

УДК 621.431

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДВУХТАКТНОГО ДВС С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВПРЫСКА ТОПЛИВА

© 2013 А. И. Довгялло, С. В. Крашенинников, Д. А. Щепетов

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматриваются вопросы организации процесса смесеобразования в двухтактных ДВС с искровым зажиганием и с кривошипно-камерной продувкой. Как наиболее эффективный способ смесеобразования, с точки зрения авторов, выбран впрыск топлива во впускной коллектор. Приведена оценка повышения эффективности работы двухтактного ДВС. Описан принцип работы системы и экспериментальная установка.

*Двухтактный двигатель внутреннего сгорания, кривошипно-камерная продувка, впрыск топлива, расход топлива, мощность двигателя, коэффициент состава смеси, электронный блок управления.*

Двухтактные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) широко распространены в мире. Однако в России двигатели данного типа не производятся, также прекращены исследовательские и опытно-конструкторские работы. В то же время потенциал таких двигателей полностью не исчерпан и допускает их дальнейшее совершенствование в направлении повышения экономичности и экологичности.

Основная цель проводимой в настоящее время научной работы – экспериментально определить эффективность применения на двухтактном двигателе способа образования топливовоздушной смеси (ТВС) путём впрыска топлива во впускной коллектор.

Осуществление процесса газообмена в двухтактном бензиновом двигателе сопровождается рядом существенных недостатков. В отличие от четырёхтактных, где отработавшие газы вытесняются поршнем, после чего и следует наполнение цилиндра свежей ТВС, в двухтактном двигателе очистка и продувка цилиндра осуществляется ею при помощи продувочного насоса. Как следствие, в период продувки часть топлива теряется в выпускную систему.

Процесс наполнения цилиндра, происходящий при открытых выпускных окнах, осложняется движением основного

потока внутри цилиндра. Для петлевой схемы продувки характерен поворот основных потоков свежей смеси, вытесняющий отработавшие газы к выпускным окнам. Это способствует появлению застойных и вихревых зон, увеличивающих количество остаточных газов в цилиндре. На режиме холостого хода относительное количество остаточных газов достигает максимального значения, с увеличением оборотов коленчатого вала двигателя их количество уменьшается. Из-за сильного разбавления свежей смеси остаточными газами и значительных потерь топлива в выпускную систему происходит ухудшение условий воспламенения и сгорания смеси, скорость распространения пламени в камере сгорания падает. Всё это ведёт к пропускам воспламенения, возрастает нестабильность работы двигателя. В итоге для стабилизации процесса необходимо обогатить смесь, а это напрямую сказывается на экономичности и экологичности двигателя. Экономичность двухтактного двигателя почти в два раза ниже, а по содержанию СН в отработавших газах, по различным источникам – до 5 раз выше, чем у четырёхтактных.

Основная задача в настоящее время – улучшение экономичности и экологичности двухтактных ДВС, что непременно сохранит его конкурентоспособность на

фоне четырёхтактных и роторно-поршневых ДВС, которые, в свою очередь, заметно отстают по другим характеристикам.

Существует ряд методов совершенствования процесса газообмена, предусматривающих снижение потерь топлива в период продувки. Один из самых эффективных – непосредственный впрыск топлива в цилиндр после закрытия выпускных окон. Данный метод обеспечивает наилучший результат, но он самый конструктивно сложный и дорогой. Более простыми и доступными являются те методы, которые лишь частично сокращают потери топлива в период газообмена. К ним относятся впрыск топлива во впускной или перепускной каналы, специальная настройка системы выпуска, организация послойного ввода свежего заряда в объём цилиндра при внешнем смесеобразовании и другие.

Современное производство в совокупности с новейшими научными разработками позволяет существенно повышать технико-экономические показатели двухтактных бензиновых ДВС, приближая их к уровню четырёхтактных. Однако применение отдельных технических решений на конкретном типе двигателей может привести к потере ряда преимуществ, характерных для данных двигателей, или окажется невыгодным с экономической точки зрения при данном уровне производства. В то же время в ряде исследований доказано, что улучшение технико-экономических показателей двухтактных двигателей, особенно на режимах малых и средних нагрузок, возможно без значительного усложнения и удорожания конструкции двигателя.

Постановка улучшений:

1) *Рециркуляция свежего топливного заряда.* Данная система призвана сократить выбросы свежей смеси в процессе газообмена путём её частичного возврата в кривошипную камеру из выпускной системы.

Процессом рециркуляции управляет поршень: кривошипная камера соединена

каналом рециркуляции с выпускным патрубком через отверстие в юбке поршня. Данная система при соответствующей настройке фаз рециркуляции обеспечивает возврат свежей смеси в кривошипную камеру. Использование данной системы позволит сократить удельный расход топлива на 10-12%.

Более простая конструкция подобной системы рециркуляции получается с каналом, выполненным в стенке цилиндра, связывающим выпускное окно с продувочными и управляемым нижней кромкой поршня.

Описанная система рециркуляции свежего топливного заряда эффективна лишь в узком диапазоне частоты вращения коленчатого вала. На других частотах в кривошипную камеру попадают отработавшие газы или, что ещё хуже, свежая ТВС вытягивается в выхлопную трубу. Применение регулирующих устройств способно расширить эффективный диапазон работы системы.

2) *Регулирование системы выпуска двигателя.* Регулирование системы выпуска отработавших газов в двухтактном двигателе сводится к настройке колебаний давления в ней. Это приводит к созданию оптимального разряжения в цилиндре двигателя для лучшей продувки, а также обратной волны давления, отражённой в резонаторе, что предотвращает потери свежей ТВС в выпускную систему.

Настройка колебаний осуществляется путём изменения длины коллектора от выпускного окна до резонатора, отражающего волну давления. Данная система имеет ограниченное применение в связи со сложностью регулирования, так как для каждой частоты оборотов двигателя необходима определённая длина коллектора.

Дополнительная резонансная камера в выпускном канале также влияет на колебания давления выпуска. Применение данного способа позволит увеличить крутящий момент и уменьшить расход топлива. Примером служат системы фирм Honda «АТАС» и Suzuki «SAEC». Привод регулятора коллектора может быть меха-

ническим, электронным, гидравлическим или пневматическим.

Существенный эффект данная система даёт на низких частотах вращения коленчатого вала при объёме резонансной камеры, равной рабочему объёму цилиндра.

Одним из распространённых способов регулирования системы выпуска является регулирование фазы выпуска изменением проходного сечения окна. Способ позволяет значительно улучшать показатели двигателя на режимах, отличных от режима максимальной мощности. Компания Bombardier-Rotax применяет систему с регулировкой плоской заслонкой. Фирма Yamaha с системой «YPVS» на своём двигателе RD400 использовала схему с поворотным золотником. Регулятор данной системы также может иметь механический, электрический, гидравлический или пневматический привод.

3) *Непосредственный впрыск топлива в цилиндр двигателя.* Наиболее эффективным из всех имеющихся способов устранения недостатков, связанных с потерей топлива в процессе газообмена в двухтактном двигателе с кривошипной продувкой, является непосредственный впрыск топлива в цилиндр. Особенностью системы является то, что продувка осуществляется чистым воздухом, а топливо поступает в цилиндр только после закрытия выпускных окон. Отсюда – отсутствие потерь топлива в выпускной канал. Однако имеются и недостатки – плохое перемешивание топлива с воздухом ввиду малого времени пребывания.

В двухтактном двигателе с петлевой продувкой австрийской фирмы AVL впрыск топлива осуществляется в смесительную камеру. Она соединена с камерой сгорания тангенциальным каналом. Топливо через форсунку подаётся в смесительную камеру, которая перезаряжается воздухом и отработавшими газами из цилиндра при движении поршня к ВМТ. Испытания опытного одноцилиндрового двигателя с рабочим объёмом 250 см<sup>3</sup> показали, что применение такой системы, в

отличие от впрыскивания топлива в камеру сгорания, позволило снизить удельный расход топлива, концентрацию СН в отработавших газах на низких частотах вращения коленчатого вала и малых нагрузках, выброс NOx. Это обусловлено улучшением процесса смесеобразования и подогревом смеси.

Современной тенденцией развития топливной аппаратуры является увеличение давления впрыска. Это стало возможно с применением насос-форсунок на пьезоэлементах.

Фирмы Chrysler, Renault, Tohatsu и Subaru применили на своих двигателях непосредственный впрыск топлива в камеру сгорания под высоким давлением.

На двигателе Chrysler EBDI применена система впрыска фирмы Siemens, в которой давление впрыска достигает 64 МПа. Высокое давление позволило многократно улучшить качество распыла и ускорить время впрыска.

Существуют также системы непосредственного впрыска топлива пневмораспыливающими форсунками. Такую систему имеет двухтактный двигатель ОСР фирмы Orbital. Особенностью системы является подача топлива под низким давлением (0,5 МПа) и одновременно сжатого воздуха, что способствует лучшему распылу топлива. Эксперименты, проводимые фирмой, показали улучшение топливной экономичности на 15-30% по сравнению с аналогичными двигателями той же мощности. Главным же недостатком системы является сложная конструкция, включающая в себя нагнетатель воздуха, который должен обеспечивать давление воздуха 0,7 МПа.

4) *Впрыск топлива низкого давления во впускной или продувочный каналы двигателя.* Основными недостатками карбюратора являются: сложность конструкции, большое количество деталей (и, как следствие, более высокая вероятность поломки), невозможность равномерного распределения топлива по цилиндрам и поддержания оптимального состава смеси

на переходных режимах работы двигателя.

Уйти от указанных недостатков позволяет замена карбюратора системой впрыска топлива во впускной канал двигателя с электронным управлением.

Преимуществами системы впрыска топлива перед карбюратором в двухтактном двигателе являются:

- близкий к стехиометрическому состав рабочей смеси;
- точное дозирование подачи топлива на переходных режимах работы двигателя;
- постоянство характеристик системы впрыска, поскольку электронный блок управления системы обеспечивает на основании показаний датчиков двигателя оптимальный состав ТВС;
- возможность реализации схемы впрыска, исключаяющей «прямой» и «обратный» выбросы смеси;
- отсутствие диффузора карбюратора, который вызывает большие гидравлические потери при продувке;
- лёгкий запуск двигателя при низкой температуре окружающей среды.

Существует два способа впрыска топлива низкого давления. Менее эффективным способом снижения потерь топлива в период продувки является впрыск во впускной коллектор. Второй способ – впрыск топлива в продувочный канал на заключительной стадии продувки. Топливная форсунка устанавливается в продувочном канале или над верхней кромкой продувочного окна, и топливо под низким давлением впрыскивается в поток воздуха.

5) *Послойный ввод свежего заряда.* Одним из перспективных способов уменьшения потерь топлива в период продувки двухтактного двигателя является послойный ввод свежего заряда в объём цилиндра в процессе газообмена. Основная идея этого способа заключается в организации послойного распределения топлива в свежем заряде и создании барьера между отработавшими газами и свежей смесью. В качестве такой преграды

обычно используются чистый воздух и «бедная» смесь. Создание воздушного барьера позволяет осуществить большую часть периода продувки цилиндра с минимальными потерями топлива за счёт вытеснения отработавших газов воздухом и «бедными» по содержанию топлива потоками смеси.

В двухтактных двигателях с послойным вводом свежего заряда при различном конструктивном исполнении обычно используют следующие способы организации подачи расслоенного топливного заряда в цилиндр двигателя:

- с одновременным либо последовательным вводом различных по содержанию топлива потоков свежего заряда;
- организацией блокирования смеси в объёме цилиндра на заключительной стадии продувки и в период принудительного выпуска.

Процесс организации расслоения заряда может осуществляться за счёт раздельной подачи воздуха и смеси в полость цилиндра с помощью отдельных насосов или организации раздельной подачи потоков чистого воздуха и смеси в объём кривошипной камеры.

Современные бензиновые двухтактные двигатели, обладая высокой литровой мощностью и относительной простотой конструкции, характеризуются значительными удельными расходами топлива, высокими выбросами СН и СО, неравномерностью работы при малых нагрузках. Для улучшения экономических и экологических показателей необходимо повысить качество ТВС, перейти на «бедные» смеси без потери мощности.

Анализ направлений совершенствования процесса газообмена показывает, что повышение эффективности работы двухтактного ДВС возможно благодаря впрыску топлива во впускной канал. Это позволит:

- добиться высокого качества смеси за счёт лучшего распыла топлива;
- обеспечить необходимый состав ТВС на всех режимах работы двигателя;

- снизить гидравлическое сопротивление на впуске;
- облегчить запуск двигателя при низких температурах окружающей среды;
- обеспечить дублирование элементов системы топливопитания;
- повысить безотказность работы двигателя;
- обеспечить работу двигателя на «бедных» смесях, то есть увеличить коэффициент состава ТВС  $\alpha$ .

Также следует ожидать повышения коэффициента использования теплоты  $\zeta_z$ . С увеличением  $\alpha$  снизится количество теплоты, потерянное вследствие химической неполноты сгорания топлива  $\Delta H_u$ .

При повышении  $\alpha$  понизится эффективная мощность. Частично восполнить эти потери удастся за счёт более низких гидравлических потерь  $\Delta p$  во впускной системе и, соответственно, лучшего наполнения цилиндров. Высокое качество подготовки ТВС позволит повысить полноту сгорания топлива, что также повысит мощность двигателя не в ущерб его экономичности.

Увеличение экономичности двигателя может составить до 25% на низких частотах оборотов, на режиме номинальной мощности снижение расхода топлива ожидается до 15% при потере мощности не более 2-3%.

Предметом исследования выбран двухтактный двухцилиндровый двигатель объемом 350 см<sup>3</sup> с искровым зажиганием, кривошипно-камерной продувкой, воздушным охлаждением.

Система впрыска топлива основана на деталях и элементах системы впрыска автомобиля ВАЗ 2112. Для работы системы используются датчики: массового расхода воздуха; положения коленчатого вала; положения дроссельной заслонки. Контроллер работы системы оригинальной конструкции, основан на микропроцессорах ATMEGA16. Получая данные от датчиков двигателя, контроллер управляет работой топливных форсунок, системой зажигания, регулятором холостого хода, бензонасосом.

Эффективность работы системы предполагается определять сравнительным методом. Предметом сравнения выступит двигатель с карбюратором, настроенный в соответствии с инструкцией по эксплуатации. В качестве нагрузки используется вентилятор с поворотными лопастями, что позволит нагрузить двигатель на разных частотах оборотов. Затем на этот двигатель вместо карбюратора будет установлена система впрыска топлива. В итоге будут получены мощностные и экономические показатели двигателя, из чего последует окончательный вывод об эффективности предлагаемой системы.

### Библиографический список

1. Алексеев, В.П. Физические основы процесса в камерах сгорания поршневых ДВС [Текст] / В.П. Алексеев, Д.Н. Вырубов. – М.: МВТУ им. Баумана, 1977. – 86 с.
2. Гололобов, Е.К. Экономичность двигателей мотороллеров и мотоциклов [Текст] / Е.К. Гололобов, А.А. Плешанов. – Тула: Приор. кн. изд-во, 1989. – 174 с.
3. Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания [Текст] / В.М. Кондрашов, Ю.С. Григорьев, В.В. Тупов [и др.] – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
4. Лобов, Н.В. Перспективы развития топливных систем двухтактных двигателей особо малого класса с кривошипно-камерной продувкой [Текст] / Н.В. Лобов // Двигателестроение. – 1996. – № 2. – С. 23-24.
5. Никольский, А.Ф. Двухтактные двигатели с искровым зажиганием и перспективы их развития [Текст] / А.Ф. Никольский // Автомобильная промышленность. – 1993. – № 4. – С. 6-9.
6. Спинов, А.Р. Системы впрыска бензиновых двигателей [Текст] / А.Р. Спинов. – М.: Машиностроение, 1995. – 112 с.

## **INCREASING THE OVERALL PERFORMANCE OF A TWO-STROKE ENGINE WITH SPARK IGNITION BY FUEL INJECTION**

© 2013 A. I. Dovgyallo, S. V. Krashennnikov, D. A. Shchepetov

Samara State Aerospace University

The paper deals with the problems of organizing the process of gas mixing in two-stroke internal combustion engines with spark ignition and crankcase scavenging. Fuel injection into the intake manifold is chosen as the most effective way of mixing from the point of view of the authors. The increase of overall performance of a two-stroke internal combustion engine is estimated. The principle of operation of the system and the experimental installation are described.

*Two-stroke internal combustion engine, crankcase scavenging, fuel injection, fuel consumption, engine power, mixture ratio, digital engine control unit.*

### **Информация об авторах**

**Довгялло Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [teplotex@ssau.ru](mailto:teplotex@ssau.ru). Область научных интересов: рабочие процессы тепловых двигателей и энергетических установок.

**Крашенинников Сергей Всеволодович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [s.v.krash@mail.ru](mailto:s.v.krash@mail.ru). Область научных интересов: рабочие процессы тепловых двигателей и энергетических установок.

**Щепетов Дмитрий Александрович**, аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [dumin2s@yandex.ru](mailto:dumin2s@yandex.ru). Область научных интересов: конструкция и расчет двигателей внутреннего сгорания.

**Dovgyallo Alexander Ivanovich**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara State Aerospace University. Area of research: work processes of heat engines and power systems.

**Krashennnikov Sergey Vsevolodovich**, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara State Aerospace University. E-mail: [s.v.krash@mail.ru](mailto:s.v.krash@mail.ru). Area of research: work processes of heat engines and power systems.

**Schepetov Dmitry Aleksandrovich**, postgraduate student of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara State Aerospace University. E-mail: [dumin2s@yandex.ru](mailto:dumin2s@yandex.ru). Area of research: design and calculation of internal combustion engines.