

Исследование влияния послойной продувки на экономичность и экологичность двухтактного двигателя

Канд-ты техн. наук В. А. КАРАСЕВ, И. Л. СОКОЛОВ, инж-ры В. Н. КУКЛИН, А. В. ХАПСКИЙ, Р. А. КУЛИКОВ (Костромская ГСХА, vakar@ksaa.edu.ru)

Аннотация. Исследованы различные конструкционные схемы двухтактных двигателей, позволяющие заметно повысить их экономичность и сократить выбросы вредных веществ.

Ключевые слова: двухтактный двигатель, физическое моделирование, коэффициент избытка воздуха, впрыск топлива, послойное смесеобразование, послойная продувка.

Study of influence of layer-by-layer blowdown on the efficiency and environmental friendliness of two-stroke engine

V. A. KARASEV, I. L. SOKOLOV, V. N. KUKLIN, A. V. KHAPSKIY, R. A. KULIKOV
(Kostroma State Agricultural Academy, vakar@ksaa.edu.ru)

Summary. The article studies the various design diagrams of two-stroke engines allowing to improve significantly their efficiency and to reduce the pollutant emissions.

Keywords: two-stroke engine, physical modeling, coefficient of excess air, fuel injection, charge stratification, layer-by-layer blowdown.

В настоящее время двигатели внутреннего сгорания, работающие на бензине, — главный источник энергии для автомобилей, различных видов сельхозмашин, мотоциклов и многих других видов техники.

В основе работы любого двигателя, работающего на углеводородном топливе, лежит процесс преобразования тепловой энергии топлива при его сгорании в механическую работу. В большинстве двигателей этот процесс осуществляется по четырехтактному циклу, но из всех тактов только третий — рабочий. Другие такты требуют затрат механической энергии на сжатие горючей смеси и газообмен в цилиндре. Поэтому подавляющее большинство четырехтактных двигателей имеют по четыре и более цилиндров. Указанные двигатели обеспечивают высокую мощность на единицу рабочего объема цилиндра, достаточно хорошую экономичность, влияющую на расход топлива, и умеренную токсичность отработавших газов (ОГ), которую снижают средствами нейтрализации.

Вместе с тем на многих видах малогабаритной техники, используемой в сельском хозяйстве, такой как минитракторы, мотокосилки, пусковые двигатели, триммеры, в качестве источников энергии применяются одно- и двухцилиндровые двигатели, работающие по двухтактному циклу. Главное преимущество двухтактного цикла — более высокая литровая мощность, поскольку рабочий ход в таких двигателях происходит в два раза чаще по сравнению с четырехтактными при одинаковой частоте вращения коленчатого вала. Отсутствие механизма газораспределения определяет простоту конструкции и обслуживания двигателя, а также малые габариты. Но основные недостатки этих двигателей, сдерживающие их широкое распространение, — низкая экономичность и более высокая токсичность ОГ. На решение этих проблем направлено данное исследование.

Принципиальное отличие двухтактных двигателей от четырехтактных заключается в отсутствии впускных и выпускных клапанов. Газообмен в цилиндре осуществляется через впускные, выпускные и продувочные окна,

расположенные на поверхности цилиндра. Для процесса газообмена используется также объем кривошипно-шатунной камеры, который при работе двигателя заполняется смесью бензина и воздуха через впускное окно. Процессы выпуска ОГ в выпускные окна и наполнения цилиндра свежей смесью из кривошипно-шатунной камеры через продувочные окна происходят одновременно. При таком газообмене часть топлива попадает в выпускную систему и далее в атмосферу, что объясняет высокий расход топлива и высокую токсичность ОГ. Если учесть, что на основных режимах двухтактный бензиновый двигатель работает на обогащенных смесях с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 0,7...0,9$, то потери топлива вследствие этого еще выше.

Самый эффективный способ решения данной проблемы — применение непосредственного впрыскивания бензина с электронным управлением, что позволяет приблизить показатели работы двухтактных двигателей по экономичности и токсичности к четырехтактным [пат. РФ № 2344299; 2038493]. Но непосредственное впрыскивание топлива приводит к значительному усложнению конструкции и повышению стоимости двигателя, что неприемлемо для двигателей, предназначенных для легких мотоциклов и средств малой механизации.

Наиболее перспективно совершенствование двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой, обеспечивающей существенное или полное исключение прямых потерь топлива при продувке [пат. Японии № 2008—243805]. В этом случае сохраняется одно из главных достоинств таких двигателей — простота конструкции. Один из признанных и эффективных способов существенного сокращения потерь топлива в выпускную систему в двухтактном двигателе — расслоение топливовоздушного заряда на впуске и при газообмене [1—3].

Данное исследование направлено на совершенствование двухтактного бензинового двигателя, в котором реализуется послойное смесеобразование за счет раздельного ввода воздуха и бензина на впуске и продувке.

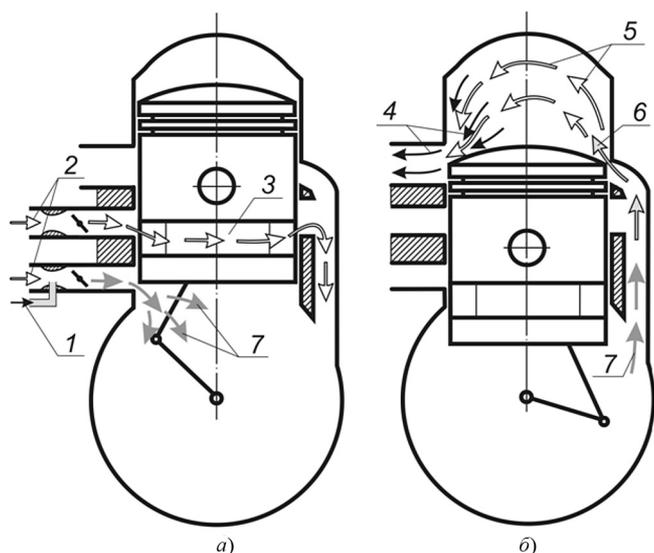


Рис. 1, а—б. Схема послойного ввода свежего заряда:

1 — подвод топлива; 2 — подвод воздуха; 3 — выемка в поршне; 4 — ОГ; 5 — чистый воздух; 6 — сверхбедная смесь; 7 — обогащенная смесь

На первом этапе работы, когда применялся карбюратор для смешивания воздуха и бензина, была исследована схема послойного смесеобразования, представленная на рис. 1, а. Топливо смешивается с воздухом в нижней камере карбюратора, и обогащенная топливовоздушная смесь заполняет кривошипную камеру. Кроме того, воздух через верхнюю камеру карбюратора и боковую выемку в нижней части юбки поршня одновременно заполняет объемы продувочных каналов. К концу впуска при положении поршня в верхней мертвой точке объемы продувочных каналов заполнены чистым воздухом, а подпоршневое пространство и кривошипная камера — обогащенной смесью.

При движении поршня вниз к нижней мертвой точке (см. рис. 1, б) происходит сжатие расслоенного заряда. После открытия выпускного окна ОГ устремляются в выпускную систему. С момента открытия продувочных окон вытеснение ОГ осуществляется потоками чистого воздуха и сверхбедной смесью. На заключительном этапе продувки цилиндр заполняется обогащенной смесью из кривошипной камеры.

С помощью физического моделирования процесса смесеобразования с применением вместо топлива "трасирующего" газа CO_2 оценивалось распределение смеси в объемах продувочных каналов по коэффициенту избытка воздуха в локальных точках каждого канала. Результаты экспериментов (рис. 2) подтверждают значительное расслоение свежего заряда к началу продувки. В верхней части каналов, примыкающих к продувочным окнам, сосредоточена сверхбедная смесь с $\alpha = 12...18$. Средняя часть заполнена бедной смесью с $\alpha = 2...2,3$. В нижней части каналов смесь также бедная с $\alpha = 1,2...1,5$. И только в отдельных точках части каналов, непосредственно примыкающей к кривошипной камере, смесь несколько обогащается.

Данные, полученные на первом этапе работы, позволили сделать вывод о перспективности данного направ-

ления совершенствования двухтактного двигателя и перейти ко второму этапу. Исследование эффективности расслоения топливовоздушного заряда в двухтактном двигателе было продолжено с применением фазированного впрыскивания топлива и электромагнитных форсунок. При этом исследовались две разные схемы работы двигателя с послойным смесеобразованием и впрыском бензина.

В одной из схем (рис. 3) двухтактный двигатель с расслоением свежего заряда характеризуется наличием кумулятивных камер, электромагнитных форсунок и окон в поршне.

Кумулятивные камеры в процессе газообмена заполняются чистым воздухом с одновременным впрыскиванием в их объемы бензина из двух электромагнитных форсунок, что приводит к образованию в камерах обогащенной топливовоздушной смеси. Продувка осуществляется чистым воздухом, а в момент ее завершения в цилиндр подается топливовоздушная смесь из кумулятивных камер.

При движении поршня вверх чистый воздух через открытое впускное окно заполняет кривошипную камеру. В то же время над поршнем происходит сжатие топливовоздушной смеси (см. рис. 3, а). В конце сжатия электрическая искра поджигает смесь, и поршень во время рабочего хода движется вниз, закрывает впускное окно и сжимает воздух в кривошипной камере. Окна в поршне открывают входные отверстия в камеры, и в них поступает предварительно сжатый воздух (см. рис. 3, б).

В момент открытия входных отверстий начинается подача топлива электромагнитными форсунками. При дальнейшем движении вниз поршень закрывает входные отверстия кумулятивных камер, открывает выпускное окно, а затем и продувочные окна. Происходит выпуск, продувка и заполнение цилиндра чистым воздухом (см. рис. 3, в). В случае необходимости подача топлива может продолжаться до момента открытия днищем поршня верхних кромок окон камер. В момент завершения продувки обогащенная смесь из кумулятивных камер под давлением, превышающим давление в цилиндре, интенсивно заполняет цилиндр (см. рис. 3, г). Таким образом, очистка цилиндра от ОГ производится чистым воздухом, а при завершении газообмена цилиндр заполняется обогащенной топливовоздушной смесью, которая при перемешивании с чистым воздухом образует рабочую смесь, пригодную для сгорания.

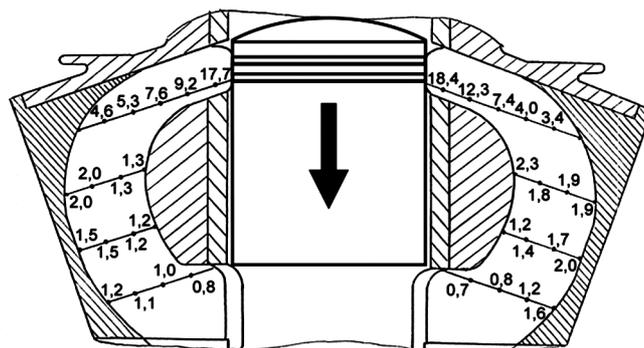


Рис. 2. Расслоение смеси в продувочных каналах:

0,8; 1,2; 5,3 и так далее — коэффициенты избытка воздуха в локальных точках продувочного канала

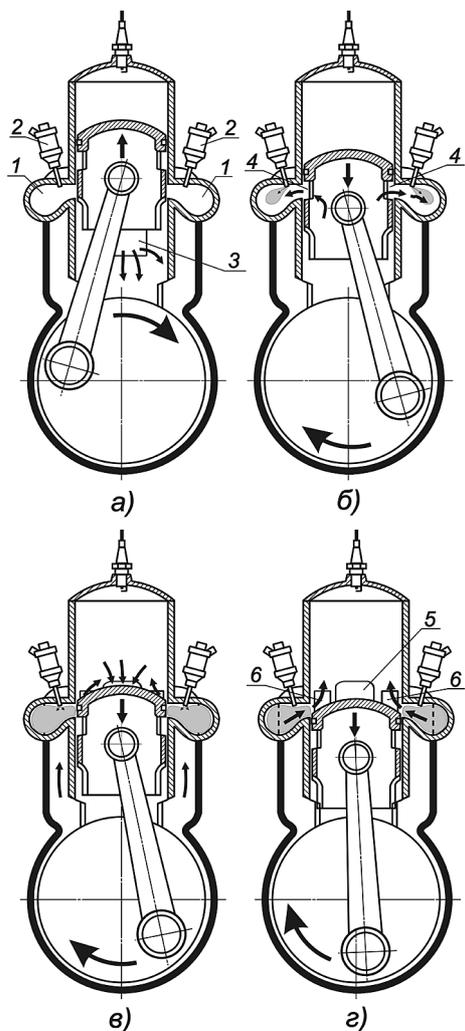


Рис. 3, а–г. Схема работы двигателя с расслоением свежего заряда и кумулятивными камерами:

1 — кумулятивные камеры; 2 — электромагнитные форсунки; 3 — впускное окно для чистого воздуха; 4 — окна в поршне; 5 — выпускное окно; 6 — продувочные окна

При правильном подборе геометрической формы и размеров кумулятивных камер, а также геометрии соединительных каналов между камерами и цилиндром двигателя можно добиться существенного снижения потерь топлива в выпускную систему при продувке. Предлагаемая схема газообмена с использованием кумулятивных камер реализована на экспериментальном двигателе (рис. 4), где показано размещение электромагнитных форсунок в кумулятивных камерах. Предварительные результаты стендовых испытаний подтвердили работоспособность предлагаемой схемы газообмена и конструкции экспериментального двигателя.

В другой схеме (рис. 5) подвод чистого воздуха в кривошипно-шатунную камеру осуществляется по продувочным каналам, соединенным с внешней стороны цилиндра с двумя впускными воздушными каналами в своей верхней части. В цилиндре отсутствует впускное смешевое окно. Процесс смешевобразования осуществляется в кривошипно-шатунной камере подачей топлива через электромагнитную форсунку и регулируется моментом и продолжительностью впрыска.

На выпуске (см. рис. 5, а) при движении поршня вверх с момента закрытия в цилиндре продувочных окон в кривошипной камере создается разрежение, передающееся через продувочные каналы во впускные воздушные каналы. Воздух из атмосферы устремляется в об-

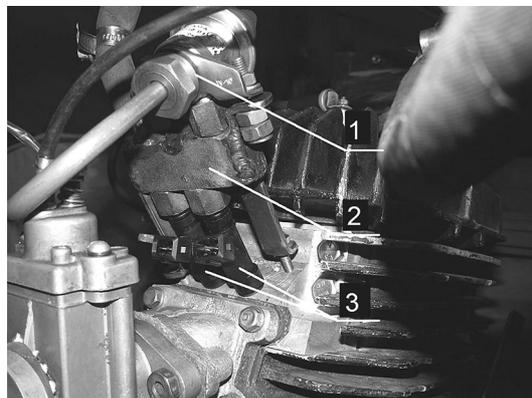


Рис. 4. Двухтактный двигатель с послойным смешевобразованием и кумулятивными камерами:

1 — регулятор давления; 2 — топливная рампа; 3 — электромагнитные форсунки

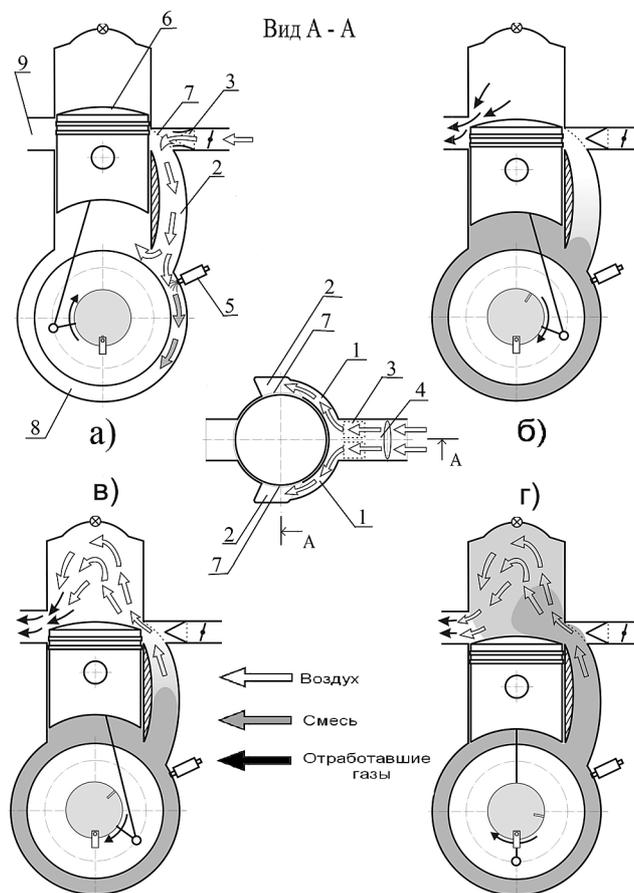


Рис. 5, а–г. Схема послойного смешевобразования и продувки в двухтактном двигателе с впрыском бензина:

1 — впускные воздушные каналы; 2 — продувочные каналы; 3 — обратный пластинчатый клапан; 4 — воздушный канал; 5 — форсунка; 6 — поршень; 7 — продувочное окно; 8 — кривошипная камера; 9 — выпускное окно

щий воздушный канал, через дроссельную заслонку и обратный пластинчатый клапан попадает в воздушные каналы и через продувочные каналы заполняет кривошипно-шатунную камеру. При движении поршня вниз (см. рис. 5, б) в кривошипной камере создается избыточное давление, которое запирает обратный пластинчатый клапан.

В начале продувки (см. рис. 5, в) после открытия продувочных окон вытеснение ОГ из цилиндра осуществляется потоками чистого воздуха из продувочных каналов в выпускное окно. При движении поршня ближе к нижней мертвой точке топливо, впрыснутое форсункой в кривошипную камеру, перемешивается с продувочным воздухом и, поступая через продувочные каналы в цилиндр, завершает процесс продувки (см. рис. 5, г). Продувка осуществляется преимущественно чистым воздухом, что значительно сокращает прямые потери топлива. Это приводит к повышению топливной экономичности двухтактного двигателя и уменьшает загрязнение окружающей среды.

Для оценки расслоения смеси на впуске и продувке проводится физическое моделирование послойного смешения (рис. 6). При этом форсунка вместо бензина подает углекислый газ. Специальные газоотборники осуществляют стробоскопический отбор проб газозвушной смеси из кривошипно-шатунной камеры, разных точек объемов продувочных каналов и камеры сгорания. Газовый анализ взятых проб позволяет определить процентное содержание углекислого газа в смеси с воздухом и перевести это содержание по расчетной номограмме в коэффициент избытка воздуха α . Тем самым определяются распределение и качественный состав смеси при газообмене и оценивается уменьшение потерь топлива в выпускную систему при продувке.

Стендовые испытания двухтактного двигателя даже с карбюраторным смешиванием топлива и воздуха показывают высокую эффективность послойного смешения. Расслоение свежего заряда на впуске оказывает положительное влияние на эксплуатационные показатели двигателя и снижение токсичности ОГ (рис. 7). При послойном смешении на экономичном и мощностном режимах общий состав смеси на впуске более обедненный по сравнению с обычной схемой газообмена. Отличие составляет 0,15–0,2 единицы по коэффициенту избытка воздуха. За счет этого экономичность улучшается на 10–15 %. Работа двигателя на мощностном режиме сопровождается экономией топлива на 15–20 %.

Указанное явление служит главным подтверждением того факта, что при продувке прямые потери свежего заряда — чистый воздух и часть бедной смеси. При этом состав сгорающей в цилиндре смеси более обогащенный, чем рассчитанный на впуске по расходам топлива и воздуха. Поэтому максимальная мощность и наименьший расход топлива в двигателе с послойным смешением достигаются при более бедных смесях.

Снижение прямых потерь топливной смеси при продувке отражается на снижении выбросов несгоревших углеводородов с ОГ на 25–30 %. Содержание угарного газа на мощностном режиме снижается в 1,5 раза. Индцирование опытного двигателя показало лучшую стабильность рабочего процесса, оцениваемую степенью неравномерности циклов α , величина которой на экономичном режиме составляет 5–6 %, в то время как у се-



Рис. 6. Двухтактный двигатель с послойным смешением и впрыском бензина:

1 — впускные воздушные каналы; 2 — продувочные каналы; 3 — обратный пластинчатый клапан; 4 — дроссельная заслонка; 5 — форсунка; 6 — штуцер газоотборника

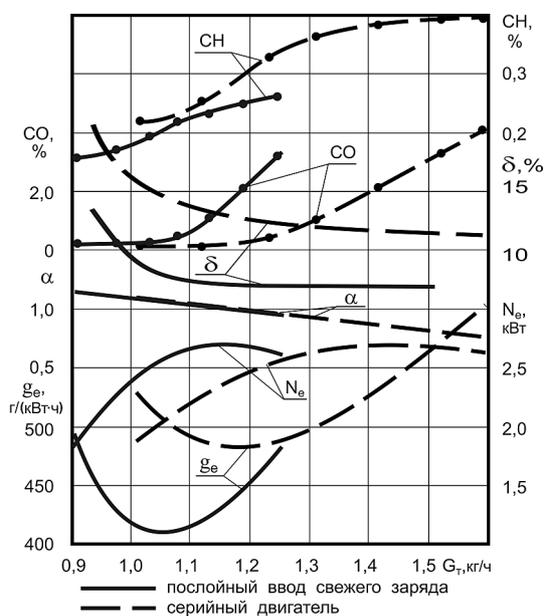


Рис. 7. Характеристика по подаче топлива ($n = 3400 \text{ мин}^{-1}$; $\varphi_0 = 0,4$)

рийного двигателя неравномерность составляет 12–13 % при прочих равных условиях.

Итак, послойное смешение в двухтактных бензиновых двигателях — эффективный способ повышения эксплуатационных показателей их работы. Быстрое развитие современных электронных систем впрыскивания топлива позволяет создавать различные схемы работы двухтактных двигателей с послойным смешением, в которых продувка цилиндра осуществляется чистым воздухом. Экономичность работы таких двигателей по значениям расхода топлива приближается к экономичности работы широко распространенных че-

Окончание статьи В. А. Карасева и др. Начало см. на стр. 12

тырехтактных двигателей. При этом сохраняются главные преимущества двухтактных двигателей — простота конструкции, высокая удельная мощность, малые габариты, что крайне важно при эксплуатации в условиях сельского хозяйства.

Литература и источники

1. **Куликов Р. Н., Карасев В. А.** Обоснование моделирования углекислым газом послойного смесеобразования в двухтактном двигателе // Актуальные проблемы науки в агропро-

мышленном комплексе: Сб. статей 66-й междунар. науч.-практ. конф. В 3 т. Т. 2. — Караваево, 2015.

2. **Соколов И. Л.** и др. Повышение технического уровня двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой путем применения систем питания с электронным впрыском // Труды Костромской ГСХА. — 2013, вып. 79.

3. **Карасев В. А., Афонин А. Ю.** Топливная экономичность двухтактного бензинового двигателя с клапанным впуском чистого воздуха и впрыскиванием топлива // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Мат-лы 57-й междунар. науч.-практ. конф. В 5 т. Т. 5. — Кострома, 2006.