

Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание
МОО "Стратегия объединения"
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:
//Машины и установки: проектирование,
разработка и эксплуатация.
Электрон. журн. 2025 № 1. С. 55 – 69.

DOI:

Представлена в редакцию: 27.04.2025

Принята к публикации: 03.05.2025

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 621. 437.3

Развитие технологий роторного двигателестроения в интересах повышения эксплуатационных характеристик транспортных средств

Зайцев А.А.

a.zaitsev@list.ru

ООО «АЗАРТ» (ОПН Сколково 1123493),
Российская Федерация

Статья посвящена обзору проблем развития двигателестроения, связанных с ограничением вредных выбросов транспортных средств, и констатации необходимости применения инновационных подходов к совершенствованию двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены принципиальные преимущества роторно-лопастных двигателей и описаны проектные решения по конструкции перспективного образца такого типа. Изложены факты, подтверждающие новизну подхода, и результаты исследований, обосновывающие высокую вероятность достижения высоких показателей эффективности инновационной конструкции нового роторно-лопастного двигателя.

Ключевые слова: роторно-лопастной двигатель, снижение вредных выбросов, транспорт, эффективность, дифференциально-кулачковый механизм.

В настоящее время мир столкнулся с серьёзной проблемой загрязнения окружающей среды. Ожидается, что к 2050 году население планеты вырастет на 2 млрд человек и вслед за этим мировой автопарк увеличится примерно на 1 млрд автомобилей. Кроме того, прогнозируется увеличение на 500% количества ближне- и среднемагистральных авиаперевозок [1-3]. Эти факторы могут негативно повлиять на ситуацию с экологическим фоном на планете из-за увеличения количества вредных выбросов в атмосферу.

Двигатели внутреннего сгорания (далее – ДВС) все труднее укладываются в постоянно ужесточающиеся нормы экологичности, но при этом мы все чаще слышим доводы в пользу того, что именно гибридные силовые установки на базе ДВС являются наиболее эффективным типом привода для транспортных средств [4, 5].

Несмотря на стремительное развитие технологий электротранспорта, по прогнозам специалистов к 2050 году силовые установки на базе ДВС по-прежнему будут актуальны для оснащения большегрузного коммерческого транспорта и другой техники, предназначенной для работы в тяжелых условиях. Наиболее востребованными они останутся и в авиатрасле. По данным аналитических агентств дальнемагистральная авиация будет продолжать использовать традиционные (усовершенствованные) двигатели, переходя на потребление синтетического топлива (Sustainable aviation fuel – SAF), которое придёт на смену керосину, а на маршрутах с дальностью полетов 500-1500 км в основном будут преобладать авиасредства как с SAF-двигателями, так и с гибридными и водородными силовыми установками [6]. Стоит предположить, что малая авиация будет продолжать использовать поршневые и роторные ДВС, приспособляемые к работе на SAF (близкому по свойствам к дизельному топливу) или на водороде. Логично, что и значительную часть наземного коммерческого и специального транспорта будет практичнее эксплуатировать с подобными силовыми установками, а не с батарейным электроприводом.

В пользу сохранения актуальности ДВС работают и трудно решаемые проблемы электромобилизации к которым относятся:

- ограничения запаса хода и времени зарядки (даже современные электромобили (далее – EV) требуют 20–40 минут для быстрой зарядки (до 80%), тогда как заправка ДВС занимает 3–5 минут, что критично в условиях дальних поездок или коммерческих перевозок);

- проблемы при экстремальных температурах (на морозе ёмкость батарей снижается на 20–40%, что ограничивает применение EV в холодных регионах);

- дефицит сырья для аккумуляторов (литий, кобальт и никель — дорогие и геополитически уязвимые ресурсы);

- низкая энергетическая плотность источника энергии (1 кг бензина содержит ~12 кВт·ч энергии, тогда как лучшие литий-ионные аккумуляторы — лишь 0,25–0,3 кВт·ч/кг);

- низкая долговечность и ремонтпригодность (ресурс ДВС достигает 500 000 – 1 000 000 км (например, у дизелей в грузовиках), тогда как батареи деградируют через 200 000 – 400 000 км);

- экономические барьеры (стоимость перехода на EV для развивающихся стран из-за дороговизны EV и отсутствия зарядной сети);

- инфраструктурные барьеры (мировая сеть АЗС насчитывает миллионы точек, а быстрых зарядок для EV — лишь сотни тысяч);

- низкая окупаемость для коммерческого транспорта (грузовики, строительная и сельхозтехника на ДВС пока дешевле в эксплуатации, чем электрические аналоги).

Кроме того, есть ниши, где ДВС просто незаменимы:

- дальняя авиация и судоходство (батареи слишком тяжёлые для самолётов и крупных судов);

- военная техника (независимость от зарядной инфраструктуры критична в боевых условиях);

- спецтехника (для буровых установок, генераторов в удалённых районах необходим ДВС).

Энергетические установки на топливных элементах (далее – ТЭ) также пока не могут конкурировать с ДВС из-за тех же энергетических и инфраструктурных барьеров и низкой удельной мощности (мощности на единицу массы или объема) в сравнении с ДВС [7-10] (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение удельных и пиковых показателей ДВС и топливных элементов

Показатель	ДВС (бензин/дизель)	Топливные элементы (H ₂)	Примечания
Массовая удельная мощность	300–1500 Вт/кг (до 2000 Вт/кг для гоночных ДВС)	300–1000 Вт/кг (включая баки и другие компоненты системы)	ТЭ проигрывают из-за массы вспомогательных систем (компрессоры, охлаждение)
Объёмная удельная мощность	500–3000 кВт/м ³	200–800 кВт/м ³	ДВС компактнее, особенно версии с турбонаддувом
Пиковая мощность	Высокая (быстрый отклик)	Ограничена скоростью реакции ТЭ и подачи водорода	Для динамичных нагрузок ДВС предпочтительнее

Таким образом, в обозримой перспективе можно прогнозировать повышение спроса на компактные, эффективные, но достаточно экологичные ДВС. Налицо наличие дилеммы, подталкивающей к необходимости кардинального совершенствования традиционных или создания инновационных двигателей. Для соответствия перспективным требованиям ДВС должны обеспечивать отдачу требуемой мощности при значительном сокращении количества (и стоимости) расходуемого топлива и существенном снижении количества вредных выбросов в атмосферу.

На сегодняшний день современные поршневые двигатели (далее – ПД) остаются основным средством обеспечения мобильности автотранспорта и легкомоторной авиатехники, однако они уже практически исчерпали резервы по возможности их совершенствования. Дальнейшие незначительные улучшения их характеристик, как правило, связаны со значительными усложнениями узлов и систем, а также с увеличением себестоимости производства.

Основным направлением улучшения показателей эффективности ПД остается повышение среднего индикаторного давления цикла, но последние достижения на этом направлении исследований показывают близость предела возможностей по наращиванию этого потенциала.

Еще одним из способов повышения КПД ПД является применение в его рабочих процессах циклов Аткинсона или Миллера. Эффект применения этих циклов заключается в более полном использовании энергии рабочего тела за счет большей степени его расширения в цилиндрах двигателя, однако цена такого эффекта – уменьшение его удельной (габаритной) мощности.

Другим направлением является использование топлив с большей, чем у традиционных видов топлива, теплотворной способностью, например, водорода, при работе на котором улучшаются еще и экологические показатели выбросов. Ведущиеся в этой области исследования показывают трудность обеспечения стабильной работы ПД на переходных режимах в связи со сложностью контролирования момента возгорания водорода и кратно более высокой скоростью его горения в сравнении с углеводородными видами топлива, что грозит разрушительными детонационными процессами. Увеличение инертности водорода смешением с другими горючими или негорючими компонентами дает положительный результат, но не является однозначно эффективным решением из-за снижения КПД [11].

Налицо необходимость поиска других, инновационных способов обеспечения транспорта эффективной мобильностью.

Один из способов решения этой задачи – довериться автору книги "Необычные двигатели" Гуськову Г.Г., заметившему в своей работе: "Роторно-лопастные двигатели,

пожалуй, самые перспективные из всех, разобранных в данной книге. И хотя в серийном промышленном производстве нет ни одного образца из этого довольно многочисленного семейства, а есть лишь буквально считанные экспериментальные модели, ещё очень далёкие от совершенства, можно ожидать, что этим двигателям внутреннего сгорания суждено большое и блестящее будущее" [12].

Роторно-лопастные двигатели (далее – РЛД) представляют собой одно из направлений в конструировании ДВС с высокими удельными показателями. Теоретически принципиальная схема РЛД (рис. 1) позволяет создавать в 4-5 раз более компактные двигатели, нежели поршневые с равным рабочим объемом, что достигается реализацией четырех полноценных четырехтактных рабочих циклов за один оборот выходного вала. По этому показателю одна секция РЛД сопоставима с 8-цилиндровым ПД с соответствующим соотношением материалоемкости, количества деталей и стоимости производства.

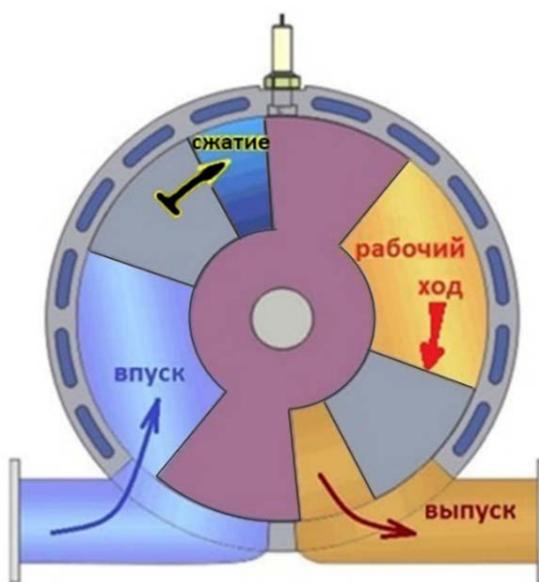


Рис. 1. Принципиальная схема роторно-лопастного двигателя

В результате проведенных исследований [13] установлено, что основная масса из предлагаемых ранее конструкций РЛД основана на использовании принципа преобразования неравномерного движения роторов в равномерное вращение выходного вала по гармонично-синусоидальной или экстремально-синусоидальной схемам синхронизации, которые не могут обеспечить в первом случае эффективность трансформации крутящего момента, а во втором случае – надежность трансформации. Доказано, что наиболее перспективным направлением совершенствования конструктивных схем РЛД является схема с останавливаемыми роторами. Эта схема может обеспечить оптимизацию взаимной компенсации инерционных и барических нагрузок со снижением паразитных потерь и повышением эффективности преобразования энергии рабочего тела.

Для реализации преимуществ схемы синхронизации с останавливаемыми роторами были проведены изыскания [14] с целью поиска эффективного решения, воплощенного в дальнейшем в конструкции механизма преобразования, состоящего из роликово-кулачкового механизма и симметричного дифференциального планетарного редуктора (защищено патентом RU 2673318). Общая кинематическая схема дифференциально-кулачкового механизма, преобразующего неравномерное вращательное движение роторов в равномерное вращение суммирующего вала, представлена на рисунке 2.

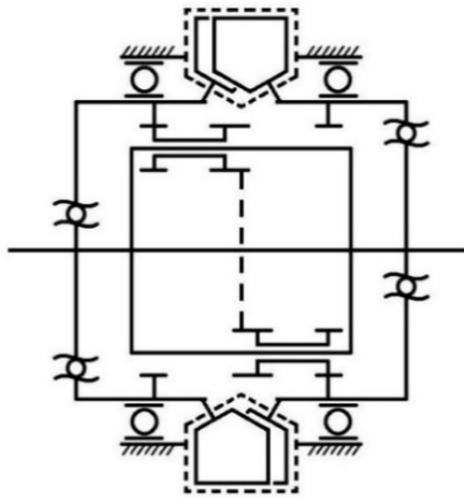


Рис. 2. Принципиальная кинематическая схема дифференциально-кулачкового механизма

Данная схема позволяет реализовать алгоритм синхронизации (рис. 3), при котором силы инерции роторов наиболее гармонично участвуют в процессе преобразования энергии рабочего тела, а в период остановки одного из роторов с другого ротора снимается крутящий момент без лишних потерь и с максимальным коэффициентом трансформации. При этом посредством преобразователя такого типа достижимо более чем 30-ти процентное увеличение эффективности преобразования энергии сгорания топлива в механическую работу по сравнению с кривошипно-шатунным механизмом (далее – КШМ) ПД.

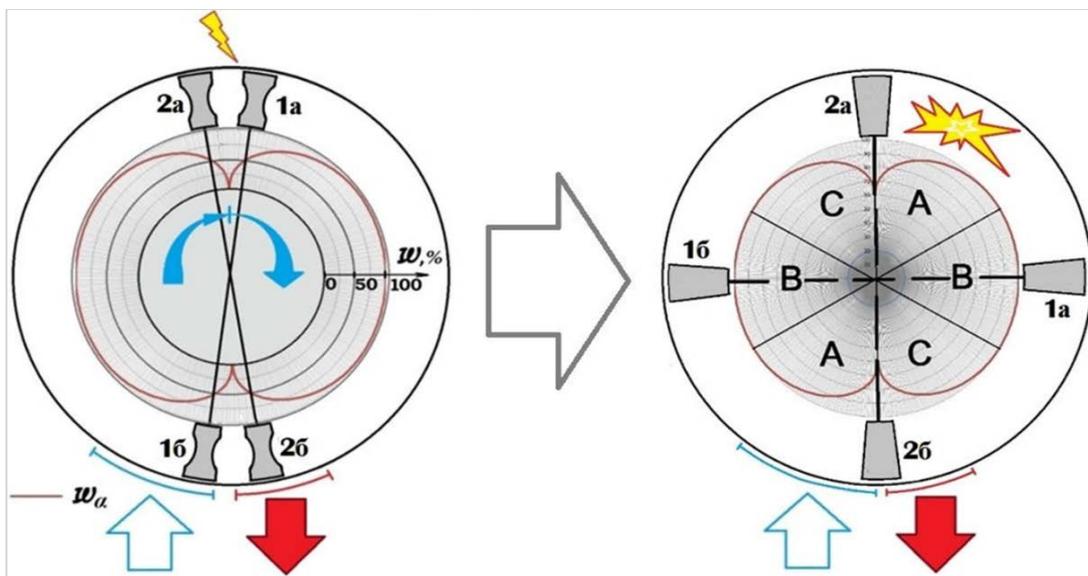


Рис. 3. Графическое отражение алгоритма синхронизации

(ω_α - угловая скорость вращения лопастей; 1, 1а, 2, 2а – обозначения лопастей; А и С – секторы разгона/торможения лопастей; В – секторы движения лопастей с максимальной скоростью вращения)

Увеличение эффективности преобразования связано с более высоким значением среднего коэффициента трансформации $K_{тр.средн.}$ у РЛД (рис. 4). Под коэффициентом трансформации $K_{тр}$ в данном случае подразумевается величина, характеризующая совершенство кинематической схемы, посредством которой суммарные силы, воздействующие на поршень (лопасти), трансформируются в силу, формирующую крутящий

момент на валу двигателя. Мгновенные значения коэффициента трансформации $K_{тр}$ механизма преобразования неравномерного вращательного движения роторов в равномерное вращение выходного вала РЛД (далее – механизм преобразования) зависят от разности текущих коэффициентов передачи крутящих моментов с роторов на выходной вал, которые находятся в прямой зависимости от значений угловых скоростей вращения роторов, приведенных к скорости вращения выходного вала РЛД [14]. Для ПД, в котором механизмом преобразования является КШМ, крутящий момент формирует тангенциальная сила T , действующая на шейку коленчатого вала и направленная по касательной к окружности, образованной радиусом кривошипа [15]. Таким образом, применительно к ПД, коэффициенту трансформации $K_{тр}$ соответствует значение множителя, выделяющего долю тангенциальной силы из величины суммарной силы, действующей на поршень и приложенной к верхней головке шатуна.

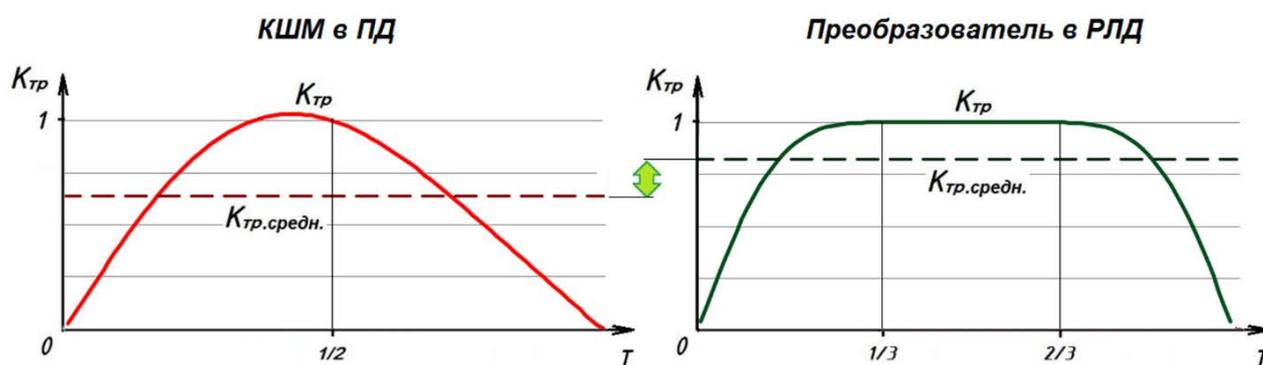


Рис. 4. Сравнение коэффициентов трансформации механизмов преобразования в ПД и РЛД

Еще большую важность имеет распространение диапазона действия повышенных значений $K_{тр}$ в зону действия повышенных значений силы давления газов (в начальный период времени рабочего такта T). Суммарный по этим показателям прирост эффективности преобразования ожидается более, чем на 30%.

Большое значение для повышения эффективности преобразования также имееткратно меньшее количество кинематических связей и, соответственно, пар трения в РЛД по сравнению с сопоставляемым ПД. Кроме того, в РЛД реализуемо применение бесконтактных уплотнений газовых стыков между поверхностями периметра лопастей и стенками тороида. Эти факторы повлияют на повышение механического КПД двигателя.

Кроме того, особенности динамики изменения объемов рабочих камер в РЛДпредопределяют повышение степени адиабатизации рабочих циклов, а также создают намного лучшие, чем в классических ПД, условия для использования водорода в качестве топлива. Интенсивное сжатие заряда в «холодном» секторе тороида в значительной степени снизит вероятность самовоспламенения водорода, а динамичное расширение рабочего тела в рабочем такте позволит оптимизировать фронт горения водорода (скорость пламени ~ 3 м/с) и избежать локальных зон перегрева за счет ускорения течения цикла.

Примером использования высокой динамики циклов для «приручения» водорода могут служить исследования, проводимые в лабораториях Porsche, Toyota, Koenigsegg. В гоночных водородных ДВС используют короткоходные цилиндропоршневые группы (ход/диаметр = 0,8:1) для ускоренного цикла. Результатом является снижение детонации на 15% при $\lambda=2,5$ [16].

Ускорение изменения рабочих объемов между лопастями в РЛД с применением запатентованного преобразователя на 30% больше по сравнению с ускорением изменения рабочего объема цилиндра в ПД с КШМ (при сравнении в пределах единицы такта) (рис. 5).

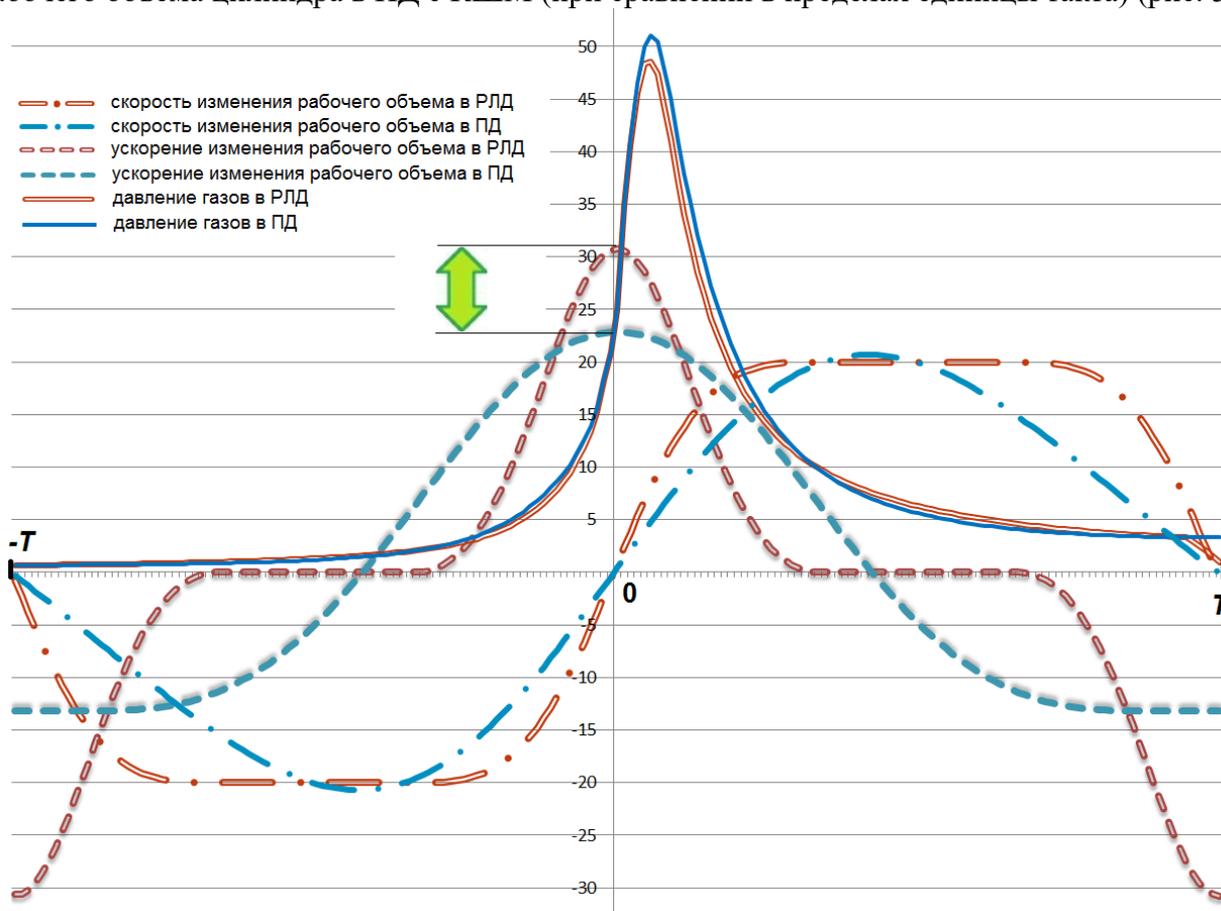


Рис. 5. Сравнение динамики процессов в ПД и РЛД (в условных единицах измерения) в зависимости от доли такта T (д.т.)

Но, что важно, один рабочий такт в РЛД происходит за 90 градусов поворота выходного вала, а в ПД – за 180 градусов. Соответственно, при равной скорости вращения их выходных валов, рабочий цикл в ПД будет происходить в два раза медленнее (здесь для максимального ускорения изменения объема в ПД справедливо равенство $22,5 \text{ у.е./д.т.} = 11,25 \text{ у.е./град.}$). Таким образом, при выборе шкалы измерения длительности процессов в углах поворота выходного вала разница в пиковых ускорениях изменения рабочих объемов получается почти трехкратная (рис. 6).



Рис. 6. Сравнение динамики процессов в ПД и РЛД (в условных единицах измерения) в зависимости от угла поворота выходного вала

Такая динамика рабочих процессов дает дополнительные преимущества для улучшения термодинамических показателей работы двигателя. Чем ближе условия расширения в ДВС к адиабатическому расширению, тем меньше тепловые потери. В предельном случае они стремятся к нулю, но в реальных двигателях снижение потерь может достигать 2–3 раза (с 30% до 10% или менее) при оптимизации процесса [17, 18]. Расчеты [19] подтверждают, что при сокращении времени расширения в 2 раза теплотери падают на 15–20%.

Дополнительным фактором, влияющим на снижение теплотери в перспективном РЛД будет являться меньшая площадь ограждающих рабочее тело поверхностей. Так при сравнении односекционного РЛД с релевантным восьмицилиндровым ПД (одинакового рабочего объема) установлена более чем 5-ти кратная разница суммарной площади теплосъёмных поверхностей.

В соответствии с законами теплопередачи количество переданного тепла (Q) пропорционально времени (t) и площади (F) поверхности теплообмена:

$$Q = k \times F \times (T_{\text{г}} - T_{\text{ох}}) \times t,$$

где k - коэффициент теплопередачи, определяемый через коэффициенты теплоотдачи со стороны горячих газов и охлаждающей среды, коэффициент теплопроводности стенки и ее толщину;

F - площадь поверхности теплообмена;

$T_{\text{г}}$ - температура горячих газов;

$T_{\text{ох}}$ - температура охлаждающей среды;

t – время теплообмена.

Чем короче время t (быстрее расширение) и меньше площадь F контакта горячих газов с ограждающими конструкциями, тем меньше количество утраченного тепла Q . Теоретически в РЛД можно снизить теплотери через стенки на 30–50% по сравнению с поршневым ДВС того же объема. Практически реальный выигрыш будет зависеть от конструктивного исполнения и примененных технологий, но снижение на 30% выглядит вполне достижимым.

Таким образом, сумма аргументов в пользу процитированного утверждения Гуськова Г.Г. о том, что «роторно-лопастные двигатели, пожалуй, самые перспективные», служит эффективным стимулом для продолжения изысканий по данной тематике.

На основании результатов проведенных исследований и выбранной принципиальной схемы выполнен предпроект РЛД, отдельные конструктивные особенности которого защищены патентом RU 2754184. Физическая реализуемость и работоспособность заданных кинематических связей апробирована на кинематическом макете (рис. 6).

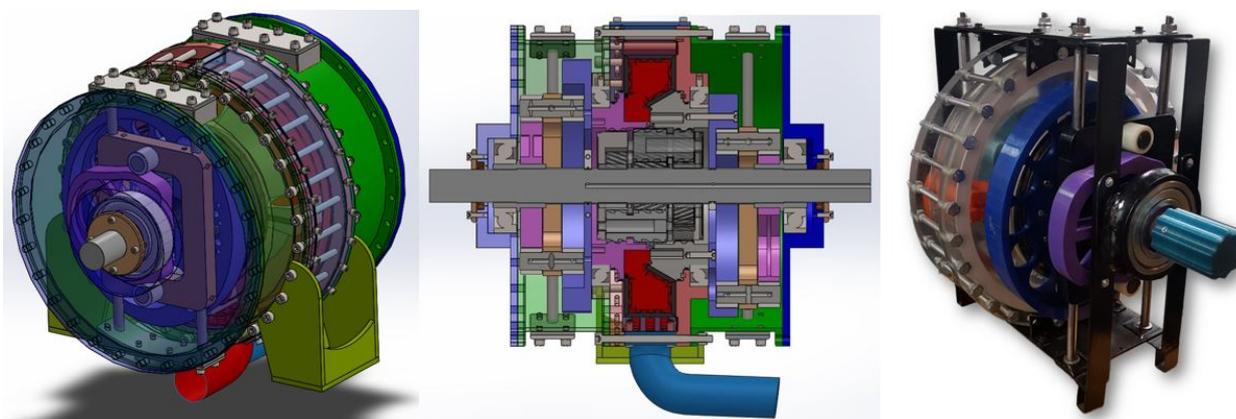


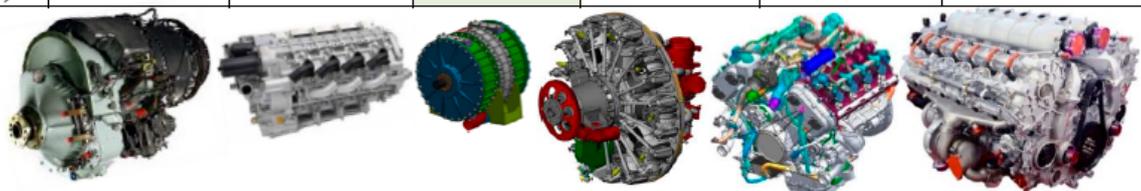
Рис. 6. Общий вид, разрез и кинематический макет РЛД (справа налево)

В среде программного комплекса SolidWorks проведена серия компьютерных тестов двигателя в рамках расчетного исследования предельных нагрузок и проверки прочности его деталей, а также работоспособности бесконтактных уплотнений газовых стыков. Также был произведен расчет дифференциального редуктора на работоспособность и ресурс под воздействием нормативной нагрузки. Результаты исследований подтверждают целесообразность практического создания РЛД [20].

В соответствии с предварительными расчетами, РЛД (при применении описанных принципиальной схемы агрегата и алгоритма синхронизации роторов) по своей компактности и удельной мощности может превосходить существующие и перспективные поршневые двигатели традиционных конструкций примерно в два раза.

Предварительные расчеты характеристик РЛД, проектируемого в формате, соответствующем его использованию в составе силовых установок для авиатехники, демонстрируют значительные преимущества такого типа двигателей в сравнении с классическими (таблица 2).

Таблица 2. Сравнительные характеристики РЛД и двигателей для ближнемагистральной авиации

Двигатель	Honeywell TPE-331-12	Wankel ККМ 504d * (High-Perf.)	РЛД * (расчетные данные)	ДВ-450 *	АПД-500 *	RED A03
тип двигателя	газо-турбинный	4-секционный роторно-поршневой с турбонаддувом	одно-секционный роторно-лопастной	9-цилиндровый, звездообразный с воздушным охлаждением	8-цилиндровый, V-образный с турбонаддувом	12-цилиндровый, V-образный с турбонаддувом
вид топлива	керосин	много-топливный	много-топливный	бензиновый	бензиновый	много-топливный
мощность, кВт	810	300	370	331	370	373
об/мин	41730	8000	5000	2950	5500	4000
сухой вес, кг	175	121	137	200	350	357
Д x Ш x В, мм	1088 x 533 x 676	793 x 480 x 435	600 x 490 x 500	950 x Ø 985	790 x 870 x 700	1114 x 870 x 712
габаритный объем, дм ³	392	166	147	723	481	690
удельная мощность, кВт/кг	4,6	2,5	2,7	1,65	1,06	1,04
удельная мощность, кВт/дм ³	2,1	1,8	2,5	0,46	0,8	0,5
расход топлива, г/л.с.*ч (г/кВт *ч)	243 (330)	200 (270)	150 (204)	180 (245)	200 (270)	154 (210)
						

Принципиальные преимущества конструкции РЛД в части низких показателей массы и занимаемого объема имеют большое значение при рассмотрении возможности его применения в составе силовых установок коммерческого и особенно авиатранспорта. Кроме предпосылки к повышенным значениям удельной мощности двигателя, экономия занимаемого им пространства и, соответственно, уменьшение размера моторно-трансмиссионного отсека приведет и к снижению общей массы носителя, что положительно скажется на его лётно-технических характеристиках.

Кроме того, подавляющее преимущество РЛД в компактности по сравнению с ПД дает возможность использовать часть этого резерва для повышения КПД путем реализации его работы по циклу Аткинсона. Тем более, что его конструкция, не нуждающаяся в газораспределительном механизме (далее – ГРМ) при работе по циклу Отто или Дизеля, позволяет обеспечить эффективную регулировку фаз газораспределения простым техническим решением. Регулируемая заслонка (шибер) на впуске позволяет плавно регулировать количество впускаемого воздуха (топливно-воздушной смеси) и обеспечивать переход от цикла Отто (или Дизеля) к циклу Аткинсона. Схематично на рисунке 7 показано изменение угловой величины α сегмента тороида, объем которого характеризует количество сжимаемого воздуха (или топливовоздушной смеси), вследствие сдвига заслонки и соответствующего изменения формы впускного окна.

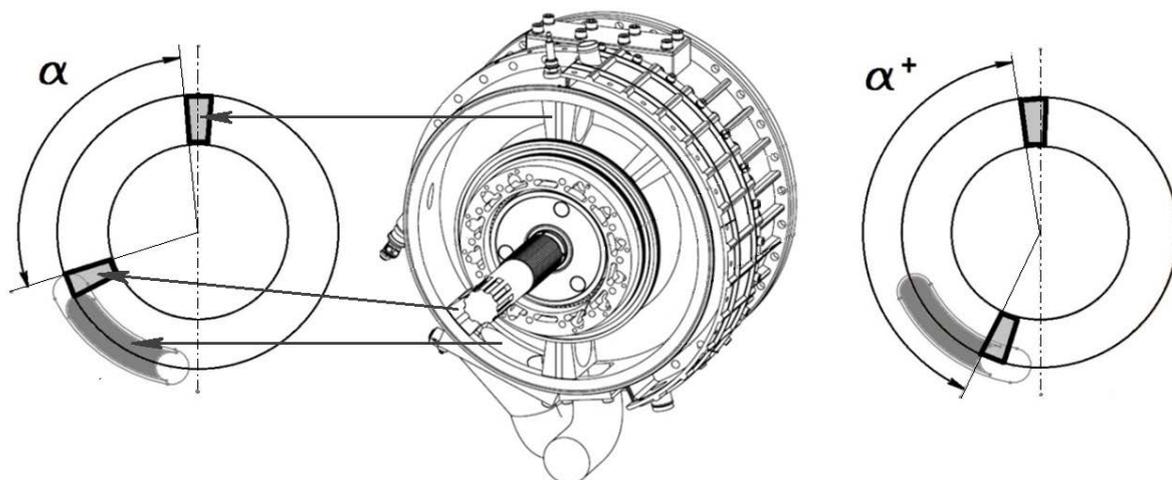


Рис. 7. Реализация способа регулировки фаз газораспределения

Проиллюстрированное конструктивное решение, реализующее (в том числе) возможность непрерывного и плавного изменения степени сжатия в процессе работы двигателя, позволяет проектировать РЛД многотопливным, с обеспечением возможности динамического перехода на питание керосином, *SAF*, газом и другими видами обычного или экологичного топлива. Такое качество при использовании РЛД на специальной технике позволит также успешно ее эксплуатировать в условиях жесткой логистики обеспечения определенными видами топлива.

Кроме того, применение такого конструктивного решения позволит повысить эффективности работы двигателя на технике, эксплуатирующейся в условиях постоянно меняющейся степени разреженности атмосферы.

Еще больше преимуществ дает такое техническое решение для реализации эффективного использования водорода в качестве топлива в дополнение к уже рассмотренным преимуществам особой динамичности рабочих циклов рассматриваемого РЛД. Об этом свидетельствуют результаты исследований, проводимых дочерней компанией Koenigsegg — FreeValve AB. Технология FreeValve кардинально меняет принцип работы

газораспределительного механизма, что особенно критично для водородных ДВС [21-23]. Эта технология существенно облегчает решение следующих проблем.

1. Борьба с детонацией: точный контроль фаз исключает самовоспламенение.
2. Многотопливность: один двигатель может работать на водороде, бензине и синтетическом топливе.
3. КПД: на 15–20% выше, чем у аналогов с обычным ГРМ.

Достигается это реализацией следующих преимуществ.

1. Подавление обратных вспышек. Проблема в том, что водород легко воспламеняется во впускном коллекторе при контакте с горячими клапанами. FreeValve решает эту проблему поздним открытием впускных клапанов (после прохождения поршнем ВМТ) и ступенчатым закрытием выпускных для предотвращения обратного выброса смеси.

2. Адаптивное управление степенью сжатия. Водород требует низкой степени сжатия для предотвращения детонации. FreeValve позволяет динамически менять эффективный объем камеры сгорания на низких оборотах ранним закрытием впускных клапанов (имитация степени сжатия 8:1), а на высоких оборотах – полным наполнением цилиндров (для максимальной мощности).

3. Оптимизация турбулентности смеси. Водород имеет низкую плотность и плохо смешивается с воздухом. FreeValve создаёт управляемые вихревые потоки асимметричным открытием клапанов (один клапан открывается на 2–3 мс раньше) и импульсным режимом (серия из 3–5 быстрых открытий/закрытий за такт).

В описываемом РЛД первое преимущество реализуемо за счет впуска и сжатия заряда воздуха в «холодном» секторе тороида и полной непересекаемости рабочих объемов разных тактов (рис. 8). Второе преимущество обеспечивается возможностью динамического и адаптивного сдвига заслонки впускного окна. Третье – конструктивным исполнением с обособленным «горячим» отсеком камеры сгорания, в который предварительно сжатый заряд поступает импульсно, создавая круговые завихрения навстречу впрыскиваемому топливу в близком к сферическому объеме (рис. 9).

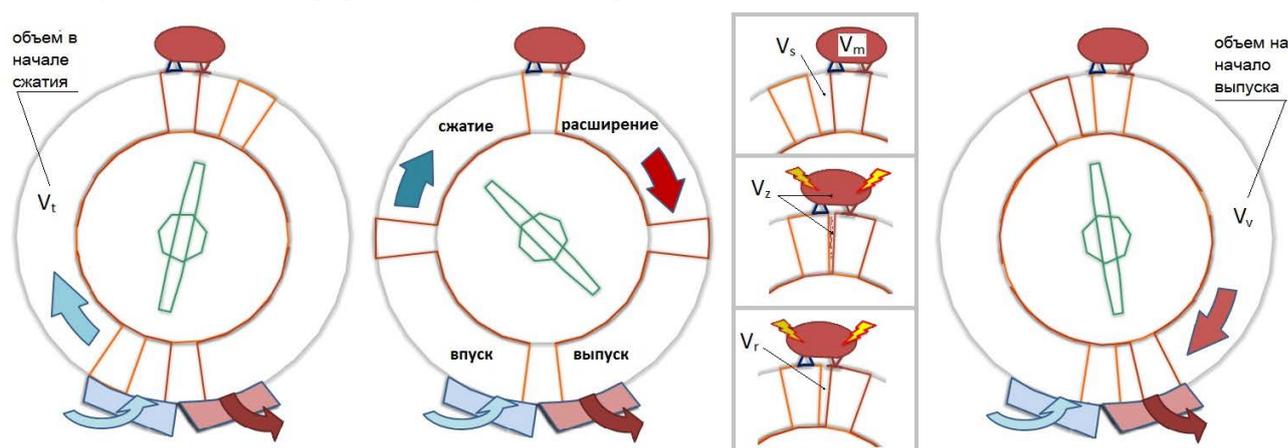


Рис. 8. Графическое отражение рабочего цикла

- (V_t – объем воздуха в начале сжатия;
- V_s – объем сжатого воздуха в начале импульса наполнения «горячего» отсека камеры сгорания;
- V_m – объем «горячего» отсека камеры сгорания;
- V_z – суммарный минимальный объем сжатого заряда;
- V_r – межлопастной объем в начале рабочего хода;
- V_v – межлопастной объем в начале выпуска)

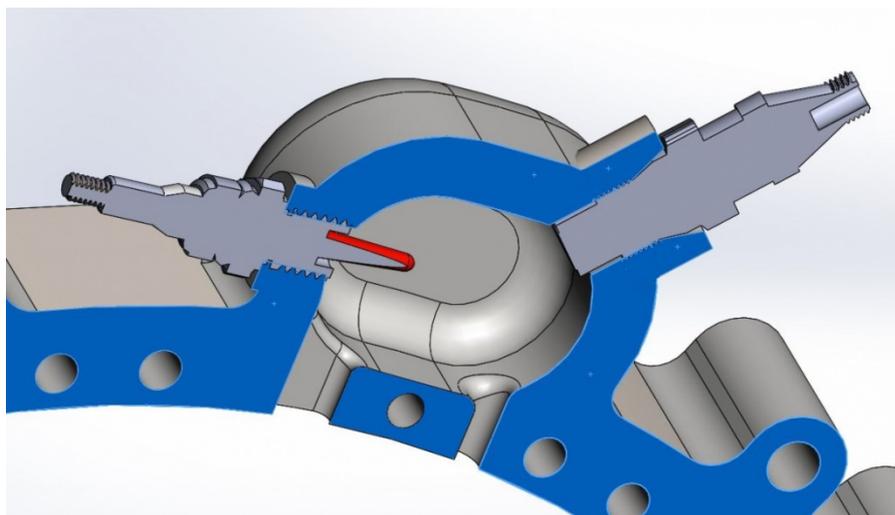


Рис. 9. Вариант исполнения «горячего» отсека камеры сгорания

Таким образом, результаты разработок и проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что реализация суммы заложенных в проекте РЛД решений предоставляет возможность для создания многотопливных (в том числе водородных) двигателей с высокими удельными характеристиками для оснащения самоходных (самолетных, мореходных) технических средств коммерческого и специального назначения с сохранением курса на декарбонизацию транспортной отрасли.

Список литературы

1. Интернет-ресурс: <https://www.un.org/development/desa/pd/content/WPP2022> (Доклад ООН «World Population Prospects 2022»).
2. Интернет-ресурс: <https://www.worldbank.org/en/topic/transport/publication/cities-and-mobility> (Отчет «Cities and Mobility 2022»).
3. Интернет-ресурс: www.iea.org/reports/the-future-of-trucks-2023 (Отчет IEA «The Future of Trucks 2023» (раздел «Passenger Vehicles»)).
4. Интернет-ресурс: <https://about.bnef.com/hybrid-vehicles-outlook> (Анализ BloombergNEF «Hybrid Vehicles Outlook 2024»).
5. Интернет-ресурс: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-hybrid-vehicles> (Отчет IEA «The Role of Hybrid Vehicles in the Energy Transition» (2023)).
6. Интернет-ресурс: <https://www.iea.org/reports/aviation-and-hydrogen> (Отчёт IEA «Aviation and Hydrogen» (2023)).
7. Интернет-ресурс: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2019-01-0032/> (Доклад SAE International «Specific Power Optimization of Turbocharged ICEs»).
8. Интернет-ресурс: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/advanced-combustion-engine-research-and-development> (Отчет «U.S. DOE Report on Advanced Combustion Engines»).
9. Интернет-ресурс: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001_fuel_cell_system_cost_2020.pdf (Отчёт "Fuel Cell System Cost – 2020").
10. Интернет-ресурс: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220015489> (NASA Technical Memorandum (2022): "Energy Density Comparison: ICE vs Fuel Cells").

11. Интернет-ресурс: https://www.porsche-engineering.com/fileadmin/processed/4/6/csm_PEM_02_2024_Hydrogen_Combustion_ENG_7a8e8e9f4e.pdf ("Hydrogen Combustion in High-Performance Engines").
12. Гуськов Г.Г. Необычные двигатели. — М.: Знание, 1974. 64 с.
13. Зайцев А.А. Обзор и анализ мировых разработок роторно-лопастных двигателей. Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 3. С. 16-33.
14. Зайцев А.А. Синтезирование механизма преобразования неравномерного вращательного движения роторов в равномерное вращение выходного вала роторно-лопастного двигателя. Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 4. С. 30-42.
15. Артамонов М.Д., Морин М.М., Скворцов Г.А. Основы теории и конструирования автотракторных двигателей: Конструирование и расчет автомобильных и тракторных двигателей. Учебник для вузов.— М.: Высш. школа, 1978. С. 11.
16. Интернет-ресурс: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2023-01-1467/>
17. Интернет-ресурс: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/670931/> (A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine/ Woschni, G. (1967)).
18. Интернет-ресурс: <https://doi.org/10.1036/007028637X> (Internal Combustion Engine Fundamentals/ Heywood, J.B. (McGraw-Hill, 2018, 2nd ed.)).
19. Интернет-ресурс: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116407> ("Transient Heat Transfer Analysis in Rapid Expansion Processes of IC Engines". Applied Thermal Engineering, Vol. 185).
20. Зайцев А.А. Предварительная оценка работоспособности роторно-лопастного двигателя. Двигатель. 2024. № 3-4. С. 2-5.
21. Интернет-ресурс: <https://www.freevalve.com/insights/cam-less-valve-train-opportunities>.
22. Интернет-ресурс: <https://www.motor1.com/news/706523/koenigsegg-freevalve-hydrogen-engine> (Интервью с инженерами Koenigsegg о тестах 2.0L 3-цилиндрового водородного двигателя).
23. Интернет-ресурс: <https://patents.google.com/patent/US20230296007A1> (Описание к патенту «Детали управления клапанами для минимизации детонации в водородных ДВС»).

АВТОР

Зайцев Андрей Алексеевич, a.zaitsev@list.ru, руководитель проекта РЛД ООО «АЗАРТ» (ОПН Сколково 1123493).

Machines & Plants Design & Exploiting

*Electronic journal
International Public Organization
"Integration strategy"
<http://maplants-journal.ru>*

*//Machines and Plants:Design and
Exploiting.*

2025 № 1. pp. 55 – 69.

DOI:

Received: 27.04.2025

Accepted for publication: 03.05.2025

© International Public Organization
"Integration strategy"

Development of rotary engine technologies in the interests of improving the performance characteristics of vehicles

Andrey A. Zaitsev

a.zaitsev@list.ru AZART LLC (ID
Skolkovo 1123493), Russian
Federation

The article is devoted to a review of engine design problems related to the limitation of harmful emissions from vehicles, and to a statement of the need to apply innovative approaches to the improvement of internal combustion engines. The main advantages of the rotary-vane engine are considered and the design solutions for the construction of a promising model of this type are described. Facts confirming the novelty of the approach are presented, as well as the results of research demonstrating the high probability of achieving high performance indicators of the innovative design of a new rotary-vane engine.

Keywords: rotary vane engine, reduction of harmful emissions, transport, efficiency, differential cam mechanism.

References

1. Online resource: <https://www.un.org/development/desa/pd/content/WPP2022> (UN Report "World Population Prospects 2022").
2. Online resource: <https://www.worldbank.org/en/topic/transport/publication/cities-and-mobility> (Report "Cities and Mobility 2022").
3. Online resource: www.iea.org/reports/the-future-of-trucks-2023 (IEA report "The Future of Trucks 2023" (section "Passenger Vehicles")).
4. Online resource: <https://about.bnef.com/hybrid-vehicles-outlook> (Analysis of BloombergNEF "Hybrid Vehicles Outlook 2024").
5. Online resource: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-hybrid-vehicles> (IEA Report "The Role of Hybrid Vehicles in the Energy Transition" (2023)).
6. Online resource: <https://www.iea.org/reports/aviation-and-hydrogen> (IEA Aviation and Hydrogen Report (2023)).
7. Online resource: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2019-01-0032/> (SAE International Report "Specific Power Optimization of Turbocharged ICEs").
8. Online resource: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/advanced-combustion-engine-research-and-development> (Report "U.S. DOE Report on Advanced Combustion Engines").

9. Online resource: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001_fuel_cell_system_cost_2020.pdf (The report "Fuel Cell System Cost – 2020").
10. Online resource: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220015489> (NASA Technical Memorandum (2022): "Energy Density Comparison: ICE vs Fuel Cells").
11. Online resource: https://www.porsche-engineering.com/fileadmin/processed/4/6/csm_PEM_02_2024_Hydrogen_Combustion_ENG_7a8e8e9f4e.pdf ("Hydrogen Combustion in High-Performance Engines").
12. Guskov G.G. Unusual engines. Moscow: Znanie Publ., 1974. 64 p.
13. Zaitsev A.A. Review and analysis of world developments of rotary-blade engines. Machines and installations: design, development and operation. 2023. No. 3. pp. 16-33.
14. Zaitsev A.A. Synthesis of a mechanism for converting uneven rotational motion of rotors into uniform rotation of the output shaft of a rotary-blade engine. Machines and installations: design, development and operation. 2023. No. 4. pp. 30-42.
15. Artamonov M.D., Morin M.M., Skvortsov G.A. Fundamentals of theory and design of automotive engines: Design and calculation of automotive and tractor engines. Textbook for universities. Moscow: Higher School, 1978. pp.
16. Online resource: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2023-01-1467/>
17. Online resource: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/670931/>(A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine/ Woschni, G. (1967)).
18. Online resource: <https://doi.org/10.1036/007028637X> (Internal Combustion Engine Fundamentals/ Heywood, J.B. (McGraw-Hill, 2018, 2nd ed.)).
19. Internet resource: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116407> ("Transient Heat Transfer Analysis in Rapid Expansion Processes of IC Engines". Applied Thermal Engineering, Vol. 185).
20. Zaitsev A.A. Preliminary assessment of the performance of a rotary-blade engine. Engine. 2024. No. 3-4. pp. 2-5.
21. Online resource: <https://www.freevalve.com/insights/cam-less-valve-train-opportunities>.
22. Online resource: <https://www.motor1.com/news/706523/koenigsegg-freevalve-hydrogen-engine> (Interview with Koenigsegg engineers about the 2.0L 3-cylinder hydrogen engine tests).
23. Online resource: <https://patents.google.com/patent/US20230296007A1> (Description to the patent "Valve control details for minimizing detonation in hydrogen internal combustion engines").

AUTHOR

Andrey A. Zaitsev, a.zaitsev@list.ru, project manager of the RVE of “AZART” LLC (ID Skolkovo 1123493).