

В.А. Коноваленко

*Двигатели высокой
удельной мощности*

Под редакцией
С.И. Маркова

2011 г.
Санкт-Петербург

Предисловие

В последние годы (судя по патентным материалам) резко возросла активность изобретателей в области двигателестроения. Среди множества заявок и патентов попадаются и перспективные разработки, намного опережающие современный технологический уровень (например, роторно-волновой двигатель), и мелкие усовершенствования, пытающиеся реанимировать отжившие своё технические решения.

Целью написания этой книги было создание своего рода схематического путеводителя по тепловым машинам и тепловым двигателям в частности. Однако, обширность темы заставила сосредоточить внимание всего лишь на одном аспекте – вопросах повышения удельной мощности тепловых машин, а ещё уже на тепловых двигателях высокой удельной мощности.

В книге сделана попытка подведения итогов четверти века работы автора в этой области двигателестроения – разработке принципов построения и конструктивной реализации двигателей высокой удельной мощности.

Такие двигатели достаточно специфичны и востребованы, как правило, только там, где существуют жёсткие требования к весу транспортного средства, то есть в разного рода летательных аппаратах.

Именно такому аппарату, точнее, летающему автомобилю, автор обязан своим приходом к двигателям. В своё время мною был запатентован «Способ управления пограничным слоем толстого крыла», позволяющий создать подъёмную силу, вполне достаточную для полёта, безо всяких раскладных или выдвигаемых крыльев непосредственно корпусом автомобиля (разуме-

ется, соответствующего профиля).

Однако, в реализации запатентованного способа используется двигательная установка, поэтому для надёжности требовалось её дублирование. Отсюда стремление найти двигатели необходимой мощности с минимальной массой.

В то время были наиболее распространены разного рода ДВС с соотношением до 1,5 кВт мощности на 1 кг массы и газотурбинные двигатели (~ 6 кВт/кг без учёта редуктора). Был ещё достаточно экзотический двигатель Ванкеля, весьма сложный в изготовлении и довольно капризный в работе (более подробно двигательные установки рассмотрены в 1 главе).

Установка двух и более ДВС грозила превратить авиэтку в самоцель, если не смысле подъёмной силы, то уж в смысле внутреннего объёма. ГТД сами по себе могли бы подойти, но их «прожорливость», в конечном счёте, сводила все преимущества к нулю.

Оставалось одно – изобретать самому. Что из этого получилось, описано в главах 2 и 3. Однако в процессе этой работы пришлось «набить не мало шишек», получив взамен представление о том, чего делать категорически не надо.

Именно этим опытом автор и намерен поделиться с читателями, такими же «одержимыми», как и он сам. Ещё раз обращаю внимание читателя, что эту книгу не следует рассматривать в качестве пособия по расчёту и конструированию двигателей (как и что делать). Скорее уж это прямо противоположное пособие – «Как и что делать не надо».

Глава 1. Обзор конструкций тепловых двигателей

1.1. Типы современных двигателей

Строго говоря, любой двигатель – это преобразователь запасённой в «накопителе» потенциальной в самом широком смысле этого слова энергии в макрокINETическую энергию интересующего нас объекта, как правило, транспортного средства. Пока что самыми компактными «накопителями» (конечно, кроме делющихся ядер) служат химические вещества, способные окисляться кислородом воздуха – горючее. Даже новейшие аккумуляторы, которые используют химические процессы, менее компактны хотя бы потому, что содержат в себе и «горючее» и окислитель.

Конечно, в аккумуляторах (и в топливных элементах) окисление имеет специфический характер – запасённая в горючем энергия сразу превращается в наиболее удобный для применения вид – электроэнергию. Со временем, видимо, топливные элементы всё-таки вытеснят тепловые машины, преобразующие потенциальную энергию горючего в кINETическую энергию молекул (теплоту), которую потом ещё нужно преобразовать в макрокINETическую энергию объекта, но до этого пока ещё далеко.

Процесс выглядит так: во время горения растёт кINETическая энергия молекул «рабочего тела» (что означает рост температуры и давления), а далее тепловая машина преобразует теплоту в механическую работу. Делать это можно в импульсном или непрерывном режиме, каждый из которых имеет свои досто-

инства и недостатки.

В импульсном режиме можно достигать более высоких термодинамических параметров (следовательно, более высокого КПД) при сравнительно низких средних значениях температуры, определяющих требования к конструктивным материалам двигателя.

Именно этим двигатели внутреннего сгорания в своё время превзошли и практически полностью вытеснили паровые машины непрерывного действия. Есть и другие достоинства, к примеру, ДВС быстрее и легче управляются подачей топлива.

Однако, включение горючего в состав рабочего тела многократно повышает требования к качеству и состоянию горючего. Зачастую ДВС «монотопливны» и переход на другое топливо просто невозможен. Для обеспечения процесса нужны довольно сложные системы зажигания, подготовки топливной смеси (карбюраторы, фильтры и тому подобное).

Кроме того, «дискретным» двигателям (так будем их называть) присуща вибрация (и шум), которые принципиально не могут быть полностью устранены.

Двигатели непрерывного горения свободны от многих из этих недостатков, но зато предъявляют гораздо большие требования к конструкционным материалам, имеют ограничения по термодинамическим параметрам (следовательно, и по КПД), сложнее в смене режимов, особенно, тепловые машины внешнего горения, например, двигатели Стирлинга.

В этой книге мы ограничимся более узким аспектом – удельной мощностью и возможностями её повышения, оставив в стороне преимущества и недостатки стационарных установок.

Двигатели дискретного горения

С момента изобретения первого ДВС и по сегодняшний момент распространены одно- и двухтопливные поршневые ДВС, дизельные и газопоршневые двигатели. Их характерной особенностью является дискретное (порционное) сжигание топлива путём его поджига или самовоспламенения. К ним относятся:

Однотопливные четырёхтактные поршневые ДВС. Они находят в настоящее время широкое применение, особенно в транспорте, хорошо известны и не нуждаются в детальном описании.

Дизельные двигатели предназначены для использования в качестве основного и резервного источника энергии. Ограничений по количеству часов работы нет. Дизельная установка способна работать при переменных нагрузках.

Двухтопливные поршневые ДВС, как правило, спроектированы и сконструированы на основе дизельных двигателей. Дополнительным оборудованием по сравнению с дизелями той же мощности являются система управления режимами подачи топлива и магистраль подачи газа.

Газопоршневые двигатели рассчитаны на работу на различных составах природного газа, включая газ, получаемый из промышленных отходов, отличающиеся высокой производительностью и пониженным содержанием вредных веществ в выхлопе по сравнению с дизельными установками.

Основной недостаток всех «дискретных» двигателей в интересующем нас аспекте – извлечение энергии только в части рабочего цикла, остальное время которого занято вспомогательными процессами.

Двигатели непрерывного горения

Непрерывное сжигание топлива было реализовано ещё в первых паровых машинах. В настоящее время к ним добавились паротурбинные (ПТУ) и газотурбинные (ГТУ) установки, а также газотурбинные двигатели (ГТД). Паровые машины и ПТУ исключим из рассмотрения априори.

Газотурбинные установки, как правило, состоят из компрессора, камеры сгорания и турбины, расположенных на силовой раме установки. В комплект ГТУ входит также топливно-регулирующая аппаратура, система смазки с насосами и маслорадиатором воздушного охлаждения, система диагностики.

При единичных мощностях менее 3,5 МВт наименьшую удельную стоимость оборудования имеют поршневые машины. Меньше у них и удельный расход топлива, причем при любом режиме нагрузки. Это объясняется тем, что КПД поршневых машин составляет 36–45 %, газовых турбин – 25–28%, газопоршневых – 34 %.

Сравнение газотурбинных установок и поршневых двигателей показывает, что установка газовых турбин наиболее выгодна на крупных промышленных предприятиях, которые имеют значительные (больше 8–10 МВт) нагрузки, собственную производственную базу, высококвалифицированный персонал для эксплуатации установки, а также подвод газа высокого давления. Применительно к нашим целям представляют интерес модификация ГТУ в виде газотурбинных двигателей (ГТД).

Газотурбинные двигатели. ГТД получили широ-

кое распространение после появления реактивной авиации, так как их КПД был существенно выше прямоточных и пульсирующих реактивных двигателей.

С тех пор усилиями конструкторов удельная мощность ГТД была доведена до 6-7 кВт/кг, что заметно выше, чем у всех других ДВС. К сожалению, их «прожорливость» и необходимость в использовании редуктора заметно ограничивает применение.

Двигатели внешнего горения

Типичным представителем двигателей внешнего горения может быть двигатель Стирлинга¹. В отличие от перечисленных ранее двигатели Стирлинга гораздо менее известны и, по-видимому, нуждаются в более подробном описании.

Тепловые машины Стирлинга.

Существует три типа двигателей, использующих термодинамический цикл Стирлинга (три патента – три типа двигателей – альфа, бета и гамма).

Альфа-Стирлинг (рис. 1) содержит два отдельных силовых поршня в отдельных цилиндрах. Один поршень – горячий, другой – холодный.

Цилиндр с горячим поршнем находится в теплообменнике с более высокой температурой, в то время как цилиндр с холодным поршнем находится в более холодном теплообменнике. У данного типа двигателя

¹ Роберт Стирлинг (1790-1878) – шотландский пастор, который, несмотря на свою учёную степень доктора богословия, не оставил «ни одного богословского произведения», в 1816 году получил патент на «машину, которая производит движущую силу посредством нагретого воздуха». В 1827 и 1840 годах он получает ещё два патента на усовершенствованные варианты своей машины.

отношение мощности к объёму достаточно велико, но, к сожалению, у Альфа-Стирлинга имеется ряд технических проблем, вызванных высокой температурой «горячего» поршня и его изоляции.

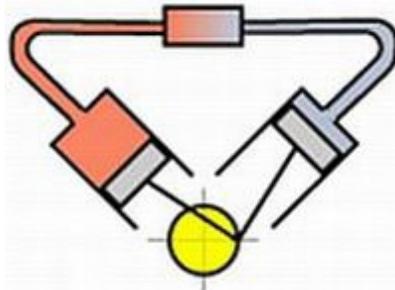


Рис. 1. Альфа-Стирлинг

У двигателя бета-типа (рис. 2) цилиндр всего один, горячий с одного конца и холодный с другого. Внутри цилиндра движется поршень (с которого снимается мощность) и «вытеснитель», изменяющий объем горячей полости.

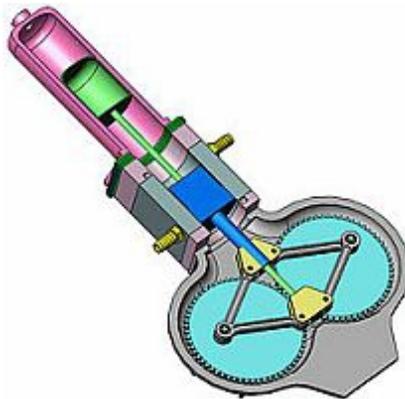


Рис. 2. Схематический разрез ромбического механизма Бета-Стирлинга.

На рис. 2 розовый цвет – горячая полость цилиндра, тёмно-серый – холодная полость, тёмно-зелёный

– термоизолирующая прокладка между разными концами цилиндра, светло-зелёный – вытеснитель, синий – рабочий поршень, голубой – маховики. Не показаны внешние нагреватель и охладитель, а также регенератор, который может быть внешним, совмещённым с поршнем-вытеснителем или теплообменником. .

В 1845 году на литейном заводе в Дании была пущена бета-машина Стирлинга мощностью 50 индикаторных лошадиных сил, проработавшая в течение трёх лет. Долгое время после этого двигатели Стирлинга не строились. В 1890 году было выпущено ещё несколько образцов таких машин малой мощности.

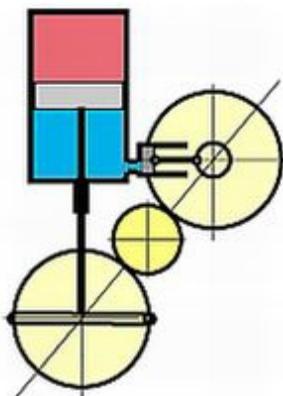


Рис. 3. Гамма-Стирлинг

У гамма-типа (рис. 3) тоже есть поршень и «вытеснитель», но при этом цилиндров два – один холодный (справа, там движется поршень съёма мощности), а второй горячий с одного конца и холодный с другого (там движется «вытеснитель»). Регенератор совмещён с поршнем-вытеснителем. Все три типа «стирлингов» используют теплообменники, обладающие тепловой инерцией, поэтому «стирлинги» сравнительно медленно реагируют на управляющие воздействия.

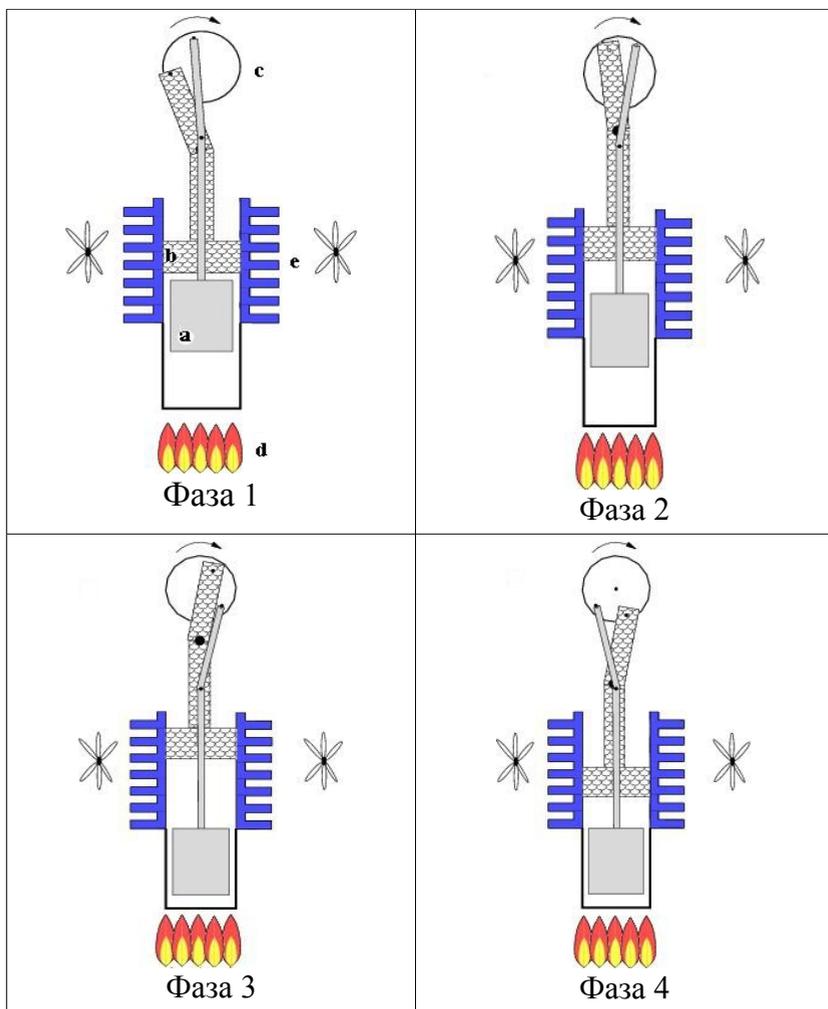


Рис. 4. Фазы работы двигателя Стирлинга.

Здесь: а – вытеснительный поршень; b – рабочий поршень; c – маховик; d – нагреватель; e – охладитель

Фаза 1. Внешний источник тепла нагревает рабочее тело в нижней части теплообменника. Создаваемое давление толкает рабочий поршень вверх (между вытеснительным поршнем и стенкой есть зазор).

Фаза 2. Маховик толкает вытеснительный поршень вниз, тем самым перемещая разогретый воздух из нижней части в охлаждающую камеру. В этом одна из важнейших особенностей двигателя – совмещение во времени перемещения рабочего тела из зоны нагрева в зону охлаждения с процессом самого охлаждения. Именно это свойство сильно затрудняет расчёт.

Фаза 3. Воздух остывает и сжимается, создавая обратное усилие на рабочий поршень, тем самым опуская его вниз.

Фаза 4. Вытеснительный поршень поднимается вверх, тем самым перемещая охлаждённое рабочее тело в нижнюю часть, где оно подвергнется нагреву, начнёт расширяться и цикл повторится.

Таким образом, при переходах рабочего тела от источника тепла к охладителю и обратно происходит расширение и сжатие газа, находящегося в цилиндре.

Разницу объёмов газа можно превратить в работу, чем и занимается двигатель Стирлинга. С конца XIX века, в связи с успехами в развитии двигателей внутреннего сгорания, машина Стирлинга была совершенно забыта, и только с 1938 года началось её возрождение. Развернулись научные исследования, и начались промышленные разработки.

Двигатель Стирлинга использует цикл Стирлинга, который по термодинамической эффективности не уступает циклу Карно, и даже обладает преимуществом. Дело в том, что цикл Карно состоит из мало отличающихся между собой изотерм и адиабат и его практическая реализация малоперспективна.

Цикл Стирлинга позволил получить работающий двигатель в приемлемых габаритах. Он состоит из

четырёх основных и двух переходных фаз: нагрев, расширение, переход к источнику холода, охлаждение, сжатие и переход к источнику тепла (см. рис. 4).

В машине Стирлинга движение рабочего поршня сдвинуто на 90 градусов относительно движения поршня-вытеснителя. В зависимости от знака этой сдвижки машина может быть двигателем или тепловым насосом. При сдвижке 0 машина не производит никакой работы (кроме потерь) и не вырабатывает её.

Широкому внедрению машин Стирлинга существенно мешает отсутствие единых методик их расчёта. Дело в том, что все происходящие в них процессы сопровождаются перетеканием рабочего тела из одной зоны в другую, это перетекание зависит от конкретной конструкции, параметры которой и нужно рассчитать.

Таблица 1. Производители двигателей Стирлинга

Фирма	Марка	Мощность, кВт	Уд. масса, кг/кВт	Ресурс, час.	Эфф. КПД, %
Philips	4 x 235	150	5,0	10000	28
	4-S-1210	265	3,8	10000	30
STM Inc.	STM4-120	52	2,1	50000	45
	SM-3	40	–	50000	40
Daimler	KS15D	15	3,7	–	37,1
Solo	V-160	7,5	2,3	28000	35
MTI	Mod-III	108	3,0	20000	36
	4-95	52	4,1	20000	41
United Stirling	V4X	1250	1,2	10000	30

Получается замкнутый круг: для расчёта нужна та конструкция, которая будет построена по результа-

там расчёта. Поэтому все шесть фирм (см. таблицу 1), выпускающие машины Стирлинга, главным производственным секретом считают свой эмпирический метод расчёта (у каждой из них он свой).

В 21 веке появилась ещё одна реализация цикла Стирлинга, конструктивно сильно отличающаяся от всех трёх предложенных Стирлингом моделей – «Двигатель с внешним подводом теплоты (ДВПТ)».

ДВПТ. Конструктивно двигатель содержит четыре расширительных и четыре компрессионных цилиндра. Цилиндры расположены поочередно и параллельно, вокруг оси рабочего вала двигателя. Механизм преобразования возвратно-поступательного движения выполнен в виде косой шайбы, как привод аксиально-поршневого насоса.

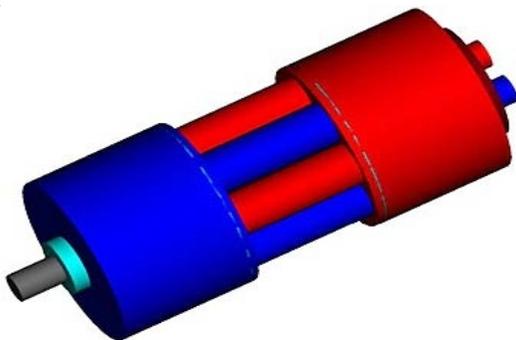


Рис. 5. Внешний вид ДВПТ.

Сгорание топлива происходит в теплообменной камере. Подвод теплоты к рабочему телу осуществляется через теплообменные трубки. При сжатии рабочего тела – отвод теплоты через теплообменные трубки и охлаждение рабочего тела в охладителе.

Количество рабочего тела (им может быть воздух), заключенного в рабочем объеме двигателя, по-

стоянно и не сменяемо. Рабочее тело находится под большим давлением, порядка 40–200 атм. Упрощённая схема двигателя представлена на рис. 6

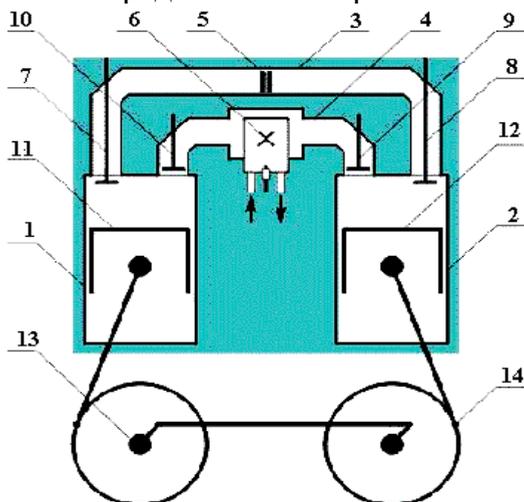


Рис. 6. Схема работы ДВПТ

В двигателе такты сжатия и расширения осуществляются в разных цилиндрах (компрессионном 1 и расширительном 2). Цилиндры 1 и 2 связаны между собой через компрессионную 3 и расширительную 4 магистрали. В компрессионной магистрали находится охладитель 5, а в расширительной магистрали – нагреватель 6. Компрессионная магистраль подключена к цилиндру 1 через выпускной клапан 7, а к цилиндру 2 через впускной клапан 8. Расширительная магистраль подключена к расширительному цилиндру через выпускной клапан 9, а к компрессионному цилиндру через впускной клапан 10.

Поршни 11 и 12 цилиндров 1 и 2 связаны с валом двигателя 13 через механизм преобразования движения 14.

1.2. Пути повышения удельной мощности

Второй по важности после проблемы повышения КПД в конструировании тепловых двигателей является проблема уменьшения их веса (повышения удельной мощности).

Лёгкие мощные двигатели нужны в лёгкомоторной авиации, в качестве лодочных двигателей, а также везде, где вес двигателя составляет существенную часть веса агрегата (например, в бензопилах и других устройствах малой механизации), по сути дела, это всё то же повышение КПД, но КПД всего устройства в целом). В таких случаях, кроме того, обычно требуются сравнительно невысокие скорости вращения.

Известны различные пути решения указанной проблемы, в частности:

- *технологический* – применяя везде, где возможно, легкие материалы;
- *конструктивный* – снижая размеры элементов конструкции, например, располагая цилиндры под углом друг к другу или звездообразно;
- *энергетический* – повышая энергосодержание цикла путем повышения термодинамических показателей или увеличивая количество циклов в единицу времени, т. е. повышая скорость вращения.

Технологические пути мы анализировать не будем – они реализуются «автоматически» по мере появления новых конструкционных материалов.

Конструктивный путь

Даже в лучших конструкциях наиболее распространённых четырёхтактных двигателей (4-ДВС) (в

которых уже применены все новейшие технологии) удельная мощность не превышает 2 кВт/кг. Несколько большей удельной мощности достигают двухтактные двигатели (2-ДВС), затем – роторно-поршневые двигатели (РП-ДВС). Наибольшей удельной мощностью обладают газотурбинные двигатели (ГТД).

Анализируя эту цепочку, легко увидеть, что основным принципиальным различием перечисленных ДВС является способ конструктивной реализации термодинамического цикла:

- в 4-ДВС все составляющие цикла совмещены в пространстве и протекают последовательно во времени;
- в 2-ДВС составляющие цикла попарно разнесены в пространстве и также попарно параллельны во времени;
- в РП-ДВС пространственное разделение осуществлено по трём рабочим зонам, что позволило обеспечить частичное временно'e перекрытие составляющих цикла, хотя процесс по-прежнему остался дискретным;
- в ГТД составляющие цикла разнесены в пространстве, совмещены во времени и непрерывны.

Это означает, что 4-ДВС только четверть времени использует рабочий объём для извлечения энергии из топлива, а остальное время занято вспомогательными процессами. Даже частичное изменение этого способа в 2-ДВС – попарное разнесение составляющих цикла в пространстве и их совмещение во времени – даёт существенный выигрыш в удельной мощности.

Пространственное разнесение составляющих

термодинамического цикла и их совмещение во времени в газотурбинных двигателях позволяет им (без дополнительных агрегатов, прежде всего – редукторов) достигать удельной мощности в несколько кВт/кг, лучшие образцы реализуют значения удельной мощности до 6 кВт/кг.

Это позволяет сформулировать два принципа конструктивного повышения удельной мощности:

- осуществление непрерывного преобразования тепловой энергии в механическую;
- минимизация преобразований энергии.

Осуществление непрерывного преобразования тепловой энергии в механическую.

Полная реализация этого принципа в ГТД должна была бы обеспечить им подавляющее преимущество перед всеми остальными ДВС (по крайней мере, по удельной мощности).

Однако принципиальной особенностью газотурбинных двигателей является необходимость преобразования внутренней энергии рабочего тела в макрокINETическую энергию газового потока, преобразуемую потом средствами газовой динамики в выходную механическую энергию.

Вследствие этого повышение энергосодержания рабочего тела означает при прочих равных условиях увеличение скорости газового потока, следовательно, увеличения угловой скорости ротора. В устройствах же, о которых мы здесь говорим, требуется, прежде всего, крутящий момент, а это в свою очередь приводит к необходимости редукции скорости вращения выходного вала.

Масса редуктора порой превышает массу самого

двигателя и существенно ухудшает суммарные характеристики. Именно в этих случаях ДВС дискретного горения, несмотря на низкую удельную мощность самого двигателя, в целом оказываются выгоднее ГТД.

Их преимущество в данном случае заключено в более короткой цепи преобразований энергии: внутренняя энергия рабочего тела, одной из форм проявления которой является давление, совершает внешнюю механическую работу именно за счет давления, без промежуточных преобразований.

Отсюда второй принцип (который, вообще говоря, и без того очевиден):

Минимизация преобразований энергии.

Иллюстрацией реализации второго принципа может служить конструкция дизель–молота: внутренняя энергия рабочего тела превращается непосредственно в кинетическую энергию молота (разумеется, применительно к дизель–молоту не следует говорить об удельной мощности – здесь масса определена совсем другими соображениями).

Энергетический путь

Энергетический путь повышения удельной мощности также предоставляет две возможности:

- выбор наиболее эффективного термодинамического цикла;
- включение в рабочий цикл двигателя жидкой (а возможно, и твёрдой фазы).

Выбор наиболее эффективного термодинамического цикла

Несмотря на широкую известность цикла Карно, пожалуй, единственное его практическое применение

– обоснование формулы максимального КПД тепловой машины – формулы Карно. Между тем, существует множество других циклов, находящихся себе применение не только в теории, но и в конструкциях реальных машин. Таковы, например, циклы Брайтона, Дизеля, Отто, Эриксона, Стирлинга и многие другие.

Правильный выбор цикла многое определяет. Так, например, длительное совершенствование поршневых ДВС позволило только недавно выйти на КПД 45%, тогда как первые же современные двигатели Стирлинга уже сейчас достигают того же КПД.

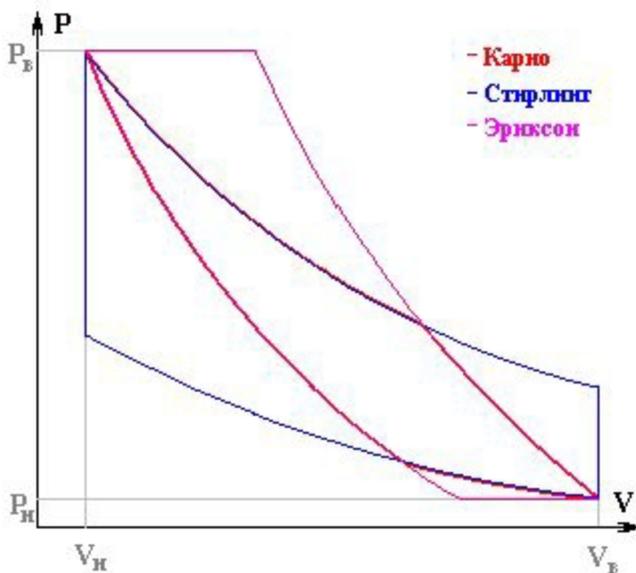


Рис. 7. Термодинамические циклы.

На рис. 7 показаны в PV-координатах (тех, в которых площадь цикла означает реализуемую циклом работу) три цикла, два из которых существенно эффективнее третьего – цикла Карно. Поскольку наивысшие и наинизшие параметры всех трёх циклов, показанных

на рисунке, совпадают, вполне очевидно энергетическое преимущество циклов Стирлинга и Эриксона. Более того, хорошо видно, что цикл Карно – общая часть этих циклов, ни в одной точке не выходящая за их границы.

Включение в рабочий цикл двигателя жидкой (а возможно, и твёрдой фазы).

В настоящее время в тепловых двигателях используются только газообразные «рабочие тела» (была одна попытка использовать для цикла Стирлинга в качестве рабочего тела металлические стержни, однако, она не получила развития).

Этого и следовало ожидать – ведь подводимое к стержню тепло вызывает его объёмное расширение, а «работает» только удлинение. Другое дело – жидкость, заключённая в цилиндре с поршнем. Конечно, тепловое расширение жидкости много меньше, чем газа, но из-за её малой сжимаемости развиваемые усилия очень велики. Вполне возможно представить себе цикл Стирлинга, реализованный на жидком «рабочем теле» для устройств, в которых нужны большие усилия, а скорость не существенна.

Однако, такие двигатели выходят за рамки обсуждаемой темы, хотя и могут служить предметами изобретений.

Глава 2. Конструктивные решения

На первый взгляд, оба принципа повышения удельной мощности реализованы в упомянутых ранее двигателях непрерывного подвода тепла – двигателях Стирлинга и ДВПТ и именно от них можно было бы ожидать высокой удельной мощности. Однако, это не так. Причин здесь две:

- по сути и стирлинги, и ДВПТ всё-таки дискретны, так как, хотя тепло действительно подводится непрерывно, процесс его преобразования в механическую энергию не постоянен во времени;
- конструктивные решения материалоемки.

2.1. Роторно-лопастные двигатели непрерывного горения (РДНГ).

Более тщательный анализ изложенного изложенного в предыдущей главе приводит к мысли о том, что нужно взять за основу рабочий цикл ГТД и так изменить конструкцию, чтобы работа в нём совершалась непосредственно избыточным давлением рабочего тела. Например, развернуть лопатки турбины так, чтобы они полностью перекрывали канал.

В таком случае ротор будет вращаться под давлением рабочего тела на лопатки, скорость газового потока будет равна линейной скорости лопаток, тем самым полностью будет исключено преобразование внутренней энергии рабочего тела в макрокинетическую энергию потока.

Так появился роторно-лопастной двигатель (РДК, свидетельство РФ № 9263), видимо, самый первый,

так как при патентном поиске для оформления заявки аналогов не нашлось. Пришлось даже в качестве прототипа брать двигатель Ванкеля.

Роторно-лопастной двигатель внутреннего сгорания (РДК).

В конструкции РДК легко прослеживается его происхождение от ГТД: роторно-лопастной компрессор (узел сжатия) нагнетает воздух через демпферную камеру в камеру сгорания, в которую непрерывно впрыскивается топливо, продукты сгорания поступают в узел расширения (роторно-лопастной аналог турбины), совершают работу и удаляются в атмосферу.

Более того, рабочий цикл РДК (рис. 8) очень близок к рабочему циклу ГТД.

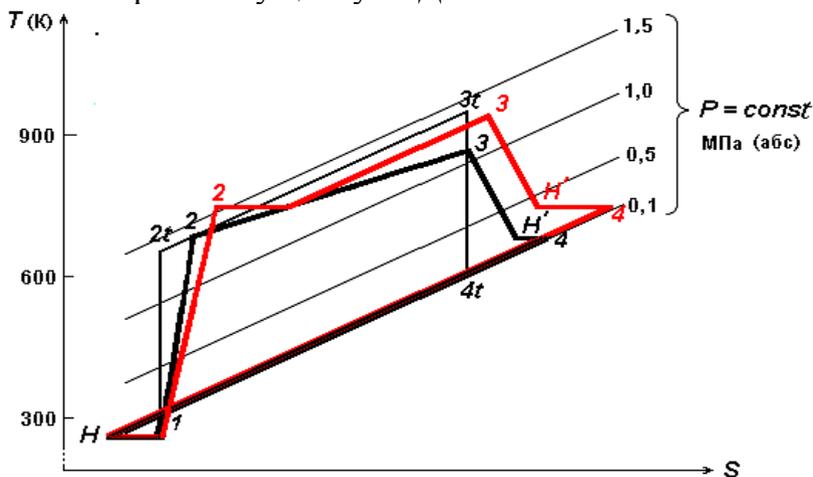


Рис. 8. Термодинамический цикл РДК (красный) в сравнении с циклом ГТД (чёрный) и теоретическим (чёрный тонкий)

На рисунке показаны расчётные циклы, экспериментально их полного подтверждения получить не

удалось (из-за нестабильного горения), однако, характерные «полочки» в точках 2 и 4 наблюдались и в пульсирующем режиме горения.

К сожалению, испытания опытного образца² не были удачны – не удалось получить стабильное горение. Видимо, цилиндрическая камера сгорания отбирала слишком много тепла – в лучшем случае, удавалось получить пульсирующий режим при непрерывной работе свечи, которая предназначалась только для запуска. А возможности менять конструкцию не было.



Рис. 9. Узел сжатия РДК со снятой щекой

Однако, именно это заставило отказаться от режима внутреннего сгорания, сделав двигатель герметичным с выводом вращения через синхронную магнитную муфту.

² К тому времени заводы уже «лежали», к счастью, нашлись неравнодушные люди, которые по опубликованным эскизам РДК изготовили опытный образец мощностью 5 кВт (габаритные размеры: длина – 70 мм, диаметр – 100 мм), который прислали в подарок посылкой.

Обращённый роторный двигатель (ОРДК)

Определённый интерес в семействе РДНГ представляет ОРДК (свидетельство РФ N 14387). Предложенный в базовой модели (РДК) принцип позволяет инвертировать модель («вывернуть наизнанку») и получить обращённый роторный двигатель непрерывного горения, в котором ротор вращается вокруг статора, заключённого внутри ротора.

Для иллюстрации возможных параметров ОРДК ниже приведены некоторые данные из расчёта модели для использования в ступице колеса мотоблока.

Геометрические данные (мм):

- *внутренний радиус ротора* $R=100$;
- *внешний радиус статора* $r = 95$;
- *длина узла сжатия* $d_c = 40$;
- *длина узла расширения* $d_p=84$.

Термодинамические данные:

- *входная температура* $T_{1c}=300$ K;
- *рабочая температура* $T_2=1300$ K;
- *температура выхлопа* $T_{2p} = 734$ K;
- *показатели политропы* $n_c=1,3$, $n_p=1,25$.
- *начальный объем* $V_{2c}= 400,0$ (см³);

Масса рабочего тела в 1-м цикле $m = 1,5$ (г/ц).

Работа цикла: $W = 458$ (Дж/ц)

Таким образом, ОРДК габаритным диаметром **250** мм и габаритной длиной **150** мм развивает при **10** об/с мощность более **4,5** кВт и крутящий момент **73** Нм. Крутящий момент на валу практически постоянен при оборотах двигателя от 1-2 до 100 об/с (мощность при этом меняется пропорционально оборотам).

При работоспособности ОРДК на малых оборотах такой двигатель может быть установлен в

ступице колеса, что исключит необходимость трансмиссий как таковых, а, следовательно, снизит массо-габаритные параметры и потери. Рабочий процесс в ОРДК полностью аналогичен рабочему процессу прототипа.

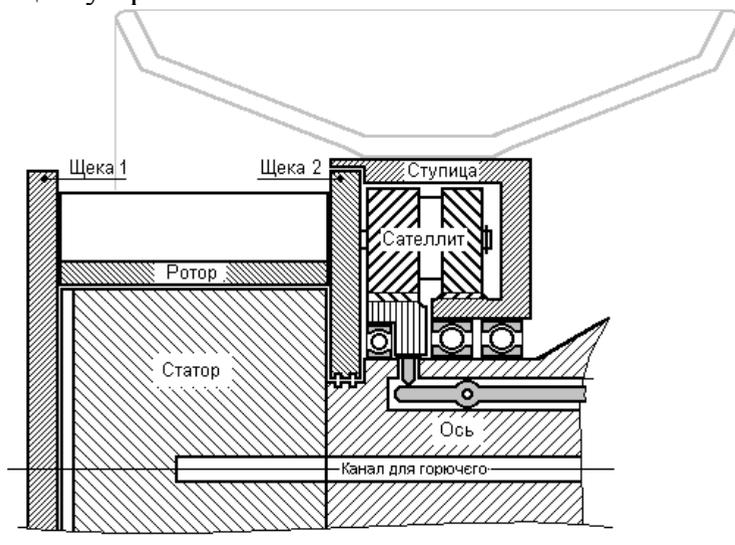


Рис.10. Схематический разрез ступицы со смонтированным в ней ОРДК.

Особое место в семействе РДНГ занимает роторный герметичный двигатель внешнего горения (РГК, патент РФ № 2220308, приоритет от 05.04.01). Как и остальные представители семейства РГК предназначен для применения в лёгких летательных аппаратах, мотоблоках, портативных мотоэлектрогенераторах и других устройствах, в которых вес двигателя составляет существенную часть общего веса установки.

Роторный герметичный двигатель внешнего горения (РГК).

Конструкция роторного герметичного двигателя внешнего сгорания – дальнейшее развитие роторного двигателя непрерывного горения (РДК).

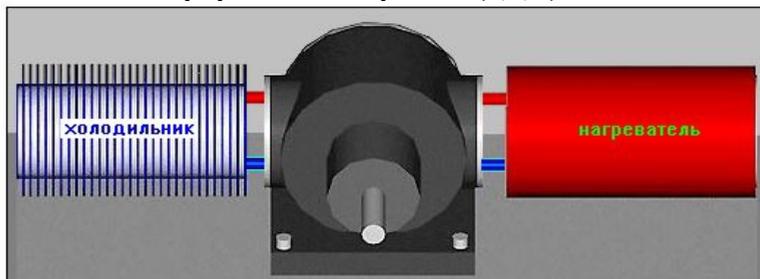


Рис. 11. Схема РГК

В отличие от прототипа в РГК (рис. 11) демпферная камера и камера сгорания вынесены из корпуса двигателя и объединены в нагреватель, в котором топливо сгорает, не смешиваясь с нагреваемым рабочим телом, протекающим по рубашке нагревателя. Нагреватель (как и холодильник) может иметь любую конструкцию, обеспечивающую максимально возможный КПД теплообмена.

Судьба роторного герметичного двигателя также не была удачной. Нам удалось получить грант на его разработку и успешно выполнить первый из трёх этапов, изготовив «холодный»³ макет РГК (рис. 12.). Однако затем завод-соисполнитель подвергся рейдерской атаке (которую, в конце концов, отбил), сроки второго этапа были сорваны и финансирование прекращено.

3 «Холодный» потому, что одна из щёк была изготовлена из прозрачного материала, работоспособного до температуры не более 100⁰С

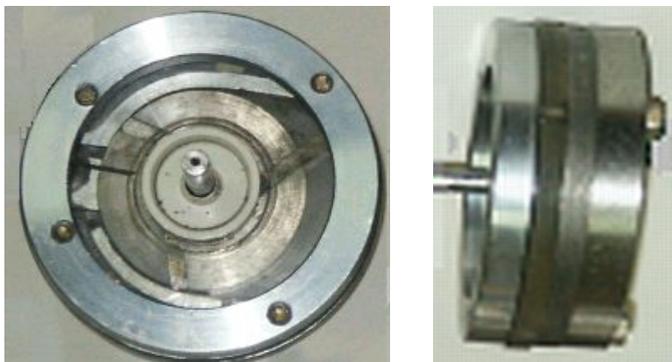


Рис. 12. «Холодный» макет РГК

Тем не менее имеет смысл остановиться на РГК подробнее, так как его макет позволил провести целый ряд измерений, а после небольших переделок макетировать последующие разработки.

При его конструировании основная конфигурация была взята от РДК:

- рабочая полость статора из соображений технологичности представляла собой два полуцилиндра, сопряжённых между собой плоскостями (оптимальная конфигурация – овал Кассини с отношением $a:c = 1,4$);
- ротор содержал три лопасти, отклонённых от радиального направления на угол, определяемый по углу трения лопасти по статору.

«Холодный» макет⁴ предназначался для визуального наблюдения работы узлов при низких температурах, однако по необходимости был использован гораз-

⁴ В процессе работы с РГК стало очевидным, что возможно объединение узлов РГК в единый моноблок, который и был запатентован (ДНГ, патент РФ № 2239713, приоритет от 26.09.01).

до шире, несмотря на температурные ограничения.

Преимущества РГК, прежде всего, связаны с тем, что рабочее тело в нём надёжно изолировано от внешней среды и тепло к нему подводится в теплообменнике. Это позволяет:

- применить в качестве рабочего тела вещество высокой плотности с нужными термодинамическими параметрами и при повышенном давлении, что увеличивает в несколько раз удельную мощность двигателя по сравнению с прототипом (до 15 кВт/кг и выше);
- сжигание топлива во внешнем теплообменнике расширяет диапазон применимого вида топлива (вплоть до твердотельного) и упрощает, а зачастую исключает переналадку двигателя при смене топлива.

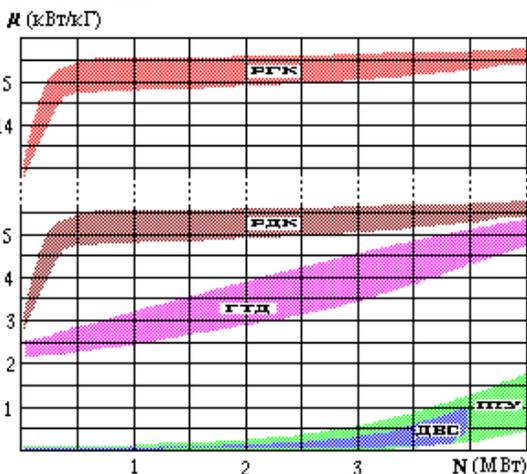


Рис. 13. Зависимость удельной мощности двигателей разных типов от номинальной мощности (данные РГК – расчётные).

2.2. Перспективные конструкции

Характерной чертой двигателестроения 21-го века (по крайней мере, в области изобретений) оказалось наличие неожиданно большого количества заявок на разного рода роторно-лопастные двигатели, что само по себе уже говорит о перспективах.

В предыдущем параграфе речь шла о моих собственных разработках, хотя нечто аналогичное запатентовано в Новосибирске (патент № 2175720, автор А.Н. Шибаяев и патент № 2225513, авторы А.Н. и Н.В. Аракеловы), Ростове на Дону, в Украине (Севастополь), США и т.д. Дело здесь не в авторских амбициях, а в том, что каждый автор хорошо знает недостатки своего детища, но не склонен их афишировать, особенно, в заявочных материалах.

Между тем, основной смысл анализа был именно в сравнении слабых сторон различных конструкций, да и критиковать себя всегда и проще, и безопаснее. По результатам анализа кажется очевидным широкое распространение в будущем, по крайней мере, среди лёгких двигателей роторно-лопастных машин внутреннего или внешнего непрерывного горения.

Попытаемся теперь представить оптимальную роторно-лопастную тепловую машину, опираясь на те достоинства и недостатки, которые были изложены в предыдущем параграфе.

По-видимому, это должен быть роторно-лопастной моноблок с внешним непрерывным подводом тепла, обеспечиваемым или за счёт сжигания разных видов топлива, или за счёт других источников (солнечного излучения, ядерных реакций и других).

Роторная машина внешнего горения (РМВГ)

Роторно-лопастная тепловая машина будущего может выглядеть так, как показано на рис. 14.

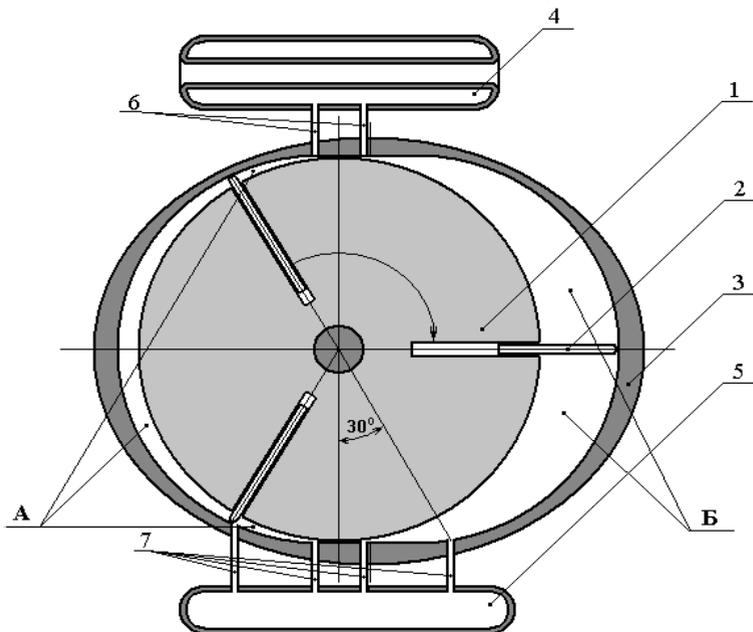


Рис. 14. Схема роторно-лопастной машины

Тепловая машина содержит ротор 1 в виде прямого кругового цилиндра с тремя лопастями 2, расположенными в пазах ротора под углами в 120° друг относительно друга и перемещающимися в них под воздействием упругих элементов до упора во внутренние поверхности статора 3.

Ротор 1 показан сплошным с целью более наглядного представления рабочих полостей, тогда как в реальной машине ротор должен быть выполнен пустотелым для снижения общей массы машины. В качестве упругого элемента, учитывая жёсткий температурный

режим, наиболее удобна сжатая газовая подушка, хотя возможно применение и металлических пружин.

Статор 3 представляет собой полый прямой цилиндр, сечение полости которого – овал Кассини с отношением $a:c = 1,4$ (внешние обводы статора тоже близки к этой кривой).

Поскольку технологически изготовление подобной полости может оказаться затруднительным, овал Кассини допустимо аппроксимировать двумя круговыми полуцилиндрами одинакового радиуса, разнесёнными в перпендикулярном оси вращения направлении, и сопрягающими эти полуцилиндры плоскостями.

Ротор 1 расположен в полости статора 3 таким образом, что он касается обоих плоских участков полости статора, а ось его смещена относительно оси симметрии статора (на рис. 14 – влево). При этом ротор 1 делит полость статора 3 на две криволинейные полости неравного объёма: полость А (камеру сжатия) и полость Б (камеру расширения рабочего тела).

С торцов статор 3 с расположенным в нём ротором 1 герметично закрыт щеками (на рис. 14 не показаны). В одной из щёк размещена синхронная магнитная муфта для передачи вращению ротора при сохранении полной герметичности внутренних полостей (не показана).

Каждая из образованных ротором 1 и статором 3 криволинейных полостей А и Б соединена каналами 6 и 7 с нагревателем 4 и холодильником 5. При этом соединение с нагревателем 4 осуществляется для каждой полости через один канал 6, размещённый рядом с линией контакта ротора со статором.

Соединение каждой полости (А и Б) с холодиль-

ником 5 выполнено через два канала 7, причём один из них расположен рядом с линией контакта ротора 1 со статором 3, а второй отнесён в сторону таким образом, чтобы угол между радиусом, проведённым из центра ротора 1 к каналу 7, и радиусом, проведённым к линии контакта ротора 1 со статором 3, составлял 30° .

Основным условием оптимальной работы является равенство отношения объёмов полостей Б (камеры расширения) и А (камеры сжатия) отношению температур нагревателя 4 и холодильника 5:

$$V_B / V_A = T_H / T_X,$$

где V_B и V_A – объёмы полостей Б и А, выраженные в любых, но одинаковых единицах, а T_H и T_X – температуры соответственно нагревателя 4 и холодильника 5 в Кельвинах.

Ожидаемые достоинства:

Всеядность. Как все двигатели внешнего горения (вернее – внешнего подвода тепла), машина может работать от солнца, от ядерного или изотопного нагревателя, паяльной лампы, дровяной печи и других источников.

Простота конструкции. В конструкции отсутствуют многие элементы привычных двигателей: система зажигания, свечи, карбюратор, клапаны, глушитель. Он запускается самостоятельно и не нуждается в стартере.

Бесшумность. Как и все машины внешнего горения подобная конструкция не имеет выхлопа, а значит, – не шумит и, при достаточно высоком качестве изготовления, прежде всего, с сечением в виде овала Кассини, даже не имеет вибраций.

Роторно-волновой двигатель (РВД)

Современным условиям, возможно, будет соответствовать, помимо роторно-лопастных двигателей, концепция «Роторно-волнового двигателя» (патент РФ № 2155272, подробнее см. в отраслевом журнале «Двигателестроение» №№ 2 и 3 за 2001 г.). Это объёмно-прямоточная машина, воспроизводящая последовательность работы газотурбинного двигателя.

В этом двигателе совершенно устранено возвратно-поступательное движение рабочих органов, ротор полностью уравновешен и вращается с постоянной угловой скоростью. Рабочее тело, как и в турбине, движется вдоль оси двигателя, траектория движения - винтовая линия. В конструкции отсутствует вредное пространство, ограничивающее рост степени сжатия рабочего тела.

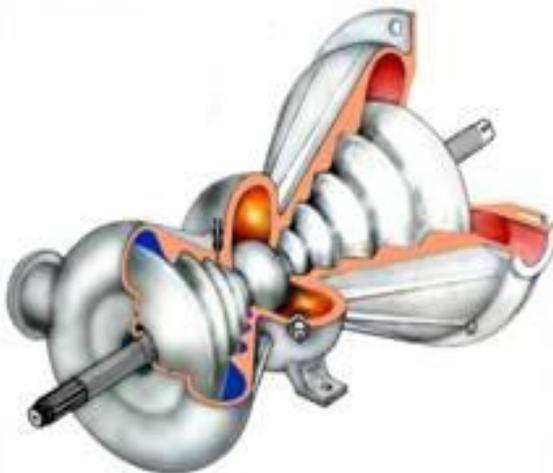


Рис. 15. Роторно-волновой двигатель (внешний вид)

Из-за отсутствия уплотнительных элементов и, соответственно трения в проточной части, снимаются

ограничения по ресурсу и числам оборотов двигателя. Рабочий процесс допускает произвольное изменение степени сжатия и расширения рабочего тела; без дополнительных регулировок и остановки двигателя осуществление перехода на любой сорт топлива.

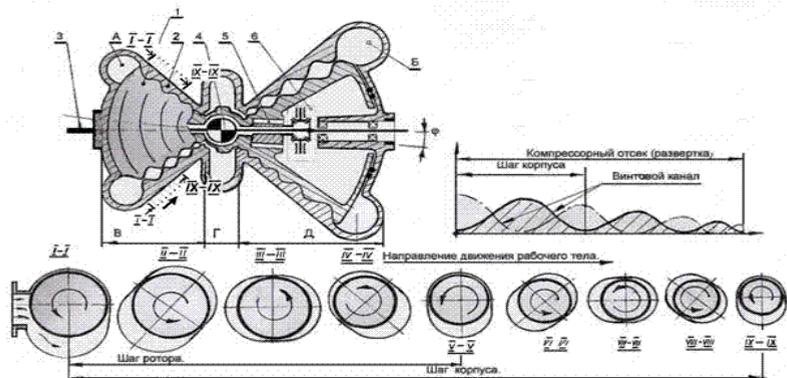


Рис. 16. Схема роторно-волнового двигателя.

1 – ротор; 2 – корпус; 3 – вал отбора мощности; 4 – шарнир равных угловых скоростей; 5 – эксцентрик; 6 – блок шестерен. А – впускное окно, Б – выпускное окно, В – компрессорный отсек, Г – камера сгорания, Д – расширительный отсек, φ – угол наклона ротора.

Ротор (1) и вал отбора мощности (3) соединяются между собой в центре двигателя шарниром Гука (4), который можно назвать шарниром равных угловых скоростей (ШРУС'ом). Необходимое же ротору «дополнительное» обкатывание по внутренним огибающим корпуса задается вспомогательным устройством – так называемым «генератором волн».

Его основной элемент – вращающийся на основном валу эксцентрик (5), с приводом через блок шестерен (6) всё от того же вала. Эксцентрик, наклоняя ротор от 3 до 6 градусов, обеспечивает угловое кача-

ние сечениям ротора в пределах от 12 до 24 градусов.

Однако необходимо признать, что на данный момент времени сильно отстает технологическая база предприятий, которые можно привлекать для изготовления подобного класса машин. Учитывая необходимость изготовления конических спиральных трохоидальных поверхностей высокого класса чистоты, серийное производство таких двигателей не будет простым и технологически, и организационно.

В этом смысле роторно-лопастные машины имеют явное преимущество. Однако, безусловным достоинством роторно-волновой конструкции является практически полное, за исключением эксцентрика и ШРУС'а, отсутствие трения, следовательно, и потерь на него, и износа основных деталей (конечно, кроме постепенного выгорания при высокотемпературных режимах).

Вторым недостатком можно считать довольно жёсткие требования к топливу и трудности с организацией процесса горения, от чего машины внешнего горения полностью свободны.

Конечно, поскольку и РМВГ, и РВД ещё не производятся и та, и другая конструкции могут преподнести в процессе эксплуатации немало сюрпризов как положительных, так и отрицательных, но такова судьба всего нового.

Глава 3. Энергетические решения

В первой главе мы коротко уже говорили о различных термодинамических циклах, существенно более эффективных, чем цикл Карно.

В пользу цикла Стирлинга мы уже имели возможность убедиться. Кстати, показанная на рис. 14 второй главы схема роторно-лопастной машины после небольших изменений (см. рис. 17) легко может быть ещё одной реализацией цикла Стирлинга.

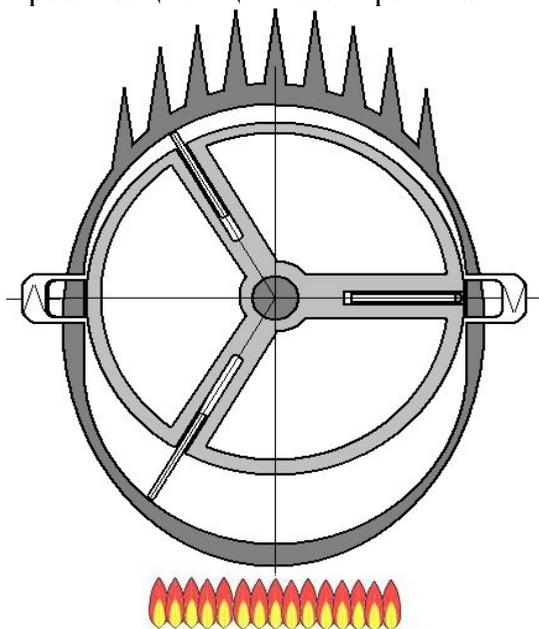


Рис. 17. Схема роторно-лопастного «стирлинга»

Изменения сводятся к замене нагревателя и холодильника каналами с лепесковыми клапанами, которые определяют направление вращения ротора (в данном случае, против часовой стрелки).

3.1. Реализация эффективных термодинамических циклов

На рисунке 7 во второй главе показаны два термодинамических цикла, существенно превосходящих цикл Карно. Однако, существует ещё более эффективный цикл – цикл Рейлиса. Этот цикл показан на рисунке 18 и он содержит в себе все три цикла рисунка 7, да ещё и с «довесками».

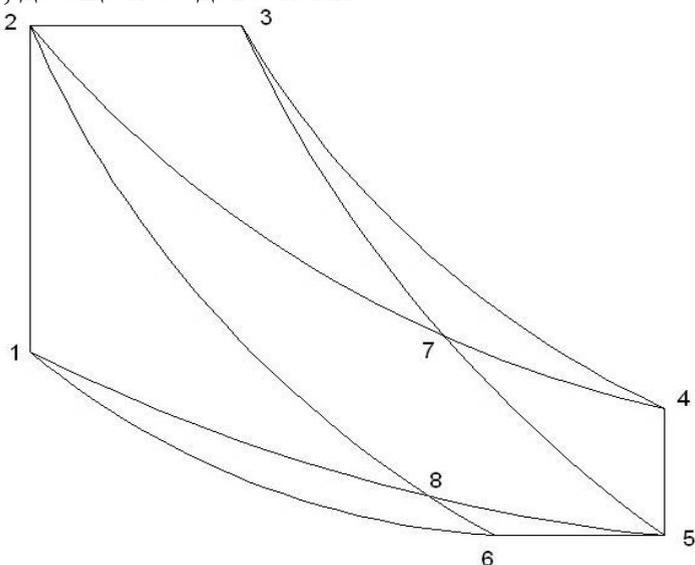


Рис. 18. Термодинамические циклы. 1245 – цикл Стирлинга, 2356 – цикл Эриксона, 2758 – цикл Карно, 123456 – цикл Рейлиса,

Как выяснилось, его «зачатки» наблюдались ещё в работе РДК, в рабочем цикле которого (рис. 8) наблюдались короткие участки изобар. Именно эта особенность – переход изохоры в изобару (точка 2 на рис. 18) и переход изобары в изохору (точка 5) – характерна для цикла Рейлиса.

Тепловая машина, реализующая цикл Рейлиса.

Эксперименты с одним из узлов «холодного» макета РГК подтвердили это предположение, в связи с чем и была запатентована ТМК («Тепловая машина, реализующая цикл Рейлиса», патент РФ на полезную модель № 88739).

Однако, последующие эксперименты показали, что реализованный цикл действительно является циклом Рейлиса, но весьма далёк от идеального.

Выглядит он так, как показано на рис. 19.

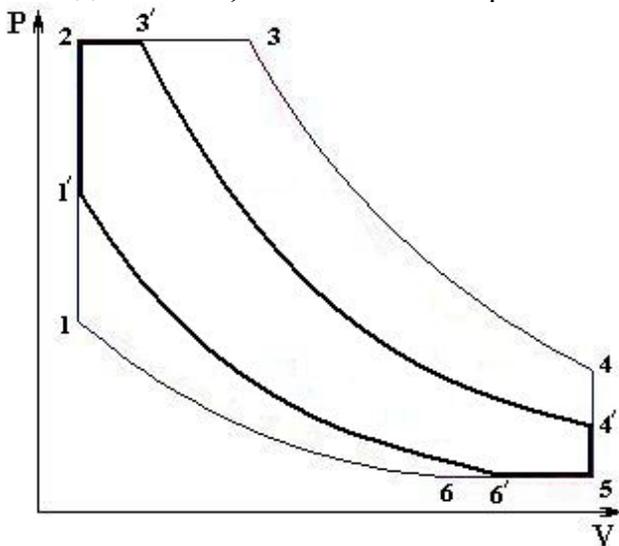


Рис. 19. Реальный (жирная линия) цикл ТМК и идеальный цикл Рейлиса

Причина оказалась в дефиците внутренней энергии, запасаемой газообразным рабочим телом в процессе нагрева. Повышение температуры нагревателя, очевидно, не могло спасти положение, так как оно означало лишь «вытягивание» диаграммы вверх по оси давления. Следовало искать другие пути.

Сорбционный двигатель внешнего горения

Изменить энергосодержание рабочего тела, не меняя его температуру (кинетическую энергию), можно путём изменения его потенциальной энергии.

Это означает необходимость включения в рабочий цикл агрегатного перехода рабочего тела – испарять его не только в «котле» – нагревателе, но и в расширительной камере. Соответственно и конденсировать ещё до холодильника – в камере сжатия. Так родился «сорбционный двигатель внешнего нагрева» (СДВН, заявка № 2010140152 от 30.09.10, решение о выдаче патента от 16.02.11), схема которого показана на рис. 20.

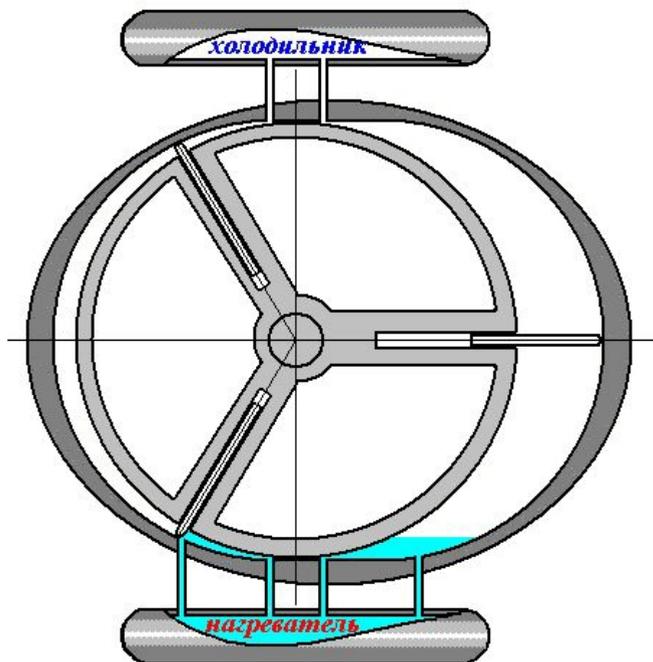


Рис. 20. Схема СДВН. Цветом отмечено примерное заполнение двигателя жидкой фазой

Сущность СДВН заключается в том, что в качестве рабочего тела в нём использован раствор одного или нескольких газов в жидкости, растворение которых сопровождается выделением тепла. Это позволяет использовать для накопления в рабочем теле энергии при нагреве и её расходовании в течение цикла не только теплоёмкость рабочего тела, но и скрытые теплоты растворения газов в жидкости.

Это даёт возможность, не повышая температуры нагревателя, «загрузить» рабочее тело существенно бо́льшей энергией и приблизить термодинамический цикл СДВН к идеальному циклу Рейлиса.

Предлагаемое решение было проверено макетным моделированием с использованием в качестве рабочего тела 50% водного раствора аммиака. Термодинамический процесс происходит примерно так, как показано на рис. 21:

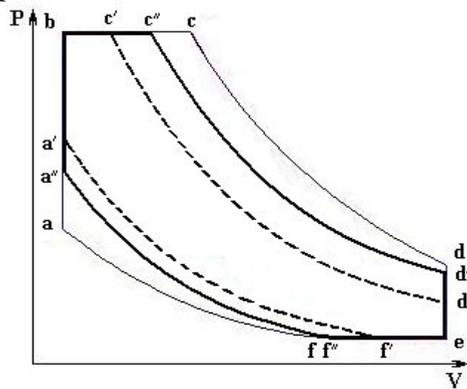


Рис. 21. Рабочий цикл в сравнении с идеальным циклом Рейлиса (тонкие линии) и циклом ТМК

На рис. 21 показан тонкими линиями идеальный цикл Рейлиса **a – b – c – d – e – f**, жирными штриховыми линиями цикл ТМК **a' – b – c' – d' – e – f'** и реаль-

ный модельный цикл $a'' - b - c'' - d'' - e - f''$, полученный в макете двигателя внешнего горения с гетерогенным рабочим телом.

В нагреватель СДВН поступает рабочее тело в состоянии a'' , при нагреве, наряду с повышением температуры, происходит испарение аммиака, которое обеспечивает быстрый рост давления и поглощение энергии не только на повышение температуры, но и на испарение.

В точке b рабочее тело получает возможность расширяться, продолжая получать энергию от нагревателя, но при этом продолжающееся испарение аммиака значительно дольше поддерживает изобарное расширение, чем это могло обеспечить чисто газообразное рабочее тело.

По достижении фазового равновесия дальнейшее расширение происходит политропно, но с учётом продолжающегося испарения аммиака за счёт снижения давления и, следовательно, отбора энергии у жидкой фазы.

Поэтому конечное давление политропы d'' заметно выше, чем для только газообразной фазы. На участках $d'' - e$ и $e - f''$ газообразный аммиак растворяется в жидкой фазе, затем рабочее тело политропно возвращается в исходное состояние.

В качестве *элемента вывода мощности* при сохранении герметичности внутренних объёмов (что совершенно необходимо для работы СДВН) можно использовать синхронную магнитную муфту. Однако, возможно и другое решение: установка встроенного вовнутрь электрогенератора с тем, чтобы выводить наружу не механическую мощность, а электроэнергию,

что в ряде случаев значительно упрощает применение.

Приведенное для иллюстрации работы СДВН использование в качестве рабочего тела раствора аммиака в воде (в просторечии – нашатырного спирта) не является исключительным, хотя именно этот раствор обладает одной из самых больших удельных теплот растворения. Возможно использование многокомпонентных растворов, а также твёрдых сорбентов.

Здесь появляется возможность обхода формулы Карно, так как она была получена для газообразных рабочих тел логическим переходом

$$\eta = (Q_n - Q_x)/Q_n \Rightarrow \eta_{\max} = (T_n - T_x)/T_n,$$

(где η – КПД, Q_n – кол-во теплоты, переданное рабочему телу нагревателем, Q_x – кол-во теплоты, переданное рабочим телом холодильнику, T_n и T_x - абсолютные температуры нагревателя и холодильника соответственно), что требует линейной зависимости между Q и T , то есть использования только теплоёмкости. Ни в цикле Карно, ни в «барьере Карно» агрегатные переходы не фигурируют.

3.2. Использование «критических состояний»

Высказанная в заключение предыдущего параграфа идея преодоления «барьера Карно», к сожалению, не может быть реализована в рамках СДВН, прежде всего, потому, что основное количество скрытой теплоты испарения всё-таки уходит в холодильник. Рабочий цикл удаётся «подправить», но и только.

Между тем, существует термодинамический цикл, давно и хорошо известный (более того, очень широко применяемый), который позволяет преодолеть этот самый барьер, точнее, просто исключить из

рассмотрения. Это термодинамический цикл «теплового насоса» компрессионного холодильника.

Всё дело в том, что он служит для прямо противоположной цели – совершать работу для «перемещения» тепла, тогда как двигатели совершают работу за счёт «перемещения» тепла.

В настоящее время патентуется первый в этом роде способ, позволяющий успешно преодолеть "барьер Карно" (заявка № 201019402 от 15.07.2010).

Суть способа заключается в организации такого термодинамического цикла, внутрь которого попадала бы критическая точка рабочего тела, как, например, показано на рис. 22.

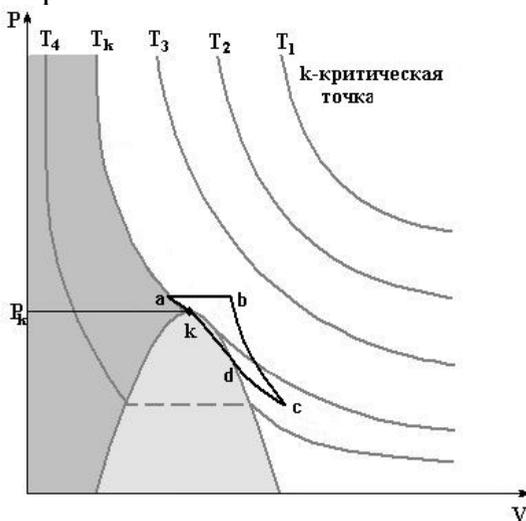


Рис. 22. Схема термодинамического цикла, включающего критического состояния рабочего тела.

На схеме **a–b** – изобарное расширение, **b–c** – политропное расширение, **c–d** – политропное сжатие, **d–k** – выход в критическую точку и сжижение, **k–a** сжатие жидкости. $T_1 > T_2 > T_3 > T_k > T_4$

Как показано на этом рисунке, жидкость нагревается при постоянном давлении от температуры точки **a** до температуры **b**, которая выше критической. При этом она переходит в газообразное состояние, поглощая энергию, соответствующую скрытой теплоте испарения. Затем мы предоставляем парам возможность политропного расширения с совершением работы до точки **c**, температура которой ниже критической, но давление мало для сжижения. Последующее политропное сжатие до точки **d** и далее до **k** приводит пары в критическое состояние и они сжижаются без выделения энергии. Затем жидкость сжимается до точки **a**. Цикл повторяется.

Такой двигатель требует определённых конструктивных решений, однако игра стоит свеч. Иллюстрировать сказанное можно на следующих примерах:

Пример 1. В качестве рабочего тела выбираем **н-пентан** (C_5H_{12}), основные физические свойства которого следующие:

- скрытая теплота парообразования у н-пентана (при н.у.) $q_{\text{скр}} = 360$ кДж/кг,
- критическая температура $T_{\text{кр}} = 197$ °С,
- критическое давление $P_{\text{кр}} = 3,3$ МПа.

В герметичном объёме двигателя **н-пентан** при давлении более 3,3 МПа будет находиться в жидком состоянии до температуры ~ 197 °С. Для определённости примем, что в двигатель, полный рабочий объём которого составляет, например, 2 л, помещён 1 кг н-пентана ($\sim 1,6$ л в жидком состоянии).

При этом основная масса рабочего тела (н-пентана) представляет собой жидкость, а оставшийся объём заполнен парами рабочего тела, находящимися

в динамическом равновесии с жидкой фазой.

При нагревании выше $T_{кр}$ некоторой части массы рабочего тела (например, 0,5 массы до 225°C), эта нагретая часть рабочего тела перейдёт в газообразное состояние, давление его паров в нагревателе и рабочей полости двигателя резко возрастёт, что позволит произвести его адиабатное расширение (совершая работу) до температуры ниже критической (например, до 175°C).

Произведённая при этом работа может быть не более разности количества теплоты, содержащейся в нагретом рабочем теле до расширения и после него:

$$Q_H = Q_{исп} + Q_{нагр} = m q_{скр} + m c_v T_B = \\ = 0,5(360 + 2,18.498) \sim 1265 \text{ кДж}, \text{ где:}$$

Q_H – теплота, содержащаяся в нагретом рабочем теле, $Q_{исп}$ – теплота, затраченная на испарение рабочего тела, $Q_{нагр}$ – теплота, затраченная на нагрев рабочего тела до T_B , m – масса рабочего тела, $q_{скр}$ – скрытая теплота парообразования, c_v – удельная теплоёмкость при постоянном объёме, $T_B = 225^{\circ}\text{C}$ – температура, до которой нагревают рабочее тело.

$$Q_x = m c_v T_x = 0,5 \cdot 2,18.448 = 488 \text{ кДж},$$

где: Q_x – теплота, содержащаяся в холодном рабочем теле, m – масса рабочего тела, c_v – удельная теплоёмкость при постоянном объёме, $T_x = 175^{\circ}\text{C}$ – температура, до которой охлаждают рабочее тело.

$$W < \Delta Q = Q_H - Q_x = 777 \text{ кДж},$$

где: W – работа цикла.

Соответственно, КПД (η) не может быть больше, чем

$$\eta < W/Q_H = (Q_H - Q_x)/Q_H = 61,4\%$$

Вполне очевидно, что для перепада рабочих тем-

ператур в 50°C максимальное значение КПД более 60% – величина недостижимая для всех ранее применяемых способов преобразования тепловой энергии в механическую.

Ведь для этого интервала температур формула Карно даёт всего:

$\eta < (T_n - T_x)/T_n = (498 - 448)/498 \sim 10,0\%$, где T_n и T_x – абсолютные температуры нагревателя и холодильника.

Такой результат даёт использование в качестве рабочего тела н-пентана, выбранного из соображений относительной безопасности.

Однако, герметичность двигателя, исключая возможность контакта рабочего тела с окружающей средой, позволяет применять любые вещества, не заботясь об их экологической чистоте и других ограничениях.

Пример 2. В качестве рабочего тела выберем ацетилен (C_2H_2). Скрытая теплота парообразования ацетилена $q_{скр} = 830$ кДж/кг, критическая температура $T_{кр} = 35,7^\circ C$, критическое давление $P_{кр} = 6,16$ МПа. Аналогичный расчёт для ацетилена в диапазоне рабочих температур 50°C – 25°C (например, для утилизации тепла обратного водотока в системе водяного отопления) даёт:

$$Q_n = 770 \text{ кДж}, Q_x = 328 \text{ кДж},$$

$$\eta < (770 - 328)/770 = 57,0\%$$

Формула Карно даёт:

$$\eta < (323 - 298)/323 \sim 7,7\%$$

Понятно, что реальный КПД будет существенно ниже максимального, полученного в приведённых примерах, однако он всё равно будет значительно

выше максимального КПД, рассчитанного по формуле Карно.

Однако, на рисунке 22 легко увидеть и существенный недостаток таких двигателей – строго заданный выбором рабочего тела интервал рабочих температур.

Высокий КПД достигается, если подавляющую часть используемой в цикле тепловой энергии составляет скрытая теплота агрегатного перехода, то есть следует соблюдать условие:

$$mq_{\text{скр}} \gg mc_v T_v$$

Для максимальной эффективности следует так подбирать рабочий диапазон температур, чтобы адиабата (а точнее, политропа) расширения проходила как можно ближе к критической точке, но не касалась её.

В то же время политропа должна оканчиваться ниже критической изотермы (точка 3 на рис. 22), в противном случае двигатель перейдёт в «газовый» режим, без жидкой фазы и его КПД упадёт в разы.

Нечто подобное происходит с компрессионным холодильником, когда в жару его радиатор оказывается не способен охладить рабочее тело до нужной температуры – конденсации не происходит, соответственно, нет испарения и холодильник впустую «гоняет» рабочее тело.

Заключение

Как уже было сказано в предисловии, содержание этой книги не касается стационарных тепловых машин, масса которых не играет существенной роли и для которых важны другие критерии. Всё изложенное в ней важно для двигателей транспортных средств, конечно, прежде всего, летающих. Но и в наземных, и в плавающих аппаратах уменьшение массы и габаритов двигателя совсем не вредно, особенно, если учесть современную тенденцию к применению гибридных двигательных систем.

Именно в таких гибридных системах, включающих в себя тепловой мотор-генератор, электрический аккумулятор и рабочие электродвигатели, способные к рекуперации, роторно-лопастные двигатели непрерывного внешнего горения (РДНВГ) со встроенным электрогенератором особенно удобны.

Конечно, каждый автор считает своё детище верхом совершенства, но мне кажется, что и помимо этого РДНВГ – транспортные двигатели будущего, на которых и следует сконцентрировать творческие усилия, вместо того, чтобы «мучительно дожимать» ДВС, выигрывая в результате доли процента в их КПД.

Оглавление

Глава 1. Обзор конструкций тепловых двигателей.....	4
1.1. Типы современных двигателей.....	4
Двигатели дискретного горения.....	6
Двигатели непрерывного горения.....	7
Двигатели внешнего горения.....	8
1.2. Пути повышения удельной мощности.....	16
Конструктивный путь.....	16
Энергетический путь.....	19
Глава 2. Конструктивные решения.....	22
2.1. Роторно-лопастные двигатели непрерывного горения (РДНГ).	22
Роторно-лопастной двигатель внутреннего сгорания (РДК).	23
Обращённый роторный двигатель (ОРДК).....	25
Роторный герметичный двигатель внешнего горения (РГК).	27
2.2. Перспективные конструкции.....	30
Роторная машина внешнего горения (РМВГ).....	31
Роторно-волновой двигатель (РВД)	34
Глава 3. Энергетические решения.....	37
3.1. Реализация эффективных термодинамических циклов.....	38
Тепловая машина, реализующая цикл Рейлиса.....	39
Сорбционный двигатель внешнего горения.....	40
3.2. Использование «критических состояний».....	43
Заключение.....	49