

# О ВТОРОЙ СТЕПЕНИ СВОБОДЫ В МЕХАНИЗМЕ ДВС

## (ПУБЛИКУЕМ В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ)

Геннадий Витальевич Корневский, к.т.н.

**“...СВОБОДЕН, СВОБОДЕН, НАКОНЕЦ СВОБОДЕН!” (М.Л. КИНГ)**

**Показана возможность использования 2-й степени свободы в механизме 2-тактного ДВС с противоположно движущимися поршнями для проявления эффекта самоорганизации в форме автоколебаний поршней двигателя. The possibility of using the 2nd degree of freedom in the mechanism of a 2-stroke opposed-piston ICE to manifest the effect of self-organization in the form of self-oscillation of the engine pistons is shown.**

**Ключевые слова: степень свободы, ДВС, автоколебания, кинетическая энергия, термический к.п.д.**

**Keywords: degree of freedom, internal combustion engine (ICE), self-oscillation, kinetic energy, thermal efficiency.**

В 80-х годах прошлого века на волне популярности эксергетического анализа применительно к внутрицилиндровым процессам у автора возникло намерение разработать подход к проектированию ДВС, предполагающий использование эксергетического синтеза, в основе которого было бы решение задачи минимизации некоторой целевой функции, учитывающей потери эксергии на всех этапах осуществления цикла ДВС.

[Эксергия — предельное (наибольшее или наименьшее) значение энергии, которое может быть полезным образом использовано (получено или затрачено) в термодинамическом процессе с учётом ограничений, накладываемых законами термодинамики; - прим. ред.]

Однако позже мы отказались от этой идеи, встретив достаточно простое определение принципа минимума диссипации (рассеяния) энергии [1]: "Принцип минимума диссипации - это один из важнейших принципов отбора реальных движений из числа виртуальных (мысленно допускаемых). Законы сохранения, как правило, не выделяют единственного решения. Природа этим принципом нам демонстрирует удивительную особенность: она допускает не просто те движения, при которых энтропия растёт, а только те, при которых рост энтропии минимален (в частности нуль)." Стало понятно, что никакая математическая модель не подскажет способ протекания рабочих процессов в ДВС лучший, чем это сделает сама природа. Нужно только предоставить двигателю "свободу выбора". Так возникла формулировка принципа самоорганизации рабочих процессов в ДВС, который был опубликован [2] как интеллектуальный продукт, чтобы как-то закрепить свой приоритет в понимании этой проблемы: "эффективность преобразования тепла в работу определяется кинематикой ДВС, точнее зависимостью изменения объема надпоршневого пространства от угла поворота вала отбора мощности (например, коленчатого), а также частотой вращения последнего ... при установленном режиме ДВС скорости изменения объема надпоршневого пространства "жестко" связаны со скоростным режимом привода. Эта "жесткость", обусловленная наличием в ДВС 1-й степени свободы, исключает возможность альтернативного протекания рабочего процесса с возможно большей эффективностью преобразования тепла в работу". Но в случае увеличения числа степеней свободы термомеханическая система сама выбирает оптимальный вариант протекания процесса преобразования тепла в работу: "из-за избыточной степени свободы процесс получения механической энергии теперь не связан (почти) с процессом ее отвода внешнему потребителю. Значительное количество механической энергии (кинетической) циркулирует в звеньях механизма ДВС и может быть отдано потребителю в любой момент времени с к.п.д. близким к 100%" [2].

Условию циркуляции, а точнее перетоку, кинетической энергии наилучшим образом соответствует схема ДВС с противоположно движущимися поршнями (ПДП), когда замедление одного поршня сопровождается ускорением другого. Схема двигателя с ПДП известна с конца 19 века, когда Хуго Юнкерс применил ее в автомобильном дизеле. Позже, в 30-х годах XX века, он использовал её, уже с двумя коленчатыми валами, и в авиационных дизелях Jumo-204-207. Дизели с ПДП разработки А.Д. Чаромского вы-

пускались заводом им. В.А. Малышева (г. Харьков): 2Д100, 10Д100 - тепловозные, 5ТДФ, 6ТД - танковые. Но во всех случаях коленчатые валы имели согласующую зубчатую передачу, что означало наличие у механизма только 1-й степени свободы. Известны и другие схемы ДВС с ПДП, в частности, использующие один коленчатый вал и два коромысла, для связи с поршнями через короткие штоки.

Свободно-поршневые дизель-компрессоры/генераторы газа также выполнены по схеме с ПДП. Но свобода поршней в них относительна, поскольку поршни связаны синхронизирующей зубчатой передачей. А главным недостатком подобных устройств является то, что они "свободны" от вала отбора мощности, что и ограничивает область их применения.

Для транспортных ДВС с ПДП предпочтительна компоновка, при которой ось цилиндра горизонтальна, как в 5ТДФ. Чтобы в ДВС был возможен колебательный процесс, связанный с перетоком кинетической энергии между двумя группами (условно называемых "правая" и "левая") деталей, совершающих возвратно-поступательное и возвратно-вращательное движения, механизм двигателя должен обладать максимальной степенью симметрии относительно плоскости, проходящей через центр камеры сгорания и ось вращения коленчатого вала. Этому требованию должен соответствовать и общий шатун, что исключает применение прицепного шатуна, как у ДВС с 1-й степенью свободы, и приводит к варианту трехшарнирного шатуна. Но такая формальная замена конструкции шатуна делает схему неработоспособной, т.к. число степеней свободы механизма уменьшается до 0. Выход был найден и состоял в замене неподвижных опорных шарниров коромысел на двухподвижные, что увеличило число степеней свободы до двух. При наличии еще одной, избыточной по сравнению с традиционными ДВС, степени свободы каждому фиксированному положению коленчатого вала уже не будет соответствовать строго определенное положение поршней, а оно будет устанавливаться динамически, исходя из процессов, протекающих в надпоршневом пространстве.

В ДВС с избыточной степенью свободы на подвод тепла в районе ВМТ (верхняя мертвая точка) термомеханическая система реагирует прежде всего поведением моторных масс, момент инерции которых на порядок меньше, чем у системы в целом. Результатом такого поведения может быть ускорение одного поршня и замедление второго, при незначительном приращении угла поворота коленчатого вала (п.к.в.). Наклон головки шатуна при вращении кривошипа приводит к асимметрии зависимости хода каждого из поршней от угла п.к.в. относительно геометрической ВМТ, поэтому ускорение одного поршня при замедлении второго может привести как к увеличению, так и к уменьшению суммарной кинетической энергии моторных масс, в зависимости от направленности этого процесса. Реакцией термомеханической системы на подвод тепла в районе объемной ВМТ может быть преобразование тепла в работу в форме локального увеличения кинетической энергии системы. Но следствием такой реакции будет и локальное увеличение объема надпоршневого пространства, что вызовет снижение давления, а значит и жесткости процесса сгорания.

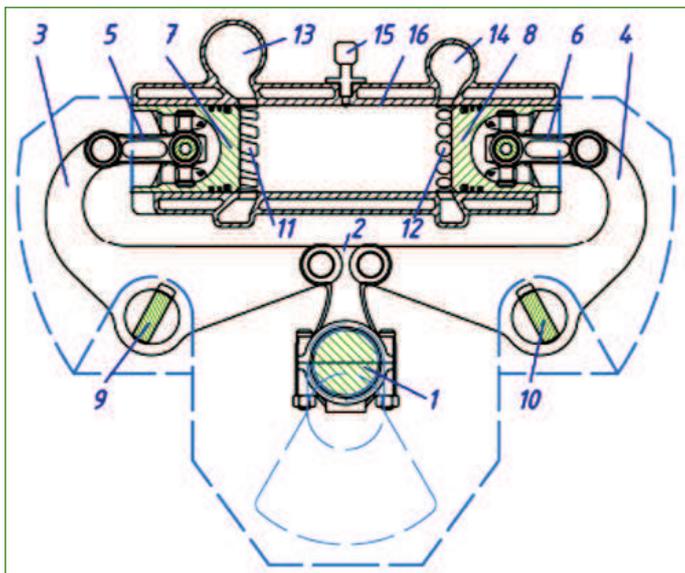


Рис. 1 Оппозитный ДВС с двумя степенями свободы:

1 - кривошип; 2 - шатун; 3, 4 - коромысло; 5, 6 - штоки; 7 - поршень выпускной; 8 - поршень впускной; 9, 10 - шарнир; 11 - окна выпускные; 12 - окна впускные; 13 - коллектор выпускной; 14 - коллектор впускной; 15 - форсунка; 16 - цилиндр

В следующий полупериод колебаний накопленная дополнительная кинетическая энергия будет отдаваться в систему, т.к. новому крайнему положению звеньев механизма будет соответствовать меньшее значение кинетической энергии моторных масс. Таким образом часть полезной работы, производимой в цилиндре ДВС, может не передаваться на коленчатый вал двигателя, а расходоваться на повышение кинетической энергии моторных масс. В следующей фазе колебательного процесса избыточная кинетическая энергия может быть передана маховику двигателя с эффективностью близкой к 100 %.

Само по себе возникновение колебаний, точнее автоколебаний, является следствием неустойчивости системы с избыточной степенью свободы, неравновесности процесса сгорания, избытка энергии, участвующей в процессе сгорания и других факторов, характеризующих термомеханическую систему ДВС как нелинейную. Подобные системы называют системами с самоорганизацией, т.к. в них возможно образование диссипативных структур типа стоячих волн. В данный момент об образовании подобных структур в цилиндре ДВС можно говорить только в предположительном смысле. Однако поведение такой системы может быть исследовано с помощью математической модели.

Математическая модель ДВС, учитывающая все виды нелинейностей, чрезвычайно сложна и подобное компьютерное моделирование внутрицилиндровых процессов потребует колоссальных вычислительных ресурсов. Поэтому для целей практической оценки параметров предлагаемого ДВС допустимо "заглубить" модель и, в

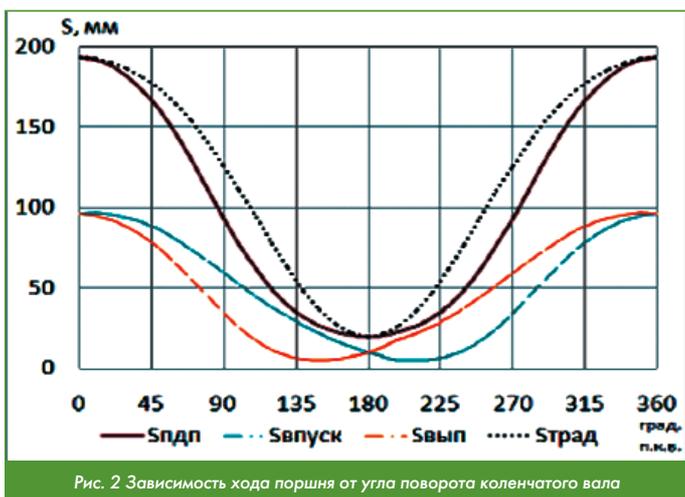


Рис. 2 Зависимость хода поршня от угла поворота коленчатого вала

частности, свести ее к схеме с 1-й степенью свободы. Такой подход означает, что на головку шатуна наложено ограничение, которое заставляет ее центр двигаться условно строго по прямой, проходящей через центр камеры сгорания и ось вращения коленчатого вала, т.е. без колебаний шатуна относительно некоторого "равновесного" положения. Эта прямая является своего рода линией "аттрактора" (притяжения) для головки шатуна, т.к. фактически ее отклонения от "равновесного" положения не могут превышать, по нашим оценкам, значений порядка 0,5 град. Отклонение шатуна от "равновесного" положения можно смоделировать, предположив существование связи между интенсивностью колебаний и мощностью тепловыделения в цилиндре ДВС.

С учетом сделанных допущений был выполнен расчет параметров модельного варианта предлагаемого ДВС (дизель) [3] при следующих исходных данных:

1. Мощность - 66 кВт (2 цилиндра);
2. Частота вращения коленчатого вала - 3000 об./мин.;
3. Ход поршня (x 2) - 95 мм;
4. Диаметр цилиндра - 80 мм;
5. Радиус кривошипа - 45 мм;
6. Длина шатуна - 90 мм;
7. Степень сжатия (геометрическая) - 18;
8. Степень сжатия (действительная) - 16.

Этим данным соответствует изображение на рис. 1 предлагаемого ДВС.

Асимметрия зависимостей хода поршней  $S_{\text{вып}}$  и  $S_{\text{впуск}}$  от угла п.к.в. относительно геометрической ВМТ и их фазовый сдвиг (60° п.к.в.) приводят к тому, что зависимость суммарного хода поршней  $S_{\text{дп}}$  от угла п.к.в. в районе объемной ВМТ является гораздо более пологой, чем у ДВС с традиционным кривошипно-шатунным механизмом  $S_{\text{трад}}$ , как показано на рис. 2. Это означает, что процесс выделения тепла (горение) протекает с максимальным приближением к изохорному ( $V = \text{const}$ ), который характеризуется наибольшим термическим к.п.д., при прочих равных условиях.

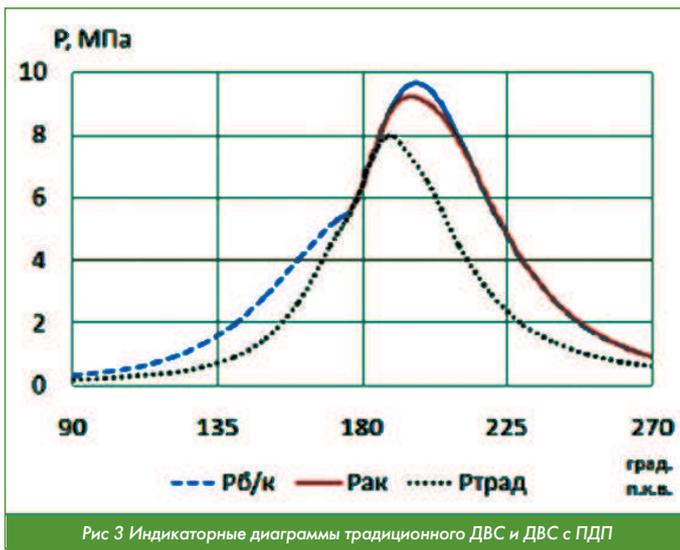
На рис. 3 показано влияние автоколебаний  $P_{\text{ак}}$  (без колебаний  $P_{\text{б/к}}$ ) на рабочий процесс предлагаемого ДВС, а также сопоставление с рабочим процессом  $P_{\text{трад}}$  традиционного ДВС, с теми же рабочим объемом и степенью сжатия, с теми же значениями цикловой подачи топлива и параметрами тепловыделения. При одинаковых давлениях начала сгорания, в предлагаемом ДВС максимальное давление сгорания выше чем в традиционном ДВС благодаря меньшей скорости изменения объема надпоршневого пространства. При этом время (в градусах п.к.в.) понижения давления до уровня давления начала сгорания в предлагаемом ДВС в 1,5 раза больше. Это означает, что при достигнутом уровне совершенства процессов смесеобразования и сгорания предлагаемый ДВС представляет возможность форсирования по частоте вращения коленчатого вала дополнительно на 50 %.

Сила давления поршня на стенки цилиндра пропорциональна тангенсу угла отклонения шатуна от оси цилиндра, который у традиционных ДВС в максимуме достигает значений 0,23 (при 13°). У предлагаемого ДВС максимальное отклонение штоков от оси цилиндра не превышает 1,5°, чему соответствует тангенс угла равный 0,026. Это означает, что потери на трение у предлагаемого ДВС существенно ниже чем у традиционного.

Зеркальная компоновка двигателя приводит в значительной степени ко взаимному уравновешиванию сил инерции, а добавление таких звеньев, как коромысла, не является критическим. В предлагаемом ДВС силы инерции выполняют "созидательную" функцию, т.к. от их величины зависит значение мощности циркулирующей в подвижных звеньях двигателя, как накопителях кинетической энергии.

Реализуемость конструкции предлагаемого ДВС можно оценить по [4].

Как видно из представленной анимации [4] в предлагаемом ДВС реализована прямоточная продувка - самая совершенная из применяемых в 2-тактных двигателях. Но если в ДВС с двумя коленчатыми валами сдвиг фаз газораспределения обеспечивается



угловым смещением коленчатых валов ( $10^\circ$  для Jumo-207;  $12^\circ$  для 10Д100), то в предлагаемом ДВС сдвиг геометрических ВМТ/НМТ возникает естественным образом и составляет  $60^\circ$  (см. рис. 2). Это открывает широкие возможности для оптимизации процессов газообмена в части выбора размеров и формы выпускных/продувочных окон. Так у дизеля 10Д100 фазы газораспределения (измеренные от объёмной НМТ) составляют: для выпускного поршня начало/конец -  $62/50^\circ$ ; для впускного поршня начало/конец -  $46/58^\circ$ . При этом высота окон в долях от хода поршня составляет для выпускного - 18 %, а для впускного - 15 %. Если у предлагаемого ДВС установить указанные доли для выпускного - 16 %, а для впускного - 17 %, то им будут соответствовать фазы: для выпускно-

го поршня начало/конец -  $57/40^\circ$ ; для для впускного поршня начало/конец -  $41/59^\circ$ . В этом случае при одинаковом опережении открытия выпускных окон ( $62 - 46 = 57 - 41$ ) выпускные окна могут закрываться значительно позже ( $59 - 40 > 58 - 50$ ) выпускных окон. Это означает возможность дополнительного наддува в последней фазе процесса продувки, а также возможность получить степень расширения большую чем степень сжатия, как в цикле Миллера, т.е. получить больше полезной работы.

Смещением центров качания коромысел, а значит и всего механизма относительно гильзы цилиндра, легко решается задача изменения степени сжатия. На варианты ДВС с изменяемой степенью сжатия имеется решение о выдаче патента на изобретение.

В последние годы возвращается интерес к 2-тактным ДВС, во всех случаях где требуется легкий и компактный автономный источник механической энергии: малая авиация, БПЛА, гибридные силовые установки. На рынке уже имеются предложения 2-тактных ДВС с ПДП, выполненных по классической схеме Юнкерса, для легких самолетов и автомобилей.

Как там у А. Райкина в "Волшебной силе искусства": "Бум мейнаться?"

...Или подождем: что скажут Honda, Mazda и иже с ними? **А**

## Литература:

1. Математика ставит эксперимент. Моисеев Н.Н., Наука, М., 1979, стр.48.
2. "Идеи. Гипотезы. Решения". Информационный бюллетень. - Москва, ВНИИЦ № 1, 2000, стр.31.
3. Пат. РФ № 2729562, 07.08.2020 г.
4. <https://youtu.be/N1FqWaj8Uuk> Опозитный ДВС с 2 степенями свободы.

Связь с автором: [gen.korenevsky@yandex.ru](mailto:gen.korenevsky@yandex.ru)