

УДК 621.432

Актуальность и проблемы совершенствования цикла ДВС применением непосредственного впрыска воды

Лефёров А.А., Куприянов Н.Д.

Аннотация

В статье рассмотрены доводы в пользу актуальности задачи совершенствования рабочего цикла ДВС утилизацией тепла отработавших газов. Рассмотрены способы утилизации тепла отработавших газов, дана их классификация. Определены не расходуемые в современных решениях резервы рабочего тела. В качестве наиболее актуального и наименее исследованного метода совершенствования предложено использование непосредственного впрыска воды в рабочий цилиндр двигателя. Определены предполагаемые преимущества предложенного метода. Рассмотрены варианты организации цикла. Проведен патентный поиск решений обусловленных применением впрыска воды в ДВС. Результатом патентного поиска стала классификация способов применения впрыска воды в запатентованных решениях и определение наиболее перспективных решений. Выполнена оценка современного состояния проблемы и определен ряд нерешенных вопросов препятствующих созданию методики проектирования ДВС с утилизацией тепла испарением жидкости.

Ключевые слова

Цикл ДВС; непосредственный впрыск воды; утилизация тепла.

Место поршневого двигателя в современном мире

Согласно прогнозам Aero-News Network, доля поршневой авиации составляет на сегодняшний день более 70% парка и к 2030 году должна составить не менее 60%. Не смотря на снижение доли поршневой авиации, абсолютное значение парка поршневых самолетов будет продолжать расти.

Сегодня в мире эксплуатируется более 750 млн. автомобилей, и к 2030 году их количество составит уже 1,2 миллиарда штук.

В настоящее время, для получения электрических мощностей до 3 МВт используются электростанции на основе поршневых двигателей.

В судостроении, в подавляющем большинстве, в качестве двигателей используются поршневые ДВС.

Таким образом, поршневые моторы являются основным источником для получения механической и электрической энергии в транспортных средствах и в стационарных источниках электроэнергии при отсутствии потребных мощностей в электрических сетях или при отсутствии сети как таковой.

На заре двигателестроения, проблема повышения эффективности цикла поршневого двигателя являлась актуальной. Сегодня поршневой двигатель достиг некоторых пределов совершенства. Как показано поршневой двигатель имеет важнейшее значение, как сегодня, так и в ближайшем будущем в роли источника механической и электрической энергии. Однако широкое, обусловленное глобальной инфраструктурой, использование невозобновляемых углеводородных топлив делает проблему повышения эффективности рабочего цикла поршневого двигателя одной из наиболее актуальных.

Тепловой баланс поршневого ДВС и потенциал повышения его эффективности

Все серийно выпускаемые поршневые двигатели используют углеводородные топлива. Эффективный КПД двигателя внутреннего сгорания изменяется, от 20% у газовых двигателей, 22% у бензиновых двигателей и до 45% у дизельных. Причем для газовых и бензиновых двигателей, в которых применяется количественное регулирование указанный КПД соответствует максимальному открытию дроссельной заслонки. В качестве авиационных силовых установок, вращающих воздушный винт применяются именно поршневые двигатели с искровым зажиганием и соответственно количественным регулированием.

Распределение тепла, введенного в поршневой двигатель с топливом описывает тепловой баланс двигателя. Типичный тепловой баланс двигателя с искровым зажиганием при полностью открытой дроссельной заслонке приведен на рис. 1.

Для подавляющего количества существующих ДВС, которыми являются двигатели автомобилей, режим максимального газа используется крайне редко, и в основном двигатели эксплуатируются на режимах частичной мощности, при которых значительно возрастает количество остаточных газов и КПД двигателя имеет минимальные значения.

Если рассматривать большинство поршневых ДВС, то можно выделить следующие диапазоны составляющих теплового баланса:

Табл. 1. Тепловой баланс современных поршневых ДВС [1].

Составляющая теплового баланса	Двигатель с искровым зажиганием, %	Дизельный двигатель, %
Q_e - теплота, перешедшая в работу на вал	21...28	29...42
$Q_{охл}$ - теплота, отведенная в систему охлаждения	12...27	15...35
$Q_{ог}$ - теплота, потерянная с отработавшими газами	30...55	25...45
$Q_{ост}$ - теплота, учитывающая остальные потери	3...10	2...5

Для ДВС с искровым зажиганием характерным тепловым балансом является использование 23% тепла, подведенного с топливом на создание мощности на валу, 27% - потери в систему охлаждения, 45% - потери тепла с отработавшими газами и 5% другие потери [1].

Видно, что основные потери извлеченной из топлива энергии, приходится на долю теп-

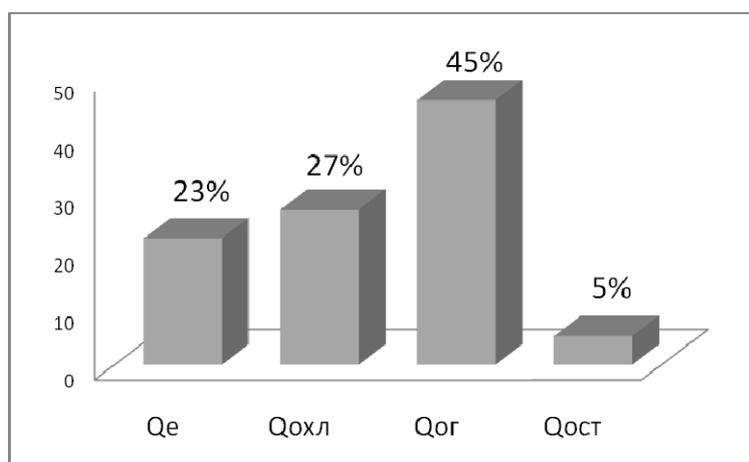


Рис. 1. Пример теплового баланса бензинового ДВС.
 Q_e - теплота, перешедшая в работу на валу
 $Q_{охл}$ - теплота, отведенная в систему охлаждения
 $Q_{ог}$ - теплота, потерянная с отработавшими газами
 $Q_{ост}$ - теплота, учитывающая остальные потери

ла уходящего через выпускную систему с отработавшими газами и могут составлять более половины всей тепловой энергии.

В отличие от лопаточных тепловых машин действительный рабочий цикл поршневого двигателя имеет более высокий уровень эффективности, за счет того, что основная доля тела подво-

ема. Не смотря на известную высокую экономичность поршневого двигателя, существует возможность дальнейшего повышения эффективности цикла за счет использования части тепла уносимого через выпускную систему с отработавшими газами.

Современные способы утилизации энергии отработавших газов

Проблема утилизации теряемого с выхлопными газами тепла для повышения эффективности цикла двигателя давно известна и довольно успешно решается различными способами. Эти способы можно разделить на внешнюю утилизацию энергии, которая была бы выброшена с отработавшими газами и внутреннюю утилизацию. К способам внешней утилизации относится использование турбокомпрессора и использование утилизирующей турбины (турбокомпаунд). Внутренняя утилизация подразумевает, что тепло обычно теряемое с выхлопными газами совершает работу внутри цилиндра двигателя, например, циклы полного расширения - цикл Аткинсона или цикл Миллера.

Турбокомпрессор и утилизирующая турбина

Двигатели, использующие энергию отработавших газов на турбине, приводящей центробежный нагнетатель имеют большой индикаторный КПД и большой механический КПД, и соответственно большой эффективный КПД, являющийся их произведением. Известно, что для обеспечения наддува требуется меньшее количество энергии, чем содержится в отработавших газах, следовательно, значительная ее часть все же теряется с выхлопом и эта энергия так же может быть утилизирована. При использовании утилизирующей турбины, соединенной через планетарный редуктор с коленчатым валом, неизрасходованная доля энергии отработавших газов может быть возвращена в рабочий цикл. Утилизирующая турбина позволяет еще повысить индикаторный и механический КПД.

При использовании турбокомпрессора прирост эффективности цикла может составлять до 25% от КПД атмосферного двигателя. Т.е. для двигателя с искровым зажиганием эффективный КПД может увеличиться до 30...35%, а КПД дизельного двигателя до 50%. Надо заметить, что указанный прирост эффективного КПД достижим только при использовании промежуточного охлаждения. Иначе сжатый в центробежном компрессоре воздух, за счет нагрева будет иметь низкую плотность.

Использование утилизирующей турбины дает дополнительное увеличение КПД на несколько процентов. Но применение такого решения целесообразно только для стационарных двигателей большой мощности, в том числе судовых. Т.к. усложняет и удорожает конструкцию, а также увеличивает габариты и вес двигателя.

Циклы Джеймса Аткинсона и Ральфа Миллера

Вариантом совершенствования цикла Николауса Отто была идея создания цикла полного расширения. Впервые реализованная в 1886 году английским инженером Джеймсом Аткинсоном. В 1947 американским инженером Ральфом Миллером предложен измененный вариант цикла Аткинсона. В таком цикле степень сжатия свежего заряда меньше степени его расширения во время рабочего хода. Тем самым практически вся энергия рабочего тела реализуется в работе газа совершаемой в цилиндре двигателя. При этом максимальная эффективность цикла достигается, когда давление рабочего тела в конце рабочего хода равно давлению в выпускной системе и больше либо равно давлению под поршнем.

Джеймс Аткинсон предложил использовать вместо кривошипно-шатунного механизма, придуманный им альтернативный преобразующий механизм, в котором за один оборот выходного вала совершалось четыре такта, причем ход поршня на тактах впуска и сжатия был меньше чем ход поршня при тактах расширения и выпуска. Таким образом в двигателе Аткинсона реализовывалось близкое к полному расширение отработавших газов.

Современный вариант цикла Аткинсона, реализуется за счет отличных от применяемых в цикле Отто фаз газораспределения (двигатели автомобилей Toyota Prius и Mazda Xedos 9). Закрывание впускного клапана выполняют значительно позже. При этом часть свежего заряда вошедшего в цилиндр на впуске выходит обратно во впускной коллектор и реальное сжатие начинается только когда закроется впускной клапан. Такой процесс называют "укороченное сжатие". При этом действительная степень сжатия будет ниже, чем геометрическая, которая будет равна степени расширения.

В цикле Миллера изначально предлагалось выполнять снижение действительной степени сжатия относительно заложенного в конструкции отношения полного объема цилиндра к объему камеры сгорания за счет регулирования фаз механизма газораспределения. С той разницей, что Миллер предложил закрывать впускной клапан намного раньше, чем это происходит в цикле Отто. Так называемый "укороченный впуск". Достоинством цикла Миллера является то, что отсутствуют обратное истекание свежего заряда через впускной клапан и соответствующие негативные явления (подогрев свежего заряда во впускной системе, работа связанная с вытеснением части свежего заряда и др.).

Однако цикл Миллера менее эффективен чем цикл Аткинсона. Это связано с тем, что в цикле Миллера присутствуют затраты работы на расширение свежего заряда, отсутствует снижающее вероятность детонации охлаждение деталей цилиндропоршневой группы перед сжатием, которое обеспечивает в цикле Аткинсона возвращаемая во впускной коллектор порция свежего заряда. С другой стороны в двигателе выполненном по циклу Аткинсона,

при повышении частоты вращения, проще обеспечить требуемое наполнение цилиндра за счет большого времени-сечения впускного клапана.

Оба цикла полного расширения обеспечивают повышение эффективного КПД цикла.

- Во-первых, при увеличении степени расширения относительно степени сжатия снижаются потери тепла уходящего с отработавшими газами.
- Во-вторых, за счет более полного расширения и меньшего объема камеры сгорания снижается средняя температура цикла и соответственно снижаются потери тепла в систему охлаждения.

Применение впрыска воды, реализованные способы

Использование воды для повышения характеристик авиационных двигателей применялось практически с момента создания тех или иных типов двигателей.

Форсирование поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) путем впрыска воды (или водно-спиртовой смеси) особенно широко применялось в ходе Второй Мировой войны американскими (Pratt & Whitney) и немецкими (Daimler Benz и BMW) двигателестроителями. Вода добавлялась в уже готовую топливоздушную смесь, охлаждая ее, и попадала вместе с ней в камеру сгорания. От контакта с раскаленной поверхностью поршня и стенок цилиндра вода мгновенно превращалась в пар, который помогал рабочим газам толкать поршень. Предварительное охлаждение топливоздушной смеси позволяло увеличить ее объем на впрыске и повышало эффективность сгорания топлива.

В современных газотурбинных двигателях также применяется впрыск воды. При впрыске воды на вход компрессора двигателя, за счет ее активного испарения в тракте компрессора происходит снижение температуры на входе двигателя. Повышается мощность двигателя и запас его газодинамической устойчивости.

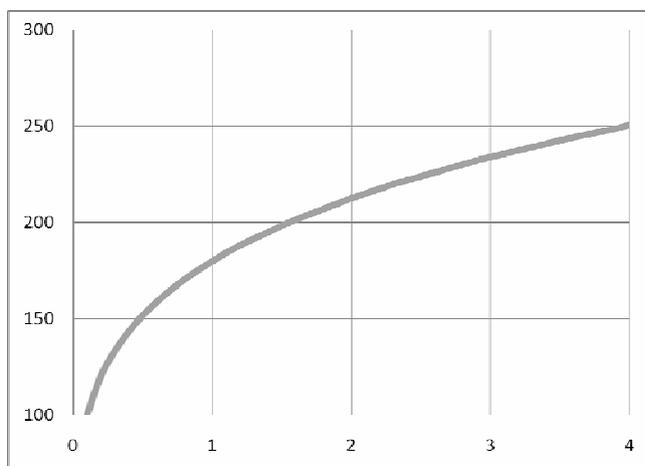


Рис. 2. Точка кипения жидкости °C при заданном давлении, МПа

Потенциал возможности применения впрыска воды

Отработавшие газы, даже при условии их полного расширения будут иметь температуру выше 700 °C [2], что означает, наличие запаса неизрасходованной тепловой энергии. При этом перепад давлений на поршне или в выпускной системе отсут-

вует и совершить полезную работу без дополнительного воздействия на рабочее тело невозможно.

При определении количества работы совершенной в цикле поршневого двигателя имеет значение, какую величину имеет давление в каждой точке цикла. Величина температуры рабочего тела характеризует теплонапряженность деталей двигателя и потери тепла в системе охлаждения.

Для повышения эффективности цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания предлагается рассмотреть различные схемы применения непосредственного впрыска воды.

При непосредственном впрыске воды в газовую среду имеющую давление и температуру выше характеристики кипения воды см. рис 2, происходит изменение агрегатного состояния воды с жидкого на газообразное. При испарении воды последовательно происходят следующие процессы:

- нагрев порции воды до температуры кипения и соответствующее охлаждение газовой среды;
- подвод энергии к порции воды для изменения агрегатного состояния и соответствующее охлаждение газовой среды;
- переход воды в газообразное состояние;
- выравнивание температуры газовой среды и воды перешедшей в газовую фазу.

В рабочем цикле поршневого двигателя начиная с момента воспламенения топливовоздушной смеси, давление и температура таковы, что соответствующая им точка лежит выше кривой приведенной на рис. 2. Следовательно, организовывать впрыск воды можно на любой стадии цикла после начала процесса сгорания.

Отработавшие газы, даже при условии их полного расширения в цилиндре, будут иметь температуру выше $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2], что означает наличие запаса неизрасходованной тепловой энергии.

Впрыск воды неоднократно применялся в поршневом моторостроении, но использовалась схема подачи воды во впускной патрубке, с целью охлаждения свежего заряда.

Оценка существующих решений по впрыску воды

Для анализа существующих решений было проведено патентное исследование.

Подобрано для патентного исследования 12 патентов зарегистрированных в Российской Федерации [3-15], 21 патент, зарегистрированный в Соединенных Штатах Америки [16-37], 6 патентов стран Евросоюза [38-43] (3 патента Германия, 1 патент Швейцария, 2 патента Франция).

Как показал анализ, наибольшее количество патентов, посвященных данной теме, зарегистрировано в США, причем патенты посвящены как чисто техническим вопросам впрыска воды и парообразования (конструкция поршней и головок, способы получения пара), так и конструкции двигателей в целом (в том числе, системам управления). Патенты, зарегистрированные в Российской Федерации, также охватывают большинство вопросов применения впрыска воды для утилизации энергии отработавших газов.

Как показал анализ, наибольшее количество патентов, посвященных данной теме, зарегистрировано в США, причем патенты посвящены как чисто техническим вопросам впрыска воды и парообразования (конструкция поршней и головок, способы получения пара), так и конструкции двигателей в целом (в том числе, системам управления). Патенты, зарегистрированные в Российской Федерации, также охватывают большинство вопросов применения впрыска воды для утилизации энергии отработавших газов.

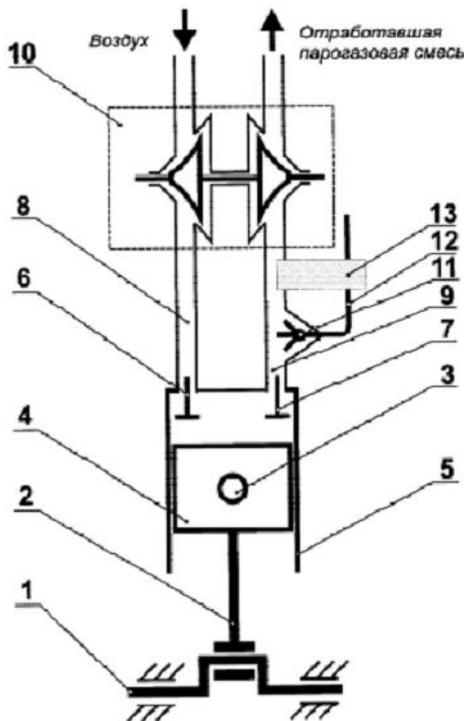


Рис. 3. Утилизация энергии ОГ при помощи паровой турбины [11]

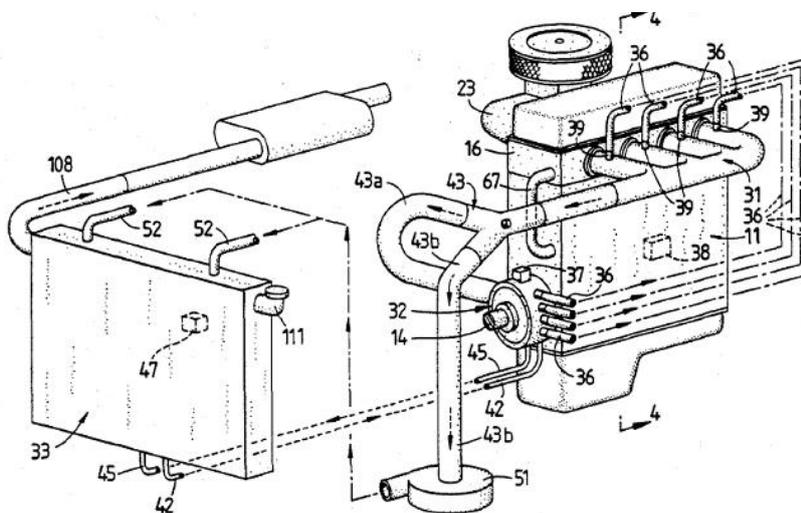


Рис. 4. Утилизация энергии ОГ при помощи паровой турбины [18]

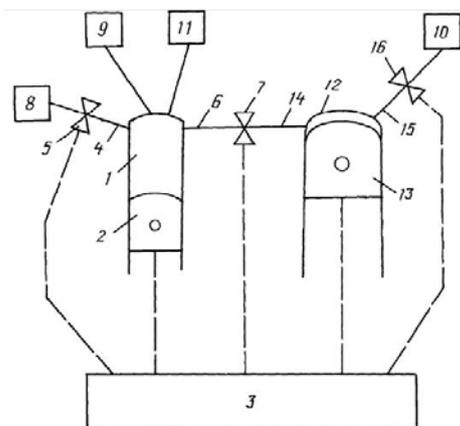


Рис. 5. Утилизация энергии ОГ в дополнительном цилиндре [9]

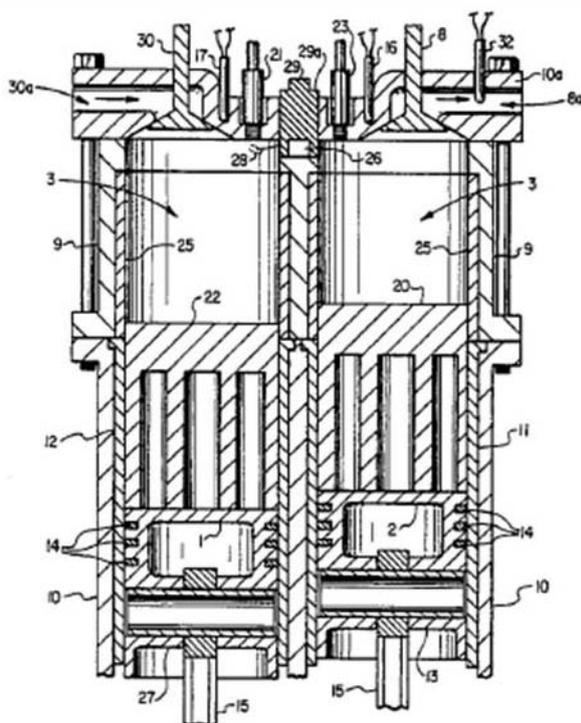


Рис. 6. Утилизация энергии ОГ в дополнительном цилиндре [29]

Рассмотренные способы можно условно разделить на четыре группы:

- утилизация энергии выхлопных газов при помощи паровой турбины (см. рис.3 и рис.4);
- дополнительные циклы сжатия-расширения пара в том же цилиндре, что и основные циклы (шеститактный цикл);
- дополнительные циклы реализуются в дополнительном цилиндре, с перепуском ОГ из основного(см. рис.5 и рис.6);
- впрыск воды или пара в ходе процесса сгорания(см. рис.7 и рис.8).

Первый способ, т.е. применение паровой турбины, рассматривается, например, в патентах [11, 18]. После совершения работы в цилиндрах, ОГ используются для получения водяного пара, который, в дальнейшем направляется на турбину. Мощность, получаемая на турбине, расходуется на совершение полезной работы (привод нагнетателя) или передается на вал двигателя (турбокомпаунд). Система турбокомпаунда применена инженерами фирмы BMW в прототипе Turbosteamer. Немецкие инженеры заявляют прирост мощности на 10% и экономию топлива на 15%. Существенным недостатком данного решения является значительное усложнение и утяжеление конструкции.

Наибольший интерес к шеститактному циклу проявляется в США [22, 23, 27, 28, 30, 32, 34, 35, 36]. Данный способ основан на сжатии ОГ после совершения рабочего хода и впрыске в них порции воды. Вода под действием высокой температуры и давления испаряется и расширяется, толкая поршень и совершая, таким образом, полезную работу. Несомненным дос-

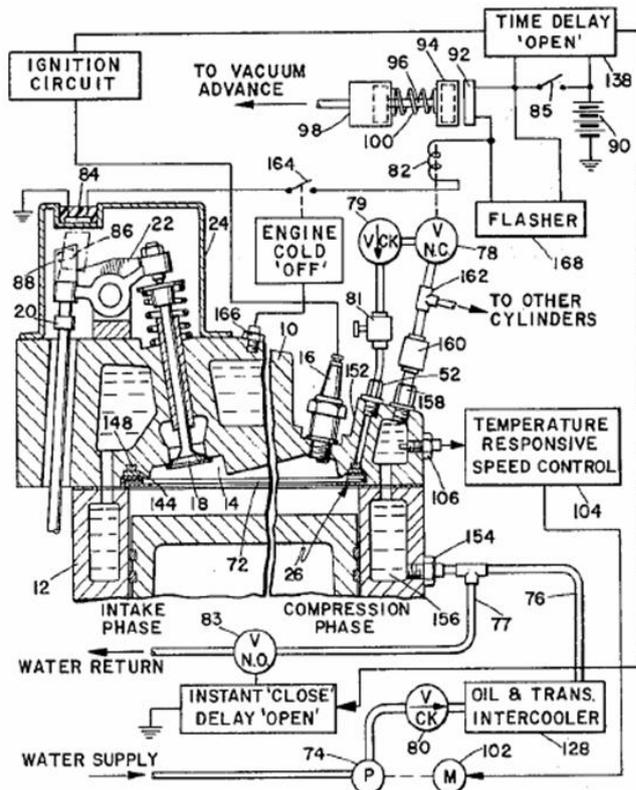


Рис. 7. Организация впрыска воды в камеру сгорания [25]

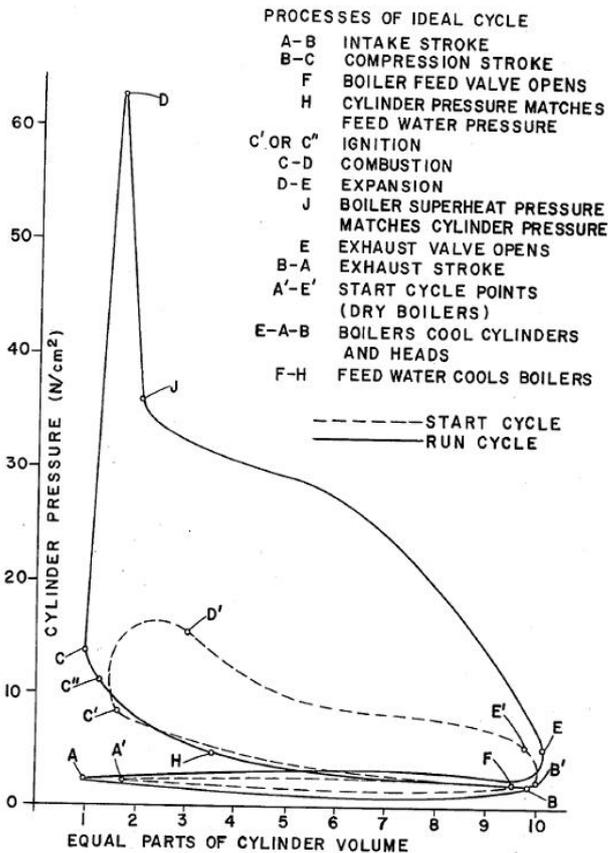


Рис. 8. Расчетная P-V диаграмма, демонстрирующая дополнительную работу, получаемую при впрыске воды в ходе процесса сгорания

тоинством данного способа является возможность увеличения степени сжатия двигателей на 30-50% (улучшение сгорания топлива и экологичности), а также надежное охлаждение стенок цилиндра и поршня. Основные недостатки данной системы – высокая коррозионная активность воды, невозможность работы системы на непрогретом двигателе, трудности при работе при отрицательных температурах окружающей среды.

Реализация дополнительных циклов сжатия–расширения пара в дополнительном цилиндре рассмотрена в патентах [9,29]. В основном цилиндре происходит стандартный четырехтактный цикл, после чего ОГ перепускаются в дополнительный цилиндр, куда впрыскивается вода. За счет высокой температуры вода испаряется и совершает полезную работу. Такое решение также значительно усложняет и утяжеляет конструкцию.

Патентами, предлагающими впрыск воды в ходе процесса сгорания, являются [13, 25]. Оба патента предусматривают впрыск воды в конце процесса сгорания топлива, что должно обеспечить получение дополнительной мощности одновременно с надежным охлаждением стенок цилиндра и поршня. Этот способ применения воды в ДВС представляется наиболее эффективным,

в связи с тем, что отсутствуют дополнительные такты сжатия.

Наиболее проработанными, на данный момент являются первые два способа утилизации энергии ОГ при помощи воды. Как уже упоминалось, паровой турбокомпаунд применяются в прототипах автомобилей фирмы BMW, а шеститактный цикл реализован известным конструктором и изобретателем Б. Кроуэром (Bruce Crower) в его экспериментальном двигателе. Вместе с тем, впрыск воды в ходе процесса сгорания топлива конструктивно не реализован, несмотря на имеющиеся теоретические предложения и научно-технический задел. Для дальнейшего развития данного способа повышения эффективности цикла ДВС требуется экспериментальное подтверждение на действующем двигателе.

Проблемы совершенствования цикла ДВС применением непосредственного впрыска воды

Учитывая современное развитие инженерной мысли в направлении использования воды в ДВС с целью систематизирования процесса проектирования ДВС с утилизацией тепла впрыском воды необходимо разработать методику проектирования и определить наиболее эффективные конструктивные схемы.

В рабочем цикле поршневого двигателя начиная с момента воспламенения топливовоздушной смеси, давление и температура таковы, что соответствующая им точка лежит выше точки кипения воды. Следовательно, организовывать впрыск воды можно на любой стадии цикла после начала процесса сгорания.

Предварительно можно сказать, что применение впрыска воды позволит:

- 1) снизить вероятность детонации в двигателях с искровым зажиганием;
- 2) снизить потери тепла в систему охлаждения, за счет снижения средней температуры цикла;
- 3) максимально реализовать тепловой потенциал отработавших газов, за счет увеличения массы рабочего тела.

Впрыск воды в поршневом двигателе можно обеспечить, используя различные схемы, как по организации цикла, так и по конструктивному исполнению. Сам впрыск воды можно осуществлять одной порцией или многостадийно, по аналогии с современной системой впрыска дизельных двигателей Common Rail.

С точки зрения организации цикла можно выделить следующие варианты впрыска:

- 1) до момента воспламенения, в конце такта сжатия;
- 2) после момента воспламенения, в конце такта сжатия;
- 3) после момента воспламенения, на такте рабочего хода;

- 4) в конце сжатия отработавших газов на дополнительном такте цикла
- 5) на дополнительном такте расширения отработавших газов

Указанные пять вариантов могут сочетаться при использовании системы обеспечивающей реализацию многостадийного впрыска.

С точки зрения конструктивной реализации, предлагаемые циклы, с дополнительным сжатием и дополнительным расширением, могут быть реализованы как в одном цилиндре (шеститактный цикл), так и в двух цилиндрах одинакового и различающегося объема.

Выполненная оценка современного состояния проблемы непосредственного впрыска воды в ДВС позволила выявить ряд нерешенных вопросов препятствующих созданию методики проектирования ДВС с утилизацией тепла испарением жидкости.

1. Отсутствует систематизированное обобщение мирового опыта применения впрыска воды при организации цикла поршневого ДВС.
2. Отсутствует математическая модель рабочего цикла поршневого ДВС с впрыском воды.
3. Отсутствует экспериментальное подтверждение работоспособности и эффективности представляющейся наиболее эффективной схемы впрыска воды.
4. Отсутствует методика выбора наиболее эффективных параметров конструкции ДВС с впрыском воды.
5. Не определены особенности применения впрыска воды при организации рабочего цикла.
6. Не определены конструкторско-технологические проблемы реализации серийного выпуска ДВС с впрыском воды и пути их решения.
7. Не определены проблемы эксплуатации ДВС с впрыском воды и соответственно пути их решения.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, мероприятие 1.1, государственный контракт № 02.740.11.01.59 от 25 июня 2009.

Библиографический список

1. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: Учебник для вузов/В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян и др.; под ред. В. Н. Луканина и М. Г. Шатрова. – 3-е изд., перераб. и испр. – М.: Высшая школа, 2007. – 479 с.: ил.

2. Вибге И.И. Новое в рабочем цикле двигателей. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя/ – Свердловск.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. – 272 с.
3. Пат. № 2 251 004 RU C2 МПК F01K 21/00 Способ получения пара из воды в паровой машине.
4. Пат. № 2 268 376 RU C2 МПК F02B 41/02 (2006.01) Двигатель внутреннего сгорания
5. Пат. № 2 278 286 RU C2 МПК F02C 3/30 (2006.01) Газотурбинная установка.
6. Пат. № 2 285 144 RU C2 МПК F02M 27/04 (2006.01) Способ получения и преобразования энергии рабочей среды в механическую работу и устройство для ее осуществления.
7. Пат. № 2 299 339 RU C1 МПК F02B 47/02 (2006.01) Способ повышения эффективности ДВС и устройство для его реализации.
8. Пат. № 2 334 112 RU C2 МПК F02C 6/00 (2006.01) Способ повышения КПД парогазовой установки.
9. Пат. № 2 338 076 RU C2 МПК F02B 47/02 (2006.01) Четырехтактный комбинированный двигатель.
10. Пат. № 2 338 667 RU C1 МПК F02C 9/48 (2006.01) Боевой вертолет.
11. Пат. № 2 338 914 RU C2 МПК F02B 47/02 (2006.01) Двигатель внутреннего сгорания.
12. Пат. № 2 344 312 RU C2 МПК F02M 43/00 (2006.01) Устройство для приготовления водотопливных эмульсий дизелей с кулачковым приводом плунжерного впрыска топлива
13. Пат. № 2 351 779 RU C2 МПК F02B 53/02 (2006.01) Способ работы теплового двигателя и его устройство.
14. Пат. № 2 359 160 RU C1 МПК F04D 19/02 (2006.01) Способ повышения эффективности работы осевого многоступенчатого компрессора.
15. Пат. № 2 369 762 RU C2 МПК F04C 9/00 (2006.01) Система (варианты) и способ (варианты) для повышения выходной мощности турбины, а также система защиты входного канала газовой турбины от коррозии.
16. Пат. US 4322950 МПК F01B 29/04 Combined internal combustion and steam engine.
17. Пат. US 4509464 МПК F01M 25/02 High efficiency internal combustion steam engine.
18. Пат. US 5191766 МПК F02G 3/02 Hybrid internal combustion steam engine.
19. Пат. US 4986223 МПК F02D 19/00 Internal combustion engine injection superheated steam.
20. Пат. US 4406127 МПК F01K 23/10 Internal combustion engine with steam power assist.

21. Пат. US 2674235 Steam injector for Internal combustion engine.
22. Пат. US 3964263 МПК F01K 27/00 Six cycle combustion and fluid vaporization engine.
23. Пат. US 4143518 МПК F01B 29/04 Internal combustion and steam engine.
24. Пат. US 4301655 МПК F02B 29/06 Combination Internal combustion and steam engine.
25. Пат. US 4402182 МПК F01B 29/04 Combined internal combustion and steam engine.
26. Пат. US 4417447 МПК F01B 29/04 Combined internal combustion and steam engine.
27. Пат. US 4433548 МПК F01K 27/00 Combination Internal combustion and steam engine.
28. Пат. US 4736715 МПК F02B 75/26 Engine with a six-stroke cycle, variable compression ratio, and constant stroke.
29. Пат. US 4783963 МПК F01K 21/04 Internal combustion steam engine.
30. Пат. US 4976226 МПК F02B 75/02 Method for increasing the heat efficiency of a piston combustion engine.
31. Пат. US 5125366 МПК F02B 47/02 Water introduction in Internal combustion engines.
32. Пат. US 6253745 МПК F01K 27/00 Multiple stroke enginehaving fuel and vapor charges.
33. Пат. US 6311651 МПК F02B 47/02 Computer controlled six-stroke internal combustion engine and its method of operation.
34. Пат. US 6571749 МПК F02B 47/02 Computer controlled six-stroke cycle internal combustion engine and its method of operation.
35. Пат. US 6986252 МПК F01B 29/04 Internal combustion engine with steam expansion stroke.
36. Пат. US 7021272 МПК F02B 77/00 Computer controlled multi stroke cycle power generating assembly and method of operation.
37. Пат. US 4030456 МПК F02D 19/00 Vapor injector for Internal combustion engines.
38. Пат. CH 611979 МПК F02B 37/04 Zweitakt-Kolbennkraftmaschine mit einer die Abgaswärme der Aufladenturbine benfitzendendampfturbine.
39. Пат. EP 0076885 МПК F02B 75/02 Verfahren hohen wirkungsgrades zur umwandlung vonkraftstoffen in antirebsenergie und zugerordneter kombinierte verbennunge und dampfmotor.
40. Пат. EP 0142580 МПК F02B 47/02 Combination Internal combustion and steam engine.
41. Пат. EP 0154975 МПК F02B 47/02 High efficiency internal combustion steam engine.
42. Пат. FR 2547624 МПК F02B 69/00 Moteur a' vapeur reallse par transformation d'un moteur a' combustion interne.
43. Пат. FR 2670827 МПК F01L 1/04 Moteur a' vapeur a' deux temps resultant de la transformation d'un moteur a' combustion interne.

Сведения об авторах

Лефёров Александр Александрович, доцент, к.т.н, Московский авиационный институт (государственный технический университет), тел. 8-499-158-4297, Email: mai203@mail.ru.

Куприянов Николай Дмитриевич, инженер, Московский авиационный институт (государственный технический университет), тел. 8-499-158-4297 Email: mai203@mail.ru.