

ЕЩЕ РАЗ ПРО РОТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

На протяжении практически всего времени существования транспортных двигателей традиционной конструкции с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) предпринимаются попытки создания роторных двигателей, в которых рабочий процесс осуществляется в объемах, образуемых вращающимися звеньями. Часто такие двигатели называют роторно-поршневыми (РПД), имея в виду то, что эти вращающиеся звенья осуществляют ту же функцию, что и поршень в КШМ. Наиболее известным является РПД Ф. Ванкеля, предложенный еще в 30-х гг. XX века и впоследствии серийно выпускавшийся рядом предприятий (NSU-KKM, Германия; Mazda, Япония и пр.). В качестве основных преимуществ РПД, как правило, называют отсутствие поступательно движущихся звеньев, уравновешенность, меньшие массу и габариты¹, возможность увеличения частоты вращения вала и пр. Одной из основных проблем, связанных с созданием РПД Ванкеля, является обеспечение надежной работы уплотнений между вершинами подвижного ротора и неподвижным корпусом двигателя. В патентной литературе в большинстве описываются именно эти разработки. В настоящее время РПД Ванкеля модели RX-8 Renesis серийно выпускается только заводами Mazda. Перспективы его применения специалисты оценивают по-разному, в частности, рассматривается возможность работы двигателя на водородном топливе. Однако, существенных преимуществ по сравнению с поршневыми двигателями автомобили с РПД до сих пор не получили, прежде всего, в связи с

¹ Массу и габариты РПД часто определяют без учета навесного оборудования, тогда как с учетом последнего массо-габаритные характеристики РПД становятся сопоставимыми с таковыми для двигателей с КШМ – см. [1].

ограничениями на выбросы токсических веществ с отработавшими газами. Так, при разработке и доводке RX-8 пришлось отказаться от наддува и форсировать двигатель по частоте вращения вала, которая достигла 9000 мин⁻¹. Однако, еще в 80-х гг. XX в. сделан специалистами фирмы Eaton Corp. был сделан вывод о том, что по комплексу показателей существенных преимуществ перед поршневыми двигателями РПД не имеют (таблица 1, [2]). В этой таблице приведены результаты сравнения двигателей различных типов по показателям: А – экономичности; В – токсичности отработавших газов; С – многотопливности; D – виброакустической активности; Е – литровой мощности; F – удельной массе и габаритной мощности; G – себестоимости; H – управляемости.

Таблица 2

Двигатель	Показатели							
	А	В	С	D	Е	F	G	H
Дизель	5	3-4	3	2	3	3	4	3-4
Бензиновый	4	2	1-2	3	4	3-4	5	4
Газовый на сжиженном природном газе	3	4-5	2	3	3-4	3	3-4	4
Газовый на сжатом природном газе	3	1	2	3	3-4	3	4-5	4
С послойным распределением заряда	4	4-5	3	3	3-4	3	2-3	3
РПД Ванкеля	2-3	3	1	3-4	4	4	5	2-3
Двигатель Стирлинга	4-5	4	5	4-5	2	2	1	2-3
Газотурбинный двигатель	1	5	5	3	4-5	4	2	4-5
Паровой двигатель	1	5	5	5	2	1	1	5

Электрический со свинцовыми аккумуляторами	3	5	5	5	1	1	1	5
Электрический с топливными элементами	4	4	-	5	1	1	1-2	5
Гибридный «дизель + электродвигатель»	3-4	4-5	3	2-5	2	1-2	2	3-5
Примечание: оценки соответствуют: 5 – отлично; 4 – хорошо; 3 – удовлетворительно; 2 – посредственно; 1 – плохо.								

В России двигатели Ванкеля разрабатываются в ОАО «АвтоВАЗ». В таблице 2 даны их некоторые характеристики в сопоставлении с серийным поршневым двигателем ВАЗ-21: данные таблицы подтверждают приведенный выше вывод об отсутствии у РПД Ванкеля существенных преимуществ по комплексу показателей.

Таблица 2

Параметры	Двигатель		
	РПД ВАЗ-4132	РПД ВАЗ-415	ПД ВАЗ-21126
Число секций РПД (цилиндров ПД)	2	2	4
Рабочий объем камеры РПД (цилиндра ПД), л	1,308	1,308	0,4
Степень сжатия	9,4	9,4	11
Номинальная мощность, кВт/мин ⁻¹	103/6000	103/6000	72/5600
Литровая мощность, кВт/л	39,4	39,4	45,0
Максимальный крутящий момент, Н*м/мин ⁻¹	186(19)/450 0	186(19)/450 0	145/4000
Минимальная частота вращения вала на холостом ходу, мин ⁻¹	1000	900	840

Минимальный удельный расход топлива (по ВСХ), г/кВт*ч	312	312	290-300
Расход масла, % от расхода топлива	0,7	0,6	0,1
Ресурс двигателя до первого капитального ремонта, тыс. км	125	125	200
Примечание: данные по РПД ВАЗ-4132 и ВАЗ-415 приведены на сайте http://www.motortalk.ru/node/254			

Основными проблемами, связанными с доводкой РПД Ванкеля, помимо обеспечения надежной работы уплотнений, являются повышение экономичности при одновременном уменьшении выбросов токсических веществ.

Многими изобретателями практически постоянно предлагаются схемы РПД, отличные от схемы Ванкеля. Так, одна только поисковая патентная система «Freepatentsonline» по запросу «rotary engines» выдает сведения о более чем 270 тыс. патентов, аналогичная система «Sumodrain» – свыше 133 тыс. патентов, зарегистрированных в их англоязычных базах. Значительное число изобретений зарегистрировано в России: подобная поисковая система «Findpatent» по запросу «роторный двигатель» находит около 6000 русскоязычных патентов. Многие изобретения поступают в научные, опытно-конструкторские и производственные организации в качестве технических предложений для разработок и последующего внедрения в различные виды транспорта, малой энергетики и пр. Заметна некоторая тенденция к росту числа предложений, в которых рассматривается отличная от РПД Ванкеля схема механизма. Некоторые из них реализованы на практике, опубликованы результаты их опытного и теоретического исследования: одной из таких разработок является двигатель с внешним подводом теплоты, разработанный специалистами Псковского государственного технического

университета [3]. Однако, ранее выполненный обзор таких конструкций применительно к двигателям внутреннего сгорания [4] не позволил для них сделать вывод о вероятности перспектив широкого внедрения.

Тем не менее, предложения по РПД (в том числе, защищенные патентами, реализованные в виде моделей и демонстрационных образцов) продолжают поступать. Многие изобретатели роторных двигателей заявляют о способности своих разработок обеспечить увеличение КПД двигателя до 60 % и даже 70 %. Достаточно частыми являются также утверждения о существенном упрощении конструкции, уменьшении массы и габаритов двигателя, универсальности (т.е. применимости для всех без исключения транспортных средств, перекрытия широкого диапазона мощностей и пр.), существенном сокращении эксплуатационного расхода топлива. При этом зачастую желаемый автору того или иного предложения результат не подкрепляется никакими обоснованиями, что затрудняет его (предложения) объективную оценку. Отдавая должное уважение изобретателям, попытаемся показать, что проблемы как создания двигателя (особенно, принципиально новой конструкции), так и его объективной оценки, должны решаться с учетом многих факторов, в том числе, и на уровне предложения принципиальной схемы.

Оценка КПД двигателя должна производиться с учетом потерь на привод агрегатов, в систему охлаждения, с отработавшими газами и пр. Потери на привод агрегатов, очевидно, должны быть сопоставимы с таковыми для двигателя равной мощности с КШМ. Сложнее оценить другие составляющие потерь, в том числе, вследствие разницы в организации рабочего процесса. Однако, известно, что тепловые потери пропорциональны величине отношения площади стенок, омываемых рабочим телом, к рабочему объему, причем, уменьшение поверхности

теплоотдачи (особенно, при расширении) приводит к сокращению тепловых потерь и росту индикаторного КПД двигателя. Эти составляющие могут быть оценены уже на стадии представления проекта.

Проиллюстрируем сказанное на примере. Изобретателем А. С. Макуниным предложен «Колебательный двигатель внутреннего сгорания» (рисунок 1, а), содержащий корпус 1 с кольцевой рабочей камерой 2, рабочий вал 22, вал отбора мощности 6, лопасти 8 с уплотнениями 9 (рисунок 1, б). В рабочей камере расположены жестко закрепленные к корпусу перегородки 4 также с уплотнениями [5]. Между лопастями и перегородками образуются камеры переменного объема, в которых размещены свечи зажигания и клапаны. Помимо этого, двигатель включает механизм преобразования движения рабочего вала во вращение вала отбора мощности с обгонными и реверсивной муфтами².

² Обратим внимание, что особенности устройства уплотнений, муфт и пр. автором изобретения не раскрываются. Не сообщается также, каким образом решена проблема обеспечения работоспособности уплотнений.

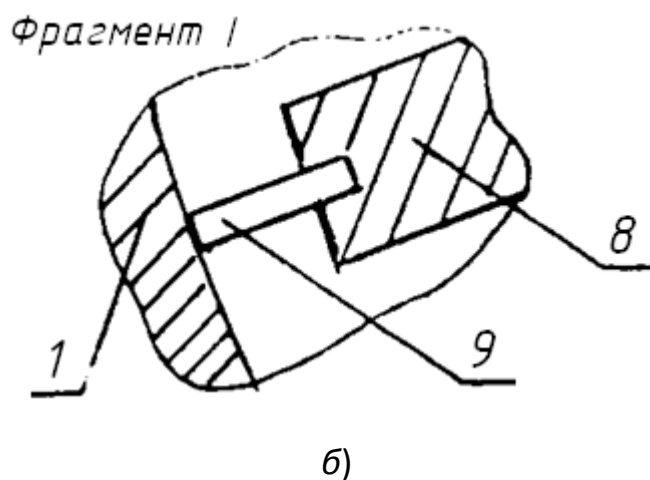
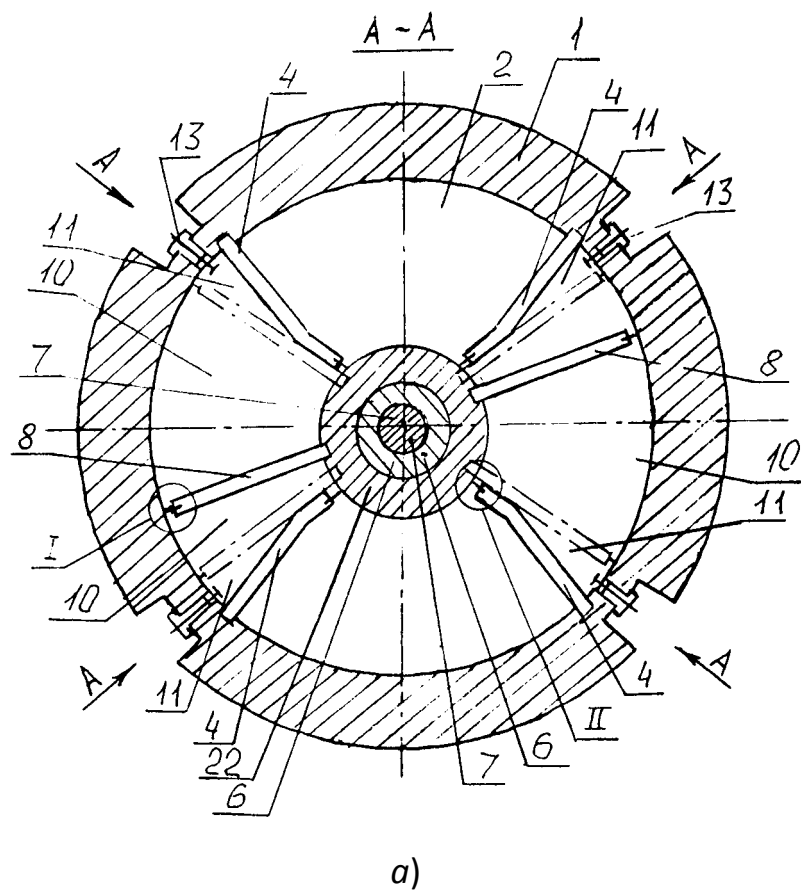


Рисунок 1 – Колебательный двигатель внутреннего сгорания А.С. Макунина
(графика автора изобретения)

Для оценки упомянутого объема и омываемой рабочим телом поверхности выполнена расчетная схема рассматриваемого двигателя (рисунок 2). Объем V одной камеры, заключенной между подвижной и неподвижной лопатками, определится по формуле

$$V = \frac{1}{4}(\pi R^2 - \pi r^2)b,$$

а омываемая поверхность F складывается из поверхностей f_1 корпуса, f_2 – рабочего вала и f_3 – лопаток, т.е.

$$F = f_1 + f_2 + f_3 = \frac{\pi R}{2}b + \frac{\pi r}{2}b + 2b(R + r).$$

Результат расчета отношения F/V при разных значениях размеров (таблица 3) и в сравнении с величиной того же отношения для поршневых двигателей различных назначений (таблица 4), показывает, что по этому показателю колебательный двигатель уступает поршневому.

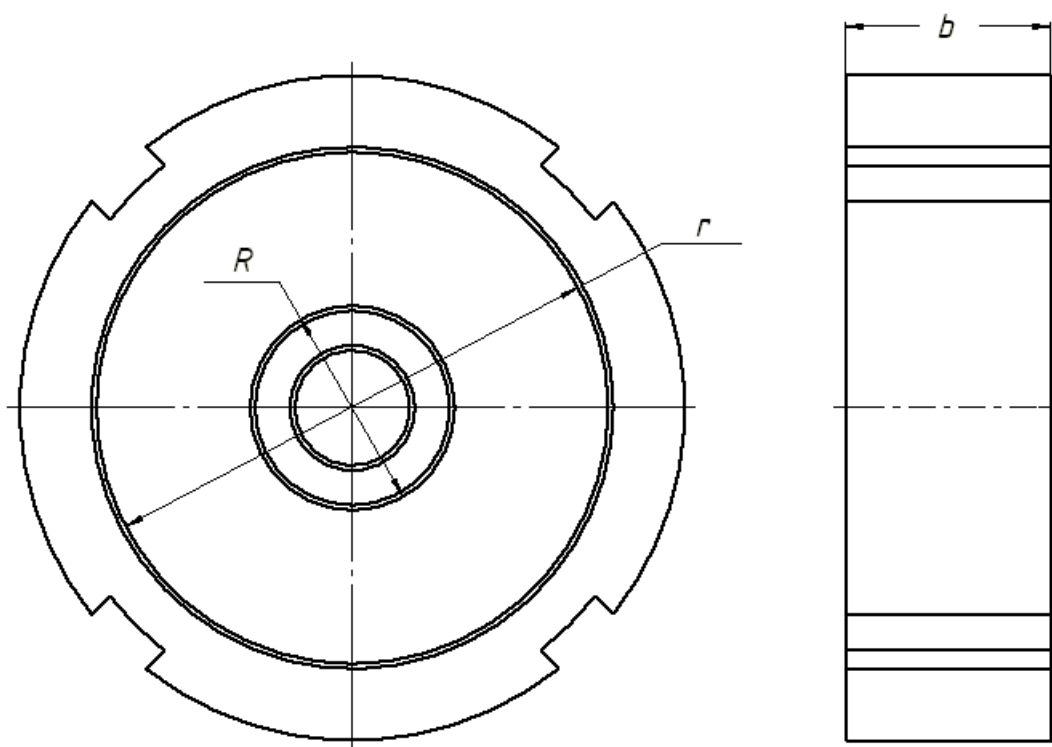


Рисунок 2 – Модель и расчетная схема для определения площади поверхности и объема колебательного двигателя А. С. Макунина

Таблица 3

R , мм	100	110	120	145
r , мм	40	40	40	50
b , мм	80	80	100	100
V , м ³	0,0005	0,0007	0,0008	0,0015
F , м ²	0,0272	0,0300	0,0316	0,0496
F/V , м ⁻¹	51,50	45,55	45,55	34,11

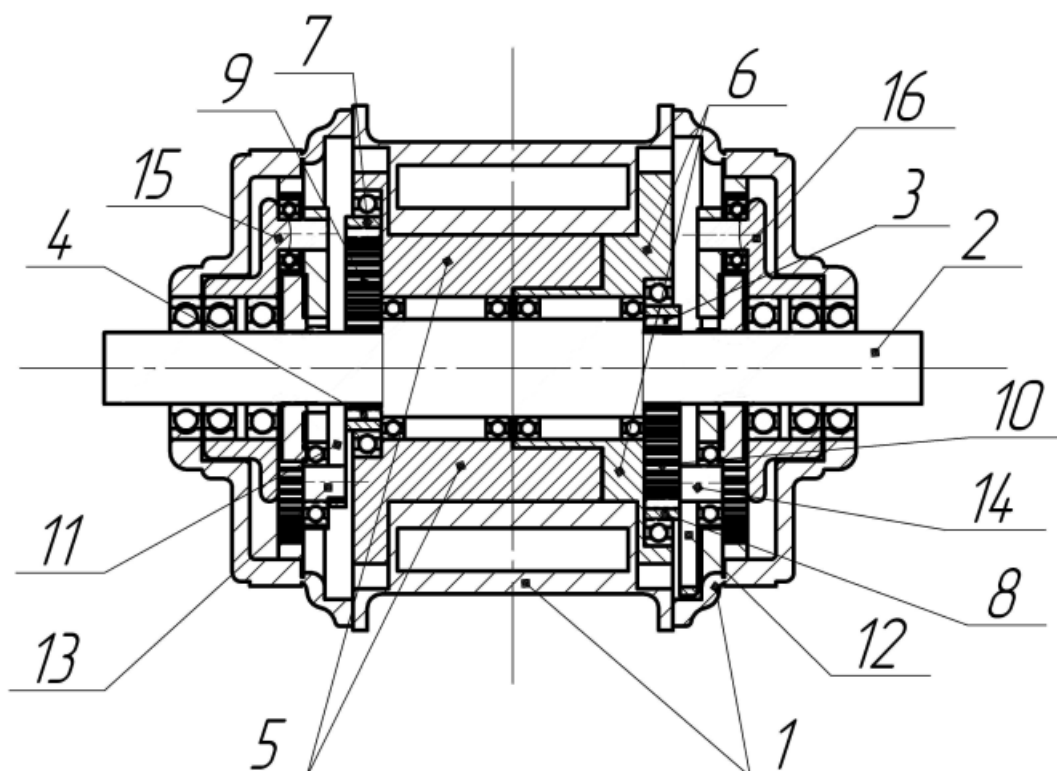
Таблица 4

Двигатель	ЗМЗ-406	ЯМЗ-534	КамАЗ-740	ЯМЗ-7511	ЯМЗ-8423
F/V , м ⁻¹	2,71	3,19	3,49	3,77	3,96

Двигатель	8ДВТ-330	AVCR-1360	MTU-883	SCCM-V8X-1500	ЧН26/26
F/V , м ⁻¹	4,54	3,77	3,92	3,91	23,08

Следует обратить внимание и на оценку динамических и прочностных качеств заявляемых устройств. В ряде предложений попросту игнорируется вопрос об их тепловой напряженности. Так, на достаточно высоком уровне с применением программного продукта ADAMS изобретателем А. С. Лысенко выполнен проект роторно-лопастного двигателя, рисунок 3. В нем в корпусе 1 установлен вращающийся вал 2, на котором жестко закреплены зубчатые колеса 3 и 4. Лопастями 5 и 6 делят внутреннюю полость корпуса на четыре камеры переменного объема. Эксцентрично по отношению к валу 2 установлены эксцентрики, в которых размещены кольцеобразные шатуны 7

и 8. В последних установлены зубчатые колеса 9 и 10, сцепленные с зубчатыми колесами 3, 4. Планетарные редукторы 15 и 16 обеспечивают возратно-вращательное движение лопастей при вращении вала 1. Автором изобретения даны рекомендации по величине передаточного отношения входящих в механизм зубчатых зацеплений, обеспечивающего разное число оборотов вала при одном обороте лопастей.



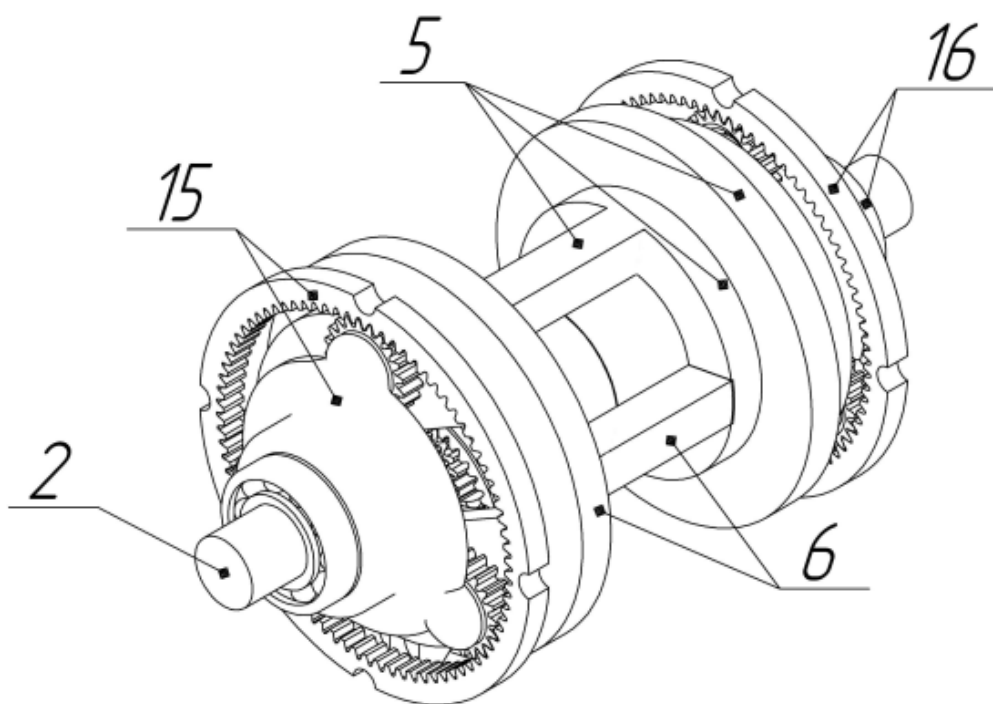
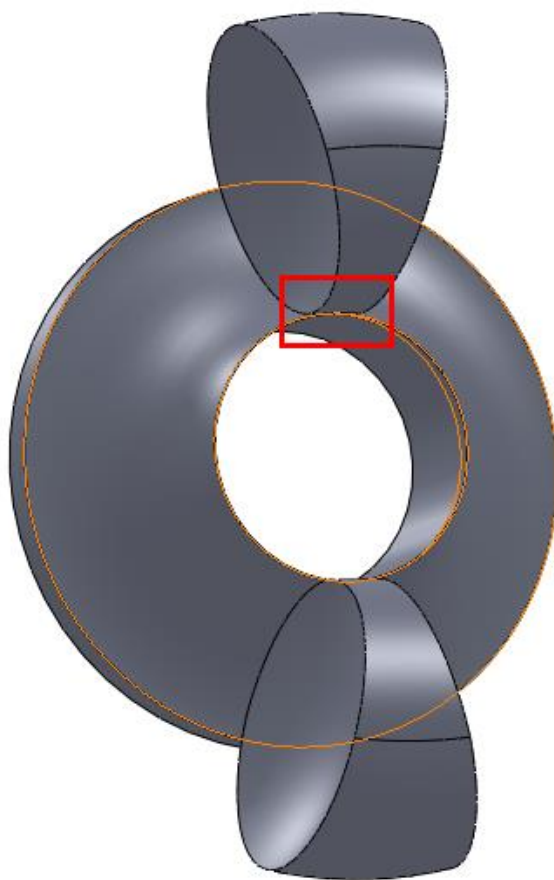


Рисунок 3 – Роторно-лопастной двигатель А. С. Лысенко

Здесь с учетом сказанного выше следует заметить, что представляемые на экспертизу материал (даже при относительно высокой подробности разработки) содержат значительное число решений, которые являются только принципиальными и не доведенными до инженерных решений. Описания, подобные «...ротор, кинематически связанный с ...», «...содержит органы газораспределения...» и т.п. далеко не всегда позволяют виртуально воспроизвести то или иное устройство, что важно, в том числе, для оценки прочности конструкции. Так, А. С. Лысенко не указан способ соединения лопастей с их основанием (средствами 3D-моделирования задаются только взаимосвязи поверхностей, осей и пр. элементов деталей), что способно приводить к затруднениям при построении конечно-элементных моделей. На рисунке 4 показано соединение лопастей (выполнены в виде тороидальных поршней) и ротора (3D-модели выполнены А. С. Лысенко). Конкретный способ соединения этих деталей не указан, а потому при сборке между деталями образуются зазоры (указаны стрелками), что приводит к необходимости измельчения сетки конечных элементов (рисунок 5) и

усложнению решения. В рассматриваемом случае следует обратить внимание на значения угловых скоростей и ускорений лопастей (рисунки 6, 7), существенно превосходящие угловые ускорения шатунов в КШМ.

Одновременно следует отметить, что изобретателем А. С. Лысенко представлены только внешние очертания деталей. В связи с этим следует сказать о часто встречаемом заблуждении многих изобретателей, которые считают, что о перспективности, возможности внедрения и пр. заявляемых ими технических предложений можно судить лишь по принципиальным решениям (пусть даже и выполненным на достаточно высоком уровне). В частности, оценка напряженно-деформированного состояния двигателя требует конкретного описания геометрии, способа соединения деталей и пр., а от результатов такой оценки может зависеть решение вопроса о перспективности разработки.



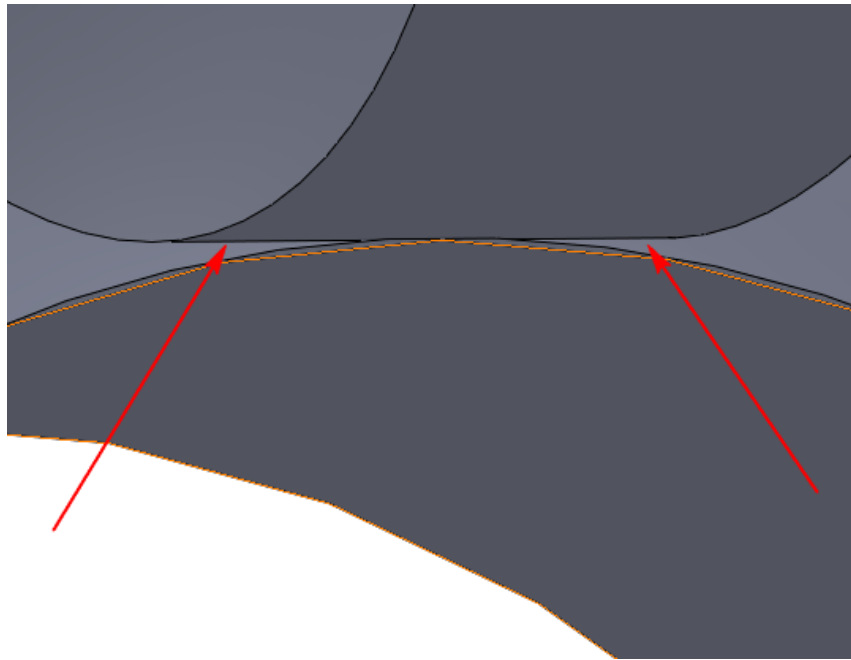


Рисунок 4 – 3D-модель соединения лопастей с ротором в модифицированном механизме А. С. Лысенко

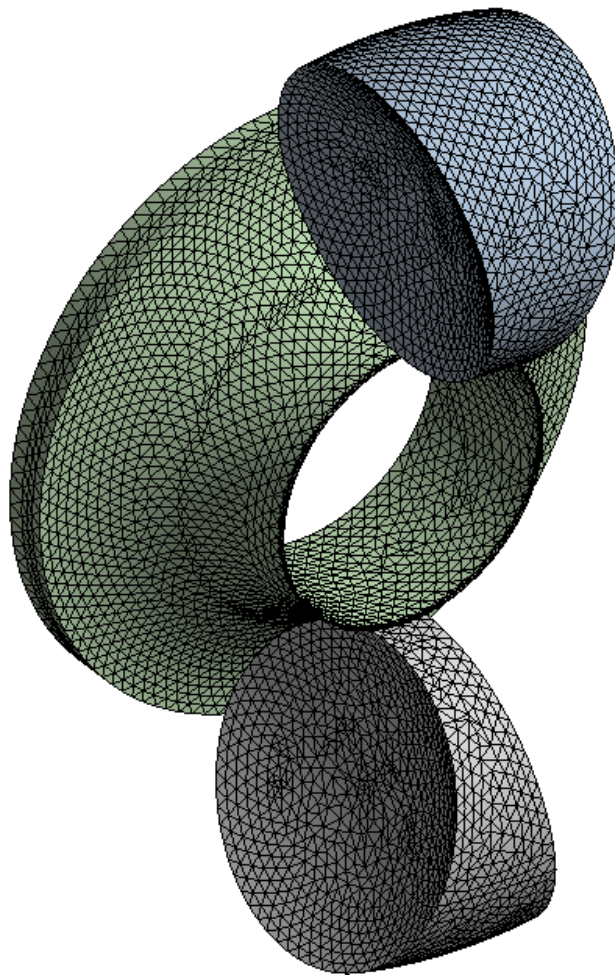


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель сборки ротора с лопатками усовершенствованной модели А. С. Лысенко (свыше 120 тыс. узлов)

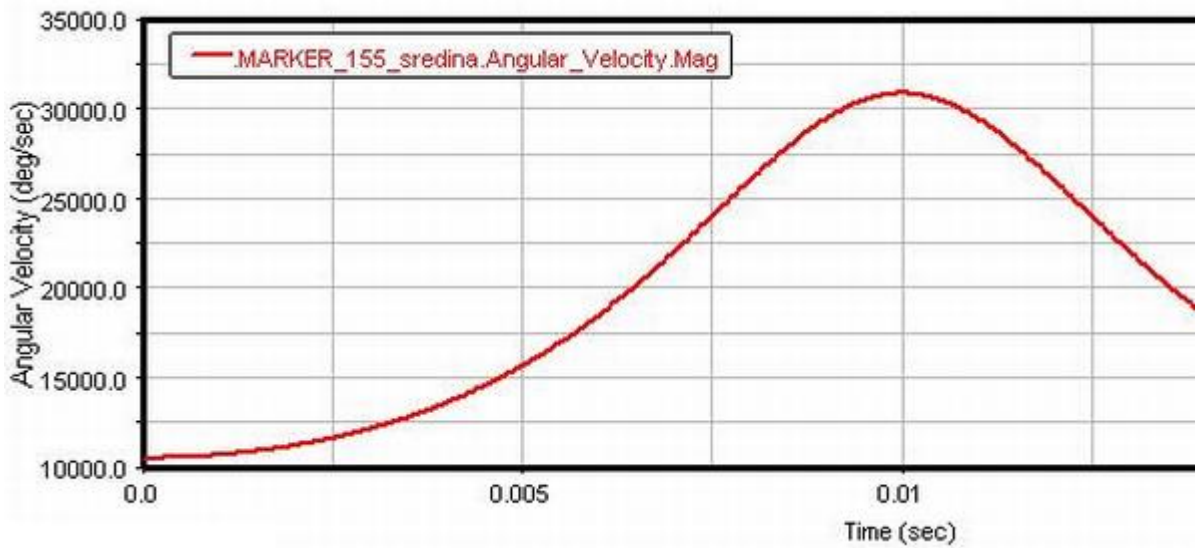


Рисунок 6 – Угловое ускорение лопасти механизма роторно-лопастного двигателя А. С. Лысенко, градус/с (рисунок предоставлен А. С. Лысенко)

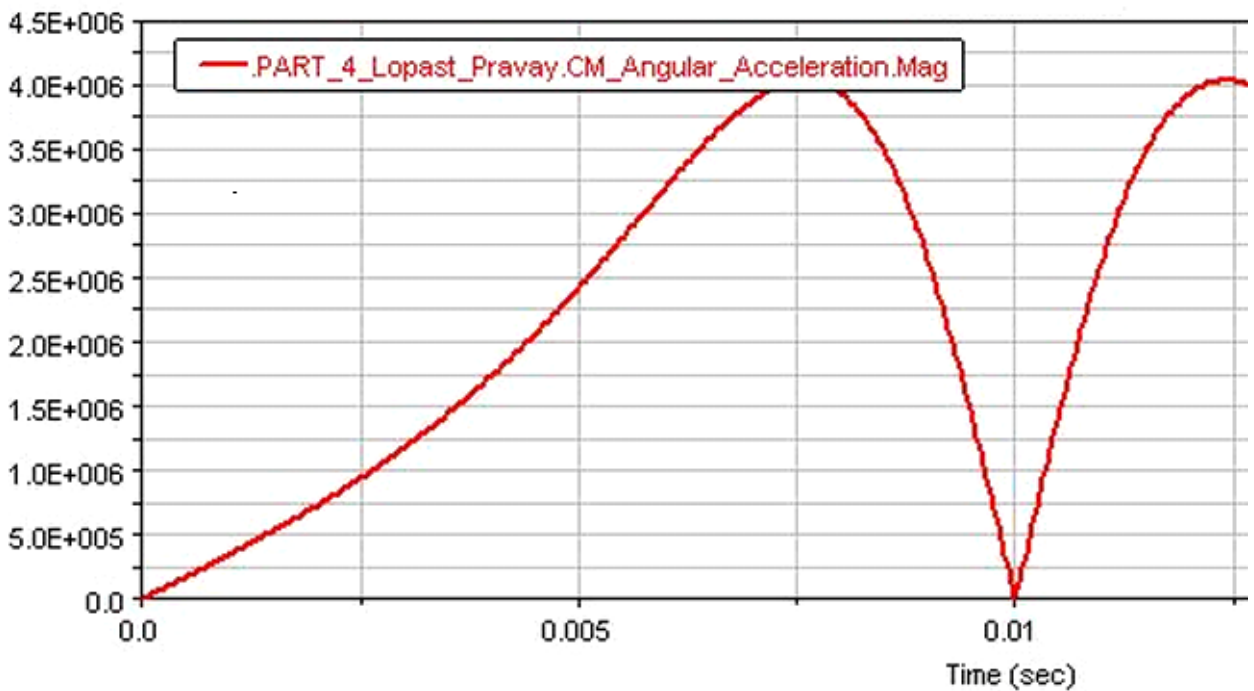


Рисунок 7 – Угловое ускорение лопасти механизма роторно-лопастного двигателя А. С. Лысенко, градус/с (рисунок предоставлен А. С. Лысенко)

В ряде случаев технические предложения изобретателей содержат не вполне корректные рассуждения, объясняющие (по мнению авторов) преимущества их предложений. Так, В. А. Таракановым [6, 7] предложены варианты однотактного двигателя, который (по мнению изобретателя) обладает следующими преимуществами: увеличение КПД двигателя до 70 %, неограниченное увеличение степени сжатия воздуха в камере сгорания; изменение степени расширения газов на выходе из двигателя; преобразование тепловой энергии сгоревшего топлива в механическую работу без использования принудительного охлаждения двигателя (при этом, по мнению автора изобретения, исключается влияние температуры нагревающегося корпуса двигателя на КПД процесса преобразования; отсутствие уплотнения зазоров, смазки рабочих поверхностей и пр.

Многие предложения роторных двигателей предусматривают наличие специальных элементов, служащих для разделения полостей между ротором и корпусом двигателя; при этом не уделяется внимания вопросам обеспечения работоспособности этих элементов в условиях повышенных температур, удельных давлений при недостатке смазки и пр.; при этом часто критикуется устройство уплотнений в двигателе Ванкеля.

Приведены лишь некоторые примеры изученных предложений роторных двигателей, поступивших в экспертный совет. При их достаточно глубокой проработке экспертами выявились некоторые общие тенденции, в той или иной степени присущие большинству этих предложений. В основном, эти тенденции сводятся к следующему.

1. В большинстве проектов можно видеть односторонний взгляд на преимущества (о его видимых недостатках, как правило, речь не идет) предлагаемого решения. В описаниях изобретений зачастую присутствуют авторские оценки тех или иных показателей предлагаемого устройства,

данные в форме «высокий», «более высокий», «неограниченное увеличение» и пр.; числовых оценок, а также способов их определения, при этом, как правило, не дается.

2. Игнорируется тот факт, что современный транспортный двигатель – результат многостороннего исследования, учитывающего одновременно вопросы экономичности, экологических качеств, надежности, ресурса, управляемости и пр. Так, в ряде случаев авторы предполагают, что заявляемый двигатель имеет повышенные значения частоты вращения вала (например, 12000 1/мин и выше), но при этом не упоминаются меры по обеспечению прочности конструкции, в большинстве случаев не принимается во внимание теплонапряженность, уравновешенность, виброактивность и пр.

3. Имеют место некорректные обоснования предлагаемого решения или даже отсутствие каких-либо обоснований. В ряде случаев игнорируются основополагающие теоретические положения.

4. Отдельно следует сказать о терминологии: авторские пояснения принципа работы, устройства двигателей и т.д. зачастую просто непонятны и/или безграмотны³.

5. Не следует игнорировать экономическую сторону вопроса. Создание современного транспортного двигателя связано со значительными затратами на разработку документации, изготовление опытных образцов, их испытания и сертификацию. Попытки некоторых изобретателей представить

³ В качестве примера приводится выдержка из текста предложения изобретателя А. В. Степанова (авторская орфография и пунктуация сохранены). «... Поршень, обладая механической энергией с векторной величиной X , через компрессию между поршнями, частично передается на поршень, и, сохраняясь в поршне, создает сопротивление рабочему газу, но так как энергия поршня меньше давления газа, то он движется к поршню. ...».

экономические обоснования проектов этих обстоятельств, как правило, не учитывают.

б. Некоторые изобретения предполагают комплексное использование различных мероприятий, которые уже известны и в той или иной степени апробированы (в частности, впрыскивание воды, разделение процессов рабочего цикла, применение металлического натрия в качестве теплоносителя в системе охлаждения и пр.). Однозначного ответа на вопрос об их эффективности до сих пор нет⁴.

Возможно, что учет этих обстоятельств изобретателями сможет способствовать разработкам перспективных конструкций роторных двигателей, которые, не исключено, могут потенциально найти применение как расширительные машины для утилизации отходящей теплоты различных энергетических и технологических процессов, компрессоров, насосов и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ханин, Н. С.** Автомобильные роторно-поршневые двигатели [Текст] / Н. С. Ханин, С. Б. Чистозвонов. – М.: Машгиз, 1964. – 184 с.
2. **Mullins, P. J.** Нефть – автомобилям [Текст] / P. J. Mullins // Автомобильная промышленность США. – 1980. – № 1. – С. 18 – 20.
3. **Гринев, Д. В.** Синтез и кинематический анализ рычажно-кулачкового механизма преобразования движения роторно-лопастного двигателя с внешним подводом тепла [Текст] / Д. В. Гринев, М. А. Донченко, Ю. Н.

⁴ В ряде случаев такие мероприятия оказывались полезными, но имели ограниченное применение: примером может служить впрыскивание воды в цилиндры, реализованное в некоторых авиационных двигателях, но не нашедшее распространения в двигателях прочих типов.

Журавлев, А. Л. Перминов // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 12. – С.

4. **Яманин, А. И.** Роторные двигатели (обзор конструкций) [Текст] / А. И. Яманин // Справочник. Инженерный журнал. – 2004. – № 11(92). – С. 36 – 41.
5. **Пат. 2518793 Российская Федерация, МПК F02B 55/14, F01C 9/00.**
Колебательный двигатель внутреннего сгорания / А. С. Макунин. – Оpubл. 10.06.2014, Бюл. № 4.
6. **Пат. 2470167 Российская Федерация, МПК F02B 53/08, F02B 55/16, F01C 1/18, F01L 7/02, F02B 29/08.** Однотактный роторно-компрессорный двигатель внутреннего сгорания / В. А. Тараканов. – Оpubл. 20.12.2012, Бюл. № 35.
7. **Пат. 2470167 Российская Федерация, МПК F02B 53/06, F02B 53/12, F01C 1/16.** Роторно-компрессорный однотактный роторно-компрессорный двигатель внутреннего сгорания / В. А. Тараканов. – Оpubл. 10.09.2013, Бюл. № 235.

Старший эксперт Экспертного совета
ФГУП «НАМИ», д.т.н., профессор

А.И. Яманин

Председатель Экспертного совета
ФГУП «НАМИ», д.т.н., профессор

В.Ф. Кутенев