

А.Н. ЖУКОВ

О ВИРТУАЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ С ПОРШНЕВЫМИ ОСЦИЛЛЯТОРАМИ

Намечается направление совершенствования реактивных двигателей, заключающееся во включении в них трансформаций двигателя внутреннего сгорания - поршневых агрегатов без кривошипно-шатунного механизма. . Ключевой агрегат - поршневой осциллятор. В построениях применяются принципы формирования и моделирования предельных абстракций двигателестроения. Даются оценки перспектив практической разработки виртуальных структур.

ВВЕДЕНИЕ

В кардинально отличном от [1] направлении совершенствования авиационных воздушно-реактивных двигателей (ВРД) корневым прототипом остается винтомоторная установка (ВМУ). Ее дискретный преобразователь тепловой энергии в механическую энергию – авиационный двигатель внутреннего сгорания (ДВС), именно его и блок поршней, и специфика движений поршней, и силовая схема связей поршней, и механизм передачи мощности потребителю существенно трансформируются. Под-подсистема - основа преобразований называется **поршневой осциллятор**.

Принципиальные схемы типов, подтипов объектов двигателестроения формируются по результатам обобщений возможностей традиционных разновидностей не только авиационных, но и наземных ДВС. В построениях осцилляторов, интеграции их в абстрактные ДВС, в термореактивные системы «ВРД» применяются принципы формирования и моделирования виртуальных структур [2].

Обозначаются кардинальные ограничения построений первых вариантов поршневого осциллятора.

- ⊙ Стремление к расширению области применения поршневых подсистем в авиации обусловлено тем, что технически допустимая температура газа в них ориентировочно равна 2500^0 абс [3], тогда как в ВРД непрерывного действия максимальная температура газа перед турбиной с интенсивно охлаждаемыми лопатками $\approx 1800^0$ абс.
- ⊙ В экономичном ДВС степень сжатия воздуха, длина хода поршня, радиус вращения кривошипа велики. При предварительной подготовке топливно-воздушной смеси степень сжатия ограничена температурой самовоспламенения. Частота вращения ротора невелика. В силу увеличенного радиуса вращения кривошипа возникают боковые усилия, имеет место проблема ускоренного износа механизма [4]. Общие габариты, вес конструкции относительно велики.
- ⊙ В ДВС большой удельной мощности степень сжатия газа, длина хода поршня и радиус вращения кривошипа относительно невелики, применяются запальные свечи, частота исполнения термодинамического цикла в цилиндре (частота вращения ротора) велика. Уменьшение габаритов, веса конструкции – следствия относительно небольшой степени сжатия в цикле, увеличения удельного расхода топлива.
- ⊙ Практикуется интенсификация мощности авиационного мотора *прямым впрыском топлива* – вводом дополнительной порции топлива непосредственно в зону горения.
- ⊙ Исследования по подготовке комплексных условий высокоэффективного высвобождения энергии топлива целесообразны. Разработка, построение систем, в которых со вмещались бы мощность быстроходных ДВС с экономичностью тихоходных ДВС, желательна.
- ⊙ Прототипами первых осцилляторов полагаются разновидности 4-тактного ДВС.

© В рис. 1 изображена примерная схема ВМУ с 4-тактным 4-цилиндровым мотором. В этом варианте последовательность исполнения тактов может быть такой, что за один ход поршней в моторе исполняется замкнутый термодинамический цикл. 4 емкости – необходимое и достаточное количество для построения одного осциллятора.

В описаниях возможностей поршневого осциллятора (ПО) используются термины *периодические свободные, вынужденные колебания*. Под *свободными* подразумеваются колебания, в процессе совершения которых внешнее силовое поле, полная энергия системы не изменяется. Примеры - колебания материальной точки под воздействием упругих сил пружины, колебания математического маятника [5]. *Вынужденными* называются колебания, в процессе совершения которых силовое воздействие извне, полная энергия изменяются.

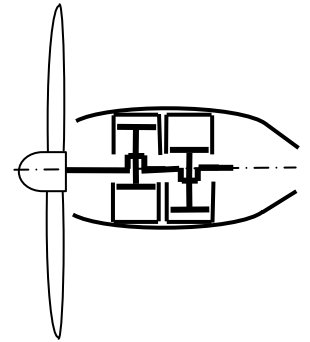


Рис. 1

Априорно ПО состоит из корпуса и собственно осциллятора. Корпус образуют жестко скрепленные оболочки трансформированных цилиндров ДВС, собственно осциллятор есть жестко связанные единым штоком поршни. ПО это

- агрегат, в котором нет кривошипно-шатунных механизмов;
- система, производящая механическую энергию термодинамического цикла в виде потенциальной энергии давления высокотемпературного газа;
- подсистема (под-подсистема ВРД), применение которой в качестве самостоятельной двигательной установки невозможно – требуется подсистема, превращающая энергию давления высокотемпературного газа в механическую работу ДВС (в энергию реактивной струи ВРД).

В формальных описаниях ПО - агрегат, в котором связка поршней может совершать специфические вынужденные колебания, называемые тут *квазисвободными колебаниями*. Такие колебания – результат суммарного воздействия плавно изменяющихся упругих сил газа и скачков давления в изохорном подводе тепла при приходе связки поршней в точки с нулевой скоростью. Между скачками состояний газов она воспринимается системой, совершающей свободное колебательное движение. Другие важнейшие аспекты формирования, их возможностей представляются в тексте.

Таким образом, изначально осциллятор формируется схематично, в отвлечении от подробностей практики двигателестроения, ПО - продукт *высокой степени абстракции*, функционирующий в соответствии с законами идеального термодинамического цикла, механики движений материальной точки. В принципе можно ограничиться сферой абстрактных построений и задаться целью формирования всех теоретически допустимых ПО. Исследование всевозможных состояний функционирования таких абстракций в рамках раздела фундаментальной науки может иметь определенное значение. Но теория ВРД – отраслевая прикладная наука. Здесь важна ориентация на практику, здесь не менее, если не более существенное значение имеют оценки перспектив воплощения теоретического образования «ПО» в эффективное изделие практики. Этот фактор ограничивает число вариантов, заставляет вначале описать процесс формирования, в котором предельные абстракции насколько это возможно продвигаются на соседние более подробные уровни описания. Формирования ожидаемо рациональных абстракций сопровождаются обсуждениями, неформальными оценками перспектив практической разработки и интеграции их в ДВС, ВРД. Затем возможности абстракций исследуются формально. В такой последовательности изложения результаты математического моделирования трактуются как результаты, подтверждающие термодинамические, кинематические аспекты неформальных оценок сложного целостного процесса.

Основы построений.

❖ Формируется примерный вариант схемы ВРД, в которой будущий осциллятор представлен предварительно с неопределенной конструктивной схемой. Назначение при-

мерной схемы ВРД – как можно полнее проявить специфику функционирования агрегата «ПО», обеспечить как можно большую автономность его функционирования.

- ❖ Формирование представляется *четырёхступенчатым* процессом. Исходные прототипы – традиционные подтипы ДВС наземных стационарных установок и транспорта, авиационный поршневой мотор.
- ❖ Определяется основной фрагмент коррективы ступени, предположительно повышающий уровень эффективности результата формирования предыдущей ступени. Образуется модификация, даются оценки по частным критериям двигателестроения - мощности, импульсу по тепловой энергии топлива, весу и габаритам конструкции.
- ❖ Ввод основного фрагмента коррективы может обусловить трансформацию некоторых связанных с ПО способов исполнения второстепенных процессов. В таком случае формируются примерные варианты механизмов исполнения этих процессов. Как правило, они те, которые из сферы теоретических построений структур видятся простейшими вариантами. Здесь следует отметить четыре обстоятельства. 1). Примерным вариантом демонстрируется принципиальная возможность решения технической проблемы, но он может быть низкоэффективным. 2). Обычно имеются почти очевидные и иные варианты реализации второстепенного процесса, окончательный выбор – прерогатива детализации проекта. 3) Ожидается, имеются пока скрытые возможности высокоэффективного исполнения второстепенного процесса. 4). Целесообразна разработка высокоэффективной реализации второстепенного процесса, если с вводом основной коррективы совершенство промежуточного варианта ПО значительно повышается и в арсенале реализаций второстепенного процесса нет приемлемого варианта.

1. Формирования, обсуждения примерных подтипов

1.1. О схемах с предварительным представлением осцилляторов

Двигатель с поршневыми осцилляторами как альтернатива авиационного ДВС это объединение осцилляторов, осевой турбины, ресиверов нивелирования колебаний газов.

Сопло – простейший механизм превращения энергии давления газа в энергию реактивной струи, связка «воздухозаборник + ПО + сопло» - простейшая разновидность одноконтурного реактивно-поршневого двигателя. Вероятность ее применения в ближайшем будущем по причине ограниченной пропускной способности поршневых подсистем мала.

Схему ВМУ можно трансформировать в схему с поршневыми осцилляторами: в трансформации вместо блока цилиндров с коленчатым валом показать условное изображение блока осцилляторов, емкость с производимым осцилляторами газом высокого давления, турбину, гладкий вал – механизм передачи механической энергии турбины на винт. В такой схеме вращение винта будет оказывать влияние на поток перед осцилляторами.

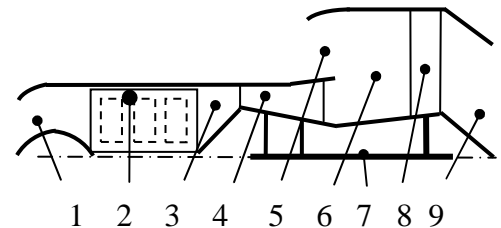


Рис. 2. РДДПО1

Представляется схема *реактивного двигателя двухконтурного с осцилляторами* (РДДПО) первой модификации (РДДПО1, рис. 2, где 1 и 5 – воздухозаборники ведущего и тягового контура, 2 – блок поршневых осцилляторов, их изображение – прямоугольники в пунктирных линиях, 3 – высоконапорный ресивер, 4 – турбина, 6 – камера смешения, 7 - вал ротора турбовентилятора, 8 – вентилятор, 9 – сопло). Суть трансформации «ВМУ → РДДПО1» заключается в перестановке винта из переднего положения в заднее положение и преобразовании его в вентилятор, в замене мотора блоком ПО, замене передачи свободной энергии мотора на винт преобразованием свободной энергии блока ПО в турбине и передачи ее на вентилятор.

Подчеркивается: варианты РДДПО - двигатели дозвуковой авиации, в которых вентилятор может быть винтом; формирование остова удовлетворительно аппроксимирует расчетный режим функционирования при взлете.

1.2. Прототип осциллятора, пошаговая трансформация

Разнообразие прототипов ДВС с осциллятором представляется *обобщенным прототипом*.

- ⊙ Обобщенный прототип - представитель подтипа со значительной длиной хода поршня, т.е. является приближением к экономичному варианту (ввод крейцкопфа желателен), но он - тронковый двигатель, что указывает на желательность приближения к мощному варианту.
- ⊙ Совершенство ДВС зависит и от степени очистки ее емкостей от продуктов сгорания. Остатки продуктов сгорания предыдущего цикла уменьшают массу рабочего тела термодинамического цикла. Смешиваясь с порцией свежего газа, они увеличивают температуру смеси. Уменьшение массы рабочего тела это уменьшение мощности, увеличение температуры газа в начале цикла - понижение уровня экономичности. Как можно полная очистка емкостей от продуктов сгорания становится актуальной при их относительно высоком давлении.
- ⊙ В виртуальном осцилляторе давление вытесняемых продуктов сгорания будет относительно велико. Полагается: в прототипе применен способ очистки емкостей перемещениями части цилиндра со сводом (торцевой стенкой) камеры сгорания.

Прототип функционирует следующим образом.

В цилиндре 1 (рис.3, 1 – 4 – номера цилиндров) поршень находится в окрестности «левой мертвой точки», свод камеры сгорания находится в крайнем левом положении (в рисунке фиксатор этого положения не показан). Энергия топлива высвобождена, с движением к «правой мертвой точке» газ совершает работу. В цилиндре 2 поршень находится в окрестности «правой мертвой точки», он движется к «левой мертвой точке». Начато перемещение свода камеры сгорания из крайнего левого положения к правому положению. Газ вытесняется из цилиндра. В цилиндре 3 поршень выходит из окрестности «левой мертвой точки», свод камеры сгорания начинает движение из крайнего правого положения к крайнему левому положению, воздух впускается в цилиндр из диффузора. (Отмечается дополнительный позитивный фактор: убыстренное перемещение свода позволит увеличить коэффициент заполнения цилиндра воздухом). В цилиндре 4 при сжатии воздуха свод камеры сгорания находится в крайнем левом положении.

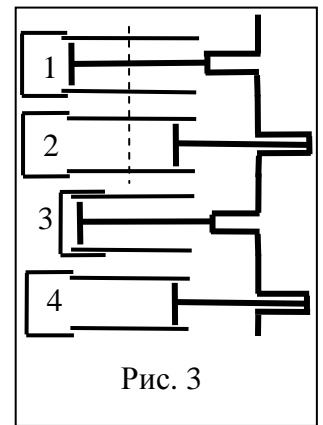


Рис. 3

В принципе прототип-блок ДВС может быть введен в РДДПО вместо осциллятора. В таком случае такт очистки емкости цилиндра от продуктов сгорания должен быть скорректирован следующим образом.

- ⊙ В начале движения поршня из «правой мертвой точки» окна выпуска продуктов сгорания остаются закрытыми - энергия вращения ротора ДВС обратно превращается в энергию давления газа.
- ⊙ Окна выпуска продуктов сгорания открываются в момент равенства работы расширения газа работе сжатия воздуха (в рис. 3 пунктирной линией отмечено положение поршня в момент открытия окон выпуска).
- ⊙ При движении поршня от пунктирной линии до «левой мертвой точки» свод камеры сгорания из своего левого предельного положения движется к «левой мертвой точке», продукты сгорания вытекают-вытесняются в высоконапорный ресивер (рис. 2).

В построениях промежуточных вариантов принимается: состояние газа в высоконапорном ресивере неизменно; нумерация емкостей в трансформациях сохраняется.

- ⊙ Цель 1-й ступени формирования – устранение превращения свободной энергии давления газа в энергию вращения ротора ДВС и обратного превращения энергии вращения

ротора в энергию давления газа, которое происходит при замещении в РДДПО1 блока осцилляторов прототипом (его функционирование представлено вариантом ①).

- ① Вводится *средненапорный ресивер*, он, как и высоконапорный ресивер, положен общей емкостью блока будущих осцилляторов. В рис. 2 его условное изображение - прямоугольник, внутри которого осцилляторы.
- ① В осциллятор вводятся две емкости без камер сгорания – *средненапорные нагнетатели* 5, 6 (рис. 4). В нагнетателе без камеры сгорания свод - подвижная торцевая стенка, в нем исполняются такт заполнения емкости воздухом и такт сжатия-вытеснения воздуха в средненапорный ресивер.
- ① В цилиндрах исходного блока ДВС длина хода поршня укорачивается. Они остаются четырехтактными, вытесняющими продукты сгорания в высоконапорный ресивер, но заполняются воздухом из средненапорного ресивера. В цилиндре с камерой сгорания длина хода поршня определяется условием равенства работы расширения газа суммарной работе сжатия воздуха в нагнетателе и в этом цилиндре.

Основные последствия 1-й ступени формирования.

А). Сумма объемов емкостей с поршнями исходного блока ДВС больше суммы объемов всех емкостей поршневого блока 1-й ступени формирования из-за исполнения нагнетания воздуха среднего давления в два такта. Ограничения по предельной прочности нагнетателя значительно снизятся, он может быть изготовлен из более дешевого материала более легким. Следовательно, даже с учетом ввода турбины можно ожидать некоторого уменьшения веса конструкции.

Б). Длина хода поршня в исходном варианте ДВС равна сумме длин хода поршней в трансформированном цилиндре с камерой сгорания и в средненапорном нагнетателе промежуточного варианта поршневой системы, что в идеале означает: термодинамический цикл, уровень экономичности остаются неизменными.

В). При уменьшении длины хода поршней можно несколько увеличить скорость вращения ротора и тем самым несколько увеличить мощность за счет увеличения частоты исполнения цикла.

Г). Как правило, значения длин хода поршней в цилиндре с камерой сгорания и в нагнетателе воздуха среднего давления различны.

- ② Цель 2-й ступени формирования – выравнивание длин хода поршней в формируемой системе. Емкость с большей длиной хода поршня трансформируется при неизменности рабочего объема так, чтобы в ней длина хода стала равной длине хода поршня в той емкости, где она имеет меньшее значение (рис. 5).

Факторы 2-й ступени формирования:

можно увеличить скорость вращения ротора, мощность еще более; выравнивание длин хода поршней – необходимое условие формирования рационального варианта осциллятора;

в построениях можно ввести критерии разбиения цилиндра, использовать решения частных оптимизационных задач, определить момент подвода тепла можно по условию равенства работы расширения газа работе сжатия воздуха.

Моделируется трансформация тех частных вариантов прототипа, в которых рабочие состояния газов таковы, что длины хода поршней оказываются равными при исполнении ①: в идеале имеют место равенства

$$T_{II} - T_T = T_K - T_B = 2(T_K - T_D) = 2(T_D - T_B),$$

$$p_{II}/p_T = (T_{II}/T_T)^{k/(k-1)},$$

где T – температура, $п, т, к, в, д$ - индексы состояний газов соответственно в конце подвода тепловой энергии, в конце изэнтропийного расширения газа в емкости с камерой

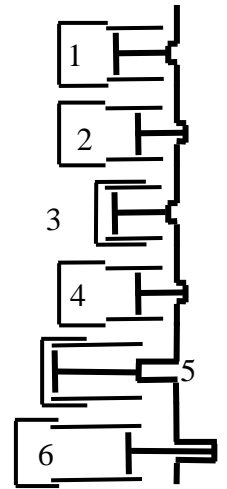


Рис. 4

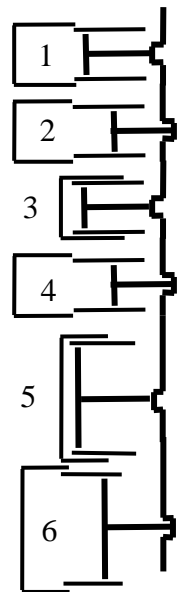


Рис. 5

сгорания, в конце изоэнтропийного сжатия воздуха в емкости с камерой сгорания, в начале сжатия воздуха в нагнетателе, в конце изоэнтропийного сжатия воздуха в нагнетателе, p – давление, k – показатель адиабаты, теплоемкости в изобарном, изохорном процессах не зависят от параметров состояний газов.

- ③ Цель 3-й ступени формирования – устранение шатуна, коленчатого вала.
- ③ В рис. 6 представлен первый промежуточный вариант ПО. Боковые поверхности емкостей предыдущей ступени формирования являются фрагментами его корпуса. Собственно осциллятором является жесткая связка *всех* поршней, закрепленных на едином

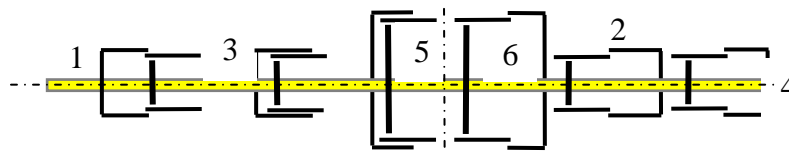


Рис. 6. 3-я ступень формирования.

штоке. В рисунке способность свободного прохождения штока сквозь торцевые стенки емкостей условно отмечена передним планом расположения штока, жесткая фиксация поршней на штоке - передним планом расположения поршней. Горизонтальная ось симметрии есть обобщение осей симметрии емкостей (цилиндров) блока 2-й ступени формирования и есть отметка возвратно-поступательного движения штока с поршнями. Введена вертикальная плоскость симметрии корпуса ПО. Слева от нее располагаются две емкости с камерами сгорания, активно воздействующих на движение поршней вправо и нагнетатель, в котором при таком движении сжимается и затем вытесняется воздух в ресивер воздуха среднего давления. Справа – две емкости с камерами сгорания, активно воздействующих на движение поршней влево и нагнетатель, который при таком движении заполняется воздухом.

- ③ Вводится термин «такт ПО». Из построений следует: в установившемся режиме функционирования термодинамический цикл выполняется в один такт; по месту исполнения частных процессов система «ПО» возвращается в исходное состояние за четыре такта.

Подчеркивается специфика 3-й ступени формирования.

1). В идеале величина давления сжимаемого газа может быть сколь угодно большой, связка поршней остановится; в итоге энергия процесса расширения продуктов сгорания преобразуется в энергию давления сжатых газов.

2). Равенство длин хода поршней – условие жесткой фиксации поршней на штоке; принятое расположение емкостей позволяет реализовать установившийся процесс с неизменным полупериодом колебания.

3). Позитивные аспекты 3-й ступени формирования:

исключение боковых усилий от кривошипно-шатунного механизма позволяет заменить тронковый поршень более легким дисковым поршнем;

упрощается силовая схема поршневой системы;

при равенстве уровней надежности функционирования габариты, вес конструкции поршневой системы уменьшаются.

- ④ В 4-й ступени формирования кардинальное изменение силовой схемы блока предыдущей ступени используется с целью дальнейшего уменьшения веса конструкции.
- ④ Устранение из схемы кривошипно-шатунного механизма позволяет те пространства, в которых он совершал колебательно-вращательные движения, использовать в качестве рабочих емкостей формируемой системы.
- ④ Трансформация двух нагнетателей предыдущей ступени формирования в *компактный* нагнетатель очевидна. Например, в качестве основы выбирается нагнетатель 5. Его пространство с правой стороны от поршня ограничивается подвижным фрагментом с торцевой стенкой нагнетателя 6 так, чтобы в нем исполнялся процесс нагнетателя 6.

Номера прототипов-нагнетателей становятся номерами рабочих объемов компактного нагнетателя, он обозначается «5,6».

- ④ Принимается следующий порядок образования *компактных* емкостей с камерами сгорания. Аналогично формированию компактного нагнетателя прототипы-емкости с камерами сгорания 1, 4 трансформируются в компактную емкость с камерами сгорания «1,4» и прототипы-емкости с камерами сгорания 3, 2 - в компактную емкость с камерами сгорания «3,2». Результат формирования 4-й ступени – рациональный вариант схемы ПО - изображен в рис. 7.
- ④ Направление процесса расширения продуктов сгорания – определяющий фактор направления движения штока с поршнями. Колебания обеспечиваются таким формированием-расположением объемов с камерами сгорания, при функционировании которых с переходом к очередному такту ПО процесс расширения в i -м объеме заканчивается скачком давления в j -м объеме с противоположным направлением процесса расширения продуктов сгорания. При этом последовательность исполнения тактов в каждом из объемов должна быть такой же, что и в прототипе. Таблица 1 показывает: принятый порядок образования компактных емкостей удовлетворяет таким условиям. (В 1-й строке таблицы 1 выписаны номера объемов с камерами сгорания, в 1-м столбце - номера тактов ПО, стрелками показаны направления движения.)

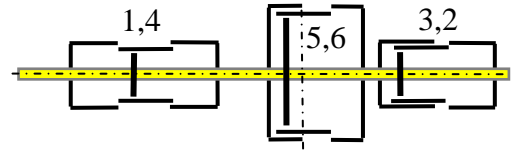


Рис. 7

Таблица 1.

№	1	2	3	4
1	Расширение	Очистка	Заполнение	Сжатие
→				
2	Очистка	Заполнение	Сжатие	Расширение
←				
3	Заполнение	Сжатие	Расширение	Очистка
→				
4	Сжатие	Расширение	Очистка	Заполнение
←				

Основной результат 4-й ступени формирования: по сравнению с предыдущей ступенью объем, вес конструкции уменьшаются почти в два раза.

3.3. Дополнительные замечания

Альтернативой механизму очистки емкости от продуктов сгорания является коррекция, заключающаяся в компромиссном разбиении объема камеры сгорания на две части, обособлении части, вводе в нее поршня для очистки. При такой коррекции число обособлений можно сократить до двух.

Имеются негативные аспекты ввода средненапорного ресивера при большой степени сжатия газа в цикле:

минимальная температура газа в емкости с камерой сгорания увеличится, интенсивность охлаждения снизится, величина максимально допустимой температуры продуктов сгорания несколько уменьшится;

возможна температура в ресивере такая, что подготовка в нем топливно-воздушной смеси будет невозможной.

Необходимость прохождения штока сквозь торцевые стенки емкостей - негативный аспект формирования. Однако, по сравнению с проблемой нивелирования протечек газа между стенкой емкости и поршнем проблема нивелирования протечек газа в торцевой стенке воспринимается как несущественная.

2. Модели осцилляторов, систем с осцилляторами

ПО (рис. 7) рассматривается как система, в которой

- собственно осциллятор совершает *периодические квазисвободные колебания*;
- осциллятор совершает *вынужденные колебания с упреждающими скачками* – результат воздействия сил газа в плавном и скачкообразном изменениях состояния при ненулевой скорости перед остановкой осциллятора;
- разнообразие внешних силовых воздействий позволяет реализовать варианты управления ДВС (ВРД), переводящих функционирование из расчетного режима в дроссельные режимы с повышением эффективности использования тепловой энергии топлива;
- двухступенчатый процесс сжатия способствует организации цикла с промежуточным охлаждением;
- промежуточное охлаждение позволяет сжимать подготовленную топливно-воздушную смесь и тогда, когда температура сжатия без охлаждения значительно превышает температуру самовоспламенения.

2.1. Квазисвободные колебания, основные оценки

Подчеркиваются основные положения модели:

- Корпус, связка поршней ПО – абсолютно твердые тела с горизонтальной осью симметрии, вертикальной плоскостью симметрии. Движение штока с поршнями аппроксимирует движение его центра тяжести по горизонтальной оси симметрии. Силы трения штока в торцевых отверстиях, поршней в емкостях пренебрежимо малы.
- Рассматриваются *равновесные* термодинамические процессы, в изменяющихся объемах силы инерции газовых субстанций отсутствуют. В термодинамическом отношении одноименные частные процессы идентичны независимо от места их исполнения. Расширение, сжатие – изоэнтропийные процессы. Подвод тепловой энергии – изохорный, изменяющий состояние газа скачком. Массовый расход топлива пренебрежимо мал. Количество подводимого тепла больше нуля, давление продуктов сгорания в начале расширения больше давления сжимаемых газов.
- Силы давления газов на поршни при ненулевой скорости движения - непрерывные дифференцируемые функции, зависящие лишь от их положения. Одновременно протекающие процессы расширения продуктов сгорания с монотонным уменьшением сил давления в одном объеме и сжатия воздуха с монотонным увеличением сил давления в другом объеме предопределяют остановку штока с поршнями.
- Массы сжимаемых газов в нагнетателе и емкости с камерой сгорания равны. В процессах заполнения и очистки емкостей с камерами сгорания, заполнения нагнетателей состояния газов неизменны.
- Изменения состояний газов в окрестности остановки осциллятора аппроксимируют скачкообразные изменения их состояний при нулевой скорости движения осциллятора. Величины скачков давления и температуры при подводе тепловой энергии определяются условиями неизменности объема, ограничениями технически допустимой температуры газа. Завершение вытеснения сжатого газа из нагнетателя с последующим открытием отверстий впуска воздуха из воздухозаборника, а также открытие отверстий впуска воздуха из средненапорного ресивера на место вытесненных продуктов сгорания описываются соответствующими скачками давления, температуры.
- Термин «квазисвободные колебания» означает колебания под суммарным воздействием упругих сил давления газов в плавно изменяющихся объемах и скачкообразно изменяющихся сил давления газов, которые происходят лишь после остановки и в момент неподвижности осциллятора.

Таким образом, основа модели - дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее *движение материальной точки под воздействием независимой явно от времени силы* [5] -

$$d^2x/dt^2 = F(x)/M,$$

где x – координата точки, t – время, M – масса штока с поршнями, F – равнодействующая сил давления газов на поршни, $F(x)$ – непрерывная функция от x . Первый интеграл выражается квадратурой

$$(dx/dt)^2/2 = \int F(x)dx/M + C,$$

где C – константа интегрирования.

Моделируется движение штока с поршнями вправо: ведущий процесс – расширение продуктов сгорания – происходит либо в объеме 1 (1-й такт ПО, наименования исполняемых процессов в других объемах приведены в таблице 1), либо в объеме 3 (3-й такт). Из построений, ограничений функционирования следует, что с точностью до обозначений места протекания частных термодинамических процессов выражения $F(x)$ будут совпадать, результат воздействия на центр тяжести штока с поршнями будет одним и тем же.

Специфика построения конструкции, упрощения функционирования предельной абстракции допускают перестановку емкостей, в которой положения горизонтальной оси симметрии и вертикальной плоскости симметрии не изменяются, центры тяжести поршней проецируются в центр тяжести осциллятора. В идеале изменением массы, изгибающим моментом силы пренебрегается, форма выражения $F(x)$ упрощается. Пусть начало координат есть точка пересечения оси симметрии с плоскостью симметрии (рис. 8). В таком варианте

$$\begin{aligned} W_{\Pi} &= S_{\Pi}(x - x_a), & W_K &= S_K(x_{\beta} - x), & W_D &= S_D(x_{\beta} - x), & S_{\Pi} &= S_K, \\ \rho_J &= M/W_J, & p_J &= p_J(t_{\alpha}^+)(\rho_J/\rho_J(t_{\alpha}^+))^{\kappa}, & J &= \Pi, K, D, \\ F(x) &= S_{\Pi}(p_{\Pi} - p_K) - S_D(p_D - p_B) - S_{\Pi}(p_T - p_D), \end{aligned}$$

где W – объем, ограниченный поршнем и торцевой стенкой емкости, S – площадь поршня, x_a и x_{β} – координаты левой и правой торцевой стенки емкости (см. рис. 8), ρ – плотность газа, M – масса газа (масса рабочего тела термодинамического процесса), p – давление, α – индекс величин в левом неподвижном положении осциллятора, $+$ – индекс величин в момент завершения скачкообразного изменения состояния газов, κ – показатель изобарного процесса, $\kappa = c_p/c_v$, c_p и c_v – удельные теплоемкости при постоянных давлении и объеме, Π, K, D – индексы изобарных процессов ПО, B, D, T – соответственно индексы состояний газов в воздухозаборнике, средненапорном и высоконапорном ресивере. Интеграл выражается степенной функцией.

Температура газов T_J в емкостях

$$T_J = T_J(t_{\alpha}^+)(p_J/p_J(t_{\alpha}^+))^{(\kappa-1)/\kappa} \quad J = \Pi, K, D,$$

в начале движения

$$(p, \rho, T)_K(t_{\alpha}^+) = (p, \rho, T)_D, \quad (p, \rho, T)_D(t_{\alpha}^+) = (p, \rho, T)_B,$$

состояние $(p, \rho, T)_{\Pi}(t_{\alpha}^+)$ зависит от ограничений изохорного подвода тепловой энергии. Если исполняется 1-й такт, то 1-е слагаемое $F(x)$ описывает воздействие газов емкости «1,4», 2-е слагаемое – емкости «5,6», 3-е слагаемое – емкости «3,2».

При движении вправо

$$dx/dt = +(2(\int F(x)dx/M + C))^{1/2},$$

второй интеграл дифференциального уравнения выражается квадратурой

$$t - t_{\alpha}^+ = \int dx / (2(\int F(x)dx/M + C))^{1/2},$$

где нижним и верхним пределами интегрирования являются x_{α} и x . Время качания вправо ($x = x_{\beta}$)

$$\tau = t_{\beta}^- - t_{\alpha}^+,$$

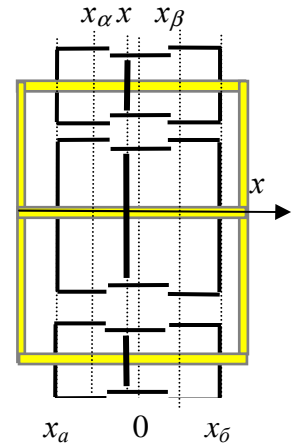


Рис. 8

β - индекс величин в правом неподвижном положении осциллятора, $\bar{}$ – индекс величин в момент завершения плавного изменения состояния газов. При завершении движения вправо

$$(p, \rho, T)_{\Pi}(t_{\beta}^{\bar{}}) = (p, \rho, T)_{T}, \quad (p, \rho, T)_{D}(t_{\beta}^{\bar{}}) = (p, \rho, T)_{D},$$

при $x = x_{\alpha}$ состояния газов перед скачками

$$(p, \rho, T)_{\Pi}(t_{\alpha}^{\bar{}}) = (p, \rho, T)_{K}(t_{\beta}^{\bar{}}), \\ (p, \rho, T)_{K}(t_{\alpha}^{\bar{}}) = (p, \rho, T)_{T}, \quad (p, \rho, T)_{D}(t_{\alpha}^{\bar{}}) = (p, \rho, T)_{D}(t_{\beta}^{\bar{}}),$$

в конце скачка из уравнения состояния газов следует

$$p_{\Pi}(t_{\alpha}^+) / p_{\Pi}(t_{\alpha}^{\bar{}}) = T_{\Pi}(t_{\alpha}^+) / T_{\Pi}(t_{\alpha}^{\bar{}}).$$

Идентичность термодинамических процессов при $x = x_{\beta}$ выражается в виде

$$(p, \rho, T)_{\Pi}(t_{\beta}^{\bar{}}) = (p, \rho, T)_{K}(t_{\alpha}^{\bar{}}), \\ (p, \rho, T)_{K}(t_{\beta}^{\bar{}}) = (p, \rho, T)_{T}, \quad (p, \rho, T)_{D}(t_{\beta}^{\bar{}}) = (p, \rho, T)_{D}(t_{\alpha}^{\bar{}}), \\ p_{\Pi}(t_{\beta}^+) / p_{\Pi}(t_{\beta}^{\bar{}}) = T_{\Pi}(t_{\beta}^+) / T_{\Pi}(t_{\beta}^{\bar{}}), \quad T_{\Pi}(t_{\beta}^+) = T_{\Pi}(t_{\alpha}^+).$$

При принятых упрощениях движение влево ($t \geq t_{\beta}^+$) описывается соотношением

$$t - t_{\beta}^+ = \int dx / (-2(\int P(x) dx / M + C))^{1/2},$$

где нижним и верхним пределами двойного интегрирования являются x и x_{β} . Время качания влево ($x = x_{\alpha}$)

$$\tau = \tau^{\circ} = t_{\alpha}^{\bar{}} - t_{\beta}^+ = t_{\beta}^{\bar{}} - t_{\alpha}^+,$$

где вводом индекса $^{\circ}$ подчеркнuto, что скачок состояний газов происходит в момент неподвижности связки поршней относительно корпуса осциллятора.

Условия активных колебаний выражаются в виде

$$(p_{\Pi}(t_{\alpha}^{\bar{}}), p_{\Pi}(t_{\beta}^{\bar{}})) < (p_{\Pi}(t_{\alpha}^+), p_{\Pi}(t_{\beta}^+)).$$

Таким образом, в рамках функционирования РДДПО1 имеют место соотношения

$$B_T = M/\tau, \quad T_T \leq T_T^M,$$

где B_T - расход газа через турбину, T_T^M - максимально допустимая температура газа перед турбиной, из равенства условий формирования следует:

мощность, эффективность использования тепловой энергии авиационного ДВС соответственно равны мощности, эффективности использования тепловой энергии системы «поршневые осцилляторы + турбина».

2.2. О моделировании, возможностях функционирования с упреждающим подводом тепловой энергии

Исследуются перспективы подвода тепловой энергии перед остановкой осциллятора, возможности использования упреждающего подвода в качестве регулирующего фактора или управления. Суть изменений демонстрирует пример:

- P** пусть базовым является режим функционирования с квазисвободными колебаниями, работа цикла с единицей массы газа меньше максимально возможной величины;
- P** допускается подвод тепловой энергии при ненулевой скорости перед остановкой осциллятора;
- P** подвод тепла по-прежнему аппроксимирует изохорный процесс со скачкообразным изменением состояния газа, скачкообразные изменения состояний газов в процессах заполнения и вытеснения происходят при неподвижном осцилляторе, протекающие в разных емкостях ПО одноименные термодинамические процессы идентичны;
- P** вариации моментов исполнения упреждающих скачков происходят при неизменности температуры газа в моменты завершения скачков.

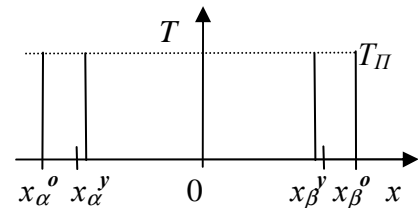


Рис. 9

Очевидно, исполнение упреждающих скачков является дополнительным тормозящим фактором, уменьшит амплитуду, полупериод колебаний осциллятора (рис. 9, схема упреждающих скачков):

$$(x_{\beta} - x_{\alpha})^y < (x_{\beta} - x_{\alpha})^o, \quad \tau^y < \tau^o,$$

где y - индекс величин, описывающих колебания с упреждающими скачками, T_{II}^+ - температура газа в моменты завершения скачков. Результат – частота исполнения цикла увеличится, скачок давления начнется при несколько меньшей степени сжатия, что при неизменности T_{II}^+ означает увеличение количества подводимого тепла в цикле. В идеале допустимы такие смещения скачков, при которых частота исполнения циклов и работа цикла будут максимальными.

Пусть теперь в точке формирования остова двигателя расчетным является режим функционирования с упреждающими скачками, мощность близка к максимально возможной мощности. Вариация смещения упреждающего скачка к положению скачка в квазисвободных колебаниях в принципе позволяет вывести двигатель в дроссельный режим с увеличенной степенью повышения давления газа в цикле, т.е., с повышением эффективности использования тепловой энергии. Таким образом, появляется возможность реализации концепции проекта летательного аппарата (ЛА), в которой ВРД обеспечивает максимально возможную тягу при взлете, а при подходящей регуляции турбовентилятора уровень, близкий к предельно высокому уровню эффективности использования тепловой энергии в крейсерском режиме движения ЛА. Что же касается авиационного ДВС, то в нем независимо от режима функционирования степень сжатия газа перед подводом тепла неизменна, с уменьшением подвода тепловой энергии давление газа перед расширением уменьшается.

Отмечаются особенности, анализируются несколько более подробно вывод подсистем РДДПО1 из расчетного режима с упреждающими скачками в дроссельные режимы – приближения к режиму с квазисвободными колебаниями, возможные механизмы регулирования.

1. В окрестности «мертвой точки» малому смещению скачка отвечает более заметное изменение интервала времени.

2. Степень сжатия газа изменяется и в нагнетателе, и в емкости с камерой сгорания.

3. В условиях не идеальности может оказаться целесообразной оптимизация режима функционирования по времени открытия-закрытия отверстий в емкостях ПО.

4. Существенное уменьшение температуры газа на выходе из турбины позволяет регулировать площадь, направление потока в направляющих аппаратах последних ступеней.

5. В вентиляторе возможно варьирование положениями всех, и статорных, и роторных лопаток.

6. Совместная регуляция площадей протока газа в турбине, вентиляторе, скорости вращения ротора турбовентилятора позволяет выдерживать равенство давлений смешиваемых потоков перед вентилятором и изменять степень повышения давления газа в вентиляторе при неизменности относительной плотности тока на его входе и с приемлемым нивелированием потерь механической энергии.

7. Равенство относительной плотности тока на входе в вентилятор расчетному максимальному значению с понижением режима функционирования означает: значение степени двухконтурности увеличивается, в идеале РДДПО1 *и как движитель* становится тем эффективнее, чем глубже дроссельный режим.

В агрегированных представлениях возможна следующая трактовка регулирования:

расход топлива регулируется по условию равенства температуры газа расчетному максимальному значению;

лопатки статора вентилятора регулируются по условию неизменности относительной плотности тока на входе,

лопатки – элементы статора турбины регулируются по условию равенства давлений смешиваемых потоков;

лопатки – элементы ротора вентилятора регулируются по условию равенства мощностей турбины, вентилятора.

Режимы с вариациями положения упреждающих скачков состояния газов может быть выражена в форме

$$(E, \chi_B, \chi_T, \chi_r) = \mathbf{var}, T_B \in [T_H, T_B^p], u \in [0, 1]$$

$$\Downarrow \Downarrow \Downarrow \Downarrow$$

$$(T_{II}^+, q_B, p_T/p_B, N_T/N_B) = \mathbf{const} = (T_{II}^{+M}, q_B^M, 1, 1),$$

где E – тепловая энергия топлива, χ_B – регулирующий фактор-обобщение углов атаки лопаток статора вентилятора, χ_T – регулирующий фактор-обобщение углов атаки лопаток статора турбины, χ_r – регулирующий фактор-обобщение углов атаки лопаток ротора вентилятора, обозначением **var** отмечены величины, варьируемые системой автоматического регулирования, B и H – индексы состояния торможения набегающего воздушного потока и невозмущенной атмосферы, p – индекс расчетных условий, u – управление двигателем, q_B – относительная плотность тока на входе в вентилятор, N_T и N_B – мощности турбины и вентилятора,

$$N_T = N_T^o + u(N_T^M - N_T^o),$$

обозначением **const** отмечены величины, контролируемые системой автоматического регулирования.

2.3. О возможностях двигательной установки с охлаждением газа в средненапорном ресивере

Трансформация «РДДПО1 → РДДПО2» заключается в замене средненапорного ресивера РДДПО1 панелью, внешние поверхности которой омываются набегающим воздушным потоком. Полагается: движение газа, вытесненного из нагнетателей в канал панели, аппроксимирует одномерное установившееся течение и охлаждение есть изобарный процесс. При

$$T_x \cong T_H, T_H < T_d < T_K,$$

где x и H – индексы состояний газа перед втеканием в емкость с камерой сгорания и атмосферы, возможна подготовка топливно-воздушной смеси в средненапорном ресивере и можно ожидать, что эта подготовка будет позитивной в той же мере, в какой она позитивна в некоторых традиционных подтипах ДВС. Методами формирования виртуальных структур показывается [6]: *несмотря на безвозвратную утрату части теплоты сжимаемого потока уровень эффективности использования тепловой энергии у РДДПО2 будет выше, чем у РДДПО1;*

максимум тяги у РДДПО2 будет значительно больше, чем у РДДПО1. Однако, в виртуальной реальности $T_H < T_x < T_d$,

позитивный эффект воздушного охлаждения снизится. Однако, использование явления термоэлектричества [7] может с избытком повысить эффект охлаждения.

Возможно кратковременное форсирование тяги испарением жидкости (T_d больше температуры испарения). Отмечается:

поскольку с впрыском жидкости плотность газа увеличится, то тот же рабочий объем емкости с камерой сгорания можно заполнить большей массой газа;

объем нагнетателя можно увеличить по условию равенства массе газа в рабочем объеме емкости с камерой сгорания, если предусмотрена возможность перемещения упоров, фиксирующих положение торцевых стенок нагнетателя;

при таком регулировании уровень эффективности форсирования тяги охлаждением будет высоким.

Заключение

Изложенный процесс формирования, предварительные оценки примерных вариантов поршневого осциллятора, интеграции его в двухконтурную схему ВРД показывают: построения двигателей с осцилляторами принципиально осуществимы;

в идеале при равенстве подводимой тепловой энергии и одноимённом процессе отводимого тепла, в условиях формирования остова трансформации прототипа не изменяют термодинамический цикл;

атрибут осциллятора - двухступенчатое сжатие газа - позволяет увеличить мощность двигательной установки увеличением частоты исполнения цикла;

при равенстве частот исполнения циклов в прототипе, ВРД с осцилляторами их максимально возможным значениям и равенстве мощностей двухступенчатое сжатие газа позволяет уменьшить количество подводимой энергии топлива в цикле, сжать газ сильнее и тем самым повысить экономичность функционирования ВРД с осцилляторами;

исполнение упреждающих остановку осциллятора скачков состояния газа в изохорном подводе тепла в принципе позволяет реализовать проект летательного аппарата, в котором ВРД обеспечивает максимально возможную тягу при взлете, а при подходящей регуляции турбовентилятора уровень, близкий к предельно высокому уровню эффективности использования тепловой энергии в крейсерском режиме;

двухступенчатый процесс сжатия способствует организации цикла с промежуточным охлаждением;

промежуточное охлаждение позволяет сжимать подготовленную топливно-воздушную смесь и тогда, когда температура сжатия без охлаждения значительно превышает температуру самовоспламенения;

ожидается: варианты ПО на основе 2-тактных ДВС будут столь же перспективны, что и ПО с 4-тактной основой.

при взлете летательного аппарата возможно форсирование тяги испарением жидкости;

ожидается значительное уменьшение габаритов, веса конструкции.

Представлением формирований первых осцилляторов в рамках схем авиационного ВРД подчеркивается: построения стимулированы потребностями авиации, их основное назначение - совершенствование авиации. Однако, возможна, а при подтверждении практикой ожидаемого уровня совершенства, целесообразна разработка аналогов наземных стационарных установок, ДВС сухопутного и водного транспорта. Позитивный экономический, экологический эффект трудно переоценить, поскольку массовость эксплуатации ДВС в наземных условиях велика даже по сравнению с авиацией.

Литература

1. Жуков А.Н. О виртуальных двухконтурных двигателях с агрегатами дискретного действия. ВЦ РАН, 2013.
2. Жуков А.Н. Авиационные двигатели: принципы формирования и моделирования виртуальных структур. ВЦ РАН, 2013.
3. Вырубов Д.Н., Алексеев В.П. Двигатель внутреннего сгорания. // БСЭ, Т. 7, С 575–577. 1972.
4. Ефанов В.И. Крейцкопфный двигатель. // БСЭ, Т. 17, С 204–205, 1974.
5. Степанов В.В. Курс дифференциальных уравнений. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958.
6. Жуков А.Н. Авиадвигатели с теплообменом между зонами газовых потоков: возможности прототипов, варианты коррекций. М.: ВЦ РАН, 2013.
7. Жуков А.Н. Об энергии термоэлектричества в производстве реактивной силы. М.: ВЦ РАН, 2013.