

ДВУХТАКТНЫЙ БЕНЗИНОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ МЕТОДОМ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА СМЕСИ

Р.Д. Еникеев, О.П. Домбровский, Д.Р. Резванов
Уфимский государственный авиационный технический университет

Приведены результаты экспериментальных исследований рабочего процесса бензинового двухтактного двигателя с непосредственным впрыском топлива и регулированием частоты вращения и мощности методом качественного изменения состава смеси. Показано, что двигатель с предложенной системой регулирования в сравнении с серийным обеспечивает более устойчивую работу на режимах холостого хода и развивает большую эффективную мощность. При этом топливная экономичность экспериментального двигателя повышается на 10–20 % при одновременном снижении выбросов продуктов неполного сгорания топлива в 2–7 раз.

Одним из наиболее перспективных способов повышения топливной экономичности и снижения токсичности выбросов поршневых ДВС с искровым воспламенением является переход на регулирование мощности методом качественного изменения состава смеси (далее качественное регулирование). Усилия многих лабораторий повсюду в мире направлены на решение этой проблемы. На кафедре ДВС Уфимского государственного авиационного технического университета в течение ряда лет разрабатывается новый рабочий процесс, обеспечивающий бездетонационное сгорание бензинов, дизельного топлива, спиртов и их смесей с водой в условиях высоких степеней сжатия с качественным регулированием мощности [1–3]. Рабочий процесс базируется на впрыске в камеру сгорания топливовоздушной струи и ее воспламенении свечой зажигания на периферии топливовоздушного факела. Этот процесс получил наименование унифицированного рабочего процесса.

Процесс реализуется за счет подачи в рабочую камеру струи богатой топливовоздушной смеси вблизи верхней мертвой точки. Струя должна иметь определенную концентрационную структуру и направленность, согласованную с формой камеры сгорания. Структура формируется в существенной мере за счет предварительного нагрева, дробления и частичного испарения капель в

процессе сжатия богатой топливовоздушной смеси в полости компрессор-форсунки и последующего ее расширения в сопле. Струя воспламеняется единичным искровым разрядом вблизи ее границы в определенной фазе процесса. Этим обеспечивается первый этап сгорания, характерный для бензинового двигателя.

В результате повышения давления и температуры несгоревшей части топливовоздушной смеси, обусловленного сгоранием части смеси, воспламенной искрой, на втором этапе происходит многоочаговое воспламенение и сгорание, характерное для рабочего процесса дизельного двигателя. В зависимости от режима работы двигателя в камере сгорания реализуется различная степень неоднородности топливовоздушной смеси — от расслоенного заряда на холостом ходе (рис. 1, а), до равномерного распределения топлива в объеме камеры сгорания на полной нагрузке (рис. 1, б). На любом режиме работы двигателя в районе искрового разряда должна находиться топливовоздушная смесь в концентрационных пределах воспламенения, в первую очередь это зависит от расположения искрового разряда относительно топливовоздушной струи.

На рис. 2 представлена схема конструктивной реализации рабочего процесса. Топливо с небольшим количеством воздуха поступает в полость компрессор-форсунки 5, где происходит пред-

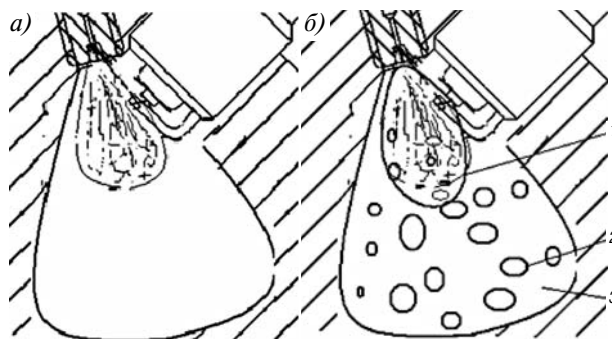


Рис. 1. Схема унифицированного рабочего процесса:
а — холостой ход; б — полная нагрузка:

1 — фронт пламени; 2 — зоны наиболее подготовленной к воспламенению смеси; 3 — зона с составом смеси, менее подготовленной к воспламенению

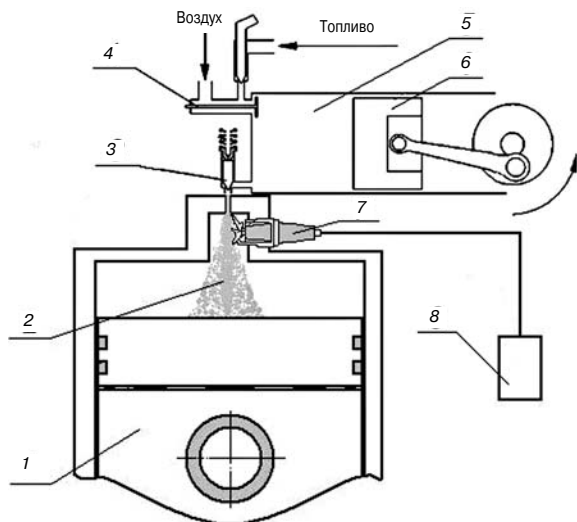


Рис. 2. Схема конструктивной реализации унифицированного рабочего процесса:

1 — поршень; 2 — струя обогащенной топливовоздушной смеси; 3 — распылитель; 4 — устройство дозирования топлива и воздуха для компрессор-форсунки; 5 — компрессор-форсунка; 6 — поршень компрессор-форсунки; 7 — свеча зажигания; 8 — катушка системы зажигания

варительная стадия смесеобразования — подогрев, дробление, перемешивание и частичное испарение топлива. Поршень 6 компрессор-форсунки приводится в движение от коленчатого вала двигателя. На такте сжатия за счет движения поршня компрессор-форсунки происходит впрыск топливовоздушного факела 2 в рабочую камеру двигателя, в которой окончательно формируется топливовоздушная смесь. Зажигание смеси осуществляется искровым разрядом от свечи зажигания 7 на периферии топливовоздушного факела в предкамере определенной геометрии. Компрессор-форсунка оснащена необходимыми устройствами для дозирования топлива и воздуха 4 в зависимости от режима работы двигателя. Система зажигания имеет традиционную конструкцию, параметры разряда характерны для современных бензиновых двигателей.

Рабочий процесс реализован на базе двухтактного одноцилиндрового двигателя ММВЗ-3.112 с двухканальной возвратно-петлевой продувкой (рис. 3). На экспериментальном двигателе реализована возможность регулирования степени сжатия, углов опережения зажигания и впрыска, местоположения искрового зазора свечи зажигания. Эксперименты проводились на штатной для данного двигателя степени сжатия $\epsilon = 10,5$. Регулирование мощности осуществлялось изменением состава смеси, дроссельная заслонка отсутствовала.

Выбор угла опережения зажигания (УОЗ), угла опережения впрыска (УОВ) для режима холостого хода осуществлялся последовательным

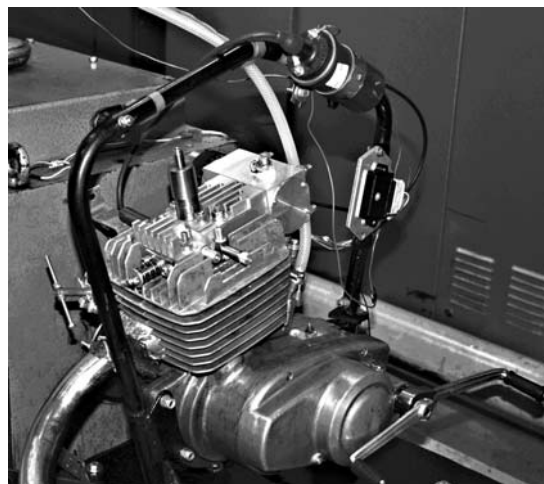


Рис. 3. Экспериментальный двигатель ММВЗ-3.112 на стенде

снятием регулировочных характеристик по критерию максимальных оборотов двигателя при постоянной топливоподаче. Под УОВ понимается угол опережения верхней мертвой точки (ВМТ) компрессор-форсунки относительно ВМТ двигателя. Положение свечи зажигания выбиралось исходя из условий отсутствия пропусков воспламенения и устойчивой работы двигателя, минимальной цикловой дозы топлива, наименьшего нагарообразования на изоляторе свечи зажигания. Внешняя скоростная и нагрузочные характеристики снимались на скоростных режимах 2000, 3000, 4000 об/мин. На каждой из этих точек снимались регулировочные характеристики по УОЗ и УОВ. Критерием оптимальности являлся максимальный момент и минимальный расход топлива. Расположение искрового промежутка свечи зажигания сохранялось таким же, как и на холостом ходе.

В ходе испытаний регистрировались следующие параметры: частота вращения коленчатого вала, часовой расход топлива, расход воздуха, эффективный крутящий момент двигателя, индикаторное

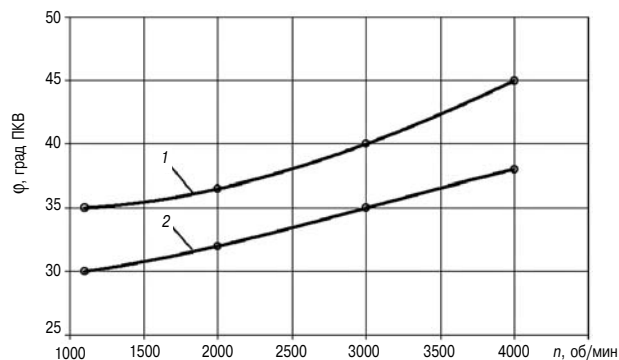


Рис. 4. Регулировочные данные экспериментального двигателя на режиме холостого хода:

1 — угол опережения впрыска;
2 — угол опережения зажигания

давление в рабочей камере, содержание токсичных компонентов в составе отработавших газов, температура головки двигателя, параметры окружающей среды в испытательном боксе.

На рис. 4 представлены значения УОЗ и УОВ, обеспечивающие стабильное воспламенение сверхбедной топливоздушной смеси в режиме холостого хода. Видно, что УОВ должен быть больше, чем УОЗ на 4–7 град ПКВ. Именно при таком согласовании УОВ и УОЗ создаются условия для воспламенения топливоздушной смеси искровым разрядом на режиме холостого хода. При этом впрыск уже либо завершен, либо близок к завершению, однако вблизи свечи зажигания концентрация топлива еще достаточно велика для воспламенения. На рис. 5 приведена экспериментальная зависимость часового расхода топлива базового и экспериментального двигателей от скоростного режима.

Как следует из представленных результатов, экспериментальный двигатель обладает большей стабильностью работы на низких частотах вращения холостого хода и лучшей экономичностью до 2000 об/мин. Некоторое увеличение расхода топлива на высоких частотах вращения объясняется наличием в экспериментальном двигателе дополнительных механических потерь на привод компрессор–форсунки. Минимальные стабильные обороты базового двигателя составили 1300 об/мин, экспериментального двигателя — 1100 об/мин. Минимальный расход топлива в режиме холостого хода базового двигателя составил 170 г/ч, экспериментального двигателя — 113 г/ч. Таким образом, топливная экономичность экспериментального двигателя с качественным регулированием на минимальных оборотах холостого хода улучшилась на 33,5 %.

Холостой ход является режимом, на котором для экспериментального двигателя достигается максимальное обеднение смеси. Поэтому при дросселировании в режиме холостого хода эффект

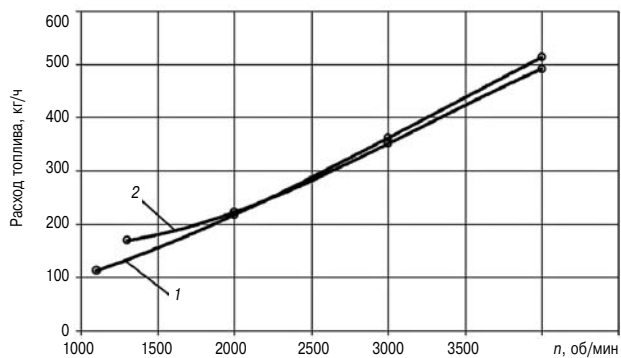


Рис. 5. Изменение часового расхода топлива по скоростной характеристике на режиме холостого хода:
1 — экспериментальный двигатель; 2 — базовый двигатель

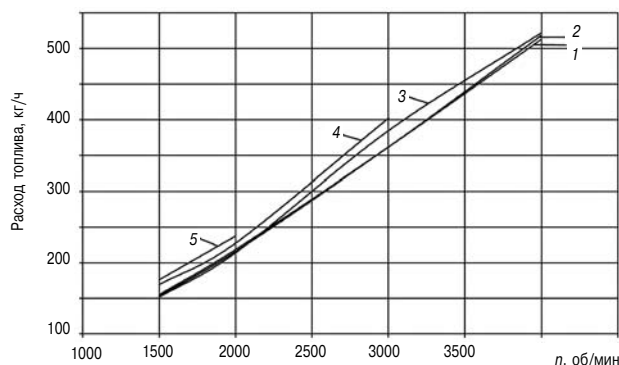


Рис. 6. Изменение часового расхода топлива экспериментального двигателя по скоростной характеристике на режиме холостого хода:
1 — ДЗ полностью открыта; 2 — ДЗ открыта на 80 %; 3 — на 60 %; 4 — на 40 %; 5 — на 20 %

качественного регулирования будет наиболее явным. На рис. 6 представлены скоростные характеристики часового расхода топлива экспериментального двигателя при различных положениях дроссельной заслонки (ДЗ). Прикрытие дроссельной заслонки до 80 % несущественно влияет на часовой расход топлива в режиме холостого хода. Дальнейшее прикрытие дроссельной заслонки до 60 % несущественно снижает расход топлива на малых оборотах и заметно повышает его на высоких оборотах. Дальнейшее прикрытие дроссельной заслонки (до 40 и 20 %) заметно снижает топливную экономичность на всех исследованных скоростных режимах. Причем при прикрытии ДЗ до 40 % экспериментальный двигатель не разгоняется выше 3000 об/мин, а при прикрытии до 20 % не достигает более 2000 об/мин. Таким образом, подтверждена зависимость топливной экономичности от состава рабочей смеси — чем беднее смесь, тем ниже расход топлива.

На рис. 7 представлены регулировочные характеристики по УОВ на режиме полной нагрузки. На этом режиме большой УОВ способствует лучшему перемешиванию топливоздушной смеси и испарению топлива, что положительно влияет на расход топлива. Однако слишком ранний впрыск до закрытия выпускных окон приводит к выбросу топлива в процессе продувки и, как следствие, повышенному расходу топлива. Слишком поздний впрыск также приводит к повышенному расходу топлива вследствие плохого смесеобразования. Видно, что оптимальный угол опережения впрыска составляет 90–110 град ПКВ в зависимости от скоростного режима.

На рис. 8 и 9 приведены значения эффективной мощности и удельного эффективного расхода топлива по внешней скоростной характеристике (ВСХ) для базового и экспериментального двигателя.

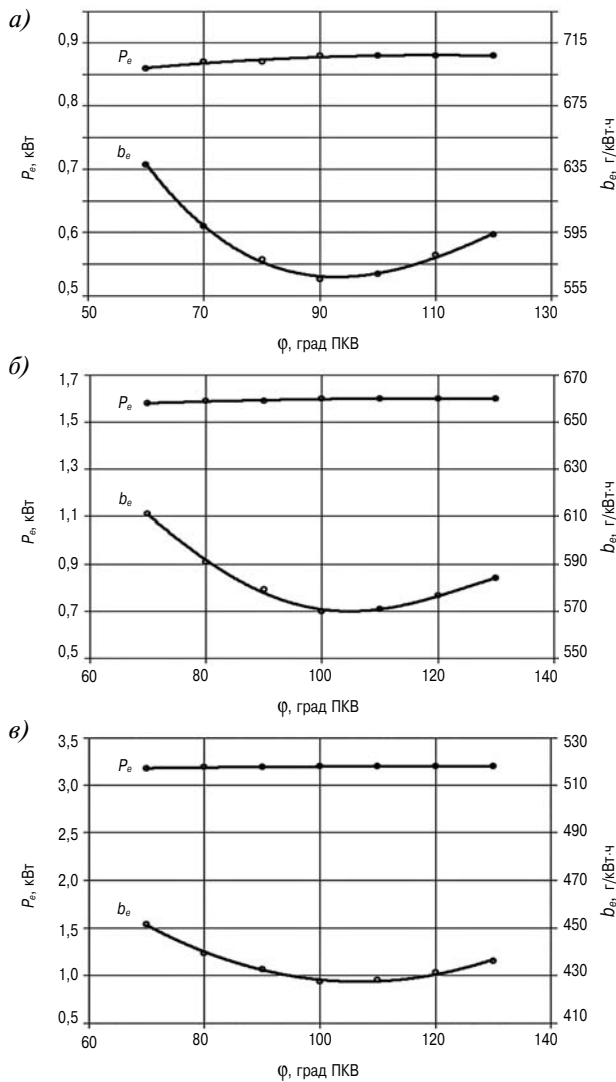


Рис. 7. Регулировочная характеристика по углу опережения впрыска на режиме полной нагрузки:
a — $n = 2000$ об/мин; *б* — $n = 3000$ об/мин; *в* — $n = 4000$ об/мин

Базовый карбюраторный двигатель на частотах до 3000 об/мин развивает меньшую эффективную мощность, чем экспериментальный двигатель. При $n = 2000$ об/мин эффективная мощность базового двигателя при полностью открытой дроссельной заслонке составляет 0,46 кВт, мощность экспериментального двигателя с внутренним смесеобразованием составляет 0,88 кВт, что на 91,3 % больше. Это объясняется нестабильностью работы карбюраторного двухтактного двигателя на малых оборотах. На рис. 10, *a* представлена характеристика изменения среднего индикаторного давления в цилиндре базового карбюраторного двигателя при $n = 2000$ об/мин в 50 последовательных рабочих циклах. Среднее индикаторное давление 32 % циклов приближено к нулю. Флуктуация максимального индикаторного давления при этом составляет 44 %. Карбюраторный

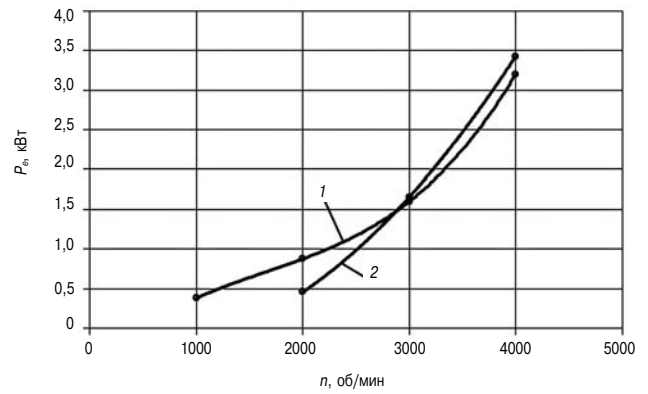


Рис. 8. Значения эффективной мощности по ВСХ:
1 — экспериментальный двигатель; *2* — базовый двигатель

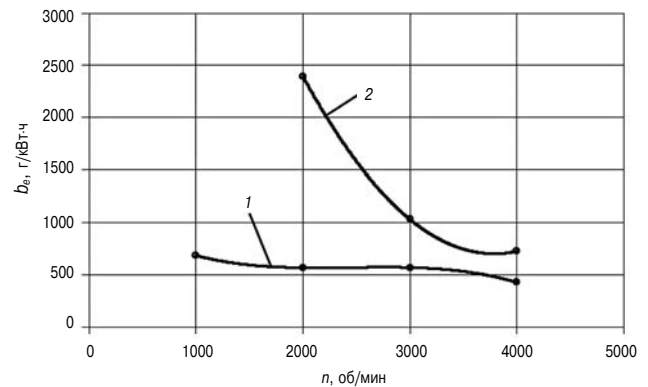


Рис. 9. Значения удельного эффективного расхода топлива по ВСХ:

1 — экспериментальный двигатель; *2* — базовый двигатель

(базовый) двигатель работает стабильно лишь при частоте вращения более от 3000 об/мин, на этом режиме мощности базового и экспериментального двигателей примерно равны. Цикловая стабильность среднего индикаторного давления карбюраторного двигателя при $n = 3000$ об/мин показана на рис. 10, *б*. Флуктуация среднего индикаторного давления при этом составляет не более 9 %. При дальнейшем увеличении скоростного режима эффективная мощность базового двигателя оказывается на 6,7 % выше, чем мощность экспериментального двигателя, что объясняется наличием механических потерь, затрачиваемых на привод компрессор-форсунки. Стабильность работы экспериментального двигателя на режиме полной нагрузки обеспечивается уже при $n = 1000$ об/мин (рис. 10, *в*). Флуктуация среднего индикаторного давления при этом составляет не более 10 %.

Как следует из представленных на рис. 9 результатов, удельный эффективный расход топлива экспериментального двигателя при полной нагрузке существенно ниже, чем у базового карбюраторного двигателя во всем исследуемом диапазоне скоростных режимов. При $n = 2000$ об/мин экспериментальный двигатель экономичнее базового карбюраторного варианта на 76,3 %, при

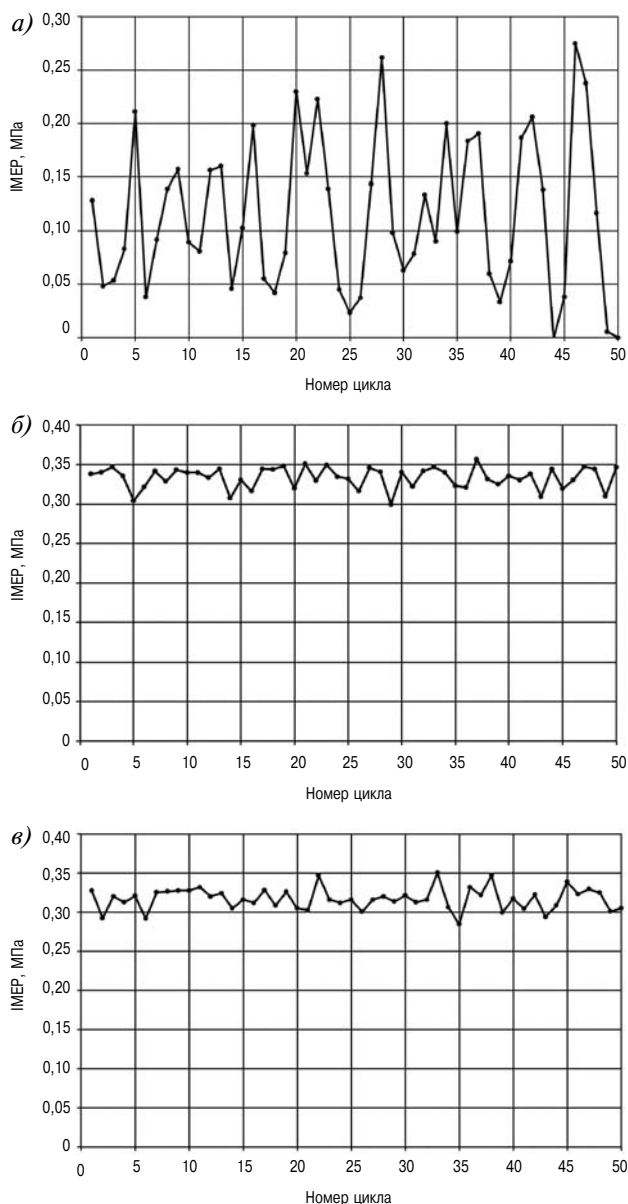


Рис. 10. Изменение среднего индикаторного давления в 50 последовательных циклах по ВСХ:

- a* — базовый двигатель, $n = 2000$ об/мин;
- б* — базовый двигатель, $n = 3000$ об/мин;
- в* — экспериментальный двигатель, $n = 1000$ об/мин

$n = 3000$ об/мин — на 44,5 %, при $n = 4000$ об/мин — на 41,1 %.

На рис. 11 представлены зависимости удельного эффективного расхода топлива по нагрузочной характеристике при частоте вращения $n = 3000$ об/мин. Как видно из представленных характеристик, экспериментальный двигатель до 46,7 % экономичнее по сравнению с базовым карбюраторным вариантом. Наибольший эффект наблюдается при высоких нагрузках, так как влияние механических потерь компрессор-форсунки на эффективную мощность двигателя снижается.

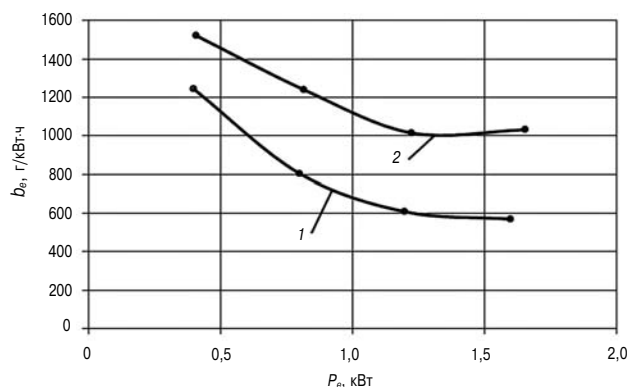


Рис. 11. Зависимости удельного эффективного расхода топлива по нагрузочной характеристике при $n = 3000$ об/мин:

- 1 — экспериментальный двигатель; 2 — базовый двигатель

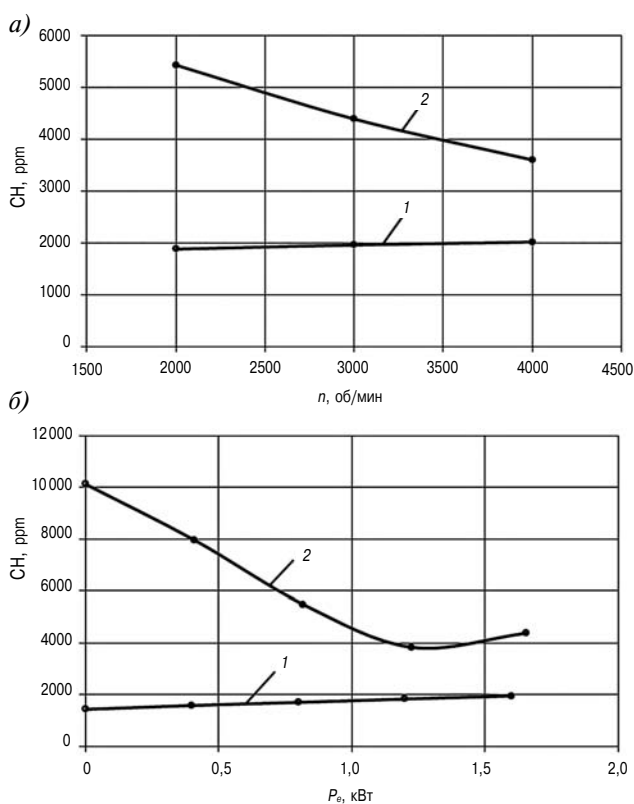


Рис. 12. Содержание углеводородов в отработавших газах:

- a* — по ВСХ; *б* — по нагрузочной характеристике при $n = 3000$ об/мин; 1 — экспериментальный двигатель; 2 — базовый двигатель

На рис. 12 приведены значения содержания углеводородов в составе отработавших газов базового и экспериментального двигателя по внешней скоростной характеристике (рис. 12, *a*) и по нагрузочной характеристике (рис. 12, *б*) при $n = 3000$ об/мин.

Содержание углеводородов в отработавших газах экспериментального двигателя существенно снижено по сравнению с базовым во всем диа-

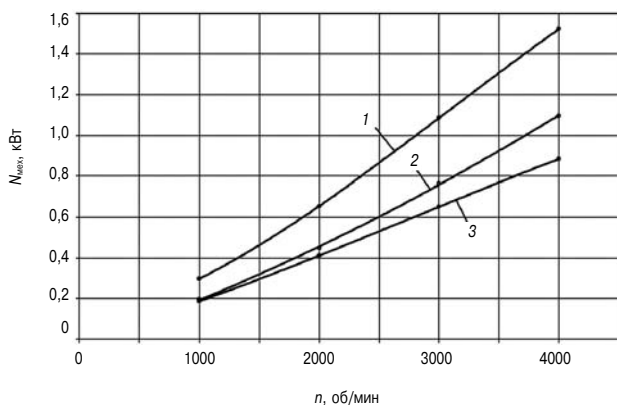


Рис. 13. Зависимость мощности механических потерь от скоростного режима:

1 — экспериментальный двигатель с КФ; 2 — базовый двигатель с полностью открытой ДЗ; 3 — базовый двигатель с ДЗ в положении холостого хода

пазоне скоростных и нагрузочных режимов. Наибольший эффект достигается на режимах малой нагрузки и холостого хода. Вследствие дросселирования в цилиндре карбюраторного двухтактного двигателя образуется большое количество остаточных газов, в результате чего возникают пропуски воспламенения. В экспериментальном двигателе качественное регулирование состава смеси решает эту проблему. На рис. 12, б видно, что на режиме холостого хода содержание углеводородов в двигателе с качественным регулированием в 7 раз ниже, чем в базовом.

Потенциально возможно дополнительное повышение эффективной мощности и топливной экономичности экспериментального двигателя за счет снижения механических потерь, затрачиваемых на привод компрессор-форсунки (КФ). На рис. 13 показаны зависимости мощности механических потерь от скоростного режима для базового и экспериментального двигателей.

Затраты на привод компрессор-форсунки на режиме 1000 об/мин составляют 0,11 кВт или 36,7 % от всех механических потерь в двигателе. Доля потерь на привод компрессор-форсунки снижается с увеличением скоростного режима и составляет 30,8 % при 2000 об/мин, 29,4 % при 3000 об/мин, 27,6 % при 4000 об/мин. При снижении потерь на привод компрессор-форсунки возможно повысить эффективную мощность и топливную экономичность экспериментального двигателя на 10–20 %.

Заключение

Рабочий процесс экспериментального двигателя обеспечивает стабильное воспламенение и горение топливовоздушной смеси в диапазоне от сверхбедной на режиме холостого хода до стехиометрической на ВСХ, что позволяет осуществлять качественное регулирование мощности двигателя во всем диапазоне нагрузок. Экспериментально подтверждена возможность существенного повышения топливной экономичности за счет качественного регулирования и непосредственного впрыска топлива, а также возможность снижения выбросов углеводородов с отработавшими газами в двухтактном двигателе.

Литература

1. Рудой Б. П. Концепция развития поршневых двигателей внутреннего сгорания // Вестник УГАТУ. — 2004. — Т. 5. — № 1 (9). — С. 3–9.
2. Гарипов М. Д. Искровое воспламенение в условиях глубокого расслоения топливовоздушного заряда в рабочей камере ДВС // Вестник УГАТУ. — 2007. — Т. 9. — № 6 (24). — С. 114–120.
3. Рабочий процесс многотопливного поршневого двигателя. // А. О. Борисов, М. Д. Гарипов, Р. Д. Еникеев, А. А. Черноусов; под ред. Р. Д. Еникеева. — Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2008. — 272 с.

ПРЕДЛАГАЕМ РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ Ориентировочные тарифы на 2 полугодие 2012 г.

Первая страница обложки	Полноцветная	40 000 руб.
Вторая и третья страницы обложки	Полноцветная	36 000 руб.
Четвертая страница обложки	Полноцветная	38 000 руб.
Внутри журнала из расчета одна страница формата А4	Полноцветная	36 000 руб.
	Черно-белая	30 000 руб.