

BARM - машины биангулярного вращения - трохоидальная технология без недостатков

Schapiro¹, В.

Ключевая тема:

**Двигатели, Компрессоры, Обратные вакуумные насосы, Насосы осушки,
Двигатели внешнего сгорания, Двигатели внутреннего сгорания, Машины
трохоидального вращения, Дроны, Мо- торы Ванкеля, Поворот к чистой энергии,
Режимы в техническом развитии современного общества**

Аннотация

Мода управляет мышлением, думают модельеры и становятся миллиардерами. Мода сегодняшнего дня - это электромобильность. Технологические вопросы в других сегментах, имеющих отношение к энергетике, будут почти забыты или проигнорированы.

Оборот: Все, что вы знаете о машинах Ванкеля, будет в 1,5 раза лучше для ма-шин BARM, гораздо выгоднее и эффективнее. И особенно в 20 раз долговечнее.

Schapiro, B., 2011-2 представил BARM как машину внутреннего сгорания, а *Schapiro, B., 2012-2* представил BARM как машину внешнего сгорания. *Шапиро, Б., Дунин, С., 2013* опубликовали обзор различных технических аспектов применения BARM.

Термодинамическое описание, то есть моделирование этих процессов, является физическим приближением, справедливым не только для BARMов, но и для всех машин с вращательным объемным перемещением аналогичного назначения, например, в работах *Пятов, И., 2010* и *Пятов, И., Шапиро, Б., 2010*.

Здесь я напоминаю о технике в физическом приближении и обсуждаю экономические и политические аспекты снова и снова.

А. Технология и общество

Мода управляет мышлением, думают модельеры и становятся миллиардерами. Мода нашего времени - это электромобильность. Это действительно необходимо, чтобы сделать жизнь в мегаполисах сносной и сохранить природу в наших городах. Но мода есть мода. Технологические вопросы в других сегментах, имеющих отношение к энергетике, почти забыты или игнорируются.

Другие отрасли нашей экономики, имеющие отношение к энергетике, намного больше, чем в автомобилестроении, и очень многообразны. Они включают в себя разнообразные насосы, бесконечное количество различных компрессоров, мощные двигатели на суше и на море, легкие самолеты, вертолеты и беспилотники. Почти во всех этих приложениях используются машины объемного вытеснения.

В большинстве этих областей применения технология объемного вытеснения уже настолько морально устарела, что глубокая инновация машин объемного вытеснения принесет огромные экологические выгоды и триллионы долларов инвесторам.

Это поняли многие игроки в экономике и поставили на трохоидальную технологию Ванкеля. Однако это не оправдало надежд. Эти надежды могут быть реализованы с помощью технологии BARM.

¹ Проф. д-р Борис Шапиро, ИПУ РАН, Институт программных систем имени А.А. Айламазяна Российской академии наук, ул. Петра Первого, 4а, Веськово, Переславский район, Ярославская область, РФ-152021 Россия, e-mail: bh@schapiro.org.

В. Кое-что о BARM против Ванкеля в качестве двигателей

Двигатель Ванкеля уже давно считается культовым объектом. Действительно, он обладает чем-то ослепительно-гипнотическим. Его тихое вращение, очень малое количество деталей, отсутствие клапанов, удивительно малый вес и неожиданно высокая удельная мощность - все это занимает всех, кто обладает чувством прекрасного и техническим прогрессом. Но на рынке двигатель Ванкеля мертв. Почему?



Рис. 1. Двигатель Ванкеля с открытой крышкой, сфотографированный несколько наискосок. Обратите внимание на контакт уплотнения с внутренней поверхностью камеры слева. Если кривизна боковой стенки в месте контакта положительна, то кривизна в местах контакта двух других элементов уплотнения отрицательна. В местах, где положительная кривизна меняется на отрицательную, центробежная сила резко опрокидывает камеру, и уплотнительная кромка врежется во внутреннюю сторону камеры, как топор. См. фрагмент **е)** в пояснении ниже.

Как обычно, есть объяснения "4 причины, почему роторный двигатель мертв". Двигатель Ванкеля в последний раз был замечен в серийном автомобиле Mazda RX-8, и в настоящее время роторных двигателей в производстве нет. Mazda может вернуть его в RX Vision, однако у роторного двигателя есть много недостатков, которые не позволили ему стать успешным.

а) Роторные двигатели имеют низкий тепловой КПД в результате длинной камеры сгорания и попадания несгоревшего топлива в выхлопную трубу. **б)** Они также имеют проблемы с герметизацией ротора в результате неравномерной температуры в камере сгорания, поскольку сгорание происходит только в одной части двигателя. **в)** Расход масла также является проблемой, поскольку масло впрыскивается для добавления смазки и поддержания герметичности ротора. **г)** Наконец, выбросы в атмосферу плохие, а экономия топлива ужасная, и в конечном итоге это стало причиной его смерти", *GJGzUYCI*, 2016.

Но я вижу главный недостаток машины Ванкеля в **е)** 5th причине: у нее чрезвычайно короткий срок службы. Причина этого явления заключается в том, что центробежная сила, действующая на уплотнение быстро вращающегося ротора, меняет свое направление с внутреннего на внешнее по мере прохождения небольшой выпуклости.

Таким образом, уплотнение ударяет по корпусу машины как топор и разрушает его в 20 раз быстрее, чем поршни разрушают корпус поршневого двигателя. Таким образом, двигатель Ванкеля проходит все 100 000 км в автомобильном применении вместо ожидаемых более 2 000 000 км в известном поршневом соревновании.

Все, что вы знаете о машинах Ванкеля, будет в 1,5 раза лучше для машин BARM, более выгодных и более эффективных. И, следовательно, в 20 раз долговечнее: **е)** У BARM нет изменения знака кривизны, следовательно, нет кипения центробежной силы, нет удара по корпусу, следовательно, нет сокращения срока службы. **д)** Выбросы BARM как машины внутреннего сгорания будут более чем хорошими из-за легко достижимого высокого давления в рабочей камере и, следовательно, высокой температуры горения и, следовательно, хорошей экономии топлива. **в)** Расход масла также будет превосходным благодаря лабиринтной системе распределения масла и поверхностному контакту уплотнения со стенками камеры в отличие от линейно-поверхностного контакта у двигателей Ванкеля. **б)** Распределение температуры в камере сгорания BARM будет значительно менее неравномерным, чем у Ванкеля, благодаря меньшей камере и более высокой удельной мощности. Это вместе с поверхностно-поверхностным уплотнением достаточно хорошо решает проблемы уплотнения. **а)** Наконец, двигатели BARM будут иметь значительно более высокий термический КПД в результате высокого давления и короткой камеры сгорания, что создает хорошие условия для хорошего сгорания топлива и практически чистого выхлопа.

Остается сказать еще одну вещь. Машина Ванкеля с треугольным поршнем Рело не нуждается в клапанах в любом применении. BARMы с двухсторонним поршнем также не нуждаются в клапанах в качестве насосов и компрессоров. Но им нужны клапаны в качестве двигателей внутреннего сгорания.

Во времена открытия трохоидальных геометрий, то есть 100 лет назад, технология клапанов была практически не развита. Поэтому отсутствие клапана стало весомым аргументом для решения Ван-Келя в пользу бесклапанной конструкции.

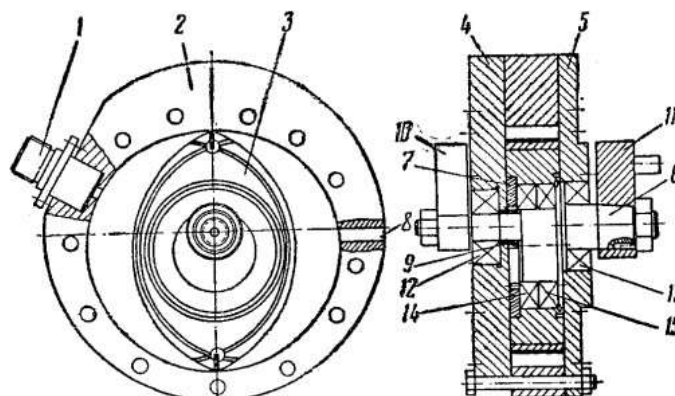
Сегодня технология производства клапанов доведена до совершенства. Следовательно, больше нет никаких аргументов в пользу того, чтобы обойтись без клапанов. Таким образом, нет альтернативы технологии BARM как роторно-поршневой технологии без недостатков для всех областей применения, таких как насосы, компрессоры, двигатели внутреннего и внешнего сгорания на суше, воде и воздухе.

Учитывая, что ограничения по оборотам у BARM в 1,5 раза выше, чем у Ванкеля, я заявляю: все, что вы знаете о машинах Ванкеля, будет в 1,5 раза лучше для машин BARM, выгоднее и эффективнее. И особенно в 20 раз долговечнее.

В. Предшественники BARM

Машина Ванкеля является эпитрохоидальной, BARM также. BARM - это аббревиатура для: **Vi-** Angular Rotation Machines. Форма поперечного сечения вращающегося поршня в виде дугообразной фигуры с двумя углами и дала название машине.

Предшественники BARM хорошо известны с 1920-х годов. До настоящего времени они разрабатывались и применялись только в качестве компрессоров.



Сайт 4 фон 13

Рис. 2. Компрессор, разработанный в Государственном аэрокосмическом университете имени Н. Жуковского "Харьковский авиационный институт" в 1960-х годах и неоднократно внедренный в промышленность. Цитируется по *Сухомлинову Р., 1975.*

Как и все машины с вращающимся поршнем, БАРМ также работают плавно и тихо и имеют высокую удельную мощность. У них высокая удельная мощность, почти в 1,5 раза выше, чем у машины Ванкеля, из-за почти в 1,5 раза большей скорости вращения; у Ванкеля до 20 000 об/мин, у БАРМ до 30 000 об/мин.

Обе они имеют цилиндрическую конструкцию, что упрощает сборку и снижает затраты времени и энергии на производство. Только БАРМы способны работать в дизельном режиме в одной секции, поскольку их наименьший остаточный объем теоретически может быть равен нулю, а объем и расположение отдельной камеры сгорания, необходимой для внутреннего сгорания, совершенно не зависит от трохоидальной геометрии. Таким образом, с помощью БАРМов можно создать практически любую желаемую степень сжатия.

С. БАРМ как машина внутреннего сгорания, краткий обзор

В БАРМ используется геометрия трохоидальной камеры, отличная от классического двигателя Ванкеля. Как и во всех роторно-поршневых машинах, отбор мощности осуществляется через эксцентриковую планетарную передачу. Ключевым элементом здесь является инновационный маятниковый уплотнительный элемент, который уплотняет поршень от поверхности к поверхности со стенками камеры, а не от линии к поверхности, как в классическом двигателе Ванкеля, *Schapiro, B., 2011-2* и *Schapiro, B., 2012-2*.

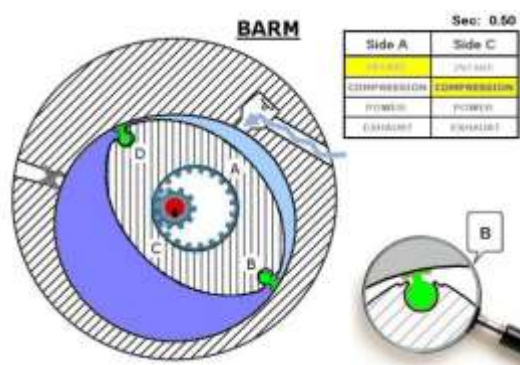


Рис. 3а

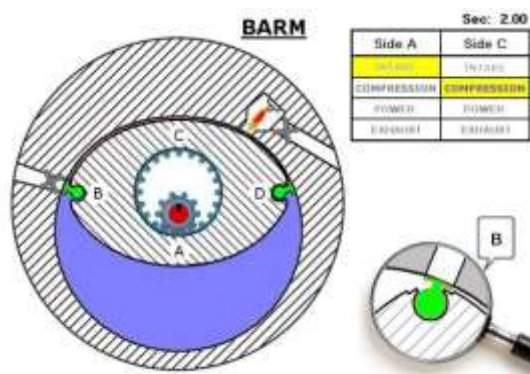


Рис.
3б

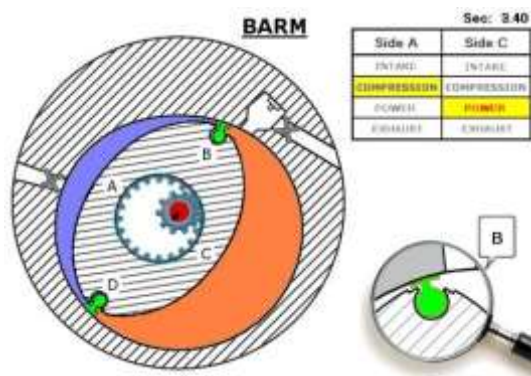


Рис. 3с

Рис. 3а-с. Схема БАРМ как 4-х тактного двигателя. Каждая сторона поршня работает как независимый поршень. Таким образом, один силовой агрегат БАРМ эквивалентен двухпоршневой поршневой машине. Здесь показаны примерные положения поршней. Конструкция БАРМ с двумя поршнями, приводящими в движение один приводной вал, создает двигатель, эквивалентный четырехцилиндровому поршневому двигателю. Каждый цикл БАРМ в комбинации из двух агрегатов - это цикл мощности, непрерывно передающий крутящий момент на приводной вал.

Контур камеры здесь не круглый, а скорее трохлоидный, алгебраическая фигура порядка 4th. БАРМы - это машины объемного вытеснения, способные применяться во всех соответствующих областях. Я ожидаю, что их особые преимущества будут очевидны при использовании в качестве экологически чистых, высокоэффективных двигателей внутреннего сгорания, расширителей диапазона для электромобилей, генераторов энергии в чрезвычайных ситуациях, компрессоров, термосолнечных и геотермальных двигателей и машин для использования высоко- и среднетемпературного выхлопного тепла всех видов.

Как показывает наш термодинамический анализ, использование БАРМ позволяет более эффективно производить и использовать энергию, чем это возможно с классическим двигателем Ванкеля, тем самым экономя электроэнергию. Давайте рассмотрим сравнение поршневых двигателей и двигателей БАРМ, оба в дизельном исполнении.

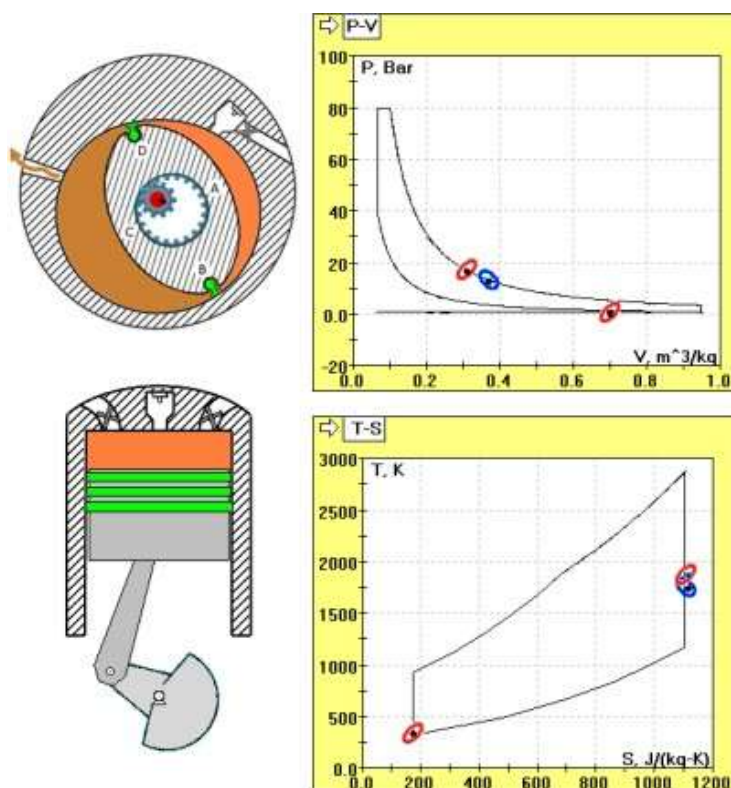


Рис. 4а

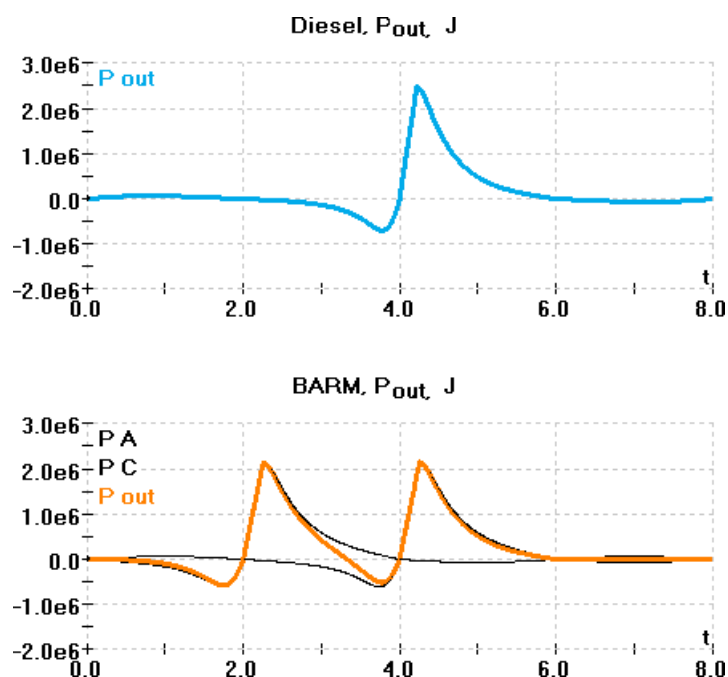


Рис.
4b

На рис. 4a-b показано термодинамическое моделирование, аппроксимирующее недеформируемые поршень и корпус, а также рабочую среду без вязкости. Синяя точка и синие кривые соответствуют поршневой машине, а красная - БАРМ. Рабочий цикл находится на стороне А как БАРМ, так и поршня с возвратно-поступательным движением. Точки в красных, наклоненных вправо овалах на диаграмме состояния отмечают термодинамическое состояние на сторонах А и С поршня БАРМ. Сопутствующее состояние обозначено точкой в левом синем овале для поршня с возвратно-поступательным движением.

В этой симуляции обе машины - поршневая и БАРМ - работают на дизельном топливе. Они имеют одинаковый рабочий объем, одинаковое давление в начале и конце цикла, одинаковую продолжительность цикла, "сжигают" одинаковое количество топлива за цикл и со стороны поршня и, конечно же, обеспечивают одинаковую энергоэффективность в этих условиях, а именно 56%.

В этих условиях БАРМ обеспечивает почти вдвое большую мощность за цикл по сравнению с поршневым двигателем, поскольку работают обе стороны его поршня. Важно отметить, что в кинематографических условиях поршень БАРМ может вращаться почти в 4 раза быстрее, чем коленчатый вал поршневой машины при прочих равных условиях.

Если бы это моделирование соответствовало реальности, то увеличение плотности мощности в 8 раз ($2 \times 4 = 8$) можно было бы теоретически ожидать. Я думаю, что двигатели внутреннего сгорания БАРМ будут иметь фактически в три, а иногда и в пять раз большую удельную мощность, чем поршневые двигатели с тем же рабочим объемом. Таким образом, я ожидаю, что двигатель БАРМ может достичь эквивалентной производительности и такого же качества выхлопных газов, как поршневой двигатель, но при этом его размеры и вес будут на 20% - 30% меньше!

Материал для двигателей, а также энергия для производства также сохраняются благодаря высокой удельной мощности БАРМ. Существует достаточное количество термостойких и устойчивых к давлению материалов, таких как металлокерамика, карбид кремния и другие керамические материалы, чтобы выдерживать высокие температуры камеры сгорания, *Kriegesmann, J., 2005*.

На диаграмме состояний Рис. 4а синяя точка проходит оранжевую точку, а затем оранжевая проходит синюю, таким образом, они завершают каждый цикл за одно и то же время.

График на рис. 4б показывает сравнение смоделированной производительности с течением времени, синим цветом для дизельного поршневого двигателя и оранжевым для БАРМ. В определенные моменты производительность отрицательна, поскольку машины используют энергию для перемещения поршней и сжатия воздуха. Значительно больше энергии выигрывается; однако, поскольку при горении высвобождается запасенная химическая энергия

и оба двигателя преобразуют эту энергию в полезную мощность, приводя в движение приводной или коленчатый вал соответственно.

Выбросы CO₂ двигателя внутреннего сгорания BARM будут в том же диапазоне, что и у поршневых двигателей, и значительно меньше, чем у двигателя Ванкеля, благодаря более высокому КПД BARM.

Проблема с выбросами NO_x такая же, как и для поршневых двигателей.

Конкурирующие технологии. На этой арене конкурируют как поршневые двигатели с их эффективностью, так и классические двигатели Ванкеля с их удельной мощностью. BARM и другие вращающиеся поршневые двигатели предлагают те же преимущества в диапазоне мощности от 2 кВт до 10 МВт и, таким образом, имеют конкурентное преимущество на технологическом и промышленном рынках.

BARM не конкурирует с газовыми турбинами, поскольку турбины обычно высокоэффективны в диапазонах мощности свыше 10 МВт.

Д. BARM-Использование в качестве тепловых двигателей, машины внешнего сгорания

Тепловые двигатели с циклически регенерируемой рабочей средой, или машины внешнего сгорания, не используют химически накопленную энергию внутри для производства механической энергии. Они используют внешнюю разницу температур, отсюда и название "машина внешнего сгорания". Они производят механическую энергию путем передачи тепла от горячего участка к холодному таким образом, что часть тепла может производить полезную механическую энергию. В таких машинах используется рабочая среда, обычно газообразная, которая циркулирует взад и вперед между нагревателем и охладителем.

Мы хотим использовать BARMы в качестве тепловых двигателей не только для улавливания и использования отработанного тепла в промышленности и муниципалитетах, но и для производства электроэнергии с использованием бесплатных природных источников энергии, особенно термосолнечных.

D1. Общие замечания по утилизации тепла

Одним из наиболее перспективных направлений использования машин BARM является преобразование тепла в механическую энергию. То есть, везде, где есть источник тепла с рабочей средой в диапазоне 400

°C и 1 200 °C достаточной мощности для получения от 10 кВт до 10 МВт тепловой энергии.

Это включает в себя широкий спектр промышленных источников отработанного тепла, таких как отработанный пар и выхлопные газы, сжигание горючих отработанных газов, а также сфокусированное солнечное тепло и тепловая мощность геотермальных источников. По нашим приблизительным оценкам, общий годовой потенциал всех промышленных и муниципальных отходов тепла составляет около 1 000 000 ГВт-ч, что составляет примерно одну четвертую часть сегодняшних мировых потребностей в энергии.

В настоящее время не существует технических стандартов с удовлетворительной эффективностью для использования тепла, доступного из этих источников.

Высокоэффективная турбинная технология выгодна только в диапазоне мощности в несколько мегаватт. В настоящее время лучшей альтернативой для утилизации тепла в диапазоне малых и средних мощностей является двигатель Стирлинга. Поэтому мы

хотим конкурировать с двигателем Стирлинга.

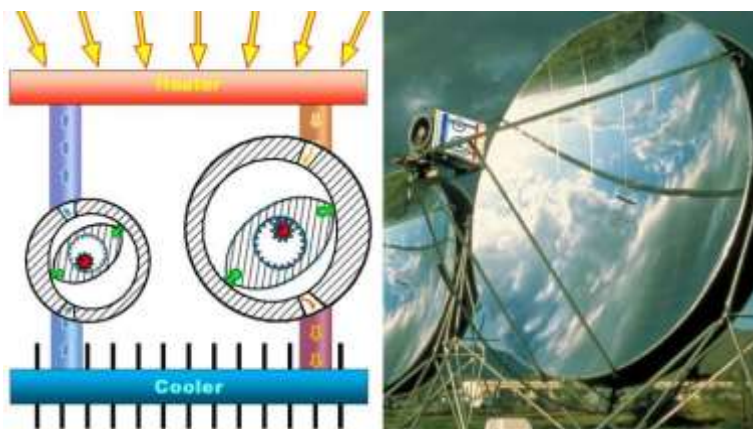


Рис. 5. Большая машина справа на эскизе - это экспандер, то есть двигатель. Маленькая машина слева - компрессор. Рабочей средой может быть гелий, например, или другая среда. Обе машины расположены так, что их силовые валы вращаются с одинаковой скоростью. Таким образом, и двигатель, и компрессор могут быть установлены на одном валу, который также приводит в движение генератор и охлаждающий вентилятор. При такой компоновке машина практически имеет только одну движущуюся часть сложной формы, а именно два поршня, постоянно соединенных с одним силовым валом.

D2. Стирлинг и другие идеальные циклические процессы

Общеизвестно, что ни один тепловой двигатель не может превзойти эффективность машины Карно, воплощающей идеальный циклический процесс Карно.

Менее известно, что ряд других термодинамических циклических процессов может иметь такой же коэффициент полезного действия η , как и процесс Карно при идеальных условиях. К ним относятся, в частности, циклический процесс Стирлинга и, при некоторых специфических условиях, процесс Ренкина с $\eta_{ideal} = (T_{театр} - T_{кулер}) / T_{театр} = 1 - T_{кулер} / T_{театр}$.

Но не многие знают, что и двигатель Карно, и эквивалентный ему двигатель Стирлинга работают при максимальном КПД с нулевой мощностью. Поэтому важен не самый высокий КПД сам по себе, а КПД при максимальной мощности. В нашем случае он будет задан с помощью процесса Брейтона-Джоуля (B-J), $\eta_{B-J} = [1 - \sqrt{(T_{кулер} / T_{театр})}]$.

Поэтому я сосредоточусь в первую очередь на процессе Брейтона-Джоуля. Я покажу, что как предшественник нашего де- знака, он лучше всего подходит для нашего проекта по техническим и экономическим причинам. При нынешнем техническом прогрессе процессы Ренкина и Брейтона-Джоуля реализуются с помощью турбин, которые демонстрируют приемлемый КПД только в диапазоне нескольких мегаватт. До сих пор процесс Стирлинга был единственным, использующим принцип объемного вытеснения и реализованным с помощью поршневого двигателя с возвратно-поступательным движением.

Эффективность реального двигателя Стирлинга зависит от того, насколько близко реальный процесс может быть приближен к идеальному. То же самое, конечно, справедливо и для других циклических процессов, это также справедливо и для нашей модификации процесса Брейтона-Джоуля - Schapiro, B., Dunin, S., 2013.

D3. БАРМ в сравнении с двигателем Стирлинга

Тепловой двигатель объемного вытеснения БАРМ реализует новый циклический процесс, разработанный нами совместно с профессором Сергеем Дуниным. Он наиболее тесно связан с циклическим процессом Брейтона-Джоуля.

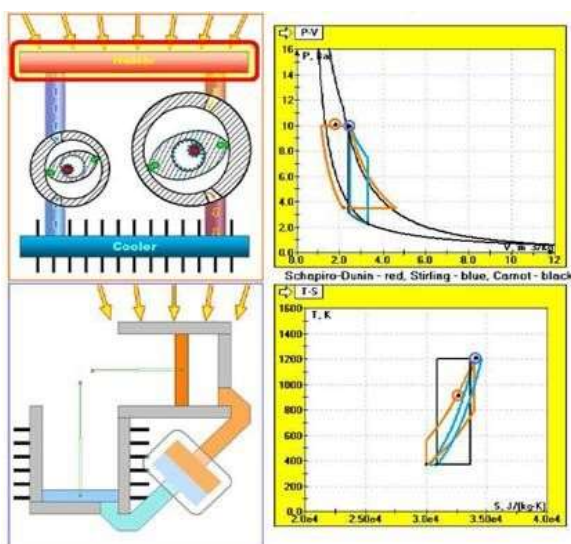
Даже в идеальном представлении тепловой двигатель БАРМ не достигает идеального коэффициента полезного действия Карно. Но с каких пор наш мир идеален? Только

наши любимые жены!

Таким образом, будущее ВАРМ и двигателя Стирлинга как тепловых двигателей полностью зависит от того, насколько техническая реализация сможет минимизировать отклонение от идеала. В этом отношении эс-

В частности, мы считаем BARM конкурентоспособным по сравнению с двигателем Стирлинга по следующим причинам:

- BARM имеет значительно более высокую удельную мощность, чем поршневой двигатель Стирлинга. Следовательно, его компактная архитектура.
- Имея значительно меньшее количество движущихся частей, BARM должен быть не только меньше, легче и экономичнее в производстве, но и гораздо надежнее, чем двигатель Стирлинга.
- В то время как мы ожидаем очень похожие потери на трение в рабочей камере и каналах обоих двигателей, мы ожидаем значительно меньшие потери на трение в механике силового вала и подшипников.
- И самое главное - в реальных условиях, то есть с регенератором тепла, БАРМы будут иметь более высокий КПД, чем двигатели Стирлинга при той же максимальной мощности.



На рис. 6 показано термодинамическое сравнение между практически идеализированным (хотя и не идеальным без регенератора тепла) двигателем Стирлинга и лишь слегка идеализированным BARM.

Очевидна более высокая эффективность BARM. Конечно, мы исследовали это сравнение во всем соответствующем спектре мощности. Результаты здесь не показаны, потому что сравнение действительно имеет смысл только при наличии регенератора тепла, то есть теплообменника.

D4. Роль регенератора и теплообменника, соответственно

Сравнение на рис. 6 было проведено без использования регенератора для обоих двигателей.

Идея регенератора заключается в отделении теплового пути от массы рабочей среды. С помощью теплообменника можно вернуть часть тепла, оставшегося после фазы мощности, в рабочую среду после фазы охлаждения. Таким образом, термодинамические потери из-за необратимого охлаждения могут быть сведены к минимуму.

Однако необратимые потери в двигателе Стирлинга, по-видимому, больше, чем в тепловом двигателе BARM. Это связано с типичным КПД теплового регенератора двигателя Стирлинга, который обычно находится в диапазоне 60%, *Femme, П., 2012*. Коэффициент полезного действия промышленных теплообменников, которые могут использоваться с BARM, составляет приблизительно 95%, *Jüttemann, Н., 2001*. Поэтому

мы ожидаем, что в реальности БАРМ с теплообменниками превзойдут почти совершенные сегодня двигатели Стирлинга. Соотношение коэффициентов общей эффективности обеих машин, конечно же, будет зависеть от выходной нагрузки.

Сравнение общей эффективности проводится при термодинамически равных условиях. Рабочей средой в обоих двигателях является He_2 массой 100 г, максимальные объемы рабочих камер равны, как и максимальная и минимальная температуры, 1 200 °К и 400 °К соответственно. Для моделирования мы приняли завышенный коэффициент полезного действия 70% (синие кружки) для теплового КПД регенератора тепла двигателя Стирлинга и 90% (красные квадраты) для теплообменника БАРМ. Потери из-за механического трения и вязкости рабочей среды не были учтены ни для одного из двигателей.

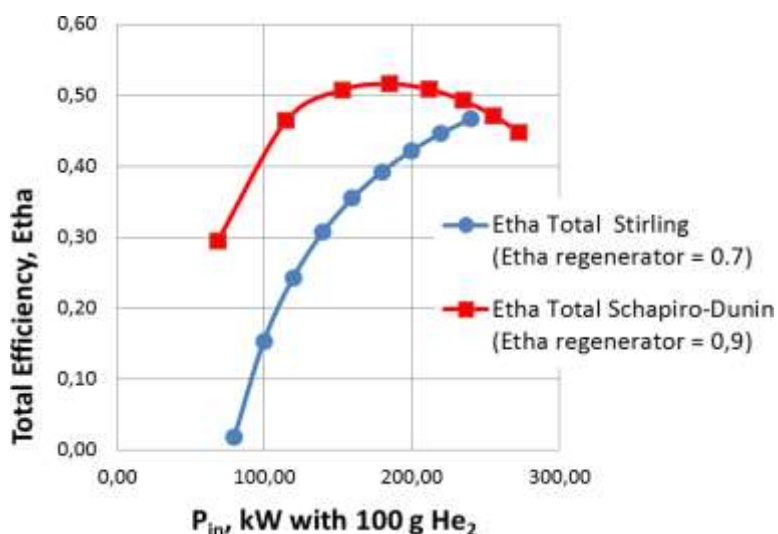


Рис. 7. Смоделированный на компьютере общий коэффициент полезного действия η двигателя Стирлинга в сравнении с БАРМ, с тепловой мощностью P_{in} в кВт, преувеличенным коэффициентом полезного действия 70% для регенератора тепла двигателя Стирлинга (синие кружки) и 90% (красные квадраты) для теплообменника БАРМ, одинаковыми 100 г He_2 в качестве рабочей среды для обоих двигателей, максимальной температурой 1 200 °К и минимальной 400 °К.

Концы кривых на рис. 7 справа и слева от графика отмечают положение, при котором термодинамическая утилизация больше невозможна. КПД двигателя Стирлинга монотонно возрастает до достижения максимального значения, в этот момент рабочая среда больше не может принимать тепло и термодинамическая функция разрушается.

Общий коэффициент полезного действия БАРМ с теплообменником, имеющим КПД 90%, достигает максимального значения 52% при потребляемой энергии около 180 кВт. Это примерно на 12% больше, чем общий КПД идеализированного двигателя Стирлинга и примерно на 18% лучше, чем общий КПД лучшего из используемых в настоящее время двигателей Стирлинга, а именно 34%. В настоящее время существуют две демонстрационные модели БАРМ, но нет ни одного практически испытанного прототипа.

Если есть интерес к приложениям с меньшей мощностью, например, для децентрализованного энергоснабжения, можно уменьшить массу рабочей среды. Таким образом, можно достичь примерно такой же общей эффективности БАРМ, используя 1 г He_2 и энергию 1,8 кВт, что теоретически приведет к 1 кВт энергии на выходе. Особый интерес представляет уравнение состояния БАРМ, в результате которого максимальное давление составляет 10 бар, а минимальное - 3,8 бар. Это должно привести к повышению надежности и увеличению срока службы двигателя. То же самое, конечно, относится и к двигателю Стирлинга. Благодаря все еще действующему закону Бойля и Мариотта, можно минимизировать ди- пенсии обеих машин обратно пропорционально желаемому давлению.

Конкурирующие технологии. Двигатели Стирлинга являются одной из технологий, конкурирующих за использование солнечной энергии и рекуперацию тепла. На рис. 5

показан тарельчатый двигатель Стирлинга, являющийся частью пилотного проекта фирмы SOLO в Испании. Мы вставили схему нашего БАРМ, чтобы показать его потенциал. Американская компания Stirling Energy Systems в 2008 году достигла мирового рекорда эффективности для двигателей Стирлинга - 31,25%. Тем не менее, в 2011 году она была вынуждена объявить о банкротстве.

Реферат: Использование в качестве термосолнечных электростанций и для рекуперации тепла

- Мы считаем, что BARM могут быть успешными в коммерческом использовании тепла в диапазоне средних температур, например, в утилизации тепла промышленных отходов и геотермальных электростанциях.
- Двигатели Стирлинга лучше, чем BARM в диапазоне низких температур. Однако коммерческий потенциал в этом диапазоне недостаточен, чтобы оправдать большие усилия в этой области, за исключением, возможно, хобби.
- Мы ожидаем явной победы BARMов в высокотемпературном диапазоне, особенно при использовании термосолнечных электростанций.

Примечание: Солнечные батареи

Мы не рассматриваем и не сравниваем здесь BARM внешнего сгорания с солнечными батареями, потому что BARM внешнего сгорания работает от теплового потока, в то время как солнечные батареи работают от солнечных лучей, особенно от высокоэнергетической (высокочастотной) их части.

Е. Синописис

После интенсивного и всестороннего исследования мы пришли к следующим выводам:

Е1. Машины внешнего сгорания, например, для производства термосолнечной энергии

- E1.a Как трохойдальная машина с вращающимся поршнем, преимущества BARM заключаются в более высокой плотности мощности при одновременных меньших размерах и значительно меньшем весе. Высокая скорость вращения BARM означает, что плотность мощности ограничена только скоростью повышения температуры и вязкостью рабочей среды.
- E1.b В отличие от хорошо известного двигателя Ванкеля, трохойдные BARM будут иметь очень долгий срок службы. Причины этого описаны в разделе **В.е**).
- E1.c Бармы с теплообменниками особенно интересны в диапазоне высоких температур около 1 000 °C, где они могут достичь такого же КПД - чуть более 40% (оптимистичная оценка: до 45%) - как и другие двигатели объемного вытеснения в реальных условиях.
- E1.d BARM внешнего сгорания получает небольшое преимущество в эффективности за счет того, что в исходном положении поршень BARM открывает серповидный рабочий объем медленнее, чем поршень возвратно-поступательного движения (оба сравниваются в точке минимального объема). По сравнению с другими распространенными геометриями, это удлиняет фазу изохорического повышения давления, тем самым немного повышая эффективность.
- E1.e Еще одним преимуществом является простая конструкция BARM, которая, наряду с меньшим весом, обещает снижение производственных затрат и более длительный срок службы.

Ожидание того, что BARMы внешнего сгорания дадут лишь немного более высокий КПД, чем другие машины объемного вытеснения, связано с тем, что теория предсказывает куполообразную зависимость КПД от отношения давлений с максимумом в диапазоне P_{\max} / P_{\min} от 8 до 10 для более мощной высокотемпературной версии. Таким образом, реальная сила двигателей объемного вытеснения, а именно их способность создавать большие перепады давления, не может способствовать

повышению эффективности в термосолнечных приложениях. Тем не менее, БАРМ могут внести значительный вклад в повышение плотности мощности, а также в снижение производственных затрат.

Е2. Двигатели внутреннего сгорания для моторизованного производства энергии

Как двигатели внутреннего сгорания, БАРМ могут, в принципе, актуализировать любой известный циклический процесс. Особенно привлекательными являются циклы Дизеля или Аткинсона. Мы считаем, что внутренние

Сгорающие БАРМ предлагают наиболее выгодное сочетание высокой плотности мощности, хорошего КПД, низкого уровня шума и доступной стоимости производства.

Е2.а Высокая удельная мощность характерна для всех трохоидных вращающихся поршневых двигателей. Высокая скорость вращения является наиболее известным преимуществом двигателя Ванкеля с результирующей плотностью мощности. То же самое в полной мере относится и к БАРМ.

Е2.б БАРМы будут иметь очень долгий срок службы. Принципиальное отличие от двигателя Wan- kel заключается в длительном сроке службы БАРМов.

Короткий срок службы двигателя Ванкеля не вызван, как многие считают, износом уплотнительных манжет. Уплотнительные кромки - это расходные детали, которые легко регулярно заменяются. Короткий срок службы обусловлен в первую очередь повреждением внутренней части камеры, вызванным неизбежным резонансом уплотнительных манжет из-за высокой частоты вращения и опрокидывания вектора центробежной силы.

Основная геометрическая причина воздействия уплотнительной кромки на стенку камеры связана с внутренним контуром камеры двигателя Ванкеля, который имеет как выпуклые, так и вогнутые (или, по крайней мере, не вогнутые) участки. Сильные центробежные силы действуют на уплотнительные кромки, когда они очень быстро соскальзывают с контура. Эти силы меняют свое направление при переходе от вогнутого к выпуклому участку и снова от выпуклого к вогнутому. Изменение направления центробежной силы, усиленное резонансом, пробивает глубокие канавки во внутренней стенке рабочей камеры. Эти канавки выглядят так, как будто их прорубили топором.

Это повреждение стенки внутренней камеры является истинной причиной короткого срока службы двигателя Ванкеля. Двигатель Ванкеля RX компании Mazda установил мировой рекорд - около 150 000 километров пробега на испытательном стенде. Срок службы хорошего поршневого дизельного двигателя Mercedes или Peugeot превышает 2 000 000 километров пробега.

Стенка внутренней камеры двигателя БАРМ в поперечном сечении очень близка к кругу, то есть только вогнута, и кривизна камеры меняется мало-помалу, только постепенно и минимально. Таким образом, изменение направления или быстрое изменение центробежной силы уплотнительной кромки не может произойти, и повреждение стенки внутренней камеры а-ля Ванкель никогда не является проблемой.

Поэтому мы ожидаем, что БАРМ будут иметь длительный срок службы, конечно, не меньший, чем у классических поршневых двигателей.

Е2.с Мы объясняем хорошую эффективность БАРМов как двигателей внутреннего сгорания с объемным вытеснением тем, что зависимость их КПД как от разности температур $\Delta T/T_{\text{Burn}}$, так и от отношения давлений $P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$ (а также степени сжатия) всегда монотонно возрастает. Таким образом, объемные двигатели могут реально использовать свою сильную сторону, а именно способность создавать большие перепады давления, для повышения эффективности.

При температуре горения 2 000 °C, температуре выхлопных газов 550 °C и коэффициенте сжатия 24:1 дизельные БАРМ теоретически могут обеспечить КПД при полной нагрузке около 60%, без учета возможного увеличения, например, с помощью турбокомпрессора или других устройств. Ожидаемое отношение мощности к массе будет менее 1,0 кг/кВт (для сравнения:

двигатели Отто 2-5 кг/кВт, дизельные двигатели 5-6 кг/кВт).

E2.d Мы объясняем низкий уровень шума отсутствием в конструкции поршневых штоков и коленчатого вала, которые являются основным фактором, способствующим повышению уровня шума, производимого поршневыми двигателями. Кроме того, напряжения, создающие шум в двигателе, в большинстве случаев могут

частично компенсируются центрально-симметричным расположением рабочих узлов, как показано на рисунке, *Schapiro B., 2011-2.*

E2.e Мы ожидаем доступную стоимость производства, в частности, благодаря повышенной плотности мощности (меньше материала на киловатт мощности) и результирующему соотношению мощности и веса от 0,5 до 1,0 кг/кВт, а также меньшему количеству деталей и удобной для производства конструкции цилиндра, аналогичной двигателю Ванкеля.

E2.f Из-за всех этих характеристик мы считаем, что БАРМ особенно подходят для двигателей легких самолетов, вертолетов малой и средней массы и беспилотников, среди прочих.

Е3. Экономические и политические аспекты

БАРМ обеспечивает потенциал для настоящего энергетического перехода как в качестве машины внутреннего сгорания, обеспечивающей высокую плотность мощности при том же КПД, что и поршневые двигатели, так и в качестве машины внешнего сгорания с более высоким КПД и плотностью мощности, чем у двигателей Стирлинга.

Технология BARM может быть развернута где угодно, обеспечивая децентрализованное и диверсифицированное производство энергии мощностью от 10 до 30 кВт в соответствии с реальными потребностями и местами, где она фактически используется. Это можно реализовать благодаря малому весу, недорогому производству и малым размерам двигателей BARM. Если бы двигатель BARM работал на каждом здании и на каждом промышленном объекте, можно было бы говорить об устойчивом и не только кажущемся "беззатратном" ~~производстве~~ производстве энергии.

Расходы на "устойчивый" энергетический переход в смысле EEG облагают налогом даже успешные и про- дуктивные экономики (EEG, Erneuerbare-Energien-Gesetz = Закон о возобновляемых источниках энергии). Немецкая система управления энергией в любом случае не подходит для использования во всем мире. Технология BARM была бы эффективна во всем мире: использование двигателей BARM вместо устаревших дизельных генераторов - это ресурсосбережение и устойчивое производство энергии.

Политический потенциал технологии BARM:

- Конверсия энергетической экономики. Разница между экономической и политической ценой энергии демонстрирует тревожные аберрации. На бирже киловатт-час стоит 3,8 цента сегодня. Для нас, мелких конечных пользователей, это стоит 28,6 цента.
- Избежать ожидаемых финансовых затрат на переход к якобы "беззатратной" энергии, которые уже ложатся бременем на всю нашу экономику и каждого человека. К ним относятся расходы на утилизацию ядерных отходов, разобранных реакторов и строительство новых мегаконвейеров для транспортировки электроэнергии.
- Избежать политических издержек, которые можно ожидать при реализации мегакондуитов вопреки протестам непосредственно затронутых местных жителей, с помощью новой философии распределения.
- Облегчить общую политическую ситуацию, уменьшив страх перед централизованным всемогуществом энергетических концернов и политическим бессилием государственных органов в энергетическом секторе. Вместо этого укрепляйте доверие и солидарность населения, наделяя местные органы власти ответственностью за собственное производство энергии.
- Предотвратить возникновение крайних худших случаев с индивидуально

настроенными объектами по производству энергии для малых предприятий-потребителей.

Внедрение действительно новой технологии, такой как технология BARM, может вызвать, наконец, крайне необходимые инновации в энергетической экономике. BARM позволяет преобразовать слишком дорогую, слишком сложную и, следовательно, неуправляемую, подверженную сбоям систему производства энергии в технически легко управляемую, простую и экономичную систему производства энергии.

Ф. Спасибо

От всей души и с увлечением благодарю моего друга и коллегу проф. Сергея Дунина, Москва, Российская Федерация, за его постоянный интерес и соавторство в важных аспектах моей работы.

Я искренне благодарю доктора Андреаса Лесона, Дрезден, Германия, и доктора Эдгара Фелкла, Остин, Техас, США, за их многолетнюю поддержку.

Профессору д-ру Льву Бритвину и д-ру Ивану Пятову, Москва, Российская Федерация, я выражаю огромную благодарность за их постоянную поддержку, а также за их терпеливые и ценные советы.

Д-ра Игоря Седунова, Санкт-Петербург, Российская Федерация, я благодарю за постоянное внимание к моей работе.

Моей жене, Хелле, я выражаю глубокую и искреннюю благодарность за то, что она не только терпит мою работу, но и активно поддерживает ее по мере сил.

Г. Ссылки

Fette, P., 2012, *Über den Energieaustausch und die Effektivität des Regenerators in der Stirlingmaschine...*, <http://www.stirling-fette.de/dtatherm.htm>

GJGzUYCI, 2016, *4 причины*, <https://www.youtube.com/watch?v=v3uGJGzUYCI>

Jüttemann, H., 2001, *Wärme- und Kälterückgewinnung*, Werner Verlag, Düsseldorf 2001

Kriegesmann, J., 2005 (Hrsg.): *DKG - Technische Keramische Werkstoffe*, HvB-Verlag, Ellerau 2005

Пятов, И., 2010, Объемно-размещающие детандеры, Презентация на ICSAT 2010, 26 февраля, 2010, 2-я Международная конференция по устойчивым автомобильным технологиям, 23 - 26 февраля, 2010, Университет прикладных наук, Ингольштадт, Германия

Пятов, И., Шапиро, Б., 2010, *Объемно-размещающие детандеры*, <http://www.rkm-schapiro.org/docs/Pyatov-Schapiro%20Volume-Displacing%20Detanders%20EN%20100218.pdf>

Шапиро, Б., 2011-1, *Rotationskolben-Verbrennungsmotor*, DE 10 2011 001 752.6, Патент в ожидании, 2011

Шапиро, Б., 2011-2, *Двуугольный двигатель Ванкеля*, Материалы ICSAT 2011, 3rd Международной конференции по устойчивым автомобильным технологиям, 4 - 6 апреля, 2011, CU- ICAR, Университет Клемсона, Гринвилл, SC, США, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

Шапиро, Б., 2012-1, *БАРМ: Машина би-углового вращения как машина внешнего сгорания*, DE 10 2012 006 419.5, Патент заявлен, 2012 г.

Шапиро, Б., 2012-2, *БАРМ: Bi Angular Rotation Machine*, Proceeding of ICSAT 2012, the 4th ICSAT, International Conference on Sustainable Automotive Technologies, 21 - 23 March, 2012, Melbourne, Australia, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.

Шапиро, Б., Дунин, С., 2013, *БАРМ: Двухугольная машина вращения как внешняя юбчирная машина*, Труды 5-й ICSAT, Международной конференции по устойчивым автомобильным технологиям, 25 - 27 сентября 2013 г., Ингольштадт, Германия, издательство Springer, 2013 г.

Сухомлинов, Р. 1975, *Трохоидальные ротор-компрессоры (рус.): Трохоидные роторные*

компрессоры

компрессоры), Verlag Vishcha Schkola, Kharkov Staatsuniversität, Kharkov 1975

Список иллюстраций в Интернете:

БАРМ Двигатель внутреннего сгорания:

БАРМ Базовая модель

<http://www.youtube.com/watch?v=LKN383NG-GI>

БАРМ почти без вибраций

<http://www.youtube.com/watch?v=h0PBrjkfsb8>

Термодинамика БАРМ vs Back and Forth Diesel Version, идентичный КПД.

http://www.youtube.com/watch?v=Z2_2pNU1nK4

БАРМ Двигатель внешнего сгорания:

БАРМ Шапиро Дунин Цикл

<http://www.youtube.com/watch?v=iDV0KKbCQ-s>

Термодинамика Шапиро Дунин без теплообменника

<http://www.youtube.com/watch?v=UuT2o9QLLjE>

Термодинамика Цикл Стирлинга без рекуперации тепла

<http://www.youtube.com/watch?v=oz7-NWhVpe0>

Термодинамика Стирлинг vs Шапиро Дунин оба без рекуперации тепла

<http://www.youtube.com/watch?v=Xu79Cce3Ji8>

Велосипед БАРМ Schapiro Dunin с фотографией

<http://www.youtube.com/watch?v=xAXAmiUbyUU>