

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.43:621.43.056

doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-53-61

Возможные концептуальные направления совершенствования транспортных ДВС

В.И. Богданов, М.А. Холманова

ПАО «ОДК-Сатурн»

Potential Conceptual Developments for the Improvement of Transport Internal Combustion Engines

V.I. Bogdanov, M.A. Kholmanova

PAO UEC-Saturn

Показано, что для существенного повышения эффективности двигателя внутреннего сгорания необходимы новые концептуальные решения. Так, применение выносной золотниковой камеры сгорания постоянного объема, конструктивное разделение процессов сжатия и расширения в таком двигателе могут обеспечить многотопливность, качественное повышение экономичности и возможность исключить или значительно упростить коробку передач. Реализация в двигателе внутреннего сгорания бинарного цикла, включающего в себя утилизацию тепловых потерь в двух дополнительных тактах, обеспечивающих паровой цикл, увеличивает экономичность и решает проблему его охлаждения. Наиболее эффективно использовать бинарный цикл в воздухо-независимых энергетических установках подводных объектов с ограниченным запасом окислителя. Наличие отдельного окислителя позволяет реализовать большие мощности путем увеличения одновременной подачи окислителя, топлива и воды в паровую часть цикла двигателя внутреннего сгорания. Для качественного улучшения характеристик последнего также необходим системный анализ и отбор созданного научно-технического задела с последующим комплексным внедрением.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, камера сгорания постоянного объема, бинарный цикл, коробка передач, воздухо-независимая энергетическая установка

New conceptual solutions are required to significantly improve combustion engine efficiency. For example, the use of the outboard spool combustion chamber of constant volume and the separation of the compression and expansion processes in the internal combustion engine can provide multi-fuel capability, a significant increase in efficiency and an opportunity to exclude or significantly simplify the gear box. The implementation of a binary cycle including heat loss recovery in two additional strokes supporting the steam cycle increases efficiency and solves the cooling problem of the combustion engine. The binary cycle is most effective in air-independent power plants of underwater objects with a limited reserve of oxidizers. The presence of a separate oxidizer makes it possible to achieve high capacity by increasing the simultaneous supply of oxidant, fuel and water to the steam part of the cycle. In order to qualitatively improve the characteristics of the combustion engine, a system analysis of the developed technical solutions is also required, followed by an integrated implementation.

Keywords: internal combustion engine, constant volume combustion chamber, binary cycle, gear box, air-independent power plant

Энергетику наземного транспорта определяет двигатель внутреннего сгорания (ДВС). Однако современный автомобильный ДВС с автоматической коробкой передач (КП), ремонт которой может стоить более 100 000 руб., иногда называют абсурдом, доведенным до совершенства. Видимо, поэтому Европа собирается заменить ДВС другими энергетическими установками (ЭУ).

Англия и Франция уже объявили о том, что к 2040 г. запретят регистрировать у себя новые автомобили с дизельными и бензиновыми ДВС. Компания Jaguar Land Rover в 2020 г. решила, что новые автомобили будут электрофицированы: в производство будут запущены либо электромобили, либо гибриды. С аналогичной инициативой выступают компании Volvo, BMW, Daimler и Volkswagen. Сборка электрических компонентов, включая батареи, требует меньше трудозатрат (до 40 %), чем в случае ДВС [1].

Вместе с тем следует отметить, что по тепловым двигателям накоплен огромный невостребованный научно-технический задел. Кроме того, сегодня мало кто знает, что в паровозе отсутствие КП обеспечивалось поздней отсечкой подачи пара благодаря расширению рабочего тела в отдельном узле — поршневой расширительной машине.

Поэтому можно значительно улучшить характеристики ДВС, но сначала необходимо си-

стематизировать накопленные знания, а затем на их базе получить новые прорывные знания для создания новой технологии и перспективного двигателя.

Цель работы — оценка эффективности комплексного применения новых рабочих процессов и конструктивных решений для качественного совершенствования ДВС.

Поршневые ДВС традиционного исполнения в основном исчерпали возможности повышения экономичности. Сделать их более экономичными, одновременно обеспечив многогопливность, можно используя выносную золотниковую камеру сгорания (КС) постоянного объема (ПО), конструктивная схема которой показана на рис. 1 [2]. Эта КС прошла экспериментальную отработку, получен высокий уровень ее характеристик [3].

Принцип работы КС ПО заключается в следующем. Воздух от компрессора поступает в золотниковую КС, когда окно ротора-золотника 4 совпадает с входным патрубком 9 КС. При дальнейшем повороте ротора-золотника его окно перекрывается корпусом 6 КС и топливная форсунка 11 впрыскивает топливо. Образовавшаяся топливовоздушная смесь воспламеняется свечой зажигания 2 и сгорает в закрытом объеме ($V = \text{const}$) с повышением давления. При совмещении окна ротора-золот-

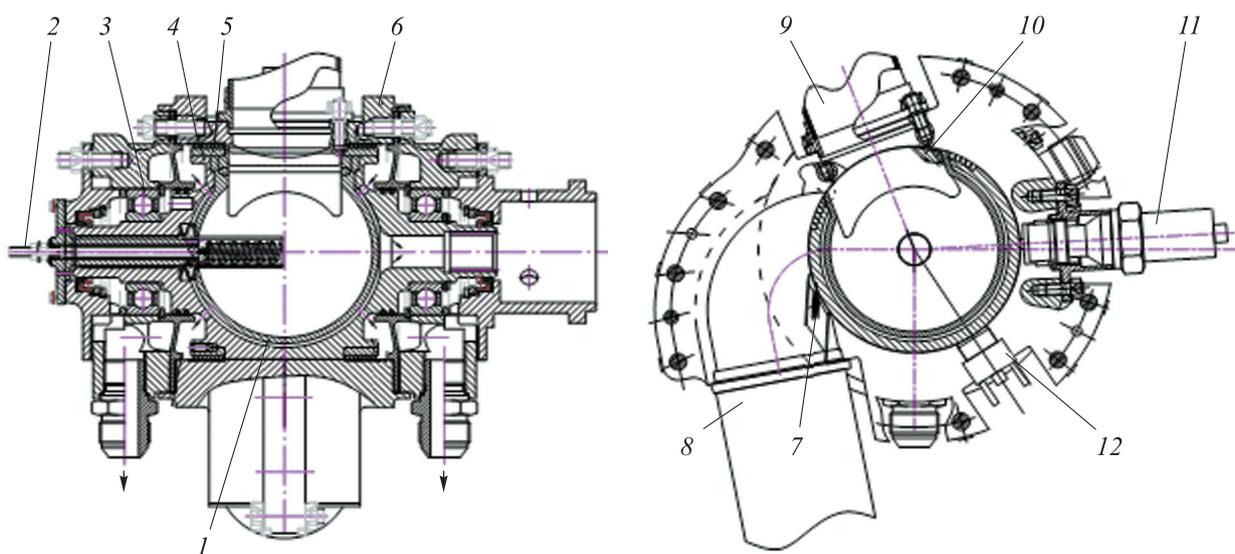


Рис. 1. Конструктивная схема КС ПО:

1 — сферическая жаровая труба; 2 — свеча зажигания; 3 — подшипник качения; 4 — ротор-золотник; 5 — лабиринтное уплотнение; 6 — корпус; 7 — решетка направляющего аппарата; 8 и 9 — выхлопной и входной патрубки; 10 — сопло в золотнике; 11 — топливная форсунка; 12 — датчик давления

ника с выхлопным патрубком 8 происходит истечение газа, а затем продувка КС.

При выносной КС процессы сжатия и расширения происходят в разных цилиндрах. Это обеспечивает более глубокое расширение благодаря использованию большего объема цилиндра расширения. В итоге экономичность может быть значительно повышена.

Данная концепция ДВС с выносной КС (которая может быть как золотниковой, так и клапанной) в настоящее время вызывает интерес специалистов [4–8]. Схема ДВС с выносной золотниковой КС ПО [2, 3] показана на рис. 2.

В фирме «АДС» (г. Заволжье, Нижегородская область) создан экспериментальный автомобильный ДВС с выносной золотниковой КС ПО, что обеспечило многотопливность и повысило экономичность силового агрегата. Однако из-за ее малого размера пришлось применить контактные уплотнения (между золотником и корпусом), которые для достижения заданного ресурса требуют большого объема доводочных работ.

Согласно предварительной оценке, лабиринтные уплотнения будут достаточно эффективны для ДВС мощностью 3000 кВт и более. При изготовлении КС из жаропрочных керамических или композиционных материалов, обеспечивающих стабильность минимальных зазоров в лабиринтах, это ограничение по мощности может быть даже снято.

Разделение рабочих процессов — сжатия, сгорания и расширения — по разным узлам, как в газотурбинном двигателе (ГТД), позволяет реализовать термодинамические преимущества цикла ГТД с подводом теплоты при

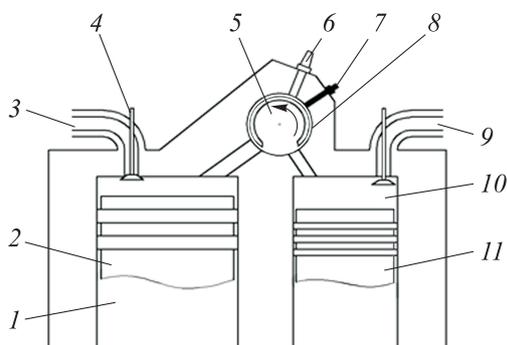


Рис. 2. Схема ДВС с выносной золотниковой КС ПО:

- 1 — цилиндр расширения (большой);
- 2 и 11 — поршень большого и малого цилиндров;
- 3 и 9 — выпускной и впускной каналы; 4 — клапаны;
- 5 — золотниковая КС ПО; 6 — свеча зажигания;
- 7 — топливная форсунка; 8 — вращающийся золотник;
- 10 — цилиндр всасывания и сжатия

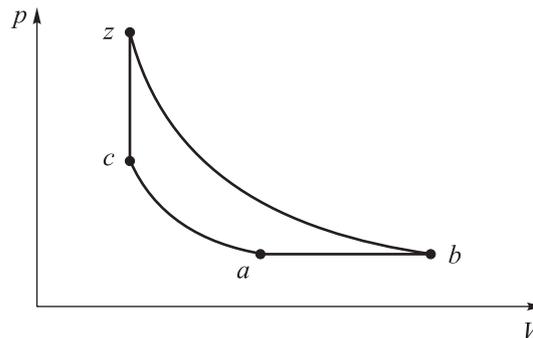


Рис. 3. Цикл ГТД с подводом теплоты при $V = \text{const}$

$V = \text{const}$ с общепринятыми обозначениями $a-c-z-b$ (рис. 3) [9–11].

Следует отметить, что для реализации такого цикла ГТД в ДВС с традиционным турбонаддувом необходимо установить импульсную турбину (имеющую невысокий коэффициент полезного действия (КПД)) между выхлопом поршневого двигателя и турбиной наддува, что значительно усложняет его, вследствие чего не находит применения.

Одно из преимуществ цикла ГТД с подводом теплоты при $V = \text{const}$ заключается в том, что температура сгорания T_z влияет на экономичность уже на уровне термического КПД, т. е. целесообразно сжигать стехиометрические смеси. Для большого давления сгорания ($p_z > 7$ МПа) не важно, как его получить — увеличением степени повышения давления в компрессоре π_k (увеличением работы сжатия и массы конструкции) или в выносной КС ПО λ при эффективном сгорании (рис. 4) [10].

На рис. 4 введены следующие обозначения: η_t — термический КПД; $\Delta\eta_t$ — прирост термического КПД цикла ГТД с $V = \text{const}$ относительно цикла ГТД с $p = \text{const}$. В дизельном двигателе (далее дизель) при $V = \text{const}$ происходит только частичное сгорание. По предварительной расчетной оценке, даже при невысокой степени повышения давления в компрессоре $\pi_k = 6$ в ГТД с $V = \text{const}$ ($T_z = 1600$ К) может быть достигнут эффективный КПД на уровне 0,37 [10]. Для сравнения: в традиционных ДВС, работающих по циклу Отто и Дизеля, эффективный КПД в среднем составляет примерно 0,25 и 0,38, соответственно.

С учетом изложенного для повышения экономичности ДВС предлагается следующая концепция его модернизации за счет применения выносной золотниковой КС ПО и турбокомпрессоров (рис. 5).

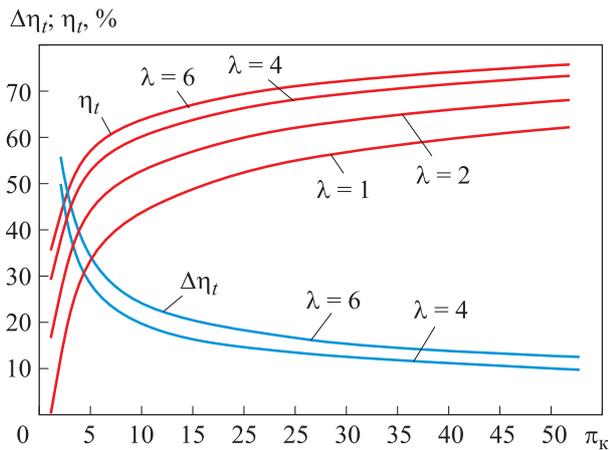


Рис. 4. Зависимости термического КПД η_t (—) и его прироста $\Delta\eta_t$ (—) от степени повышения давления в компрессоре π_k при различных значениях степени повышения давления в выносной КС ПО λ

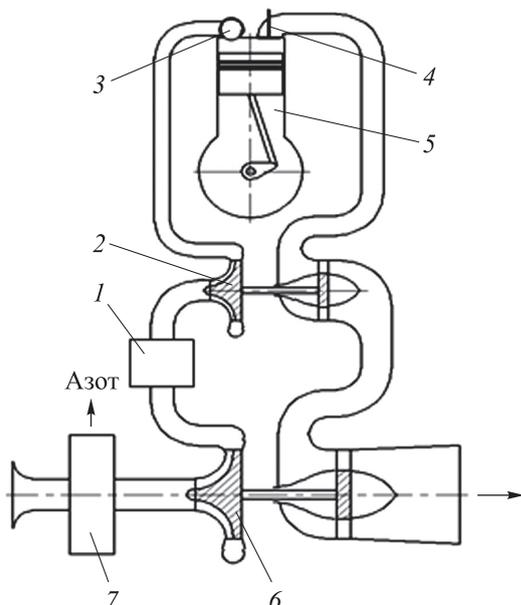


Рис. 5. Схема ДВС с выносной КС ПО и турбокомпрессорами:

1 — охладитель воздуха; 2 — турбокомпрессор высокого давления; 3 — золотниковая КС ПО; 4 — выпускной клапан; 5 — поршневая расширительная машина; 6 — турбокомпрессор низкого давления; 7 — устройство мембранного обогащения кислородом (отделение азота)

1. Сжатие осуществляется в двух- или трехступенчатом турбокомпрессоре с промежуточным охлаждением воздуха термодинамически эффективным для цикла ГТД с $V = \text{const}$ (даже без регенерации теплоты) [9]. Для повышения температуры сгорания целесообразно обогащать воздух кислородом вследствие мембранного отделения азота, что также позволит снизить выбросы оксидов азота.

Так, при обогащении кислородом до 40 % уменьшение выбросов оксидов азота может составить 78 % по сравнению с использованием для сгорания обычного воздуха (21 % кислорода) [12]. Для ДВС большой мощности сжатие может проводиться в лопаточных компрессорах с приводом от турбин, работающих на отработавших газах. При этом традиционный поршневой ДВС будет выполнять функцию только расширительной машины.

2. Сгорание осуществляется в КС ПО, вращение золотника которой синхронизировано с вращением коленчатого вала поршневой машины. Высокая температура стенок КС (не менее 1000 °С) должна обеспечивать высокую полноту сгорания топлива при коэффициенте избытка воздуха, близком к единице.

3. Вначале расширение происходит в поршневой расширительной машине, затем — в турбине. Причем для обеспечения продувки КС давление газа при его выпуске через клапаны в турбину несколько меньше, чем за компрессором. В отличие от традиционных ДВС с турбонаддувом здесь нет потерь на импульсный выхлоп. В итоге, по предварительной оценке, при равных давлениях сгорания p_z экономичность ДВС с КС нового типа может быть повышена на 20...25 %.

Следующий шаг совершенствования ДВС — введение дополнительных тактов с парообразованием. Этот новый подход по повышению экономичности ДВС, подтвержденный экспериментально, показан в работе [4]. К традиционным четырем тактам ДВС добавлены еще два.

В конце четвертого такта в цилиндр впрыскивается вода. Попадая на горячую поверхность поршня и гильзы цилиндра, вода превращается в пар и толкает поршень вниз, совершая пятый такт. На шестом такте отработавший пар удаляется из рабочего объема цилиндра через выпускной клапан.

Теплота, уходящая в обычных ДВС в систему охлаждения, превращается в работу. Эти два дополнительных такта можно назвать паровым циклом. По оценке автора этого изобретения Кроуэра (США) [4], повышение экономичности двигателя, работающего по циклу Отто, может составить 40 %. Это также решает вопрос его охлаждения. Однако потребуются решить проблемы использования:

- дистиллированной воды, ее очистки при работе двигателя;
- дорогих нержавеющей сплавов;

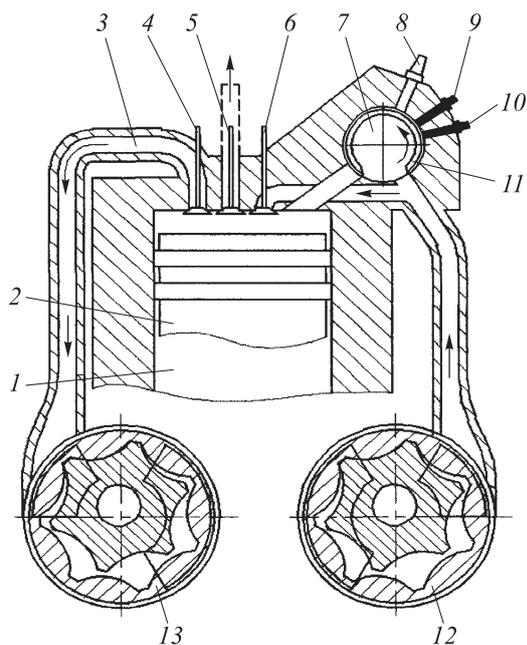


Рис. 6. Схема роторно-поршневого ДВС с выносной золотниковой КС ПО и реализацией парового цикла:

1 и 2 — цилиндр и поршень основной расширительной машины; 3 — выпускной канал; 4 и 5 — клапаны выпуска газа и пара; 6 — управляемый клапан УКМ; 7 — выносная золотниковая КС ПО; 8 — свеча зажигания; 9 и 10 — топливная и водяная форсунки; 11 — вращающийся золотник; 12 и 13 — компрессор и турбина для его привода

- дополнительного клапана для выпуска пара в оборотной системе водоснабжения с устройством конденсации.

Известно, что новая техника в рыночных условиях вытесняет старую, если ее комплексная эффективность (топливная экономичность, масса, цена) больше примерно на 25 %. Поэтому целесообразно дополнительно рассмотреть и другие перспективные решения (например, конструкторские), которые бы в комплексе еще больше подняли эффективность двигателя.

Предлагается сжатие и расширение реализовать с помощью простых роторно-поршневых машин, качественно упростив КП. Конструктивная схема роторно-поршневого ДВС с выносной золотниковой КС ПО и реализацией парового цикла приведена на рис. 6. В его состав входят: основная расширительная машина с цилиндром 1 и поршнем 2, выносная золотниковая КС ПО 7 с вращающимся золотником 11, клапаны выпуска газа 4 и пара 5, клапан усилителя крутящего момента (УКМ) 6 (для впуска воздуха с целью повышения крутящего момента на коленчатом валу), агрегат наддува, состоящий из компрессора 12 и турбины 13 для его привода.

Основную расширительную машину можно создать на базе обычного поршневого двигателя, с которого и снимается мощность. Выносная золотниковая КС выполнена с некоторыми отличиями от описанной ранее. Вращающийся золотник сконструирован так, чтобы обеспечить аккумуляцию теплоты для последующего эффективного парообразования в постоянном объеме КС.

Этого можно достигнуть развитием внутренней поверхности золотника, созданием специального аккумулялирующего слоя. Снижение температуры конструкции КС за счет парообразования облегчит доводку контактных уплотнений, необходимых для ДВС мощностью 50 кВт и более. Вал поршневой машины и золотник кинематически связаны для согласованности работы.

Компрессор 12 с турбиной 13 (агрегат наддува) могут быть выполнены в виде так называемых героторных машин и кинематически связаны с основным расширителем через обгонную муфту только на пуске. Такая конструкция героторных машин отработана на экспериментальном двигателе, созданном в Техасском университете США [6].

В состав ДВС также входит УКМ, включающий в себя управляемый клапан 6, способный подавать воздух из-за компрессора мимо КС в цилиндр при расширении в нем газа без повышения тепловой напряженности конструкции. Такое устройство может качественно упростить КП или даже исключить ее из конструкции двигателя.

Роторно-поршневой ДВС с выносной золотниковой КС ПО и реализацией парового цикла (см. рис. 6) работает следующим образом. Вначале реализуется двухтактный цикл со сгоранием топлива. После его сгорания газы поступают в цилиндр и толкают поршень, совершая работу (первый такт). При достижении поршнем нижней мертвой точки открывается клапан выпуска газа, и последний поступает в турбину для дальнейшего расширения. Затем поршень движется вверх, вытесняя газ в турбину.

Одновременно с выпуском газа происходит очередное наполнение полости золотника воздухом. После перекрытия его окна впрыскивается вода, которая испаряется с повышением давления, в основном вследствие теплоотвода от горячих стенок.

В третьем такте, когда поршень находится в верхней мертвой точке, пар поступает в цилиндр, где расширяется, совершая работу с од-

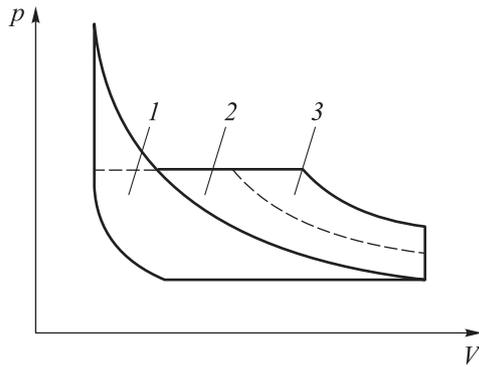


Рис. 7. p - V -диаграмма рассматриваемого ДВС:
1 — УКМ выключен; 2 — УКМ включен частично;
3 — УКМ включен полностью

новременным подогревом от днища поршня и стенок цилиндра. В четвертом такте, когда поршень движется вверх, происходит выпуск пара. Целесообразно его выпускать через отдельный клапан 5 с последующей конденсацией в оборотной системе водоснабжения (на рис. 5 не показано), имеющей примерно такие же массогабаритные характеристики, что и существующие жидкостные системы охлаждения ДВС.

Таким образом, если в прототипе [4] из шести тактов — два рабочих, то в рассматриваемом ДВС на четыре такта приходится два рабочих. Агрегат наддува (без поршневого компрессора) — высокооборотный и имеет меньшую массу, чем поршневая машина. В итоге это должно улучшить массогабаритные характеристики двигателя.

Принцип работы УКМ заключается в следующем. При малой частоте вращения коленчатого вала ДВС (кратковременно, при трогании автомобиля с места) в КС подается избыточное топливо, которое примерно в 1,5 раза больше, чем нужно для полного сгорания. При этом образуется газ и химически высокоактивное горячее (свободные радикалы).

В процессе расширения при определенном положении поршня, когда давление газа будет несколько меньше давления воздуха за компрессором, открывается клапан УКМ, и воздух поступает мимо КС в цилиндр, дожигая там смесь при постоянном давлении. То есть дальнейшее движение поршня идет без падения давления с увеличенным крутящим моментом на валу (аналог поздней отсечки пара в паровой машине).

При этом агрегат наддува работает на максимальной частоте вращения. Площадь p - V -диаграммы (рис. 7, вариант 3) максимальна. Режим работы ДВС будет наиболее теплонапряженным

с несколько повышенным расходом топлива при трогании автомобиля с места и малой скорости его движения, что требует специальных исследований, оптимизации конструкции (с упрощенной КП или без нее).

В промежуточном (частичном) режиме работы УКМ (при меньшей по времени избыточной подаче топлива) площадь диаграммы будет меньше (вариант 2). Более «горячий» режим процесса расширения с включенным УКМ обеспечит и большую мощность парового цикла.

Создание воздухонезависимых (анаэробных) ЭУ для подводных объектов требует решения таких проблем, как обеспечение приемлемых массогабаритных характеристик, усложнение конструкции, увеличение объемов под размещение окислителя — кислорода [14].

Предлагаемая концепция анаэробной ЭУ, выполняемой на базе классического дизеля с разделенной КС и регенератором, и работающей по бинарному циклу, может значительно повысить его экономичность. В дизеле после каждого основного рабочего такта осуществляются такты парового цикла. Концепция базируется на следующих разработках и принципах:

- шеститактный цикл работы дизеля, в котором два дополнительных такта реализуют паровой цикл;

- разделенная КС (рис. 8) с теплоаккумулирующим покрытием (регенератором), обеспечивающим:

- аккумуляцию теплоты для парового цикла, что дает возможность повысить экономичность за счет увеличения тепловыделения в начале такта при большом давлении;

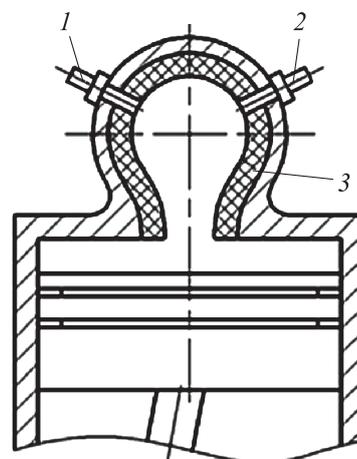


Рис. 8. Разделенная КС с теплоаккумулирующим покрытием:

1 и 2 — форсунки подачи топлива и воды;
3 — теплоаккумулирующее покрытие

– снижение жесткости работы, свойственной дизелям, и, как следствие, уменьшение шумности, что очень важно для подводных объектов;

– увеличение мощности ЭУ (по сравнению с двигателем Кроуэра) благодаря возможности повышения относительного содержания окислителя в рабочем теле, а следовательно, подачи топлива и воды.

Теплоаккумулирующее покрытие может быть выполнено по типу регенератора двигателя Стирлинга из хромоникелевых сталей, вольфрама, металлокерамики в виде пористых структур [13].

Термодинамический бинарный цикл шеститактного ДВС в p - V -диаграмме показан на рис. 9, где V — объем (в упрощенном виде подвод теплоты при $V = \text{const}$).

На рис. 10 приведена схема воздухонезависимой ЭУ, реализующей бинарный цикл в одном силовом агрегате — дизеле.

Принцип работы такой ЭУ в части реализации парового цикла следующий. В конце традиционного четвертого такта в цилиндр впрыскивается вода. Попадая на горячую поверхность поршня и гильзы цилиндра, вода превращается в пар и толкает поршень вниз, совершая пятый такт. В шестом такте отработавший пар вытесняется поршнем и поступает в конденсатор 7, после которого вода подкачивающим насосом 6 прокачивается через фильтр 5 и подается на вход насоса высокого давления 4 (10...15 МПа).

Затем вода подогревается отработавшими газами дизеля 1 в теплообменнике 3 и поступает к форсункам, которые впрыскивают воду в цилиндр в начале пятого такта — рабочего хода поршня. Система подготовки отработавших

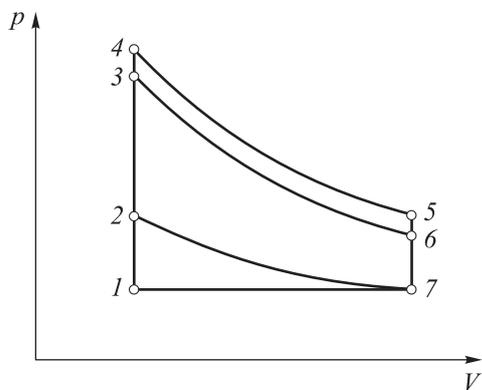


Рис. 9. Термодинамический бинарный цикл шеститактного ДВС в p - V -диаграмме:
2-4-5-7-2 — четырехтактный цикл со сгоранием топлива;
1-3-6-7-1 — двухтактный паровой цикл

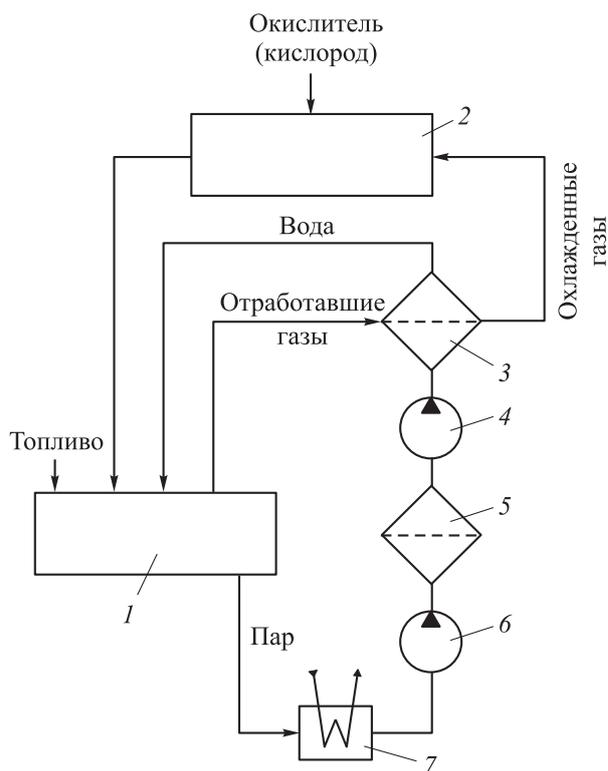


Рис. 10. Принципиальная схема воздухонезависимой ЭУ, реализующей бинарный цикл в дизеле

газов 2, включая подмешивание окислителя, для осуществления рабочего процесса в дизеле аналогична существующим.

Выполнена предварительная оценка повышения эффективности рассматриваемой ЭУ, реализующей бинарный цикл при следующих исходных данных и допущениях:

- эффективность дизельного цикла и тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы сохраняются;
- баланс теплоты в дизеле принят среднестатистическим [14]:

- теплота, превращенная в полезную работу, — 40%;
- теплота, отведенная в систему охлаждения, — 23%;
- теплота, отведенная с отработавшими газами, — 33%;
- остальные потери теплоты, — 4 %;

- эффективный КПД парового цикла — 0,25.

Тогда доля теплоты, превращенной в полезную работу в паровом цикле, составит $(23+33) \cdot 0,25 = 14$ %; суммарный эффективный КПД ЭУ — 54 %, а его прирост — 35 %.

Следует отметить, что эффективный КПД современных парогазовых установок составляет 55...60 %.

Паровой цикл является вспомогательным к основному дизельному, что обуславливает проблему сохранения мощности ЭУ. Однако, учитывая, что паровой цикл двухтактный, а также возможность одновременного увеличения подачи окислителя, топлива и воды (т. е. повышение энергоемкости парового цикла), можно предполагать, что мощность ЭУ не снизится.

Для окончательной оценки эффективности рассмотренной ЭУ необходимо выполнить исследования по реализации парового цикла.

Выводы

1. Применение выносной золотниковой КС ПО, конструктивное разделение процессов сжатия и расширения в ДВС может обеспечить многотопливность, качественное повышение экономичности и возможность исключить или значительно упростить КП.

2. С учетом известных результатов исследований показана возможность реализации бинарного цикла в одном силовом агрегате — дизеле — путем утилизации его тепловых потерь в двух дополнительных тактах, реализующих паровой цикл. По предварительной оценке, повышение экономичности может составить около 35 %.

3. Целесообразно использовать рассмотренную высокоэффективную концепцию двигателя в воздухонезависимых ЭУ подводных объектов с ограниченным запасом окислителя. Наличие отдельного окислителя позволяет также реализовать большие мощности путем увеличения одновременной подачи окислителя, топлива и воды.

4. Полученные результаты проработки следует считать предварительными. Для окончательной оценки перспективности рассмотренной воздухонезависимой ЭУ необходимо выполнить исследования по реализации парового цикла.

Литература

- [1] Богданов В.И. Концепция гибридного электромобиля на базе ГТУ. *Инженер*, 2019, № 8, с. 21.
- [2] Богданов В.И., Кузменко М.Л. *Камера сгорания газотурбинного двигателя*. Патент № 2196906 РФ, 2003, бюл. № 2, 2003.
- [3] Богданов В.И., Кузнецов С.П. Результаты экспериментальной отработки золотниковой камеры сгорания постоянного объема. *Вестник СГАУ им. С.П. Королева*, 2011, № 2, с. 122–130.
- [4] Тер-Мкртчян Г.Г. *Двигатели внутреннего сгорания с нетрадиционными рабочими циклами*. Москва, МАДИ, 2015. 80 с.
- [5] Тер-Мкртчян Г.Г. Двигатели с продолженным расширением рабочего тела. *Двигателестроение*, 2015, № 2(260), с. 3–9.
- [6] Чернышев Д. «StarRotor» — еще одна попытка. *Двигатель*, 2004, № 6, с. 36–37.
- [7] Богданов В.И. Концепция многотопливного автомобильного двигателя с усилителем крутящего момента. *Двигателестроение*, 2006, № 4, с. 19–21.
- [8] Богданов В.И. Автомобиль и его двигатель — возможные перспективы развития. *Автомобильная промышленность*, 2009, № 1, с. 25–28.
- [9] Вараксин А.Ю., ред. *Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 640 с.
- [10] Богданов В.И., Тарасова Е.А. О применении цикла ГТД с подводом теплоты при постоянном объеме. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2007, № 3, с. 35–37.
- [11] Богданов В.И. *Возможные перспективы развития энергодвигательных установок и новые принципы создания движущей силы*. Germany, LaP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 172 p.
- [12] Богданов В.И., Буракова Л.И. Эффективность применения отделения азота и охлаждения воздуха на сжатии в перспективных энергетических ГТУ со сгоранием топлива при $V = \text{const}$. *Газотурбинные технологии*, 2009, № 6, с. 30–32.
- [13] Дядик А.Н., Замуков В.В., Дядик В.А. *Корабельные воздухонезависимые энергетические установки*. Санкт-Петербург, Судостроение, 2006. 424 с.
- [14] Богданов С.Н., Буренков М.М., Иванов И.Е. *Автомобильные двигатели*. Москва, Машиностроение, 1987. 363 с.

References

- [1] Bogdanov V.I. The concept of a hybrid electric vehicle based on a gas turbine. *Inzhener*, 2019, no. 8, p. 21 (in Russ.).
- [2] Bogdanov V.I., Kuzmenko M.L. *Kamera sgoraniya gazoturbinnogo dvigatelya* [Gas turbine engine combustion chamber]. Patent RF no. 2196906, 2003.
- [3] Bogdanov V.I., Kuznetsov S.P. Some results of experimental refining of a constant volume valve combustion chamber. *Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering*, 2011, no. 2, pp. 122–130 (in Russ.).
- [4] Ter-Mkrtych'yan G.G. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya s netraditsionnymi rabochimi tsiklami* [Internal combustion engines with unconventional duty cycles]. Moscow, MADI publ., 2015. 80 p.
- [5] Ter-Mkrtych'yan G.G. Engines featuring extended expansion phase. *Dvigatolestroyeniye*, 2015, no. 2(260), pp. 3–9 (in Russ.).
- [6] Chernyshev D. StarRotor is another attempt. *Dvigatel'*, 2004, no. 6, pp. 36–37 (in Russ.).
- [7] Bogdanov V.I. Concept of multi-fuel automobile engine with torque amplifier. *Dvigatolestroyeniye*, 2006, no. 4, pp. 19–21 (in Russ.).
- [8] Bogdanov V.I. A car and its engine — possible development prospects. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2009, no. 1, pp. 25–28 (in Russ.).
- [9] *Teoriya i proyektirovaniye gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Theory and design of gas turbine and combined plants]. Ed. Varaksin A.Yu. Moscow, Bauman Press, 2000. 640 p.
- [10] Bogdanov V.I., Tarasova E.A. Application of GTE cycle with heat supply at constant volume. *Russian Aeronautics*, 2007, vol. 50, no. 3, pp. 282–286, doi: 10.3103/S1068799807030087
- [11] Bogdanov V.I. *Vozmozhnyye perspektivy razvitiya energodvigatel'nykh ustanovok i novyye printsipy sozdaniya dvizhushchey sily* [Possible prospects for the development of power propulsion systems and new principles for creating a driving force]. Germany, LaP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 172 p.
- [12] Bogdanov V.I., Burakova L.I. Efficiency of nitrogen separation and compressed air cooling in promising power gas turbines with fuel combustion at $V=\text{const}$. *Gazoturbinnyye tekhnologii*, 2009, no. 6, pp. 30–32 (in Russ.).
- [13] Dyadik A.N., Zamukov V.V., Dyadik V.A. *Korabel'nyye vozdukhonezavisimyye energeticheskiye ustanovki* [Shipborne air-independent power plants]. Sankt-Petersburg, Sudostroyeniye publ., 2006. 424 p.
- [14] Bogdanov S.N., Burenkov M.M., Ivanov I.E. *Avtomobil'nyye dvigateli* [Automotive engines]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1987. 363 p.

Статья поступила в редакцию 31.08.2020

Информация об авторах

БОГДАНОВ Василий Иванович — доктор технических наук, эксперт. ПАО «ОДК-Сатурн» (152903, Рыбинск, Российская Федерация, проспект Ленина, д. 163, e-mail: bogdanov-vasiliy@yandex.ru).

ХОЛМАНОВА Марина Александровна — инженер-конструктор первой категории. ПАО «ОДК-Сатурн» (152903, Рыбинск, Российская Федерация, проспект Ленина, д. 163, e-mail: marinakholmanova@gmail.com).

Information about the authors

BOGDANOV Vasily Ivanovich — Doctor of Science (Eng.), Expert. PAO UEC Saturn (152903, Rybinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 163, e-mail: bogdanov-vasiliy@yandex.ru).

KHOLMANOVA Marina Alexandrovna — Design Engineer of 1st Category. PAO UEC-Saturn (152903, Rybinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 163, e-mail: marinakholmanova@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Богданов В.И., Холманова М.А. Возможные концептуальные направления совершенствования транспортных ДВС. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 11, с. 53–61, doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-53-61

Please cite this article in English as:

Bogdanov V.I., Kholmanova M.A. Potential Conceptual Developments for the Improvement of Transport Internal Combustion Engines. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 11, pp. 53–61, doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-53-61