

4-х тактный балансирный ПДП-двигатель.

В журнале «Техника молодёжи» №11 за 2015 год опубликована статья Михаила Бирюкова «Магия встречного движения». В данной статье описаны 2-х тактные ПДП - двигатели, устанавливаемые на различные виды транспорта. Статья достаточно объёмна и информативна.

Причиной написания статьи о 4-х тактном ПДП-двигателе послужило то, что поршневые двигатели внутреннего сгорания будут востребованы в ближайшие 20...30 лет, несмотря на прогресс в развитии других видов силовых установок.

ДВС будут переходить на использование газомоторного топлива и продуктов переработки природного газа, например ДМЭ (диметиловый эфир). Такая задача поставлена перед моторостроителями России.

В статье показывается возможность развития двигателей ПДП – схемы, но уже 4-х тактного типа. Первый 4-х тактный ПДП – двигатель был разработан в Российской Империи ещё в 19 веке, двигатель разрабатывался Огнеславом Костовичем для дирижабля «Россия». В настоящее время двигатель хранится в музее Петербурга.

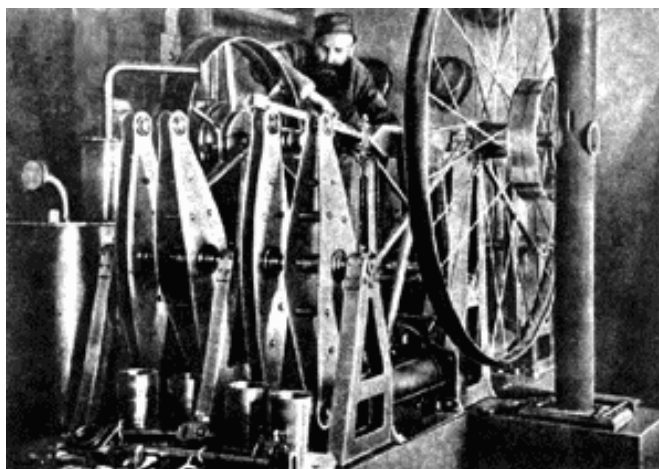
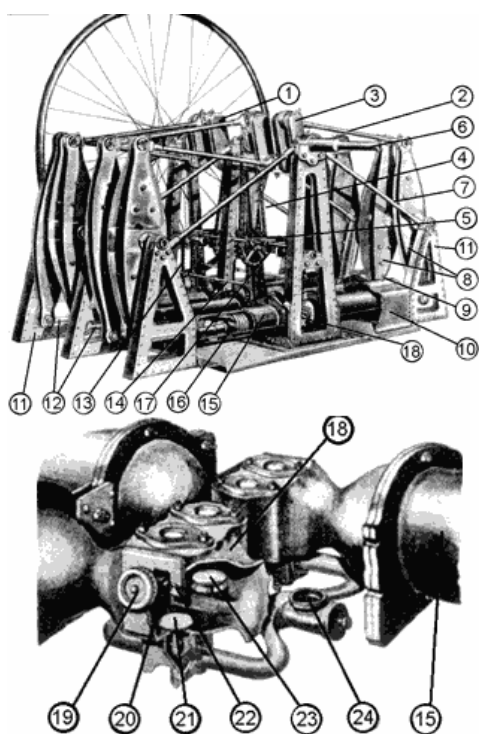


Рис.1 – Двигатель Костовича

Это был первый поршневой ДВС, созданный в России, для авиационной техники. Статья по данному двигателю опубликована в журнале «Изобретатель и Рационализатор» №2(650) за 2004 год.

Схема данного ПДП двигателя не получила дальнейшего развития в России. Раймонд Корейво разработал схему 2-х тактного ПДП - двигателя, 2-х вальной схемы, наиболее часто применяемую в прошлом и настоящее время. В 2-х тактных ПДП – двигателях также применяется одновальная схема с балансирным приводом коленчатого вала, как у двигателя Костовича.

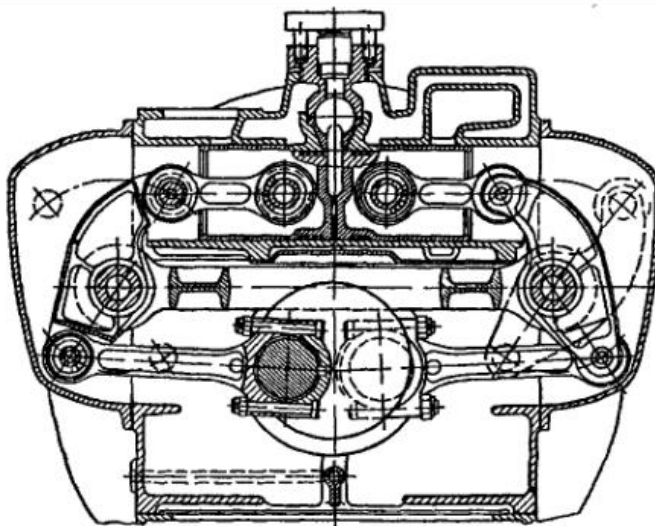


Рисунок 2 – Конструктивная схема двигателя фирмы «Commer»

МВТУ им. Баумана, НАМИ, «Алюминиевая Ассоциация», «Русал» совместно с моторными и автозаводами разработали программу по созданию унифицированного ряда поршневых двигателей. Программой предусматривается широкое использование алюминиевых сплавов в конструкции поршневых ДВС. Применение алюминиевых сплавов способствует снижению нагрузок на ходовую часть автомобиля, но приводит к необходимости использования конструктивных решений, учитывающих особенности данных материалов. Широкое применение алюминиевых сплавов при изготовлении ДВС разного назначения, в сочетании с применением природного газа в качестве моторного топлива, позволит ещё долго конкурировать поршневым двигателям с электромоторами.

В настоящее время в Море имеется ряд разработок систем ДВС, направленных на создание поршневых двигателей, работающих на природном газе, позволяющих использовать его на транспортных средствах ещё в течение нескольких десятилетий. К таким разработкам относятся:

1. Микродуговое оксидирование (МДО) рабочих поверхностей двигателя;
2. Применение СВЧ зажигания рабочей смеси;
3. Непосредственный впрыск газа в цилиндр;
4. Применение единой смазочно-охлаждающей жидкости - моторного масла;
5. Применение безкулачкового привода системы ГРМ с регулируемым ходом клапанов;
6. Применение 4-х тактных ПДП – двигателей балансирной схемы.

Рассмотрим каждую разработку.

1. Микродуговое оксидирование (МДО) рабочих поверхностей двигателя

МДО – покрытие образуется на поверхности металлов переходной группы под действием электродугового процесса. Процесс происходит в среде электролита, определённого состава, при дуговом разряде между электродом и покрываемой деталью. В зависимости от химического состава металла детали и состава электролита, могут формироваться покрытия как термобарьерного, так и антифрикционного типов.

Представляет интерес термобарьерное покрытие, в виде поверхностного слоя муллита (метасиликата алюминия). Данное покрытие имеет пористую структуру, что позволяет модифицировать поверхность определёнными солями металлов. Покрытие предполагается наносить на поверхность камеры сгорания и «огневую поверхность»

поршня. Покрытие камеры сгорания механически не обрабатывается, состоит из наружного муллитового слоя на корундовом подслое. Наружный слой пропитывается солями никеля и кобальта. Керамическое покрытие, при работе, обладает электретными свойствами. Соли никеля и кобальта являются катализаторами, что вместе с электретными свойствами способствует интенсификации процесса сгорания топлива.

2. Применение СВЧ зажигания рабочей смеси

Немецкая фирма MWI (Micro Valve Ignition AG) разработала СВЧ систему зажигания, которая в настоящее время проходит испытания. По открытым литературным данным, СВЧ зажигание пороховых зарядов используется в артиллерийских орудиях, разработанных в России. Также есть сообщения о разработке в России способа сжигания газообразных топлив с применением квазиоптического СВЧ – пучка. Отмечается, что затраты энергии сравнимы с искровыми системами зажигания. Система СВЧ – зажигания генерирует в камере сгорания множественные очаги воспламенения, в отличие от классического зажигания от одной или 2-х искровых свечей зажигания.

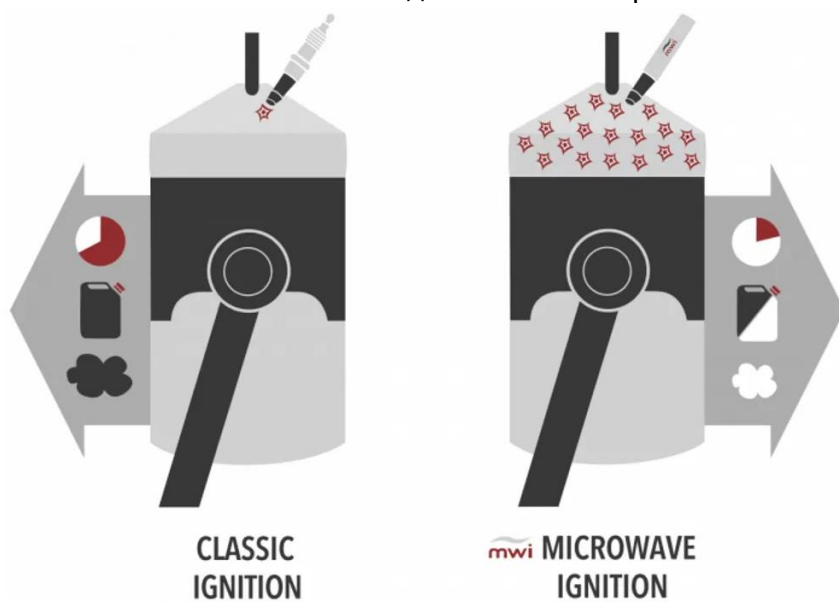


Рисунок 3 – воспламенение смеси от искровой и СВЧ - свечей

Подобная система зажигания позволяет значительно сократить время горения, уменьшить потери тепла в стенки цилиндра в процессе расширения, за счёт большей «своевременности» подвода тепла. Данная система зажигания наиболее целесообразна для двигателей, имеющих «L – камеры», «вихревые клиновидные» и «вихревые укороченные» камеры сгорания. На данных камерах можно применять форкамеры со свечами накаливания типа «Smart Plug», а также обычные искровые свечи.

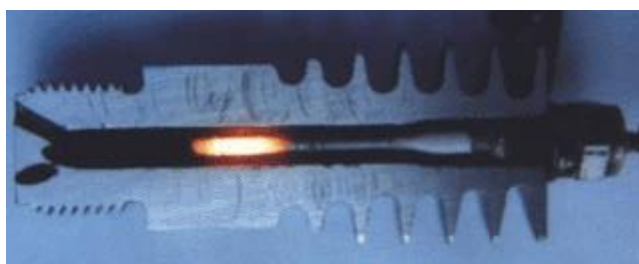


Рисунок 4 – Форкамера «Smart Plug»

Данные форкамеры применяются на авиационных двигателях «Continental» O-200 для работы на керосине и бензине с ОЧ-92.

3. Непосредственный впрыск газа в цилиндр

На начальном этапе целесообразно использовать обычный, распределённый, впрыск природного газа под впускные клапаны двигателя. По мере отработки системы непосредственного впрыска природного газа можно переходить на систему непосредственного впрыска. В «вихревых камерах» будет обеспечено активное смесеобразование однофазных сред окислителя и горючего, в сочетании с СВЧ – зажиганием можно получить качественный рабочий процесс двигателя.

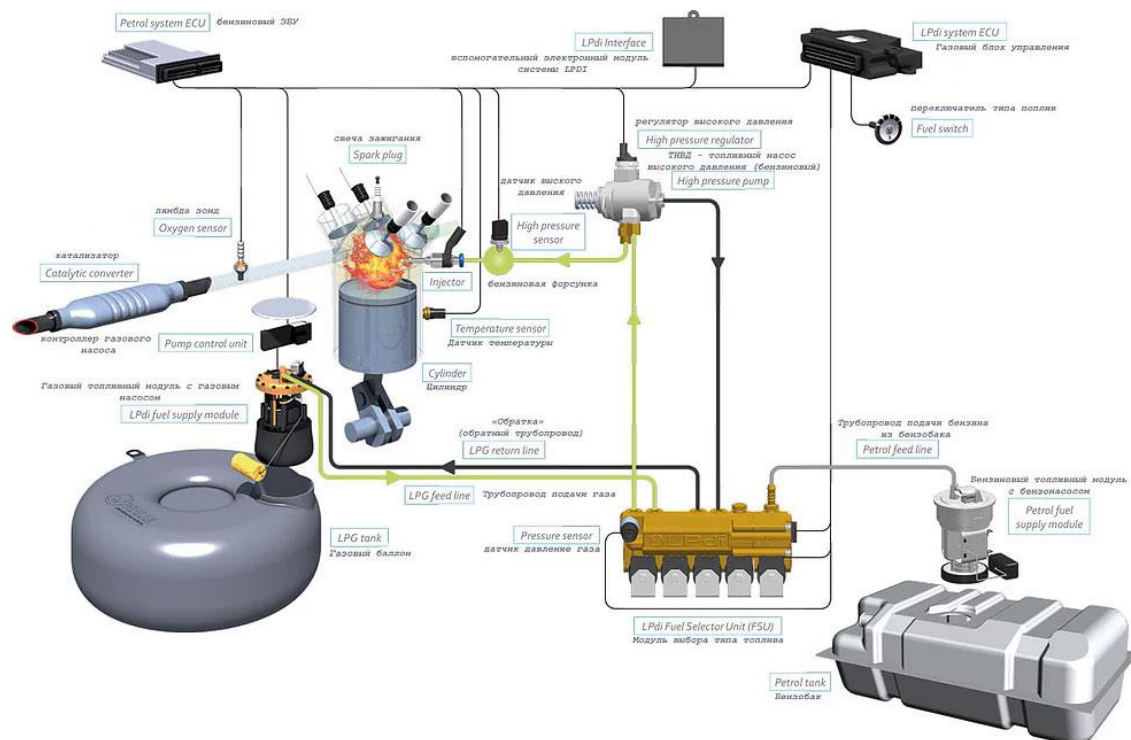


Рисунок 5 – Система непосредственного впрыска газа

4. Применение единой смазочно-охлаждающей жидкости, моторного масла

При ПДП - компоновке, балансирного типа, появляется возможность применения сочетания канальной и струйной масляной системы охлаждения двигателя. Такая система охлаждения позволит иметь двигатель с одной смазочно-охлаждающей жидкостью. Система охлаждения становится масляно-воздушной. В настоящее время двигатели с такими системами охлаждения выпускаются германскими фирмами MTU (двигатели армейских машин серии MTU 890), Deutz (промышленные дизели серии D2011) и японские 4-х тактные мотоциклетные двигатели Suzuki GSX-R750. Масляно-воздушная система охлаждения упрощает эксплуатацию двигателя, повышает надёжность (отсутствует отдельная система охлаждения). В зимних условиях упрощается подготовка к пуску, т.к. прогревается только маслобак двигателя. Охлаждение камеры сгорания будет производиться прокачкой масла по каналам, охлаждение цилиндра прокачкой масла через полость и слив в картер. Поршни, впускные и выпускные каналы будут охлаждаться струйным способом. При таком способе охлаждения происходит интенсивный тепломассообмен, масло эффективно отводит тепло от нагретых деталей

двигателя. Масляная система двигателя будет включать в себя масляный насос системы смазки, масляный насос системы охлаждения и центрифугу.

5. Применение безкулачкового привода системы ГРМ с регулируемым ходом клапанов

Развитие современных систем управления двигателем позволило перейти к непосредственному управлению фазами газораспределения двигателя в процессе работы. Подобные системы позволяют отказаться от применения дроссельных блоков в газовых двигателях, соответственно улучшаются экономические показатели силовой установки. Управляемый клапанный привод позволяет легко обеспечить отношение степени последующего расширения к степени сжатия выше 1. Это достигается управляемым перепуском части свежего заряда во впускной коллектор. Отсутствие распределительного вала упрощает кинематику привода вспомогательных агрегатов и снижает потери на трение в двигателе.



Рисунок 6 – Система безкулачкового привода ГРМ

Для упрощённых вариантов двигателей будет применяться обычная, кулачковая система ГРМ с верхним расположением кулачковых валов и гидрокомпенсаторами зазоров.

6. Применение 4-х тактных ПДП – двигателей балансирной схемы

Автором данной статьи разработана конструкция 4-х тактного ПДП – двигателя с балансирной системой передачи на коленчатый вал. Первый вариант двигателя разрабатывался как 2-х секционный, «перевернутый», безредукторный авиационный двигатель мощностью 108 л.с. при $n = 2800$ об. / мин. Двигатель разрабатывался как альтернатива «Ротакс-912» и имеет сопоставимые с ним вес и габариты.

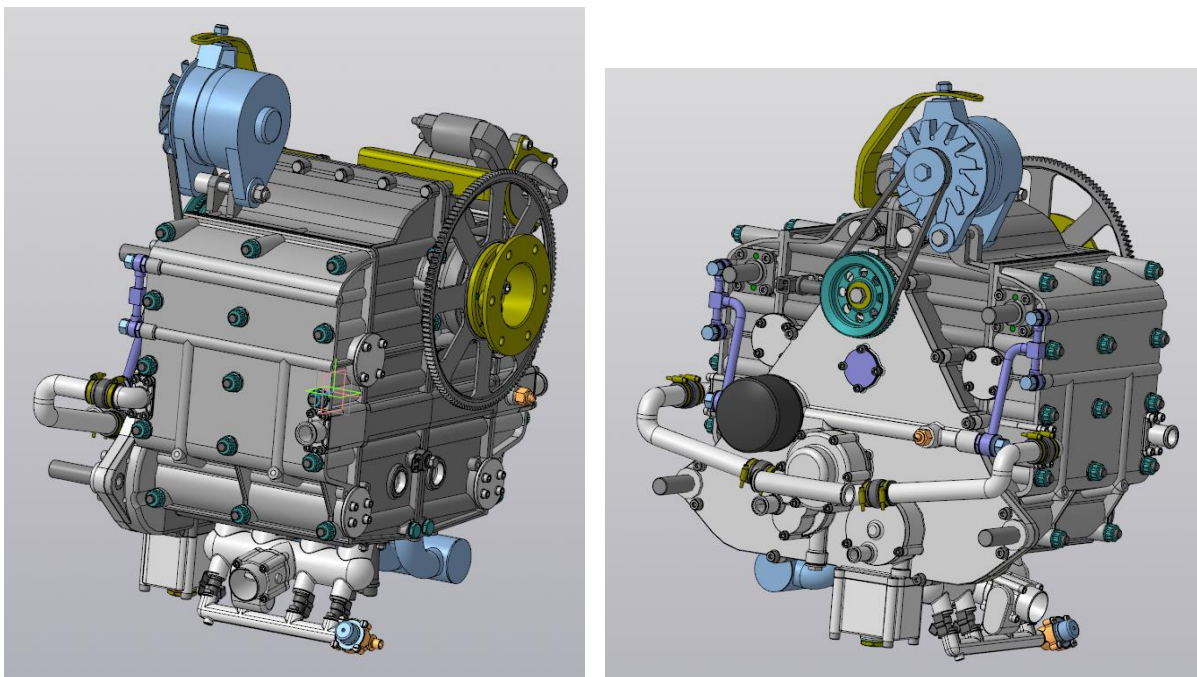


Рисунок 7 – Двигатель АПД-100 [ПДП-2Ч(10х10)2] «перевёрнутого типа»

Двигатель бензиновый, жидкостного охлаждения. Кинематическая схема двигателя, за счёт «зеркальности» деталей КШМ, позволяет получить полностью уравновешенный двигатель. Блок двигателя состоит из пяти алюминиевых деталей, стянутых сквозными шпильками. В данной конструкции на растяжение работают только сквозные шпильки.

Двигатель имеет два распредвала: распредвал впускных и распредвал выпускных клапанов. На каждую камеру сгорания приходится по два впускных и два выпускных клапана. Камера сгорания «боковая клиновидная вихревая» с двумя свечами зажигания на камеру. Камеры сгорания подобного типа, в особенности у двигателей ПДП – схемы, по качеству смесеобразования, за счёт развитого вытеснителя, по экономичности находятся на одном уровне с «шатровыми» и «шатровыми с вытеснителем». Сравнительные характеристики камер (См. рис.8.) даны в учебнике «Двигатели внутреннего сгорания» Т1 под редакцией А.С.Орлина, годы выпуска 1949 и 1951. Применение СВЧ-зажигания только улучшит характеристики такой камеры.

Индикаторные показатели двигателей с жидкостным, от электрической схемы 125

Таблица 9

Влияние формы камеры сгорания, расположения свечей и клапанов на коэффициент полезного действия двигателя и индикаторный η_i , %

Форма камеры сгорания	Схема	Индикаторный коэффициент полезного действия				Оптический коэффициент полезного действия	
		70–74	75–80	80–85	85–90	70–74	75–80
1. Полушаровидная клиновидная		6,8	7,3	8,5	1,0	1,0	1,07
2. Вихревая		6,5	7,0	—	0,97	0,99	—
3. Вихревая с опускной камерой		6,85	—	—	0,98	—	—
4. Вихревая клиновидная		7,0	7,3	8,5	1,0	1,05	1,07
5. Цилиндрическая		7–8	—	—	—	—	—
6. Шатровая		—	—	8,0	—	—	1,05
7. Шатровая с вытеснителем на поршне		—	—	8,5	—	—	1,07

Рисунок 8 – Характеристики камер сгорания

В настоящий момент, в Море, вернулся интерес к разделённым камерам сгорания. Подобные камеры позволяют увеличить интенсивность перемешивания топливно-воздушной смеси; как следствие, сокращается время горения смеси. Уменьшается период догорания смеси на линии расширения, как следствие, уменьшаются тепловые потери в систему охлаждения двигателя. Известно, что для ускорения реакции в 2-х и многофазных реагирующих средах необходимо активное перемешивание. Современные камеры сгорания бензиновых двигателей не всегда обеспечивают активное перемешивание рабочей смеси из-за слабо развитого вытеснителя.

Для интенсификации перемешивания применяют, например, предкамеры (рисунок 9), камеры сгорания в поршне (рисунок 10) и т.д.

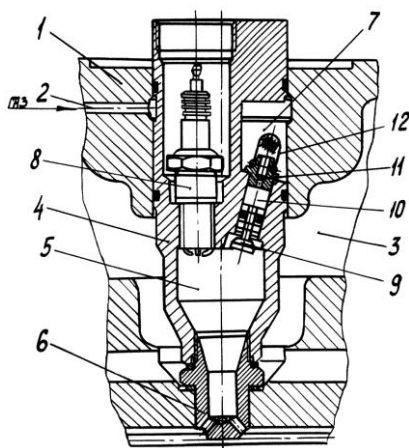


Рисунок 9 – Предкамера

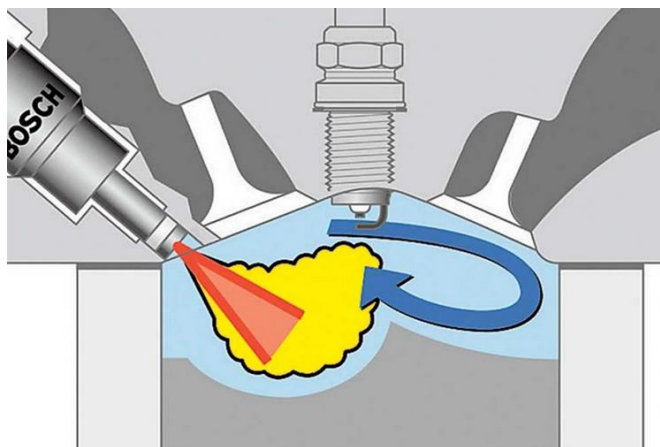


Рисунок 10 – Современная камера сгорания

По площади теплообмена современные камеры сгорания двигателей с непосредственным впрыском не сильно отличаются от «боковой клиновидной вихревой» камеры. Поршни ПДП – двигателя, с оговоренной выше камерой, имеют менее «вычурные» формы, легче и проще в изготовлении.



Рисунок 11 – Поршни впрысковых двигателей

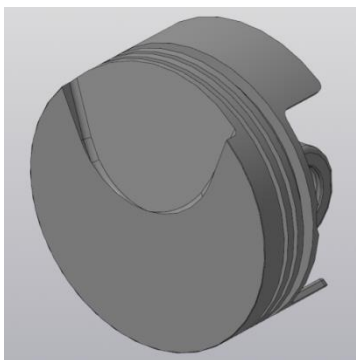


Рисунок 12 – Поршень ПДП-двигателя с «боковой клиновидной вихревой» камерой.

Кривошипно-шатунный механизм ПДП-двигателя представлен на рис. 13.

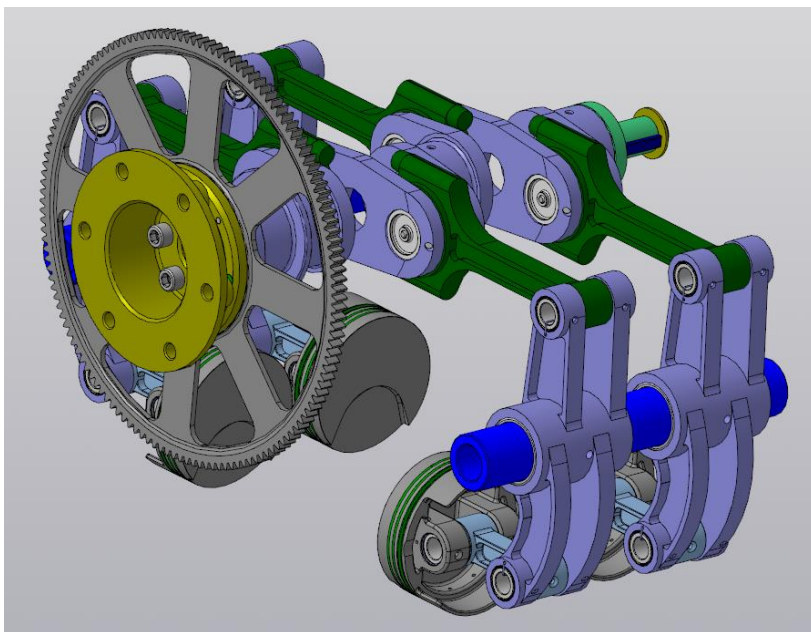


Рисунок 13 – КШМ ПДП-двигателя «перевернутого типа»

КШМ двигателя состоит из 3-х опорного коленчатого вала, коромысел с осями, больших и малых шатунов и поршневых комплектов. На схеме видно, что поршни работают в противофазе. Все силы и моменты взаимно уравновешены, кроме крутящего момента. Нагрузка от газовых сил передаётся осями на крышки блоков.

По неравномерности хода представленный двигатель эквивалентен 2-х цилиндровому 4-х тактному двигателю.

Корпусные детали двигателя выполнены из алюминиевых сплавов и состоят из 2-х блоков цилиндров (впускного и выпускного), 2-х крышек блоков цилиндров и крышки коробки привода агрегатов. Ниже на рис. 14 приводится вид впускного блока цилиндров, на котором хорошо видна форма камеры сгорания. В связи с тем, что двигатель выполнен «перевернутого» типа, противолежащие цилиндры соосны. Такая схема применяется только на приведённом выше типе двигателя.

Двигатели с верхним расположением цилиндров имеют наклонную установку цилиндров относительно друг друга. На рис. 15 представлена компоновка «газового» двигателя.

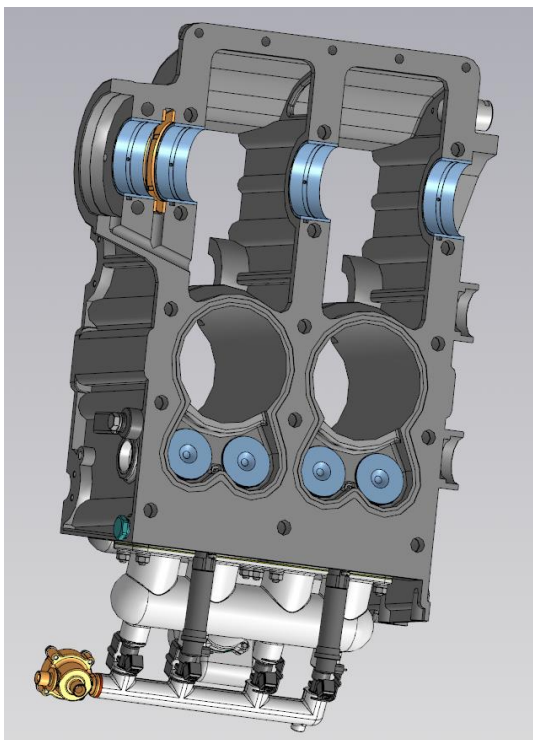


Рисунок 14 – блок цилиндров впускной

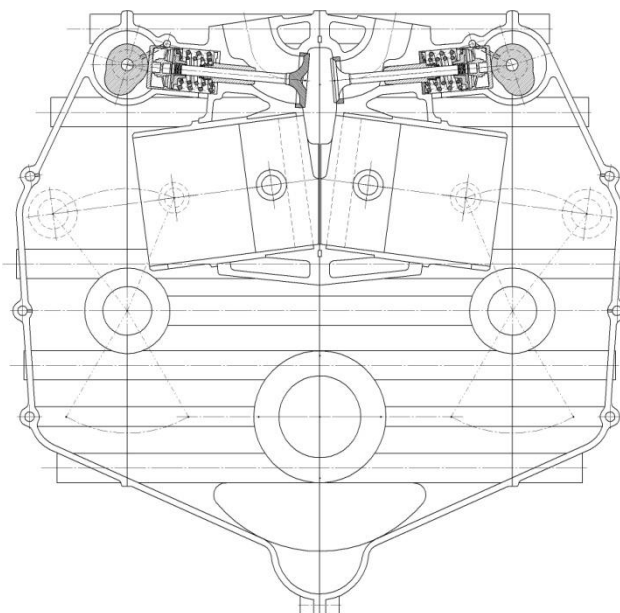


Рисунок 15 – компоновка «газового» двигателя

На рис.15 показаны «боковая вихревая клиновидная» камера сгорания и расположение ГРМ. Также показаны каналы системы охлаждения и масляные форсунки, в крышках блоков цилиндров, предназначенные для охлаждения и смазки деталей двигателя. Гильзы цилиндров съёмные, чугунные или стальные, с химико-термической обработкой рабочей поверхности. Детали КШМ не показаны, это проработка ЦПГ, ГРМ, систем смазки и охлаждения.

6.1. Двигатель, построенный по схеме на Рис.15 имеет следующие особенности:

1. ПДП схема позволяет увеличить полезную работу рабочих газов за счёт более полного расширения;
2. При балансирующей схеме на кривошип действует пара сил от 2-х противоположных поршней, уменьшается время приёмистости. Газовые силы, действующие на противоположные кривошипы, разгружают коренные подшипники. Действие газовых сил переносится на оси балансиров, это не критично, ось балансира работает только на изгиб.
3. Коленчатые валы балансирующих двигателей не имеют массивных противовесов, это способствует снижению веса детали, что очень важно в авиации.
4. Блоки противоположных цилиндров разгружены от растягивающих газовых сил. Растягивающие нагрузки воспринимают крышки блоков, но они не испытывают больших термических напряжений как блоки цилиндров.
5. Балансирующая схема снижает нормальную нагрузку на стенки цилиндра, соответственно снижаются механические потери на трение в наиболее проблемном месте, т.е. в паре гильза - поршень.
6. Отсутствуют головки блока цилиндров, их функцию взяли блоки цилиндров, при боковом расположении клапанов. При такой схеме можно делать по 4 клапана на секцию, камера сгорания «боковая вихревая клиновидная», по две свечи на камеру. При непосредственном впрыске появляется возможность организации плёночно-вихревого

процесса, это позволяет использовать тяжёлые сорта топлива, например авиационный керосин, газовый конденсат или ТШФС.

7. Установка впускных и выпускных клапанов, напротив друг друга, позволяет обеспечивать качественную продувку камеры сгорания свежим зарядом. При этом достигается хорошее охлаждение выпускных клапанов, что снижает риск возникновения детонации.

8. На двигателе целесообразно применение 2-х искровых свечей зажигания, могут быть использованы свечи накаливания, устанавливаемые в форкамеры, по типу «Smart Plug». В настоящее время отрабатываются системы зажигания с применением СВЧ свечей. Применение СВЧ - запальных устройств позволяет производить объёмное воспламенение свежего заряда, что способствует более полному сгоранию и уменьшает количество догорающей смеси на линии расширения. Это позволит поднять экономичность двигателя.

9. Конструкция двигателя позволяет отказаться от жидкостного охлаждения традиционного типа и перейти на канально-струйное масляно-воздушное охлаждение. Двигатель будет иметь только одну смазочно-охлаждающую жидкость.

10. Для авиационного мотора балансирного ПДП-типа наиболее целесообразно использование воздушной системы запуска. Современные воздушные компрессоры и углекислотные баллоны, под сжатый воздух, имеют небольшую массу. В условиях Крайнего Севера, при сильных морозах, гораздо проще запустить двигатель воздухом, чем от электростартера. На борту ЛА может находиться небольшой компрессор с ручным приводом, по типу компрессора самолёта Пе-2.

11. Поршни 4-х тактного ПДП работают в лучших условиях, чем поршни 2-х тактных ПДП. Токсичность выхлопа будет ниже у 4-х тактного ПДП по сравнению с 2-х тактным ПДП - двигателем. При использовании газового топлива ресурс ЦПГ увеличится, снизится токсичность отработавших газов.

12. Гильзы стальные или чугунные нитроцементированные, съёмного типа. Возможно применение алюминиевых гильз с покрытием МДО или высококремнистых алюминиевых сплавов. Это позволит проводить капитальные ремонты при относительно низких затратах.

13. ПДП – двигатель, балансирного типа более компактен, чем классические рядные поршневые двигатели разных схем.

14. Очень важное преимущество ПДП балансирного типа для авиации заключается в том, что при отказе секции (т.е. камеры с двумя противоположными поршнями) двигатель не будет трясти как любой другой рядный поршневой двигатель и двигатель радиальной схемы, это снижает нагрузку на пилота и уменьшает опасность возникновения резонансных колебаний в планере ЛА.

15. ПДП – двигатель, балансирного типа, имеет возможность работы с отключением секций. Секции у многоцилиндрового двигателя целесообразно отключать последовательно - попеременно. Это позволит поддерживать оптимальный тепловой режим двигателя. Данный режим работы может применяться на частичных нагрузках с целью экономии топлива.

16. Отключение секций двигателя производится одновременным отключением подачи топлива на форсунку секции и подъёмом одного впускного клапана посредством исполнительного механизма декомпрессора, гидравлического или пневматического типа.

17. Применение механизма декомпрессора позволяет реализовать цикл Аткинсона, для этого необходимо применение непосредственного впрыска топлива в камеру секции.

18. ПДП схема балансирного двигателя в наибольшей степени подходит для двигателей, имеющих корпусные детали из алюминиевых или алюмомагние-вых сплавов.

Силовая схема выполнена в виде коробчатых корпусных изделий, в основном, разгруженных от растягивающих нагрузок.

19. На ПДП – двигателе более рационально komponуется ТКР системы наддува, по сравнению с V-образными и радиальными двигателями.

20. По степени неравномерности хода, к примеру, 2-х секционный 4-х поршневой двигатель, эквивалентен 2-х цилиндровому 4-х тактному двигателю, крутящий момент у ПДП двигателя будет в 2-раза больше (при одинаковой размерности ЦПГ сравниваемых двигателей). Если потребуется делать редуктор на авиационный двигатель, он будет более сложным и нагруженным.

21. «Боковая вихревая клиновидная» камера сгорания имеет более умеренные степени сжатия, обычно не выше 9-ти. Для авиадвигателя, работающего на лёгких топливах, это не актуально, он работает обычно на режимах близких к максимальной мощности, степень сжатия у таких двигателей находится в диапазоне 7...9. Камеры подобного типа применялись на дизельных двигателях в середине 30-х годов прошлого века. Работу этих камер по дизельному процессу ещё необходимо изучать.

Костенко А.Г. г. Волгоград. 2020 г.