

БИНАРНЫЙ РАБОЧИЙ ЦИКЛ — НОВОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ В ДВС

Ю.Г. Плескачевский, инж., А.В. Шерстнёв, к.т.н, с.н.с., ст. преп.
ВИ(ВМП) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала. Н.Г. Кузнецова»
П.В. Дружинин, д.т.н., профессор,
ВИ(ИТ) ВА МТО

Приведена конструктивная схема поршневого ДВС для реализации бинарного рабочего цикла, осуществляемого в двух изолированных камерах (камере сгорания и камере нагнетания), разделенных свободным поршнем. Разделение рабочего объема двигателя на две изолированные камеры повышает качество смесеобразования и снижает пиковые нагрузки на детали КШМ за счет сжатия части воздушного заряда между основным и свободным поршнями. Полный цикловой заряд воздуха осуществляет функции окислителя (в камере сгорания) и упругого звена (в камере нагнетания) при передаче давления газов на детали коленчатого вала двигателя.

Решение вопросов экономии энергоносителей, улучшения эксплуатационных характеристик и обеспечение защиты окружающей среды, были и остаются актуальными задачами развития ДВС [1]. В этой связи особый интерес представляют технические решения, характеризующие конструктивные и эксплуатационные возможности двигателя нового типа — бинарного ДВС (БДВС). Данную статью следует рассматривать как знакомство с особенностями конструктивного исполнения и функционирования двигателя, расширения функциональных возможностей двигателей, представленных в патентах РФ [2–4] и др.

В основу концепции бинарного цикла положено расширение функционального использования воздуха в рабочих процессах поршневых ДВС как компонента, выполняющего следующие функции:

- воздух, необходимый для окисления топлива;
- воздух, как упругая среда при передаче давления газов на вал двигателя;
- воздух, совершающий полезную работу без участия в химических процессах.

На рис. 1 представлены варианты конструктивных схем БДВС, отличающихся вариантами подачи воздуха в камеру сгорания. Новыми элементами здесь являются

автономный поршень (АП) и упор. Назначение АП — разделение рабочего объема цилиндра на камеры сгорания (КС) и нагнетания (КН). В процессе работы камеры изолированы и кратковременно сообщаются только для подачи воздуха из КН в КС. В отличие от основного поршня (ОП), АП не связан с элементами КШМ и перемещается вдоль оси цилиндра под действием разности давлений в камерах, но не дальше упора, ограничивающего перемещения АП на такте сжатия. Остальные конструктивные элементы по назначению и устройству мало отличаются от аналогичных элементов традиционных ДВС и подробных комментариев не требуют.

«Внутренняя» подача воздуха осуществляется по специальным каналам в самом АП, открывающихся при определенных условиях внутри рабочего объема цилиндра. Для варианта «внешней» подачи воздух в КС направляется по магистрали с клапаном 5, расположенным вне рабочего объема цилиндра. Левые фрагменты рисунка соответствуют такту сжатия и поступлению циркуляционной порции воздуха (ЦПВ) в КС, а правые — поступлению ЦПВ в КН, которое может совпадать с одновременным выпуском продуктов сгорания из КС при открытых клапанах 7. Поршень 3, являясь кинематическим звеном криво-

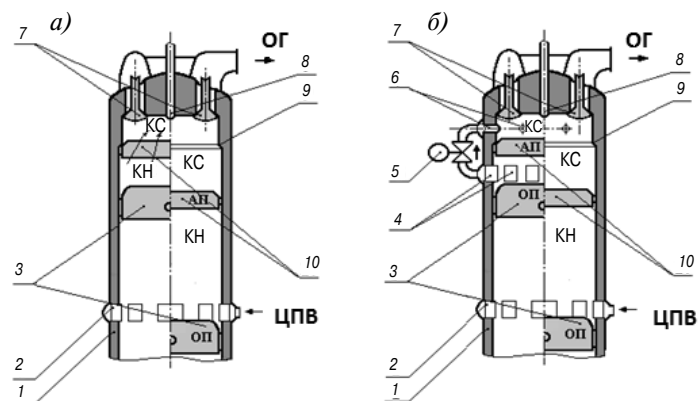


Рис. 1. Конструктивная схема бинарного ДВС:

а — вариант внутренней подачи воздуха;

б — вариант внешней подачи воздуха;

1 — корпус цилиндра двигателя; 2 — окна впуска ЦПВ; 3 — ОП; 4 — окна подачи воздуха в КС; 5 — клапан сообщения/разобщения КН и КС; 6 — каналы подачи воздуха в КС; 7 — клапана выпуска ОГ; 8 — устройство (форсунка) подачи топлива в КС; 9 — упор; 10 — АП

шипно-шатунного механизма, обеспечивает чередование тактов сжатия/расширения и передает силу давления газов непосредственно на вал двигателя. Поэтому в БДВС он назван основным поршнем — (ОП). Автономный поршень — 10 является новым элементом конструкции. Он разделяет рабочий объем цилиндра на КН и КС, не имеет кинематической связи с коленчатым валом и перемещается в цилиндре под действием разности давлений между камерами, т. е. является подвижной газонепроницаемой перегородкой.

Рабочий процесс организован следующим образом. Поступление воздуха в рабочий объем цилиндра двигателя осуществляется только в КН через окна 2 при нахождении ОП 3 в нижней мертвой точке (НМТ). На такте сжатия, после перекрытия поршнем 10 окон 2, движение ОП, являющегося «движущей» силой, вызывает «согласованное» с ним перемещение АП. При этом параметры рабочего тела в КН (воздух) и продукты сгорания сжимаются приблизительно с одинаковой интенсивностью (политропа сжатия), т. е. процессы сжатия согласованы. В процессе такта сжатия часть воздуха из КН поступает в КС, а часть — остается в КН и участие в сгорании топлива не принимает. Для подачи воздуха в КС, необходимо в цилиндре создать определенные условия. Для этого достаточно, чтобы давление в КН ($p_{кн}$) превысило давление в КС ($p_{кс}$) на заданную величину $\Delta p_{п}$, т. е. $\Delta p(\varphi) = (p_{кн} - p_{кс})_{\varphi} \geq \Delta p_{п}$. Для этой цели служит упор 9, который ограничивает перемещение АП на такте сжатия до прихода ОП в ВМТ. В простейшем случае упором может служить коническое сужение внутреннего диаметра на некоторой высоте гильзы цилиндра, как показано на рис. 1. От положения упора 9, зависят основные расходные характеристики рабочего процесса и режимные возможности БДВС. После впрыска топлива и завершения рабочего хода, из КС в окружающую среду удаляют отработавшие газы (ОГ) при открытии клапанов 7.

Независимо от выбранного варианта подачи воздуха в КС основной задачей АП является изоляция на большей части хода ОП камер друг от друга. Механизм выполнения основной задачи АП можно представить следующим образом. На рис. 2 изображена верхняя часть цилиндра в районе упора, при этом на АП действуют давления со стороны КН и КС, $p_{кн}$ и $p_{кс}$ соответственно. Давления со стороны камер представляют собой равномерно распределенные нагрузки. Под действием этих нагрузок основным видом движения будет плоскопараллельное перемещение АП. При таком движении действия боковых составляющих сил рабочего давления $p(\varphi)$, переменных по модулю и направлению, практически исключается.

Таким образом, можно считать, что перемещение АП вдоль оси цилиндра зависит только от перепада давлений между камерами $\Delta p = (p_{кн} - p_{кс})$. Фрагменты а и б рис. 2 представляют положение поршней до и после «посадки» АП на упор на такте сжатия. Для примера, представленного на рис. 2–4, принято: если $p_{кс} < p_{кн}$, то АП либо перемещается в сторону крышки цилиндра, либо прижимается к упору; если $p_{кс} \geq p_{кн}$, то АП, отслеживая повышение давления в КС, перемещается в сторону НМТ — сгорание и последующий такт расширения. На такте сжатия, до посадки АП на упор, движение ОП вызывает «согласованное» с ним перемещение АП (практически «отслеживая» перемещение ОП). При этом параметры рабочего тела в КН (воздух) и параметры рабочего тела в КС (смесь ПС и топлива) сжимаются с одинаковой интенсивностью, определяемой показателем политропы сжатия. После посадки АП на упор давление в КС не меняется, а вследствие продолжающегося такта сжатия давление в КН продолжает расти. Когда перепад давления между камерами КН достигает заданного значения $\Delta p_{п}$, начинается подача воздуха в КС. Величина $\Delta p_{п}$ определяется из условия поступления в КС заданного количества воздуха ($L_{цпв}$) за отведенный период. При этом в КН остается часть воздуха, масса которого не меняется до момента поступления в КН новой порции воздуха и определяется, как «наполнение» КН — $L_{кн}$.

Для варианта «внешней» подачи масса воздуха из КН в КС регулируется клапаном 5 (см. рис. 1). В этом варианте перекрывается весь технически необходимый диапазон возможных режимов подачи воздуха.

При реализации «внутренней» подачи ЦПВ существуют определенные ограничения, поскольку изменение подачи воздуха происходит автоматически, за счет предварительной настройки некоторых элементов АП.

Для осуществления воздухообмена посредством сообщения или разобщения камер можно применять разные устройства, реагирующие на перепад давления между камерами. Один из возможных конструктивных вариантов устройства

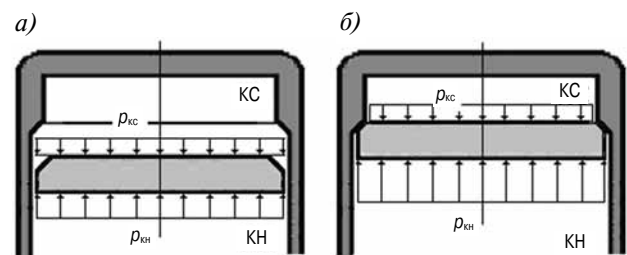


Рис. 2. Схема работы АП:

а — положение АП до «посадки» на упор; б — АП на упоре

АП и механизм сообщения/разобщения камер приведен на рис. 3–4. Более подробные объяснения представлены в [4].

Во внутренней полости корпуса АП 3 установлена шайба, как показано на рис. 3. АП 3 перемещается вдоль оси 1 цилиндра двигателя. Левая часть рисунка соответствует свободному перемещению АП, а правая часть — фиксированному положению АП на упоре 7. Корпус АП со стороны КН имеет полку 2 с концентрическим отверстием диаметром D_0 , а шайба диаметром $D_{ш}$ перфорирована сквозными отверстиями 5 и прижимается к этой полке. При этом центральная (сплошная) часть шайбы 6 полностью перекрывает концентрическое отверстие, т. е. $(D_{шш} - D_0) > 0$. В таком положении доступ воздуха из КН к отверстиям шайбы, по зазору между полкой и шайбой, перекрыт.

Случай, представленный на правой части рис. 3, соответствует эпюре, изображенной на фрагменте а рис. 4. Здесь: $p_{кн}$ и $p_{кс}$ — давления в камерах; $F_{кн}$ и $F_{кс}$ — результирующие силы, действующие на противоположные поверхности АП; $F_{уп}$ — сила со стороны упругого элемента 4 (рис. 3), дополнительно прижимающая шайбу к полке 2 корпуса АП 3. Таким образом, условие разобщения камер — $(p_{кн} - p_{кс}) \geq \Delta p_p$. В этом случае корпус АП и шайба представляют единое целое и перемещаются вместе, обеспечивая разобщение камер, а Δp_p — заданный перепад давлений для подачи воздуха в КС.

На такте сжатия и положения АП на упоре (правая часть рис. 3 и фрагмент б рис. 4), давление со стороны КС постоянно растет. При из-

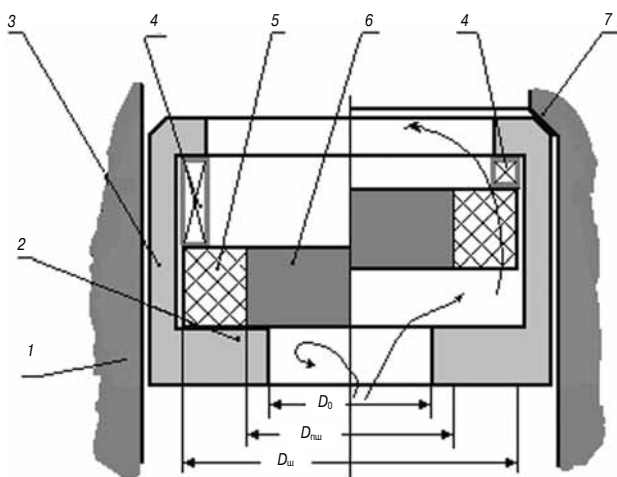


Рис. 3. Работа АП для варианта «внутренней» подачи воздуха:

1 — корпус цилиндра двигателя; 2 — полка со стороны КН; 3 — корпус АП; 4 — упругий элемент; 5 — перфорированная часть шайбы; 6 — сплошная часть шайбы; 7 — упор; $D_{ш}$, $D_{шш}$ — диаметры общей и сплошной частей внутренней шайбы; D_0 — диаметр центрального отверстия полки корпуса АП со стороны КН

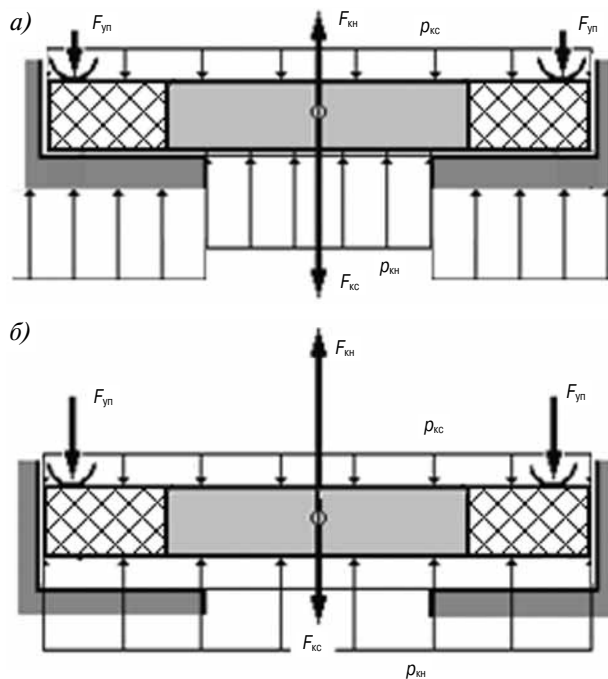


Рис. 4. Режимы работы АП для варианта внутренней подачи воздуха (Патент РФ [3]):

а — режим «разобщения» камер; б — режим «сообщения» камер; $F_{кн}$, $F_{кс}$, $F_{уп}$ — силы, действующие со стороны КН, КС и упругого элемента; $p_{кн}$, $p_{кс}$ — давление в КН и КС

менении условия, т. е. при $\Delta p(\varphi) = (p_{кн} - p_{кс})\varphi \geq \Delta p_p$, сила $F_{кн}$ становится больше силы, прижимающей шайбу к полке 2 ($(F_{кн} - F_{кс}) > 0$) и шайба «всплывает», открывая доступ воздуха из КН к сквозным отверстиям шайбы по зазору между полкой и шайбой. С поступлением воздуха, давление в КС повышается и наступает момент, когда $(F_{кс} - F_{кн}) > 0$, шайба «садится» на место и опять перекрывает доступ воздуха к сквозным отверстиям перфорированной части шайбы — камеры разобщены.

Если для варианта «внешней» подачи, АП всегда обеспечивает разделение камер, то для варианта «внутренней» подачи, изоляция камер возможна только в случае, когда корпус и шайба представляют единое целое.

Режимы рабочего процесса БДВС в основном осуществляются при «согласованном» перемещении поршней. Пошаговая схема, представленная на рис. 5, демонстрирует механизм взаимодействия поршней при их перемещении [4]. Каждый шаг разбит на три условных квазиэтапа, разделенных вертикалями и обозначенных 1, 2 и 3 (нижняя часть рисунка).

Перед очередным шагом (исходное положение, 1-й этап) ОП и АП обозначены пунктирными линиями, объем КН — V_0 , давление в КН и КС равны ($p_{кн} = p_{кс} = p_0$), т. е. перепада давлений между камерами не возникает. В этот момент, если считать АП невесомым, АП неподвижен и находится во «взвешенном» состоянии.

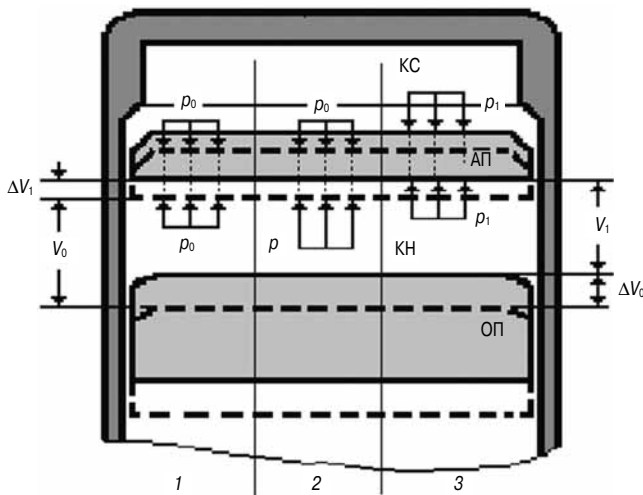


Рис. 5. Режим «согласованного» перемещения поршней:

V_0, V_1 — объемы КН, начальный; $\Delta V_0, \Delta V_1$ — изменения объемов КН и КС соответственно после первого шага АП; p_0, p_1 — давление в цилиндре, до и после очередного шага АП

В результате перемещения ОП в новое положение (из положения отмеченного пунктирными в положение отмеченное сплошными линиями), объем КН уменьшается на ΔV_0 , давление в КН повышается до $p > p_0$ (этап 2). Под действием возникшей разности давлений АП перемещается в направлении крышки цилиндра, сжимая воздух в КС. Давление в КС повышается и, после выравнивания давлений между камерами, за счет перемещения АП $p_{кн} = p_{кс} = p_1$, АП занимает новое положение (этап 3, сплошные линии) при новом давлении ($p_1 > p_0$) и уменьшенном объеме КС на $\Delta V_1 < \Delta V_0$. При этом все текущие параметры и условно «взвешенное» состояние АП сохраняются до очередного шага ОП.

Как следует из представленной схемы взаимодействия поршней, на такте сжатия в режиме «согласованного» перемещения, ОП является «движущей» силой, определяющей динамику взаимодействия поршней и кинематику перемещения АП в соответствии со схемой на рис. 5.

На такте расширения «движущей» силой, определяющая динамику взаимодействия поршней становится давление в КС. Причем влияние давления рабочего тела в КС на АП сохраняется до момента выравнивания давления в обеих камерах, после чего процесс расширения будет проходить согласованно.

При «согласованном» перемещении поршней, на каждом шаге такта сжатия и такта расширения, перемещение ОП вызывает соответствующее перемещение АП ($\Delta V_{кн} = \Delta V_0$) ($\Delta V_{кс} = \Delta V_1$). Представленная конструктивная особенность характеризует способность демпфирования бросков

давления (штатных или не штатных), особенно в процессе сгорания.

Важнейшим аспектом рабочей схемы нового двигателя является то, что продукты сгорания топлива локализованы в КС, а передача энергии на ОП, т. е. на выходной вал двигателя, осуществляется посредством сжатия воздуха, заполняющего КН. Таким образом, рабочие тела в разных камерах, изолированных между собой, совершают полезную работу в рамках общего динамического процесса расширения, что и определяет предложенный термин — бинарный ДВС.

Наличие двух изолированных камер, в термодинамике такого цикла, предоставляет возможность локализовать процессы на «чистые» для воздуха КН (L_n) и «грязные» для продуктов сгорания в КС ($L_{цпв} \cdot \beta + M$)

Кроме того, исключается попадание «грязных» и горячих компонентов КС в картер двигателя, поскольку между КС и картером находится промежуточная «чистая» КН.

Отмеченная конструктивная особенность уменьшает (исключает) негативные проявления повышенной скорости нарастания давления dp/dt , снижает «жесткость» работы и детонационную зависимость двигателя от применяемого топлива.

Выводы

1. Представлен альтернативный вариант существующим (традиционным) конструкциям поршневых ДВС.
2. Отмечается улучшение некоторых параметров, таких как «жесткость» работы, детонационная зависимость двигателя от применяемых видов (сортов) топлив.
3. Реализация предложенных технических решений возможна, поскольку базируется на освоенных технологиях, применяемых в отечественном двигателестроении.

Литература

1. Орлов А.В., Путятинский В.А., Дружинин П.В., Лукин В.В. Улучшение технико-экономических показателей автономных систем электроснабжения путем применения дизель-генераторных установок с переменной частотой вращения // Двигателестроение. — 1980. — № 1. — С. 29–30.
2. Ю.Г Плескачевский, Патент РФ № 2146007; F02B 3/04. 2510; 27.02.2000.
3. Ю.Г Плескачевский, Патент РФ № 2349774; F02B 75/28; 20.03.2009.
4. Ю.Г Плескачевский, Патент РФ № 2407901; F02B 75/28 27; 12.2010
5. НИР «Исследование работоспособности и оценка эффективности бинарного ДВС», шифр «Бинар»; ВМПИ ВУНЦ ВМФ Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова; 2014.