг	Мощность двигателя, л.с.
1.	ОАО «Камов»	КА-37 КА-137 КА-135	250 280 300	2x33 65 80
2.	НПЦ « АнтиГрад-Авиа»	Нарт	1100	2x90
3.	ОКБ «Сокол»	Данем Дань-Барук»	450 500	100 100
4.	ОАО «Кулон»	Пчела Пчела-1Т»	100 140	20 32
5	ОАО «Иркут»	Иркут-200 Иркут-850	180 860	60 100
6.	ОАО «Луч»	Типчак	50	15
7.	ОАО «Транзас»	Дозор-2 Дозор-3 Дозор-4 Дозор-600	38 500 85 600	5,5 100 12 80
8.	ОАО «Эникс»	Е 08Д «Берга» М850 «Астра» Элерон-10Д	150 130 12	40 40 5
9.	ОАО «Туполев»	Проект	1000	160
10.	ООО «ZalaAero»	421-02x 421-09	90 70	38 (AR-731) 20
11.	НПЦ « Вега»	Аист	600	2x60
12.	НПЦ «СА Лавочкин»	Калибри	380	75

Для ДПЛА необходимы двигатели с высокими требованиями по удельным параметрам: массе, габаритам, экономичности и надёжности. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают роторно – поршневые двигатели (РПД), в виду меньшего, чем у традиционных ПД количества деталей (рис.1), отсутствия возврата – поступательного движения подвижных частей, меньшего отношения массы и габаритов к мощности, меньшего уровня вибрации и шума, высокой равномерности крутящего момента и простоте конструкции. К положительным качествам РПД относится многотопливность и возможность обеспечения работоспособности на авиационном керосине и дизтопливе.



Рис. 1. Сравнение количества деталей (модулей) четырёхтактного четырёхцилиндрового двигателя и двухсекционного РПД одинаковой мощности

РПД, обладая простотой конструкции 2-х тактного двигателя (отсутствуют клапаны, распределительный вал с приводом и т.д.), работает по 4-х тактному циклу и имеет лучшую экономичность во

всём диапазоне мощности, а с уровня мощности ~30 л.с. и лучшие массогабаритные параметры. В табл. 2 представлены данные авиационных двигателей для ДПЛА: 2-х тактного П – 032 с параметрами, соответствующими мировому уровню, и РПД AR-731, производства английской фирмы UAV. Сравнение параметров показывает существенное преимущество РПД по всем позициям.

За рубежом и в России разработаны и опубликованы теоретические вопросы проектирования РПД, позволяющие получать необходимые параметры двигателей. [1, 2]. Решены технологические проблемы изготовления специфических для РПД деталей. РПД серийно производятся рядом зарубежных фирм (табл. 3). Фирма «Freedom motors» (США) производит широкий ряд РПД мощностью от 2,5 до 270 л.с. для авиации и наземного применения (бензогенераторы, компрессоры, водопомпы, колёсный и водный транспорт и т.д.) [3]. Английская фирма «UAV» выпускает РПД для ДПЛА ряда стран (более 30 ДПЛА) в диапазоне мощностей 38... 120 л.с. [3]. Японская фирма «Mazda» производит РПД автомобильного и авиационного применения в диапазоне мощностей 230...690 л.с. с литровой мощностью до 265 л.с./л. с удельным расходом ~205...220 г/л.с.ч. (рис. 2).

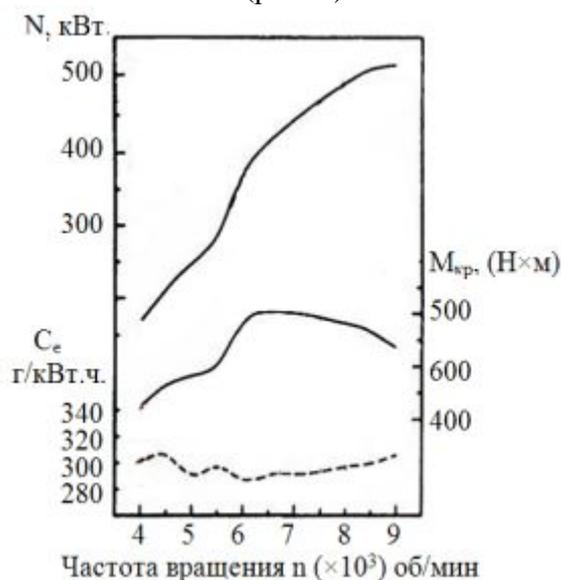


Рис. 2. Параметры 4-х секционного РПД с ТН фирмы «Mazda»

Таблица 2 – Сравнение параметров двигателей с воздушным охлаждением: двухтактного ПД П-032М и РПД АR-731

	ПД П - 032М	РПД АR – 731	Преимущество РПД
Топливо	2х - тактная смесь	2х - тактная смесь	
Рабочий объём, см <sup>3</sup>	444	208	< в 2,15 раз
Мощность, л.с.	32	38	> в 1,2 раз
Удельный расход топлива, г/л.с.ч.	0,35	0,24	< в 1,46 раз
Литровая мощность, л.с./л.	72	182	> в 2,5 раз
Частота вращения, об/мин	6800	7500	> в 1,1 раз
Масса, кг	12,5	9,9	< в 1,26 раз

Таблица 3 - Перечень стран (фирм), производящих РПД

Страна	Фирма	Двигатель
Англия	UAV Cubewano Rotron	AR-731, AR-741, AR-801, AR-682 Sonic 20,-25,-35 (N=1,5; -5,5; -11 л.с) 22 л.с. n= 7600см <sup>3</sup> V=220 см <sup>3</sup>
Германия	Woelfle Engineering G mbH WST AUDI MWE Wesley Mahler Wankel Rotary G mbH	Aikro XR 50 56л.с. m=17кг n= 11000 об/мин V= 294см <sup>3</sup>  Audi –AI  2х2х407 n=6000 об/мин N= 160 л.с
Швейцария	Mistral	G-360T3, G-300, G-200, G-230TS
Австрия	Austro engine	AE-50 , AE-75
США	Freedom motors	2,5.... 270 л.с. (1,2,3,4,6 секционный)
Канада	WST, OMC, LML	
Япония	Mazda  Nitto	12A, 13B, - 230 л.с./8200 20ER -3л.с./1000, 20EP- 1,8 л.с./10000 20EN-3л.с./18000
Южная Корея	WST LML	
Китай	Chery	V=800см <sup>3</sup> Для гибридной СУ авто
Индия	Nishant	N=55л.с. n= 8100 об/мин M=30кг V=324см <sup>3</sup> 71х11,6х0,5х75,2
Италия		
Нидерланды	LML, WST	

В России РПД мощностью 40...45 л.с. производились во ВНИИМОТОР-ПРОМЕ (г. Серпухов) для тяжёлых мотоциклов. СКБ РПД «АвтоВАЗ» разработаны и производились РПД автомобильного и авиационного назначения в диапазоне мощностей 40...300 л.с. (~30 типов двигателей) (рис. 3). Нарботка лидерных автодвигателей составляла 3000 ч.

Следует отметить, что особенности конструкции и рабочего процесса РПД

определяют характеристику двигателя, неблагоприятную для использования его на автомобиле в городских условиях, т.к. на частичных углах открытия дросселя (меньше 50%) РПД уступают традиционным ПД в экономичности. При использовании РПД в авиации, лодочных моторах и других изделиях, работающих преимущественно в верхнем диапазоне открытия дросселя, этот недостаток минимизируется.



Рис. 3. Авиационные РПД АвтоВаза

Небольшая серийность авиационных двигателей не позволяет обеспечить высокую рентабельность их выпуска и, следовательно, заинтересованность предприятий осваивать производство. Выходом из этой ситуации является двойное применение материальной части авиационных РПД как двигателя для подвесных лодочных моторов (ПЛМ), компрессоров и приводов электрогенераторов, насосов и т.д.

Одним из перспективных направлений развития роторно-поршневой тематики может быть компрессоростроение. Компрессорная тематика является серьезным самостоятельным направлением развития технологии роторно – поршневой техники, не менее значимой и высокотехнологичной в своей области, чем РПД в двигателестроении [4].

Оценка роли компрессоростроения в экономике развитых стран, а также изучение ситуации на компрессорном рынке в

России по номенклатуре и качеству представленного на нём оборудования показывает, что успешное решение компрессорной проблемы послужит укреплению технологического, энергетического и оборонного потенциала страны. Целесообразность развития этой темы обусловлена высоким уровнем рентабельности компрессорного оборудования высокого класса, характеризуемым удельными показателями его цены (табл. 4).

Высокие удельные параметры роторно – поршневых компрессоров (РПК) обусловлены не только способностью этой схемы работать на высоких частотах вращения в виду отсутствия возвратно – поступательного движения, но и возможностью в одной секции организовать две рабочие ветви нагнетания воздуха. Габаритные размеры и масса обычного поршневого компрессора и РПК приведены на рис. 4.

Таблица 4 – Количественные и стоимостные характеристики компрессорного оборудования в России

	Классы компрессоров по качеству сжатого воздуха		
	Промышленный	Индустриальный	Медицинский
Объём продаж, шт/год	Более миллиона	Тысячи	Сотни
Доля изделий импортного производства, %	>95	>99	100
Цена 1 кг товарной продукции, руб/шт	350...500	600...1000	20000...30000
Цена 1 кВт мощности, руб/кВт	5000...10000	25000...35000	50000...100000

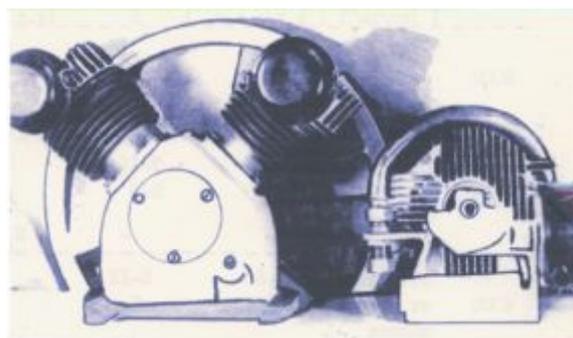
Видно, что РПК вчетверо компактней и легче традиционного ПК. По ряду важнейших свойств компрессоры других схем уступают РПК:

- по степени повышения давления ~ вдвое;
- по объёмной эффективности (отношение подачи к рабочему объёму) ~ в полтора раза;
- по скажности (отношение времени непрерывной работы при полной нагрузке к общему времени эксплуатации) ~ в полтора раза;
- по равномерности подачи, удельному энергопотреблению, загрязнению воздуха маслом, долговечности и себестоимости.

Сравнение параметров компрессоров различных типов приведены в табл.5. Как видно из приведённых данных, РПК имеет существенное преимущество по всем позициям.

Пример использования РПК в составе автомобильного кондиционера показан на рис. 5. Компрессоры широко используются не только в промышленных предприятиях, но и в транспортных средствах:

в системах кондиционирования воздуха, пневмотормозов и др. Это обуславливает их большую серийность при изготовлении, что способствует снижению себестоимости.



Давление нагнетания 0,8 МПа  
Производительность, м<sup>3</sup>/мин.:

0,593	0,666
67.2	16.5
Масса, кг:	

Рис. 4. Габаритные размеры и масса поршневой и роторно – поршневой воздушных компрессорных головок

Таблица 5 – Сравнение параметров компрессоров различных типов (с давлением 0,7 МПа)

Параметры компрессора	Винтовой	Поршневой	РПК
Масса (кг)			
-компрессорные головки	120	565	35
-компрессорные установки	600	1800	200
Габаритный объём, м <sup>3</sup>	0,70	2,6	0,35
Ресурс (2×10 <sup>3</sup> )	20	8	20
Производительность, м <sup>3</sup> /м	120	225	300
Энергопотребление, Дж/л	560	315	295
Цена, тыс. руб.	270	111	100
Себестоимость 1000 м <sup>3</sup> газа с производительностью 300 м <sup>3</sup> /м, руб	432	445	116

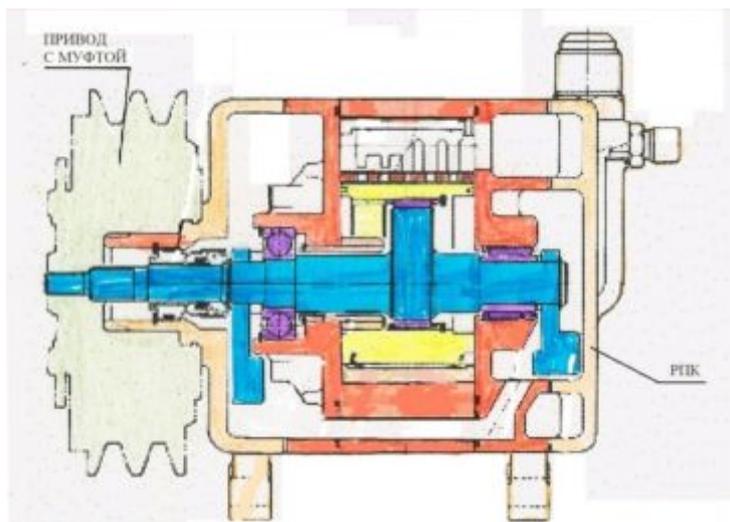


Рис. 5. Роторно – поршневой компрессор автомобильного кондиционера

Для удовлетворения потребностей малой и беспилотной авиации в ОАО «Кузнецов» разработан ряд РПД разной размерности в диапазоне мощностей 8...200 л.с. [5,6]. Размерность РПД определяется объёмом рабочей камеры, который зависит от четырёх характерных параметров:

$a$  – производящего радиуса;

$e$  – эксцентриситета;

$k$  – эквидистанты;

$H$  – ширины секции или высоты ротора. Величины этих характерных параметров связаны оптимальными соотношениями и не могут выбираться произвольно друг от друга. [5].

С учётом стандартного ряда подшипников выбраны три размерности РПД, на основе которых разработаны проекты ряда двигателей в одно- и двухсекционном исполнении при различных частотах вращения (табл. 6).

Таблица 6 - Мощностной ряд РПД

Типо-размер	Кол-во секций	Частота вращения об/мин	Мощность, л.с.
I 52×8х0,5×35 $V=76\text{ см}^3$	1	7000	8
	1	10000	12
	1	15000	18
	2	7000	16
	2	10000	24
II 80×12×1×68 $V=345\text{ см}^3$	1	5200	30
	1	6500	40
	1	8500	50
	2	5200	60
	2	6500	80
	2	8500	100
III 100×14×2×80 $V=594\text{ см}^3$	1	6500	70
	2	6500	140
	2	7500	180
	2	9000	200

Мощностной ряд может быть расширен увеличением числа секций и установкой турбонагнетателя. Двигатели мощностью 8...24 л.с. имеют воздушное охлаждение статора от набегающего по-

тока при полёте ЛА или от встроенного вентилятора при использовании РПД в качестве привода электрогенераторов, насосов и т.д., а охлаждение внутренней полости (ротора, подшипников) – свежим топливным зарядом. Для двигателей большей мощности охлаждение статора – жидкостное, а внутренней полости – свежим воздухом с добавлением дозированной подачи масла (~1...1,5%).

Прокачка воздуха выполняется вентилятором на входе и отсосом на выходе эжектором, работающем на выпускных газах. В табл. 7 приведены параметры двухсекционного РПД – 100 с объёмом секции 345см в атмосферном исполнении, а на рис. 6 – продольный разрез эскизного проекта силовой установки с РПД-100 с редуктором и встроенным генератором. Вид основных деталей двигателей мощностью 8 и 100 л.с. приведён на рис. 7.

Таблица 7 - Параметры РПД-100

Наименование параметра	Значение параметра	Примечание
Мощность, кВт/л.с. - эффективная взлётная -действительная, с учётом отборов на генератор, глушитель, вентилятор, помпу	73,5 (100) 81,9 (117)	
Частота вращения вала двигателя, об/мин	8500	
Удельный расход топлива на крейсерском режиме, кг/кВтч (кг/л.с.ч)	0,3/0,22	
Редуктор	Шестерёнчатый, двухступенчатый	
Передаточное отношение редуктора	3,739	
Частота вращения вала винта	2270	Воздушный винт - толкающий
Мощность генератора, кВт	5,0	Встроенный, расположен на валу двигателя
Система топливопитания	Распределённый впрыск низкого давления	По две форсунки на каждую секцию
Система зажигания	Электронная, дублированная питанием 27 В	Без высоковольтных проводов
Габаритные размеры (мм): длина × ширина × высота	630 × 400 × 400	
Сухая масса, кг	50	С генератором, редуктором, выпускной системой, без радиатора

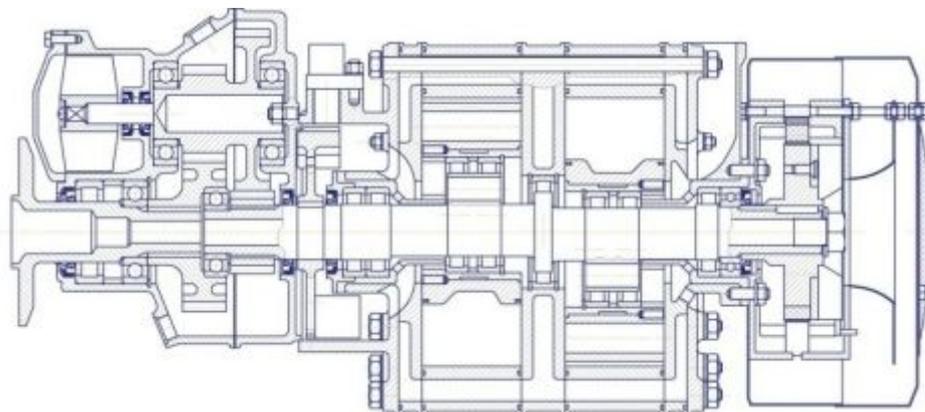


Рис. 6. Продольный разрез двухсекционного РПД - 100

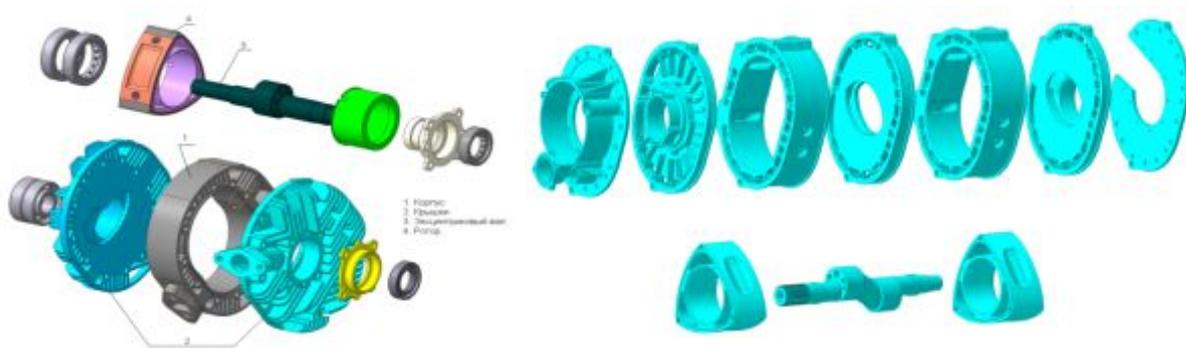


Рис.7. Основные детали модулей двигателей РПД-8 и РПД-100

С целью увеличения серийности и рентабельности производства целесообразно использовать спроектированные двигатели в подвесных лодочных моторах. Замена двухтактного двигателя «Вихрь – 30» на РПД с сохранением дейдвуда и подвески позволит существенно улучшить потребительские свойства ПЛМ: снизить уровень вибрации и шума,

уменьшить удельные расходы бензина и масла в 1,5 раза с одновременным увеличением мощности в 1,5 раза [7]. Сравнение модулей РПД – 45 и «Вихрь – 30» приведено на рис. 8. В виду меньших размеров при большей мощности РПД помещается в существующий поддон и под капот ПЛМ «Вихрь – 30».

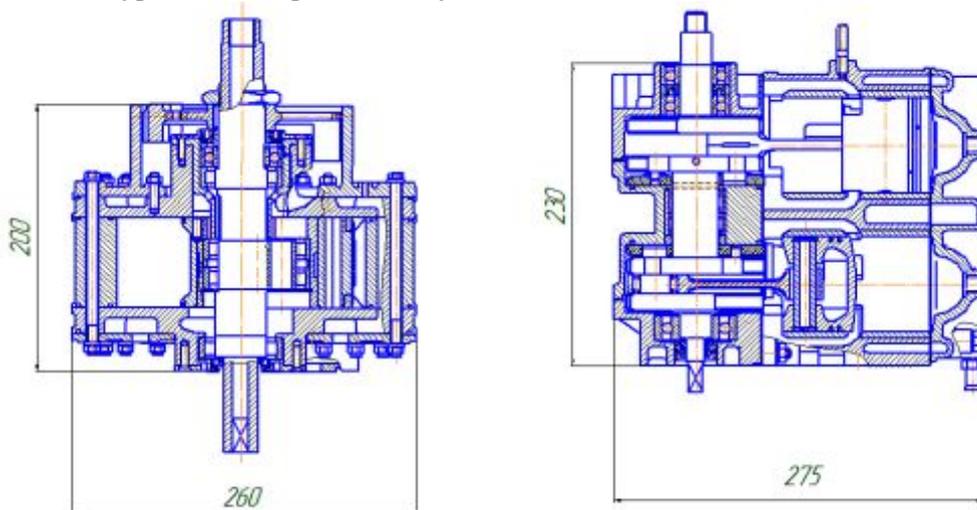


Рис.8. Сравнение модулей РПД – 45 и Вихрь - 30

Таким образом, тематика РПД, как приоритетное направление развития ПД, открывает широкие возможности и позволяет:

- разрабатывать лёгкие и компактные авиационные двигатели необходимой мощности с учётом изложенных предложений до 200 л.с. в атмосферном исполнении и до 300 л.с. с турбонаддувом;
- обеспечить низкую себестоимость двигателя ввиду простоты конструкции, ограниченного количества деталей, малой

металлоёмкости и трудоёмкости изготовления;

- обеспечить востребованность и устойчивый спрос на изделия с РПД благодаря высоким потребительским свойствам, удельным параметрам, надёжности и ресурсу двигателей;
- обеспечить высокую серийность и рентабельность производства за счёт высокого уровня унификации и двойного применения матчасти (авиадвигатели, ПЛМ, привод генераторов и насосов, компрессоры).

### Библиографический список

1. Бениович В.С., Апазиди Г.Д., Бойко А.М. Ротопоршневые двигатели. М.: Машиностроение, 1968. 151 с.
2. Kenichi Yamamoto. Rotary Engine. Published by SankaidoCO.Ltd, Tokyo-Japan, 1981. 67 p.
3. Кочеров Е.П., Кононов В.А., Окорочков В.В., Окорочкова В.М., Иванова К.П. К вопросу о развитии тематики роторно-поршневых двигателей за рубежом и России // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3(27), ч. 4. С. 207-214.
4. Лебедев Н.В. Позиционирование конструкции роторно-поршневого компрессора на стадии разработки // Компрессорная техника и пневматика. 2005. № 6. С. 34-38.
5. Технический отчёт № ТО-166-к-2010. Определение основных параметров РПД для мотогенератора мощностью 3кВт. Самара: ОАО «СКБМ», 2010. 34 с.
6. Технический отчёт № ТО-73-к-2011. Авиационный поршневой двигатель РПД –160. Самара: ОАО «Кузнецов», 2011. 57 с.
7. Технический отчёт № ТО-176-94ПJM. Результаты отработки подвесного лодочного мотора с роторно-поршневым двигателем мощностью 40 л.с. Самара: ОАО «СКБМ», 1994. 23 с.

### Информация об авторах

**Окорочков Владислав Владимирович**, начальник отдела поршневых двигателей ОКБ ОАО «Кузнецов», г. Самара. E-mail: [yv.okor@mail.ru](mailto:yv.okor@mail.ru). Область научных интересов: двигателестроение.

**Окорочкова Валентина Михайловна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория двигателей летательных аппаратов», Самарский государственный аэрокосмический университет

имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [pauka@ssau.ru](mailto:pauka@ssau.ru). Область научных интересов: двигателестроение.

**Шафранов Виктор Всеволодович**, специалист по роторно – поршневым компрессорам СКБ РПД «АвтоВАЗ», г. Тольятти. E-mail: [victor.shafranov@yandex.ru](mailto:victor.shafranov@yandex.ru). Область научных интересов: двигателестроение.

## SIGNIFICANCE AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF ROTARY PISTON AREA OF RESEARCH

© 2014 V.V. Okorochkov<sup>1</sup>, V.M. Okorochkova<sup>2</sup>, V.V. Shafranov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Open Joint-Stock Company “KUZNETSOV”, Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

<sup>3</sup>Open Joint-Stock Company «AutoVAZ», Toljatty, Russian Federation

The development of small and unmanned aircraft in Russia is hampered by the lack of production of domestic aircraft engines in the power range up to 200 h.p. The main requirement for the aircraft engine is minimal ratio of mass and overall dimensions to output. In a greater degree that is matched by the engines of rotor piston layout. The intensive work on rotor piston engines is carried out abroad by companies of many countries: Britain (UAV), USA (Freedom Motors), Austria (Austro engine) etc. In Russia, at SKBM the works on rotor piston engines were conducted for outboard motor application in cooperation with Rotor Piston Engines Design Bureau of AVTOVAZ. For the satisfaction of needs for small and unmanned aircraft a project of creation of rotor piston engines in the power range of 8-200 h.p. was developed.

*Rotor, stator, module; cooling, ignition, fuel supply systems, compressor.*

## References

1. Beniovitch V.S., Apazidi G.D., Boiko A.M. Rotoporshnevye dvigateli [Rotary piston engines]. Moscow: Mashinostoyeniye Publ., 1968. 151 p.
2. Kenichi Yamamoto. Rotary Engine. Published by SankaidoCO.Ltd, Tokyo, Japan, 1981. 67 p.
3. Kocherov E.P., Kononov V.A., Okorochkov V.V., Ivanova K.P., Okorochkova V.M. Issues of evolution of rotor piston engines subject abroad and in Russia // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2011. No. 3(27), part 4. P. 207-214. (In Russ.)
4. Lebedev N.V. Positioning of dising of rotary piston compressors under development // Compressors and Pneumatics. 2005. No. 6. P. 34-38. (In Russ.)
5. Technical report No. TO-166-к-2010. Opredelenie osnovnykh parametrov RPD dlya motogeneratora moshchnost'yu 3kVt [Determination of rotary piston engine main parameters for 3kW motogenerator]. Samara: JSC SKBM, 2010. 34 p. (In Russ.)
6. Technical report No. TO-73-k-2011. Aviatsionnyi porshnevoi dvigatel' RPD-160 [Aviation piston engine RPE-160]. Samara. JSC «Kuznetsov», 2011. 57 p. (In Russ.)
7. Technical report No. TO-176-94PLM. Rezul'taty otrabotki podvesnogo lodochnogo motora s rotorno-porshnevym dvigatelem moshchnost'yu 40 l.s. [Results of development work on 40 h.p. outboard motor having rotary piston engine]. Samara: JSC SKBM, 1994. 23p. (In Russ.)

## About the authors

**Okorochkov Vladislav Vladimirovich**, Head of rotary piston engine department of Engineering Center, Open Joint-Stock Company “KUZNETSOV”. E-mail: [vv.okor@mail.ru](mailto:vv.okor@mail.ru). Area of Research: engine building.

**Okorochkova Valentina Mikhailovna**, Candidate of Science (Engineering), associate professor of Department of aircraft

engines theory of Samara State Aerospace University. E-mail: [nauka@ssau.ru](mailto:nauka@ssau.ru). Area of Research: engine building.

**Shafranov Victor Vsevoldovich**, specialist of RPC and RPE of Open Joint-Stock Company «AutoVAZ». E-mail: [victor.shafranov@yandex.ru](mailto:victor.shafranov@yandex.ru). Area of Research: engine building.