

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСШАТУННОГО СИЛОВОГО МЕХАНИЗМА В ДВС

ИСТОРИЧЕСКИЙ И КОНСТРУКТИВНЫЙ АНАЛИЗ

Андрей Олегович Миллер, ведущий специалист
Государственного университета аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

Силовой механизм (СМ) ДВС обеспечивает преобразование возвратно-поступательного движения поршня во вращение вала. К СМ ДВС предъявляются следующие требования:

1. Закон движения поршня СМ должен обеспечивать наиболее эффективное протекание рабочего процесса.
2. Высокая нагрузочная способность СМ при минимально возможной массе и размерах.
3. Высокий механический КПД при необходимых динамических нагрузках и скоростях перемещения деталей СМ.
4. Приемлемый ресурс при необходимых динамических нагрузках и скоростях перемещения деталей СМ.
5. Минимальный уровень вибрации при необходимых динамических нагрузках и скоростях перемещения деталей СМ.
6. Приспособленность конструкции, материалов и технологии изготовления деталей СМ для серийного производства.

По опубликованным данным испытаний опытных двигателей и результатам современного моделирования бесшатунный силовой механизм (БСМ) в большей степени удовлетворяет перечисленным требованиям, чем кривошипно-шатунный механизм (КШМ) [1, 2, 3].

Основные отличия БСМ от КШМ заключаются в следующем:

1. В отсутствие шатуна поршень БСМ крепится на шток, который не имеет углового перемещения по отношению к оси цилиндра. Данное обстоятельство позволяет обеспечить более прямолинейное движение поршня в зоне поршневых колец и избежать соприкосновения стенок поршня и цилиндра.

2. Радиус кривошипа БСМ равен радиусу кривошипа коленчатого вала (КВ) БСМ, поэтому перемещение поршня БСМ происходит по синусоидальному закону.

Первый в мире ДВС с БСМ появился в виде ротативного (неподвижный КВ и вращающийся картер с цилиндрами) авиационного двигателя "Burler" [4]. В двигателе "Burler" вместо КВ неподвижными были кривошипы, а БСМ синхронизировался вращающимся картером.

Для создания двигателя с неподвижным картером и цилиндрами необходимо было обеспечить синхронизацию вращающихся кривошипов БСМ.

Советский конструктор Сергей Степанович Баландин (рис. 1) предложил использовать для этого соединительный вал с зубчатыми передачами (Авторское свидетельство СССР № 118471) [1].

В отличие от многих вариантов СМ и БСМ, предлагаемых изобретателями, в БСМ Баландина зацепления зубчатых передач не находятся на пути давления газов от поршней к выходному валу, а мощность на соединительный вал передаётся в виде крутящего момента от зубчатых колёс, расположенных на кривошипах (рис. 2).

Это определило высокий ресурс и работоспособность зубчатых передач, надёжность и высокую эффективность БСМ двигателя Баландина с соединительным валом.

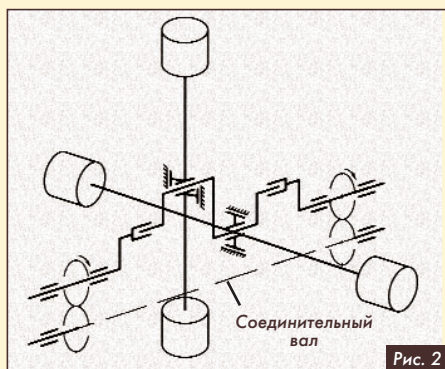


Рис. 2



Рис. 1 С.С. Баландин

Сравнение опытного бесшатунного двигателя ОМБ (рис. 3) и серийного двигателя М-11А с одинаковыми деталями цилиндروпоршневой группы (ЦПГ) было проведено во время 50-часовых сравнительных испытаний в одинаковых условиях, на одинаковом топливе и на одинаковых оборотах - 1580 об/мин. Это позволило достаточно объективно их сравнить.

Серийный двигатель М-11А показал механический КПД - 0,845, а опытный двигатель ОМБ - 0,932 [1]. "По сравнению с М-11А ОМБ имел меньший удельный расход топлива, был менее теплонапряженным и мог работать на бензине более низкого качества, но имел больший вес при меньшей мощности" [5].

Преимущество в удельной массе двигателя М-11А объясняется тем, что шатунная шейка КВ КШМ перемещается по окружности. С помощью прицепных шатунов на одну шейку КВ КШМ можно установить намного больше поршней, чем в бесшатунных ДВС, где штоковая шейка КВ перемещается прямолинейно вдоль оси цилиндра и на одну шейку возможно крепление только двух поршней со штоками. Поэтому в ОМБ для размещения четырёх поршней понадобилось сделать КВ с двумя шейками (рис. 3). В двигателе М-11А на одну шейку КВ установлено 5 поршней. Таким преимуществом обладают звездообразные ДВС с КШМ, где на одну шейку КВ может устанавливаться до 9 поршней.

Но в двигателях с БСМ появляется возможность использования цилиндров двойного действия, с камерами сгорания по обе стороны поршня (рис. 4). Удельная масса такого мотора получается меньше, чем у многоцилиндровых ДВС с КШМ, так как поршень БСМ в цилиндре двойного действия использует для рабочего хода одно и то же пространство цилиндра. Благодаря этому могут создаваться очень мощные (до 24 000 л.с. при 2650...2800 об/мин.) поршневые двигатели внутреннего сгорания с удельной массой до 0,25 кг/л.с.

Эти возможности в значительной степени были использованы С.С. Баландиным при создании мощных авиационных двигателей, в которых нуждалась наша страна в годы Великой отечественной войны [1, 5].

Деятельность группы учёных и конструкторов, в которой принимал участие автор статьи, наоборот, сводилась к созданию относительно простых бесшатунных ДВС с малым числом цилиндров (2 или 4), конструкция которых допускает их крупносерийное производ-

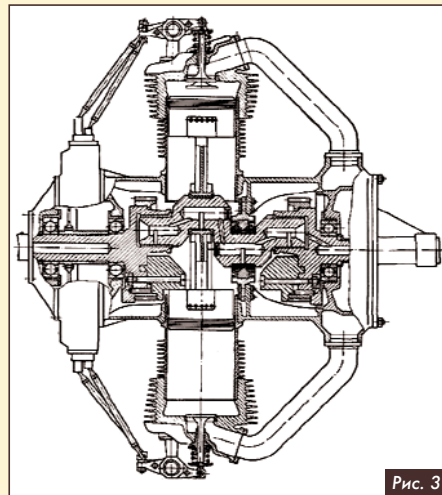


Рис. 3

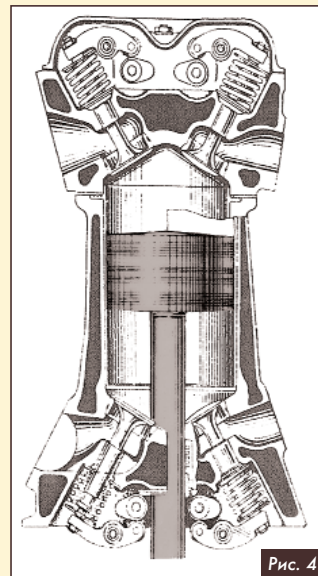


Рис. 4

ство и применение на всех видах транспорта и распределённой энергетики.

При этом для решения экономических и экологических задач ДВС, должны были быть сохранены все преимущества БСМ.

Особенности ДВС с БСМ

Конструктивные преимущества двигателя с БСМ

1. Перенос поверхности трения с боковой поверхности (тронка) поршня на ползуны (в зону с более низкой температурой и с гарантированным жидкостным трением) облегчает доводку деталей движения при создании нового двигателя, что обеспечивается более стабильными зазорами и гидромеханическими характеристиками пары трения "ползун - направляющая" при любом тепловом режиме двигателя.

2. Благодаря отсутствию пары трения "поршень - цилиндр" достигается снижение расхода масла в направлении камеры сгорания, устранение потерь на сопротивление движения поршня на смазочном слое и шума от ударов поршня о стенку цилиндра, снижается опасность его заклинивания при перегреве и др. Исключается необходимость доводки данной пары трения при создании нового двигателя.

3. Так как поршень БСМ не является парой трения, то его форма является телом вращения, и при его производстве нет необходимости обеспечения эллипсного и бочкообразных профилей поршня. Отсутствие приливов под бобышки поршневого пальца обеспечивает более равномерное тепловое поле поршня, что, в свою очередь, позволяет создать между поршнем и стенкой цилиндра более равномерный зазор, который можно уменьшить.

4. В двигателе с БСМ обеспечиваются лучшие условия работы поршневых колец, из-за отсутствия колебаний поршня вокруг оси поршневого пальца при перекладке поршня в мёртвых точках в пределах зазоров между поршнем и цилиндром. Этим достигается равномерный износ поршневых колец и стенки цилиндра. Отсутствие эллипсности износа цилиндра позволяет кольцам дольше сохранять уплотняющую способность, а лучшее охлаждение колец позволяет ещё больше увеличить ресурс деталей ЦПГ.

5. Снижение потерь на трение в БСМ служит основанием для прогноза существенного увеличения ресурса основных трущихся поверхностей бесшатунного двигателя при прочих равных условиях по сравнению с двигателем с КШМ.

6. В четырёхтактных двигателях с БСМ из-за уменьшения высоты поршня размер по оси цилиндра уменьшается на высоту тронка поршня.

7. Уменьшение в 2 раза радиуса кривошипа КВ (при одинаковом ходе поршня и диаметре шеек) обеспечивает увеличение перекрытия крайних шеек вала, а, значит, повышение его прочности, жёсткости и уменьшение его размеров и массы.

Конструктивные недостатки двигателя с БСМ

1. В силу встречного движения КВ и кривошипов вращение в подшипниках сочленения указанных валов происходит с двойной скоростью.

2. На КВ БСМ двигателя Баландина действует неуравновешенный продольный момент от газовых и инерционных нагрузок, который воспринимается подшипниками сочленения КВ и кривошипов.

3. Необходимость обязательного наличия в конструкции соединительного вала (кроме эксцентриковой схемы).

4. Необходимость наличия направляющих ползунов.

Динамика БСМ

В рядных и оппозитных ДВС с КШМ при малом числе цилиндров (2 или 4 цилиндра) для вывода поршней из мёртвых точек используется момент инерции вращающихся масс деталей КШМ и, прежде всего, маховика.

Возложение функции накопителя энергии на маховик приводит к возникновению крутильных колебаний КВ в КШМ.

В связи с особенностью кинематики БСМ, в момент нахожде-

ния одного ползуна в мёртвой точке, другой ползун находится в середине своего хода и имеет максимальную мгновенную скорость и, следовательно, максимальную энергию. Расходование энергии движения ползунов происходит без передачи всей энергии на маховик и обратно, а часть ее сразу передается соседним ползунам, находящимся в мертвых точках через щеку КВ.

Это способствует уменьшению крутильных колебаний в БСМ и приближает (в известных пределах) динамику двигателей с БСМ с меньшим числом цилиндров к динамике двигателей с КШМ с большим числом цилиндров.

Снижается величина необходимого момента инерции маховика, что может приводить к уменьшению его размеров и массы, и даже к полному отказу от его использования.

Система смазки БСМ

БСМ не имеет новых и оригинальных узлов и деталей. Опоры вращения в БСМ выполняются в виде подшипников скольжения или качения.

Ползуны, с которыми соединяются штоки и поршни, работающие в замкнутых направляющих прямолинейного перемещения в условиях гарантированного жидкостного трения и низких температур с системой смазки под давлением дроссельного типа или типа "насос - карман", широко используются и в машиностроении. Опыт показывает, что такими ползунами обеспечивается:

1. Высокая несущая способность, которая объясняется более равномерным распределением нагрузки на направляющих по сравнению с опорами качения или с парой "поршень - цилиндр" в КШМ.

2. Малый коэффициент трения в широком диапазоне скоростей перемещаемых деталей.

3. Высокое демпфирование, обеспечивающее работоспособность таких ползунов при больших ударных нагрузках и других неблагоприятных условиях работы (перегрев и др.).

4. Использование смазки под давлением позволяет усреднять периодические погрешности сопрягаемых поверхностей опор ползунов и направляющих, включая отклонения от параллельности самих направляющих. Степень редуцирования погрешностей зависит от толщины масляной пленки, типа системы смазки, величины и характера погрешностей и т.д.

Несущая способность опоры жидкостного трения растёт с увеличением скорости взаимного перемещения деталей. Ползуны БСМ имеют нулевую мгновенную скорость в мёртвых точках, а максимальную - в середине своего хода. Поэтому жёсткость масляного слоя в середине хода ползуна максимальна.

При этом, из-за особенностей кинематики БСМ, ползуны в середине своего хода перекладываются на противоположную направляющую [1]. Это облегчает получение необходимой толщины масляного слоя для смазки ползуна, и для этого в БСМ не требуется очень высокого давления масла в системе смазки, что подтверждается данными двигателей Баландина.

В опытном двигателе ОМБ мощностью 90 л.с. давление масла составляло от 3 кгс/см² до 6,5 кгс/см², а на очень мощном ОМ-127РН давление масла составляло 9...10 кгс/см² [1], что в целом соответствует показателям систем смазки двигателей с КШМ сопоставимой мощности.

Большое значение имеет оптимизация формы, размеров, микро- и макропрофиля трущихся поверхностей деталей БСМ, реологические свойства применяемого моторного масла, согласование его показателей с конструкцией смазываемых деталей и т.д.

Уравновешенность ДВС с БСМ

Уравновешенный двигатель на установившемся режиме работы воздействует на свои опоры усилиями, постоянными по величине и направлению.

У неуравновешенного двигателя эти усилия переменны по величине и направлению и при передаче их на раму или кузов машины вызывают их вибрацию. В ряде случаев плохая уравновешенность двигателя является препятствием к его внедрению.

В самом распространенном диапазоне мощностей от 5 до 150 л.с., как правило, применяются ДВС с числом цилиндров до 4 включительно, и даже оппозитный четырёхцилиндровый двигатель с КШМ не является полностью динамически уравновешенным.

Реже всего уравниваются силы инерции второго и высших порядков. Эти силы инерции возбуждают гармоники колебаний, так как поворот противовеса КВ не соответствует ходу поршня, который он должен уравновесить из-за того, что шатун длиннее радиуса кривошипа КВ КШМ. "...При современных уровнях форсирования двигателей, эти силы в сумме могут достигать весьма существенных значений. Так для двигателя ЗМЗ-406 (автомобиль ГАЗ 2410) при $n = 4500$ об/мин величина суммарной неуравновешенной силы инерции второго порядка превышает 9000 Н, что сопоставимо с весом самого автомобиля (масса, в зависимости от комплектации, составляет 1400...1550 кг)." [6]

Для уменьшения уровней вибраций ДВС с КШМ применяются уравнивающие механизмы, которые увеличивают их массу и стоимость.

В БСМ силы и моменты сил инерции первого порядка полностью уравниваются, а силы инерции второго и высших порядков отсутствуют. Поэтому появляется возможность создания полностью уравновешенного рядного поршневого ДВС с небольшим числом цилиндров (2 или 4 цилиндра). Такие двигатели сегодня были бы очень востребованы для беспилотных летательных аппаратов, где не всегда нужны многоцилиндровые двигатели, но отсутствие вибраций играет важную роль для нормальной работы чувствительной аппаратуры.

Опытная проверка и моделирование

После выхода книг С.С. Баландина в нашей стране предпринимались попытки создать двигатель транспортного типа с Х-образным, V-образным и оппозитным расположением цилиндров. К сожалению, никаких конкретных данных о полученных результатах испытаний - величине механических потерь, расходе топлива и т.д. опубликовано не было.

Однако разработка и исследования различных видов БСМ продолжается - кривошипно-кулисный механизм (ККМ), силовые механизмы двигателей Revitec, Wiseman и др. По конструкции эти СМ отличаются как от БСМ Баландина, так и друг от друга. Отличаются и результаты - на бесшатунном двигателе Wiseman был получен отрицательный результат [7].

Таким образом, использование других схем может привести к потере преимуществ БСМ и требует обязательной опытной проверки, обеспечивающей научную объективность и идентичность условий испытаний, что доступно только хорошо оснащённым и финансируемым лабораториям и организациям.

Опубликованы результаты сравнительного моделирования ККМ и КШМ:

- Поскольку перемещение кулисного механизма является синусоидальной функцией, все его производные представляют собой гладкие синусоидальные или косинусоидальные кривые. Это очень желательно с точки зрения кинематики. [8]

Преимущества подтверждаются и результатами проведенных исследований (опытной проверки) бесшатунных двигателей с ККМ (рис. 5).

Согласно этим исследованиям, рост экономичности бесшатунного двигателя с ККМ по сравнению с двигателем с КШМ складывается из следующих факторов:

1. Синусоидальный закон движения поршня - рост на 11 %.
2. Меньшая величина механических потерь - рост на 6...9 %.
3. Возможность увеличения степени сжатия при одном и том же топливе - рост на 10 %. Согласно публикации [3], при увеличении

степени сжатия до $\epsilon = 17$ на двухтактном двигателе с ККМ был получен рост экономичности на 21 %.

4. Изменения в лучшую сторону скорости сгорания и продувки - рост на 10 % [3].

Отличия ККМ от БСМ Баландина заключаются в том, что в ККМ ползуны перемещаются по направляющим, выполненным в штоке поршня, а боковая сила воспринимается тронками поршней, как и в КШМ (рис. 6).

В БСМ Баландина направляющие ползунов выполнены в самой жёсткой детали ДВС - картере или блоке цилиндров, а поршни не касаются стенки цилиндров.

Возможен БСМ без соединительного вала, когда кривошипы синхронизируются шейкой КВ, проходящей сквозь эксцентрик [1]. Недостаток эксцентриковой схемы хорошо виден на рис. 7 - диаметр шейки эксцентрика получается сопоставимым с диаметром цилиндра двигателя.

Поэтому БСМ с эксцентриковой схемой могут быть рациональными при малых размерностях двигателя, в компрессорах и др.

В БСМ с соединительным валом (рис. 3) диаметр шейки КВ может быть более чем в 2 раза меньше диаметра цилиндра, что обеспечивает меньшие потери на трение, несмотря на наличие дополнительных потерь на соединительном валу.

Крестообразное расположение цилиндров двигателя Баландина практически исключает использование такого двигателя на наземном транспорте, а в морском транспорте его применение рационально в виде главного двигателя энергетической установки.

Кроме одноцилиндровых ДВС, наиболее распространёнными двигателями являются четырёх- и двухцилиндровые рядные ДВС, поэтому необходимо создание таких ДВС с БСМ.

В нашей стране был разработан новый БСМ с рядным расположением цилиндров, схема показана на рис. 8.

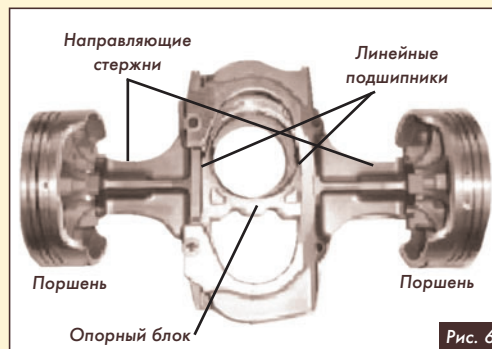


Рис. 6

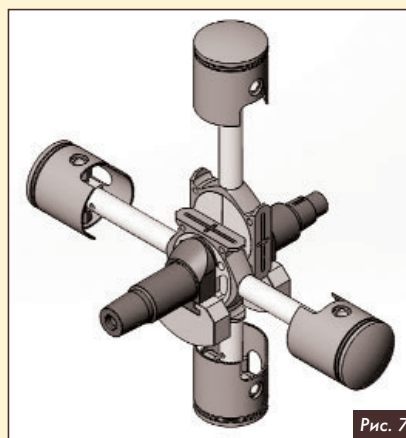


Рис. 7

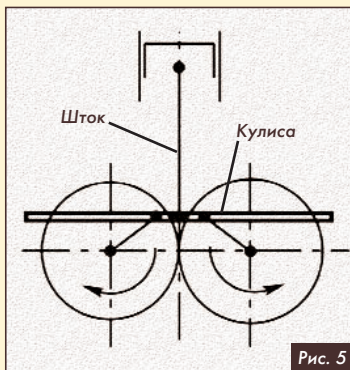


Рис. 5

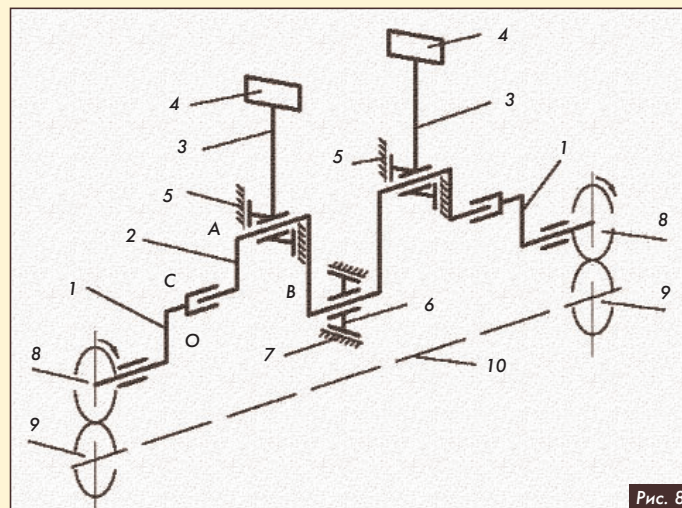


Рис. 8

Как и в БСМ двигателя Баландина, боковые усилия от действий инерционных и газовых сил перенесены с поршней на ползуны, которые воздействуют на направляющие.

В подшипниках кривошипов 1 установлен симметричный коленчатый вал 2. Нижняя часть штоков 3, жёстко связанных с поршнями 4, выполняет функцию ползуна и движется вертикально по направляющим 5. Балансир 6 также выполняет функцию ползуна и движется горизонтально по направляющим 7. Синхронизация и силовое замыкание кривошипов обеспечивается соединительным валом 10 и шестернями 8, 9.

Симметричный КВ обеспечивает устранение продольного момента, который нагружает подшипники сочленения КВ и кривошипов в БСМ Баландина. В таблице № 1 приведены данные рядных опытных двигателей в основе конструкции которых лежит схема БСМ с симметричным КВ.

Таблица 1

Проектные данные двигателей с БСМ

| Модель | Каспий-65 4-тактный | ДНБ-4 4-тактный | 2Д-200 2-тактный |
|--|------------------------|--------------------|---------------------|
| Число цилиндров | 4 | 4 | 2 |
| Диаметр и ход поршня, мм | 76 x 88 | 76 x 76 | 52 x 47 |
| Литраж, см ³ | 1596 | 1378 | 200 |
| Степень сжатия | 11,5 | 11,5 | 12,5 |
| Мощность, кВт | 47,8 | 30 | 16,5 |
| Число оборотов, мин ⁻¹ | 4000 | 3000 | 6000 |
| Минимальный удельный расход топлива, г/(кВт·ч) | 217 | 217 | 272 |
| Масса, кг | 80 | 75 | 18 |

При изготовлении опытных двигателей использовалось стандартное оборудование отечественных заводов, используемые материалы - традиционные для двигателестроения.

Все двигатели работали по двухконтурному рабочему процессу, который осуществляется в двух цилиндрах. [9]

Двигатель "Каспий-65" (4Ч 7,6/8,8) был изготовлен на ПО "Дагдизель". Появление ДВС с БСМ на этом предприятии связано с деятельностью В.П. Копцева, который работал начальником отдела по испытаниям двигателей ПО "Дагдизель". [10]

Проведённые В.П. Копцевым с соавторами расчёты характеристик дизеля с БСМ по сравнению с дизелем с КШМ одинаковой размерности показали, что "...при одинаковой продолжительности процесса максимальное давление и температура сгорания в дизеле с БСМ выше, чем с КШМ, соответственно на 0,5 МПа и 130 К. Механический КПД и топливная экономичность увеличились на 9 %, также повысилось среднее эффективное давление дизеля с БСМ на 9,3 %. Таким образом, в дизеле 2Ч9,5/9,0 с БСМ можно получить эффективную мощность $N_e = 29,4$ кВт, а в дизеле с КШМ $N_e = 26,7$ кВт". [11]

Был построен макет дизеля с БСМ, который испытывался на стенде. Исследования четырёхцилиндрового мотора были проведены на первом в мире бесштатном двигателе с симметричным КВ - "Каспий-65" в 1990 году (рис. 9).

При прокрутке двигателя при $n = 1000$ мин⁻¹ и температуре масла $t_m = 70$ °С величина механических потерь составила $N_{m1} = 1,32$ кВт.

Для двигателя близкой размерности МЗМА-407 (4Ч 7,6/7,5) при $t_m = 70$ °С, по опубликованным данным, $N_{m2} = 1,44$ кВт, т. е. на 9 % больше, чем у двигателя с БСМ (отношение мощностей механических потерь):

$$N_{m-отн} = N_{m2} / N_{m1} = 1,44 / 1,32 = 1,09.$$

Для более корректной оценки следует учесть параметры, су-

щественно влияющие на величину N_m - это средняя скорость поршня - C_m и степень сжатия - ε . Двигатель МЗМА-407 при таком же ходе поршня S , как у "Каспия-65" имел бы более высокие механические потери N'_m :

$$\frac{N'_m}{N_m} = \frac{a + bC_m}{a + bC_m} = \frac{0,35 + 0,115 \cdot 2,9}{0,35 + 0,115 \cdot 2,5} = 1,08.$$

Следует учесть и разницу в величине степени сжатия двигателей "Каспия-65" и МЗМА-407 (11,5 и 7,0 соответственно).

Отношение N_m при различных степенях сжатия определяется выражением:

$$\frac{N_{m2}}{N_{m1}} = \frac{\varepsilon_2 + 8,5}{\varepsilon_1 + 8,5} = \frac{11,5 + 8,5}{7 + 8,5} = 1,29.$$

Таким образом, в одинаковых условиях сравнения, снижение N_m благодаря БСМ составило 52 %: $N_{m-отн} = 1,09 \cdot 1,08 \cdot 1,29 = 1,52$. Это соответствует повышению механического КПД с 0,85 до 0,90, то есть на 6 % [2].

Двигатель работал под нагрузкой до $n = 4200$ мин⁻¹, а на режимах холостого хода до $n = 3000$ мин⁻¹.

Конструкция "Каспия-65" усложнена использованием двух БСМ (рис. 10), расположенных параллельно, кривошипы которых синхронизированы одним соединительным валом (патент РФ № 2008478).

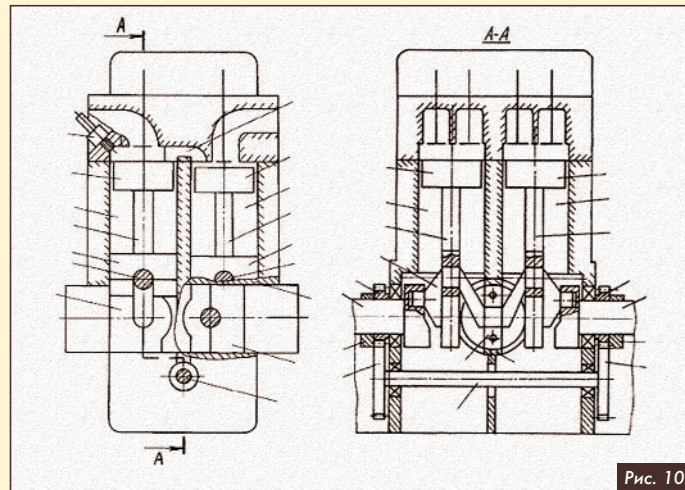


Рис. 10

В четырёхтактном двигателе ДНБ-4 (рис. 11), изготовленном в 1997 г. на екатеринбургском Турбомоторном заводе, была использована более простая одновальная схема БСМ. На рабочую шейку КВ действуют одновременно два поршня, а нижняя часть штоков объединена в общий ползун (рис. 12). Из-за отсутствия на заводе стенда для испытания быстроходного двигателя малой мощности был изготовлен временный

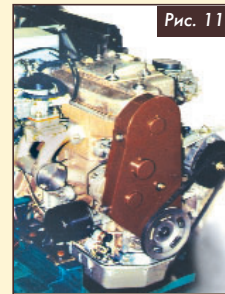


Рис. 11

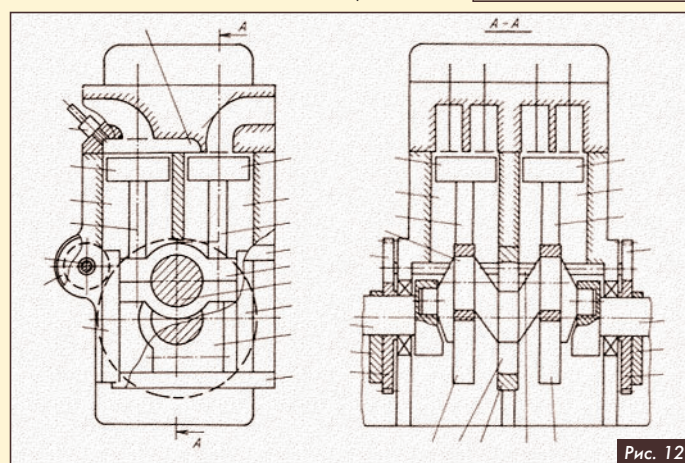


Рис. 12

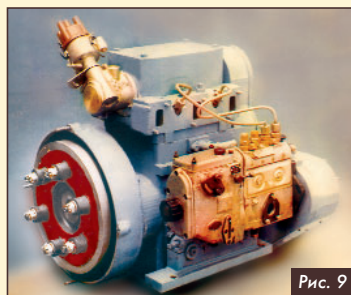


Рис. 9

стенд, позволяющий осуществлять только прокрутку и запуск двигателя при отсутствии нагрузочного устройства.

После первой сборки и обкатки величина механических потерь оказалась выше, чем у двигателя близкой размерности МЗМА-407, примерно на 45 %. Однако двигатель устойчиво работал на режиме холостого хода в диапазоне $n = 800...3000$ об/мин., а расход топлива, замеренный при $n = 2400$ об/мин., оказался на 10 % ниже, чем у МЗМА-407. В данном случае преимущества рабочего процесса (более высокая степень сжатия, высокая полнота сгорания топлива, работа на режиме холостого хода с $\alpha > 1$) превалировали над ростом механических потерь.

В ходе разборки двигателя никаких следов наработки или заедания в парах трения обнаружено не было. После проведения ряда конструктивных и технологических мероприятий двигатель снова прошел холодную и горячую обкатку при $n = 800...3000$ об/мин. Величина механических потерь была снижена [2]. К сожалению, необходимого для него стенда этот двигатель так и не получил.

Основная идея двухтактного двигателя 2Д-200 (рис. 13) заключалась в создании конкурента автомобильному четырёхтактному двигателю аналогичной размерности - "Ситроен 2СУ".

Двухтактный способ работы был использован для достижения большей литровой и удельной мощности нового двигателя. Для устранения потерь прямого выброса топлива с продувочным воздухом применён непосредственный впрыск топлива с низким давлением впрыска. В дальнейшем планировалось использование системы беспрецизионного впрыска.

Новый рабочий процесс обеспечивает расширение пределов качественного регулирования мощности, ускорения сгорания топлива и увеличения его полноты, а в сочетании с впрыском и много-топливность двигателя 2Д-200 [9].

Данный двигатель уникален тем, что его симметричный КВ полностью "соответствует" симметричной газовой нагрузке двух цилиндров, в которых (при новом рабочем процессе) одновременно осуществляется процесс расширения газов. В таком БСМ минимально возможные рабочие деформации деталей.

В двигателе 2Д-200 были применены только подшипники качения, система жидкостной смазки под давлением необходима только для пары "ползун - направляющие", что позволило предельно упростить конструкцию системы смазки. В сочленениях КВ и кривошипов этого двигателя впервые были применены сдвоенные подшипники качения типа "кольцо в кольце". Воздух для продувки сжимается в отдельном цилиндре; поэтому отсутствует заброс масла из картера в цилиндр.

Наличие отдельного продувочного цилиндра (рис. 14) позволяет увеличивать объём продувочного воздуха (делать больше, чем необходимо) и, тем самым, обеспечивать гомогенизацию топливовоздушной смеси, пневматический впрыск топлива и/или низкий наддув. Это может менять и тепловое состояние деталей двигателя.

Идеи двигателя 2Д-200 заинтересовали специалистов СКБ завода им. В.А. Дегтярёва (Ковров) (СКБ ЗиД), профинансировавшего разработку эскизного проекта двигателя и рабочего проекта системы непосредственного впрыскивания бензина. Через несколько лет, благодаря спонсорской поддержке, в СКБ ЗиД был разрабо-

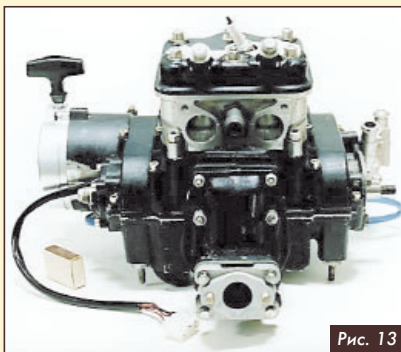


Рис. 13

тан технический проект, а на заводе изготовлены опытные образцы, которые на стенде прошли 8-часовую холодную обкатку.

Величина силы тока в электродвигателе стенда при этом составила - 1,3...1,4 А, а у серийного двигателя ЗиД аналогичного рабочего объёма такая величина составляла - 1,7...1,8 А. При этом обкатка опытных образцов производилась без подачи на ползуну смазки под давлением. Они смазывались масляным туманом, как и поршни четырёхтактных двигателей.

Через несколько лет появилась возможность провести испытания 2Д-200 на стенде. Была проведена доработка конструкции двигателя, обеспечена смазка ползуну под давлением. На первом этапе испытаний (горячая обкатка и под нагрузкой) двигатель работал в диапазоне $n = 1400...5000$ мин⁻¹ [12].

Как и в предыдущих проектах в ходе стендовых испытаний было выявлено, что двигатель 2Д-200 отличается высоким уровнем уравниваемости, и, как следствие, пониженными уровнями вибрации и шума.

На рис. 15 приведена характеристика механических потерь двигателя 2Д-200 после обкатки при температуре масла $t_m = 45$ °С, при наличии масляного, водяного и приводного продувочного насосов.

Данные по N_m не являются окончательными. Необходимо было провести испытания при $t_m = 70...80$ °С, что в обычном ДВС (в сравнении с $t_m = 45$ °С) снижает N_m приблизительно на 20 %. Кроме того, в отличие от двигателя Баландина, в парах "ползун-направляющая" не были использованы антифрикционные материалы [13].

Однако даже такие результаты подтверждают преимущества БСМ над КШМ - на рис. 15 приведена также характеристика близкого (с учетом тактности) по размерности двухцилиндрового четырёхтактного двигателя "Ситроен 2СУ" [14].

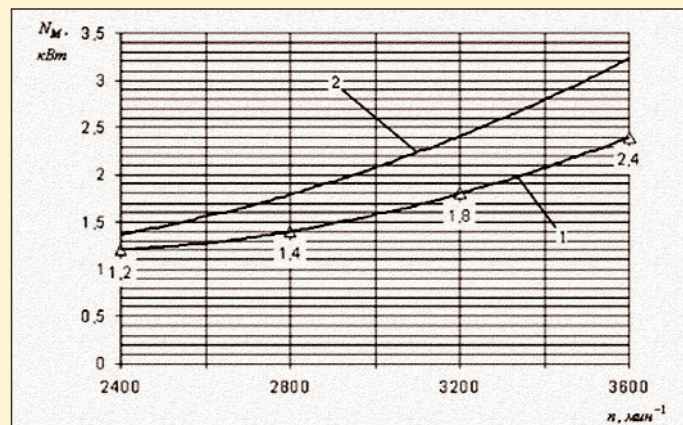


Рис. 15 Характеристика механических потерь: 1 - 2Д-200; 2 - "Ситроен 2СУ"

Сравнение показывает, что у двигателя "Ситроен 2СУ" на режиме $n = 2500$ мин⁻¹ N_m больше на 16 %, при $n = 3000$ мин⁻¹ - на 30 %, при $n = 3500$ мин⁻¹ - на 42 %.

Подобный двухтактный двигатель в большей части рабочих режимов будет иметь преимущества по экономичности и токсичности ОГ в сравнении с традиционным четырёхтактным двигателем.

Внедрять в серийное производство ДВС с БСМ пока никто не хочет, но двигателю 2Д-200 повезло чуть больше остальных - его БСМ планировали применить в качестве СМ двигателя Стирлинга. Поэтому было проведено моделирование его БСМ. Для проведения моделирования был разработан, изготовлен и применен измерительный комплекс на основе трёхосевого акселерометра Analog Devices EVALA DXL-377Z для исследования физической картины перемещений деталей механизмов, движущихся с ускорениями до ± 200 g" [15]. Акселерометр был установлен на поршне бесшатунного двигателя 2Д-200 (рис. 16).

"Путём сравнения аналитических моделей БСМ и КШМ выявлено, что нагрузки на



Рис. 16

элементы КШМ от действия сил инерции поступательно движущихся масс на 23...30 % выше, чем у элементов БСМ" [15].

В настоящий момент создаются малоразмерные ДВС с крейцкопфным КШМ, например - двигатели Руггера или "полностью алюминиевый" двигатель ЗК-2000 "МОДУЛЬ-Д" [16].

Однако несмотря на отсутствие в их конструкции касания стенок поршня и цилиндра двигателя с крейцкопфным КШМ также уступают двигателям с БСМ: "Результат сравнения численных моделей (рис. 17) показал

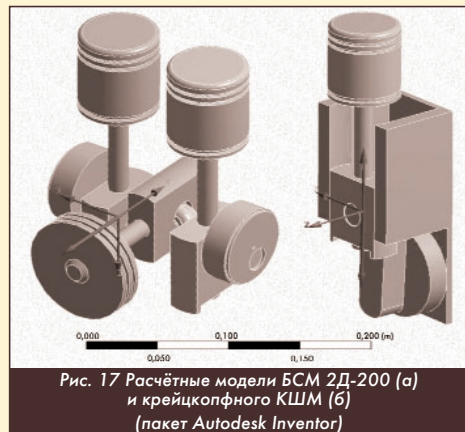


Рис. 17 Расчётные модели БСМ 2Д-200 (а) и крейцкопфного КШМ (б) (пакет Autodesk Inventor)

возможность обеспечения высокой динамической уравновешенности БСМ, что приводит к снижению нагрузок в ползунах. При этом, в сравнении с крейцкопфным КШМ, нагрузка более чем в 17 раз меньше. Следовательно, появляется возможность использовать направляющие ползунов без жидкой смазки, и, в частности, изготавливать их из

композитных материалов" [15].

Результаты, полученные при испытаниях и моделировании БСМ опытных бесшатунных моторов говорят, как минимум, о сопоставимом или о существенно более высоком уровне получаемых эффективных показателей по сравнению с современными ДВС с КШМ в исследование и доводку которых были вложены огромные средства, усилия и время. Причём объёмы этих средств, усилий и времени не сопоставимы в принципе.

С учётом того, что практически любые современные и перспективные технологии и материалы, применяемые для повышения характеристик современных ДВС, могут быть с таким же (или даже большим) эффектом применены в ДВС с БСМ, следует признать данное направление развития ДВС перспективным.

Однако у экспертного сообщества единого мнения по этому поводу не существует, но зато существует много слухов и фейков.

Фейки и экспертная оценка ДВС с БСМ

В сети Интернет и печати есть десятки публикаций разных авторов, в которых содержится следующий текст:

- С выходом в свет книги С. Баландина "Бесшатунные ДВС" 1968 и 1972 г. изданий многочисленными коллективами инженеров и рядом заводов (таких как "Дагдизель", СКБ "Серп и Молот" и т.д.) начали предприниматься попытки построить двигатель, скопировав его в первоначальном или даже в усовершенствованном вариантах. Вопреки ожиданиям, у большинства построенных образцов при первых оборотах вала происходило заклинивание силового механизма в корпусе двигателя в результате задира поршней о зеркало цилиндров. Те, кто сумел спроектировать и построить работоспособный двигатель, обнаруживали в нём интенсивный износ и выкрашивание крейцкопфных направляющих (питтинг). Все попытки бороться с этим явлением не приносили успеха. Живучесть силового механизма определялась несколькими часами работы.... Выяснилось, что никто, кроме самого С. Баландина, так и не смог построить работоспособную конструкцию. По признанию же самого автора, каждый четвёртый двигатель, вышедший в свое время из стен его КБ, выходил из строя из-за указанных выше неполадок [17].

Никаких ссылок и документов на эти факты не приводится, и ничем не подтверждается. Все публикации "самого автора" - С.С. Баландина, - наоборот, говорят о преимуществе в низкой величине механических потерь и в высоком ресурсе деталей БСМ и ЦПГ всех бесшатунных двигателей, созданных в ОКБ 500-II под руководством С.С. Баландина.

Кроме книг и выступлений в печати С.С. Баландина известен большой массив данных по работам ОКБ 500-II из архивов ЦИ-

АМ, МАИ и других организаций, где так же нет никаких подобных данных [18].

Двигатели "выходить из стен КБ" никуда не могут, серийного производства бесшатунных двигателей никогда не было, поэтому и статистики о том, что "выходил из строя каждый четвёртый двигатель" быть не может. Опытные двигатели изготавливают по несколько штук для проведения исследований, а если имеются в виду отказы при испытаниях и доводке, то 75 % успешных пусков - это замечательный результат!

Разумеется, при создании нового двигателя всегда возникает большое количество проблем, которые должны быть решены. Но такие же проблемы есть и при создании новых ДВС с любым СМ.

Бороться с ложью и фейками можно только просвещением, что и является целью данной статьи. Поэтому стоит рассмотреть наиболее технически грамотные и объективные возражения против ДВС с БСМ:

Инженер Игорь Зиновьев:

- Сравнительный расчёт двух двигателей с одинаковыми диаметрами и ходом поршней, степенью сжатия, частотой вращения и т.д. показывает, что среднее удельное боковое давление в паре "ползун - направляющая" двигателя Баландина в 2,5 раза, а максимальное в 2,8 раза больше тех же величин для пары "поршень - цилиндр".

Повышенные удельные давления неизбежно приводят к увеличенным потерям на трение, то есть росту удельного расхода топлива [19].

Величина удельных давлений определяется не только нагрузкой, но и площадью сопрягаемых деталей. Вследствие исключения кромочных явлений, возникающих в сопрягаемых деталях ЦПГ двигателей с КШМ, величина удельных давлений в паре БСМ "ползун - направляющая" меньше, чем в паре "поршень - цилиндр" при одной и той же боковой силе и площади сопрягаемых деталей. Моделирование же показывает, что боковая сила в БСМ сопоставима с аналогичной силой в паре "поршень - цилиндр" КШМ [20].

Рост удельного расхода топлива в БСМ также нигде и никем не подтверждён, а вот снижение расхода топлива фиксировалось в ряде испытаний бесшатунных двигателей [1, 3].

Приведённый Игорем Зиновьевым "статический" расчёт верен только для КШМ, в котором длина шатуна приравнена к длине кривошипа. Но в БСМ происходит эстафетная передача боковой силы с одного ползуна на другой - ползун работающего поршня воспринимает боковую нагрузку примерно до 45° поворота КВ. Далее нагрузка переходит на ползун смежного цилиндра, а плечо крутящего момента продолжает увеличиваться.

Как показывает моделирование БСМ двигателя 2Д-200 [20], перекладка ползунов происходит на 10° поворота КВ раньше, чем ожидалось согласно теоретическим представлениям, изложенным в [1].

Однако даже если расчёт инженера Игоря Зиновьева верен, то увеличение боковой силы в 2,8 раз с запасом перекрывается низким коэффициентом трения для пары скольжения "ползун - направляющая" (средний для условий жидкостного трения - 0,06), который в 8...10 раз меньше, чем для пары трения "поршень - цилиндр" в КШМ. Что было понятно и без моделирования в далёком 1983 году, когда вышла статья Игоря Зиновьева.

Особенно "достаётся" от критиков соединительному валу, который никогда не являлся лимитирующим звеном БСМ.

Благодаря соединительному валу в БСМ есть возможность отвода крутящего момента от обоих концов КВ, который при этом разгружается. Поэтому стабильность зазоров подшипников КВ (а это основное условие его хорошей работы) в БСМ практически гарантирована.

Перечислим претензии критиков БСМ к соединительному валу.

1. Инженер Игорь Зиновьев:

- Кроме того, надёжная работа этого механизма возможна лишь при высокой точности сочленения восьми деталей (коленчатого вала, двух кривошипов, четырёх шестерён и соединительного вала), которые не могут быть обработаны совместно. Поэтому обес-

печение соосности опор выходного вала двигателя требует индивидуальной подгонки сопрягаемых деталей, что возможно лишь при малом выпуске [19].

При серийном производстве ДВС с КШМ обрабатываются совместно шатуны с крышками и блок цилиндров с крышками коренных подшипников. В БСМ ползуны с крышками и отверстия под подшипники кривошипов и соединительного вала тоже обрабатываются совместно. Есть также совместная обработка направляющих ползунов БСМ в блоке цилиндров или картере. В КШМ совместно обрабатываются гильзы цилиндров в сборе с блоком цилиндров или картером.

Поэтому никакой "индивидуальной подгонки сопрягаемых деталей" при обеспечении соосности опор выходного вала двигателя не требуется.

Есть мнение, что, в отличие от КШМ, в БСМ нужна очень высокая точность соосности осей цилиндра и направляющих ползунов. Однако зазор между стенкой поршня и цилиндра в двигателях Баландина составлял от 0,350 мм до 0,640 мм [1]. Оборудование АвтоВАЗа, которое позволяет производить от 1500 до 2500 двигателей в день, имеет точность 0,02 мм.

2. Бесшатунные механизмы содержат дополнительные кинематические связи и поэтому требуют высокой точности изготовления сопряжений.

В зубчатом зацеплении БСМ Баландина есть два зазора, которые влияют на несоосность отверстий подшипников сочленений КВ и кривошипов - боковой зазор зубчатого зацепления и зазор в подшипнике кривошипа.

Благодаря наличию зубчатой передачи есть возможность изменять передаточное соотношение, что позволяет снизить несоосность опорных подшипников кривошипов при одной и той же величине бокового зазора зубчатой передачи.

Для бесшатунных двигателей достаточен уровень точности, который сегодня используется при производстве серийных ДВС аналогичной размерности. Что подтверждается опытом создания и испытаний опытных двигателей.

Например, все опытные образцы двигателя 2Д-200 были выполнены с различными величинами бокового зазора зубчатого зацепления. В процессе доводки и испытаний величину минимального зазора увеличивали, что положительно сказывалось на характеристиках двигателя либо никак на них не влияло.

3. Знакопеременная нагрузка присутствует во многих деталях механизмов преобразования, в том числе и в КШМ. Перекладка контакта на зубья зацепления с одной стороны на другую для всех видов механизмов преобразования ДВС, использующих зубчатые передачи, происходит строго в ВМТ и НМТ при поступательных скоростях поршня близких к 0. Так что никаких "ударов зубьев шестерен" там нет. Доказательство этого факта очень простое - большое количество агрегатов самого двигателя часто приводится прямо от зубчатого колеса, расположенного на КВ - механизм ГРМ, масляные насосы, генераторы, компрессоры, уравнивающие механизмы и т.д.

Контраргумент о том, что мощность этих агрегатов невелика, не проходит, так как эти зубчатые передачи и спроектированы под меньшую нагрузку. Знакопеременная нагрузка не влияет на работоспособность и более нагруженных зубчатых передач в ДВС. Например, в танковом дизеле с противоположно двигающимися поршнями (рис. 18) два КВ КШМ связаны между собой через 4 "паразитных" зубчатых колеса (3 зацепления).

Несмотря на наличие крутильных колебаний в КШМ, проблем с работоспособностью зубчатых колёс нет и здесь.

Негатив к зубчатым передачам в БСМ идет от не дос-

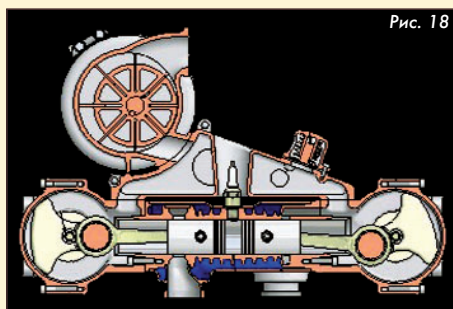


Рис. 18

точного в прошлом ресурса редукторов авиационных поршневых двигателей с небольшим числом цилиндров. Однако в современных авиадвигателях с небольшим числом цилиндров (например "Ротакс 912") с успехом применяются редукторы с зубчатыми передаточными. Так один из современных специалистов Л.А. Финкельберг отмечал:

- Сергей Степанович Баландин работал в ЦИАМ и здесь создал двигатель, который развивал мощность, но, только до 2000 оборотов... Работоспособную конструкцию создать удалось, но не удалось сделать именно двигатель с нормальным ресурсом и нужными характеристиками [21].

Однако известно, что уже самый первый двигатель С.С. Баландина - ОМБ - в 1940 году проработал без ремонта 1843 часа с установленными деталями от серийного двигателя М-11А, и по ресурсу превзошёл этот же двигатель в 46 раз! При этом он продолжал оставаться в работоспособном состоянии, а ресурс лучших современных поршневых авиадвигателей с КШМ и сегодня не превышает 2000 моточасов. Какой ресурс тогда должен быть нормальным?

Кстати, обороты одного из проходившего испытания двигателя Баландина были - 2650 об/мин.

А вот что пишет учёный Юрий Бехли:

- Среди различных типов бесшатунных двигателей, динамика и конструкция которых рассматривалась и изучалась отечественными двигателями, наибольшее внимание было уделено схеме, предложенной С.С. Баландиным ещё в 1935 г. До 1951 г. были разработаны и построены несколько двигателей типа ОМ-127РН мощностью до 3200 л.с. Последним из построенных двигателей был 8-цилиндровый мотор жидкостного охлаждения Х-образной схемы. Использование процесса двойного действия (по обе стороны поршня) позволяло получить высокую по тем временам литровую мощность 145 л.с./л. Удельная масса двигателя составляла 0,635 кг/л.с. В 1951 г. двигатель прошёл комплекс официальных испытаний. На основе ОМ-127РН был выполнен проект 24-цилиндрового двигателя М-127 мощностью 10 000 л.с. Этот двигатель был снабжён турбокомпрессором и импульсными турбинами. Его высота достигала 12 000 м. Удельный расход топлива на крейсерском режиме был весьма малым - всего 165 г/л.с.ч у земли и 148 г/л.с.ч на расчётной высоте.

Полноразмерный двигатель не был построен, так как работы по созданию новых образцов мощных АПД всех типов были в 1951 г. прекращены....

Нужно отметить, что в институте был создан и испытан экспериментальный отсек 2-тактного дизеля двойного действия по схеме С.С. Баландина.

В таком двигателе конструктор подошёл к предельным возможностям тепловой машины в смысле использования рабочего объёма и частоты циклов цилиндров, поскольку в каждом цилиндре за один оборот коленчатого вала совершалось два рабочих хода. Работы по этому двигателю были прекращены в 1951 г. в связи с переходом ЦИАМ на газотурбинную технику [22].

Технология серийного изготовления ДВС с БСМ

Из ответа директора Дивизиона "Силовые агрегаты" ООО "УК "Группа ГАЗ" К.Д. Рухани (оригинал письма есть у автора статьи):

- Попытки создания поршневых двигателей малой и средней мощности по бесшатунной схеме периодически возобновлялись энтузиастами "бесшатунного движения", но создать работоспособный, надёжный двигатель по бесшатунной схеме пока, насколько известно, не смог никто, а также создать технологически приемлемую конструкцию массового применения (в частности, необходимость введения операций настройки зазоров в парах "ползун - направляющая" и необходимость периодического контроля зазоров в ходе эксплуатации).

Если не создавать серийный мотор по "бесшатунной схеме", то он никогда и не появится!

В выпускаемых заводами Дивизиона "Силовые агрегаты" ООО "Группа ГАЗ" двигателях точно есть такая пара трения как

"поршень - цилиндр" и там обязательно должны быть введены операции по "настройки зазоров в парах" и присутствует "необходимость периодического контроля зазоров в ходе эксплуатации". Не понятно, почему это невозможно сделать в БСМ?

Как на сборку КШМ, так и на сборку БСМ устанавливаются одинаковые жёсткие требования, особенно на зазоры и натяги в сопрягаемых прецизионных узлах трения.

Необходимая точность сопряжения достигается методом предварительной группировки деталей по фактическим размерам, их соответствующей маркировки и их подбором при сборке, то есть селективной сборкой. Селективная сборка ползуна БСМ и поршня КШМ в этом смысле ничем не отличаются.

Селективная сборка необходима для прецизионных узлов трения, только в БСМ этими узлами являются пары "ползуны - направляющие", а в КШМ этими узлами являются пары "поршень - цилиндр" и "поршень - поршневой палец - верхняя головка шатуна".

Подшипники качения и скольжения успешно применяются в обоих типах ДВС и их сборка аналогична.

При этом БСМ имеет меньшее количество прецизионных узлов трения, чем в КШМ, при прочих равных условиях.

Как и в КШМ, в БСМ поршневую и ползунную сборочные единицы подбирают по массе, а вращающиеся детали - коленчатые валы, маховик и др. подвергают балансировке, иногда отдельно, иногда - в сборе.

Для серийного производства ДВС с БСМ достаточно оборудования и технологий, применяемых для изготовления традиционных ДВС с КШМ и серийное производство бесшатунных двигателей, полностью аналогично производству двигателей с КШМ. Однако и здесь мы видим отсутствие технической грамотности и влияние фейков.

Инженер Игорь Зиновьев:

- Сравнивая этот механизм с кривошипно-шатунным, замечает, что в нём есть специфические детали: соединительный вал, четыре шестерни, два дополнительных кривошипа, а также ползуны и их направляющие. Но именно они делают бесшатунную конструкцию двигателя Баландина сложнее и дороже обычной [19].

Последуем примеру Игоря Зиновьева и сравним количество деталей движения двух рядных двухцилиндровых четырёхтактных двигателей - с БСМ (рис. 19) и двигателя с КШМ (рис. 20), например, ВАЗ 1111/1113 - серийного двигателя автомобиля "Ока".

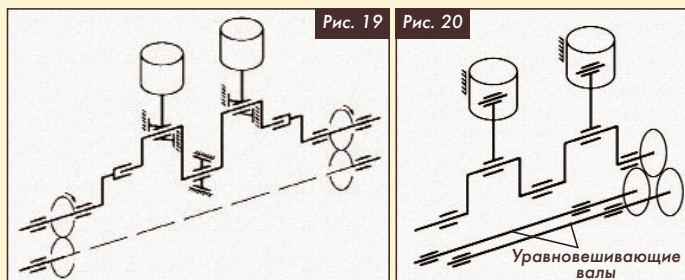


Таблица 2

| Тип двигателя | Двигатель с БСМ (рис. 19) | Двигатель с КШМ (рис. 20) |
|--------------------------|--|---|
| Итого деталей | 13 шт.: поршни - 2, ползуны с крышками (из них два со штоками) - 3, КВ - 1, кривошипы - 2, соединительный вал - 1, зубчатые колёса - 4 | 12 шт.: поршни - 2, шатуны с крышками - 2, поршневые пальцы - 2, КВ - 1, уравновешивающие валы - 2, зубчатые колёса - 3 |
| Подшипники | 11 шт. | 9 шт. |
| Прецизионные узлы трения | 3 шт. (ползуны - направляющие) | 4 шт. (поршни - цилиндры + поршни - поршневые пальцы - шатуны) |
| Степень уравновешенности | Двигатель полностью уравновешен по силам и моментам инерции | Двигатель уравновешен по силам инерции первого порядка, а второй и высшие порядки не уравновешены |

Примечание:

1. Рядный двухцилиндровый четырёхтактный ДВС с КШМ уравновешен хуже, чем одноцилиндровый ДВС, так как его поршни должны работать в одной фазе. Поэтому такие ДВС приходится оснащать механизмом уравновешивания, как на рис. 20.

2. Поверхности прецизионных узлов трения, как правило, обрабатываются совместно в сборе и эти узлы требуют селективной сборки.

3. Пара "поршень - цилиндр" БСМ не является прецизионным узлом трения, в отличие от пары "поршень - цилиндр" КШМ и селективной сборки не требует.

Сравним три рядных четырёхтактных четырёхцилиндровых двигателя.

Неуравновешенный двигатель с КШМ (рис. 21).

Детали - 13 шт. (КВ - 1, шатуны с крышками - 4, поршни - 4, поршневые пальцы - 4). Подшипники - 9 шт. Прецизионные узлы трения - 8 шт. (поршни - 4 + поршневые пальцы - 4).

Двигатель уравновешен по силам и моментам инерции первого порядка, второй порядок неуравновешен, что ограничивает увеличение рабочего объёма рядного 4-цилиндрового двигателя, так как при этом резко повышается уровень вибрации (что приводит к снижению не только комфорта, но и надёжности).

Если уравновесить на этом двигателе силы инерции второго порядка, то к его деталям силового механизма надо добавить ещё 5 деталей: шестерни - 3 шт. и уравновешивающие валы - 2 шт. Тогда количество деталей станет

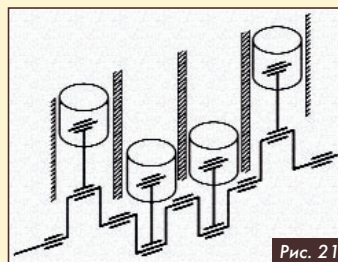


Рис. 21

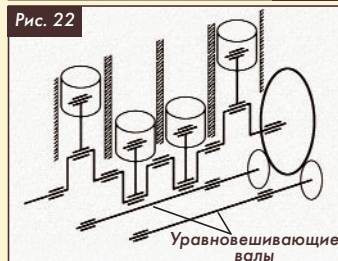


Рис. 22

равным - 18 шт. Сравнение этого двигателя (рис. 22) с двигателем с БСМ (рис. 23) приведено в таблице № 3.

Примечание:

Схема БСМ двигателя ДНБ-4 (рис. 23) актуальна только для двигателя с двухконтур-

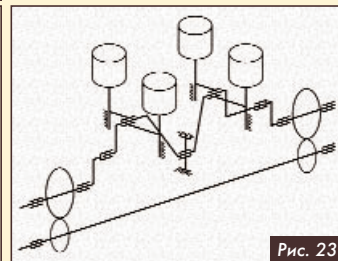


Рис. 23

ным рабочим процессом [9]. Таким образом, рядный четырёхцилиндровый двигатель с БСМ имеет всего три прецизионных узла трения (ползуны), которые требуют селективной сборки при меньшем количестве подшипников, чем у аналогичного двигателя с КШМ. При этом количество деталей движения больше всего на 1 шт.

Таблица 3

| Тип двигателя | Двигатель с КШМ (рис. 22) | Двигатель с БСМ (рис. 23) |
|--------------------------|--|---|
| Итого деталей | 18 шт. - (поршни - 4, шатуны с крышками - 4, поршневые пальцы - 4, КВ - 1, уравновешивающие валы - 2, зубчатые колёса - 3) | 19 шт. - (поршни - 4, ползуны с крышками (из них два со штоками) - 3, КВ - 1, кривошипы - 2, соединительный вал - 1, зубчатые колёса - 4) |
| Подшипники | 13 шт. | 11 шт. |
| Прецизионные узлы трения | 8 шт. (поршни - цилиндры + поршни - поршневые пальцы - шатуны) | 3 шт. (ползуны - направляющие) |
| Степень уравновешенности | Двигатель полностью уравновешен по силам и моментам инерции | Двигатель полностью уравновешен по силам и моментам инерции |

Но, может быть, сами детали БСМ сложнее, чем детали КШМ? Это тоже не так. Например, КВ четырёхцилиндрового рядного двигателя с КШМ имеет 9 шеек (КВ оппозитного авиационного двигателя "Ротакс 912" - 7 шеек). КВ четырёхцилиндрового рядного бесшатунного двигателя ДНБ-4 имеет 5 шеек. Поршни, штоки, кривошипы и ползуны в БСМ с точки зрения технологии их изготовления проще, чем аналогичные детали КШМ.

Таким образом, себестоимости изготовления двигателей с БСМ и КШМ сопоставимы по следующим причинам:

1. Количество деталей силовых механизмов двигателей с БСМ и КШМ сопоставимо.

2. Детали БСМ проще и меньше по размерам аналогичных деталей КШМ, что позволяет (даже при большем их числе) применять для их производства более доступное и недорогое оборудование, что особенно важно при производстве мелких и средних серий.

3. Количество прецизионных узлов трения, требующих селективной сборки в БСМ меньше, чем в КШМ.

То же самое относится к ремонту ДВС с БСМ.

На рис. 24 показан поперечный разрез двигателя ДНБ-4, а на

рис. 25 его детали. Для того, чтобы извлечь из блока цилиндров поршень, необходимо отвернуть только одну гайку крепления штока на ползуне. Поршень со штоком извлекается из цилиндра, при этом, если снят только один из двух поршней со штоком, то и штоковый подшипник и сам ползун не разбираются.

Микрометраж и оценка других трущихся поверхностей двигателя с БСМ так же ничем не сложнее, чем у двигателя с КШМ.

Таким образом, большинство мнений специалистов и экспертов не основано на опыте создания таких двигателей

и реальных знаниях в этой области.

У чиновников же позиция однозначная - делать ничего не будем. Из ответа директора по внешним связям "Трансмашхолдинг" Ф.В. Дытынко:

- Действительно, предлагаемые конструкции таких двигателей хорошо известны. Их отличают главным образом: применение в качестве топлива бензинов и высокая частота вращения выходного вала. В этой связи они рассматривались в качестве силовых установок автомобилей. Дизелестроительные предприятия АО "Трансмашхолдинг" специализированы на выпуске среднеоборотных промышлен-

ных дизелей в мощностном диапазоне 800-7300 кВт/1000 об/мин. Особые требования к таким тяжёлым двигателям - минимальные эксплуатационные расходы топлива и крайне высокие характеристики надёжности, в частности, безотказность и ресурс. Такие требования отмеченные в письме двигатели обеспечить объективно не могут. Принимая это во внимание, а также имеющиеся особенности технологий производства компонентов и производства комплектных двигателей, данное предложение на предприятиях АО "Трансмашхолдинг" не может быть реализовано.

Понятно, что диапазон мощности двигателей, над которыми работал коллектив автора статьи, не входит в интересы АО "Трансмашхолдинг". Непонятно только, чем была бы плоха на тепловозе секция с бесшатунным двигателем М-127Д мощностью 4600 л.с. и массой 2,5 тонны вместо 17,75-тонного 12Д49М втрое больших габаритов и в 1,5 раза меньшей мощности? Ведь если для тепловоза большая масса двигателя это, в основном, положительный фактор, то для корветов и фрегатов, на комплектацию которых Коломенский завод АО "Трансмашхолдинг" также поставляет свои двигатели, эти показатели являются важнейшими, как и уровни шума и вибрации этих двигателей, на которые жалуются отечественные кораблестроители. Но в условиях санкций выбора у них нет.

Энергетическая и экологическая безопасность - один из основных государственных ориентиров - указан в "Энергетической стратегии России на период до 2030 года". Её реализации способствует создание экономичных и экологически чистых энергетических установок (ЭУ). Одним из возможных методов решения поставленных задач является применение в составе энергетических установок двигателей, обеспечивающих такие качества.

Основным источником вибрационных нагрузок в ДВС являются вращающиеся и поступательно движущиеся массы деталей СМ, применяемого в ДВС. Правильный выбор СМ позволяет снизить вибрации, что, в свою очередь, положительно отражается на долговечности и надёжности, технологичности, низкой материалоемкости и себестоимости ЭУ.

Благодаря снижению механических потерь достигается повышение мощности, уменьшается удельный расход ГСМ, улучшаются экологические характеристики. Именно это необходимо для создания экономичных и экологически чистых ЭУ в нашей стране.

Литература

- Баландин С.С. Бесшатунные двигатели внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1972. стр.39.
- Лашманов В.В., Костин А.И. Первые результаты испытаний макетного образца двигателя // Двигателестроение, 2003. - № 2.
- Химченко А.В. Улучшение топливной экономичности и снижение токсичности двухтактных бензиновых двигателей на частичных режимах. Диссертация, Горловка, 2004, С. 137.
- Балдин С.С. Воздухоплавающие двигатели. С-Петербург: Типография Усманова, 1910.
- Котельников В.Р. Отечественные авиационные поршневые моторы 1910 - 2009. Москва, 2010, стр. 411 - 422.
- Яманин А.И., Жаров А.В. Динамика поршневых двигателей. М.: Машиностроение, 2003. - 464 с.
- Priyesh Ray and Sangram Redkar. Analysis and simulation of Wiseman hypocycloid engine // Cogent Engineering [2014], 1: 988402
- URL: <https://laksh04.medium.com/kinematic-comparison-of-scotch-yoke-with-single-slider-crank-mechanism-7cbb27935e74>
- А.О. Миллер. Двухконтурная организация рабочего процесса как техническая основа создания нового класса поршневых ДВС // Двигатель, № 4 - 6, 2020 г.
- А.О. Миллер. По следам забытых вариантов ДВС // Двигатель, № 6, 2004 г.
- Б.Н. Семёнов, Е.П. Павлов, В.П. Копцев. Рабочий процесс высокооборотных дизелей малой мощности. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. -240 с.
- URL: <https://www.youtube.com/watch?v=gEqzV9iRxtY>
- Костин А.И. Куколев М.И. Опытные образцы бесшатунных двигателей. Материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. Владим. гос. ун-т. Владимир. 2010, с.194-198.
- Конев В.М. и др. Автомобильные карбюраторные двигатели. М.: Машгиз, 1960.
- Дворцов В.С. Неидеальность связей и их влияние на уплотнение поршня двигателя с внешним подводом теплоты с бесшатунным силовым механизмом. Диссертация на соискание ученой степени КТН, Санкт-Петербург, 2017 г.
- И.Д. Зверков, И.С. Ким, Перспективная винтомоторная установка на базе поршневого двигателя 3К-2000 "Модуль-Д". Круглый стол, Воронеж, 2019 г. URL: <https://cloud.mail.ru/public/NAbZ/SDNdYBBsM>
https://disk.yandex.ru/i/_sH0L3hSK_BVg
- И.П. Седунов. Конструктивный анализ бесшатунных двигателей Баландина и пути их совершенствования // Двигателестроение, № 3, 1998 г.
- Е.П. Голубков. Авиационные бесшатунные двигатели. Сравнительный анализ с кривошипно-шатунными и воздушно-реактивными двигателями, 2015 г.
- Игорь Зиновьев. По следам сенсаций. // Техника-молодежи, № 11, 1983 г. Стр. 35.
- Куколев М.И., Костин А.И., Дворцов В.С. Оценка влияния пар трения на динамику бесшатунного силового механизма // Известия Международной академии аграрного образования. СПб.: СПбМААО, 2013. Вып. 16, Т. 4. С. 88-91.
- Филькенбергер Л.А. Авиационные поршневые двигатели XXI века. Интервью 7 декабря 2017 г. URL: <http://www.ciam.ru/press-center/interview/aviation-piston-engines-of-the-xxi-century/>
- Юрий Бехли. Основные вехи развития отечественных авиационных поршневых двигателей (краткий обзор). URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/23/page13.html>

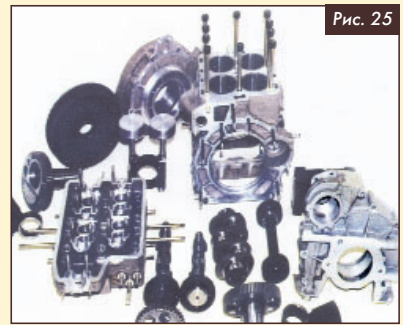


Рис. 25

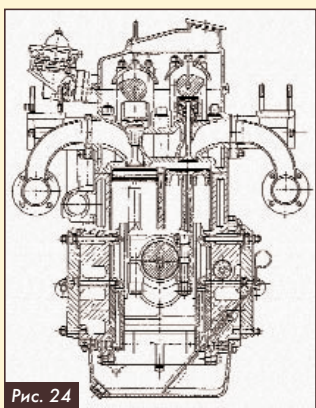


Рис. 24