

УДК 621.43

М. Д. ГАРИПОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОТОПЛИВНОГО РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ДВС СО СТЕПЕНЬЮ СЖАТИЯ 12,5

Приведены результаты экспериментального исследования возможности организации в ДВС с искровым воспламенением бездетонационного сгорания дизельного топлива и бензина. Процесс реализуется за счет управления моментом подачи обогащенной топливовоздушной смеси в рабочую камеру и моментом первичного воспламенения искрой. *Поршневой ДВС; рабочий процесс; многоочаговое сгорание; детонация; многотопливность*

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Исторически сложились два типа поршневых ДВС – с воспламенением от искры (бензиновые) и воспламенением от сжатия (дизели). Бензиновые двигатели отличаются высокой удельной мощностью и невысокой топливной экономичностью. Дизели, наоборот, обладают высокой топливной экономичностью, но низкой удельной мощностью. Перспективный (унифицированный) рабочий процесс должен объединять лучшие качества бензиновых двигателей и дизелей и работать на всей существующей номенклатуре выпускаемых для них топлив. Это даст возможность перейти на единое унифицированное топливо, включающее фракции современных товарных топлив, что значительно снизит энергоемкость и себестоимость их производства.

Для достижения топливной экономичности дизельных двигателей бензиновым двигателям необходимо поднять степень сжатия до уровня 12–15 и перейти на качественное регулирование мощности, т. е. увеличить максимальный коэффициент избытка воздуха на частичных нагрузках до значений, характерных для дизелей ($\alpha \approx 4-5$) [1]. Бензиновые двигатели имеют к моменту воспламенения уже подготовленную гомогенную смесь. Это условие налагает ограничение по максимальной степени сжатия, так как в гомогенных смесях при повышенных степенях сжатия возникает детонация. Двигатели с такими процессами, как May Fireball, Mitsubishi GDI и другие, приблизились к нижней границе вышеуказанного диапазона степеней сжатия лишь при условии использования высокооктановых топлив.

Дизели позволяют осуществить многотопливный цикл при высоких степенях сжатия (более 20). Повышенные значения максимального давления и жесткости сгорания цикла при высоких степенях сжатия определяют высокие нагрузки на детали цилиндропоршневой группы, что приводит к увеличению механических потерь и требует более прочной конструкции двигателя. При использовании топлив с низкими цетановыми числами (например, бензинов) указанные явления усиливаются, поэтому время работы дизеля на резервных топливах по техническим условиям не превышает 10% от общего ресурса двигателя. Снижение степени сжатия в дизелях до уровня 12–15 позволило бы снизить массу и габариты двигателя без увеличения расхода топлива [2, 3]. Однако в традиционном дизеле снижение степени сжатия менее 15 приводит к ухудшению смесеобразования и сгорания, а также к возникновению проблемы пуска.

В связи с ограничениями по максимальной частоте вращения и минимальному значению коэффициента избытка воздуха дизели имеют низкую, относительно поршневых ДВС с искровым воспламенением, литровую мощность. Повышение литровой мощности дизеля до уровня бензиновых двигателей достигается на данный момент в основном наддувом и некоторым увеличением (благодаря многофазному впрыску) частоты вращения. При этом вес и габариты дизеля из-за высоких степеней сжатия остаются достаточно большими. Соответственно, остается относительно низкой удельная мощность и происходит перерасход материалов как двигателей, так и агрегатов, на которые они устанавливаются.

Решение вышеперечисленных задач выдвигает ряд проблем смесеобразования, воспламе-

нения и сгорания, которые необходимо разрешить в целях сохранения мощностных и экономических показателей двигателя при переходе с одного топлива на другое [1].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работах [4, 5] сформулирована гипотеза о возможном способе реализации унифицированного рабочего процесса. Процесс, согласно этой гипотезе, реализуется за счет впрыска компрессор-форсункой непосредственно в рабочую камеру двигателя богатой топливовоздушной струи, которая воспламеняется единичным искровым разрядом вблизи ее границ. 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. При этом уровень неоднородности топливовоздушной смеси должен быть таким, чтобы, с одной стороны, исключить возможность возникновения детонации с интенсивностью, близкой к максимальной, с другой стороны, обеспечить максимально возможную степень использования имеющегося в рабочей камере двигателя воздуха. Удовлетворить эти противоречивые требования, вероятно, возможно, если организовать процесс таким образом, чтобы концентрационная неоднородность имела место на локальном уровне, а сами очаги локальной неоднородности были относительно равномерно распределены по объему камеры сгорания. Предполагается, что образование детонационных волн в локальных очагах допустимо, если в процессе распространения они ослабляются до такого уровня, который не представляет опасности для конструкции двигателя и не ухудшает его эффективные показатели. Принципы организации процессов смесеобразования и воспламенения, заложенные в предлагаемом рабочем процессе, должны позволить управлять степенью неоднородности за счет управления моментом начала подачи обогащенной топливовоздушной смеси в рабочую камеру и моментом первичного воспламенения искрой. Самовоспламенения может и не быть при использовании высокооктановых топлив, например, водных растворов этанола.

В сравнении с дизелями такая схема организации рабочего процесса имеет следующие преимущества:

1. Устраняются ограничения по нижнему пределу степени сжатия, верхнему пределу частоты вращения коленчатого вала и цетановому числу топлива, характерные для дизельных двигателей. В унифицированном рабочем процессе, в отличие от дизелей, самовоспламенение – лишь сопутствующий, но не обязательный фактор. Поэтому многотопливность может быть реализована при значительно более низких, чем в многотопливных дизелях, степенях сжатия, а параметры двигателя не ограничиваются сравнительно медленными химическими процессами, которые приводят к самовоспламенению и сильно зависят от типа топлива, термодинамических условий в рабочей камере и т. п.

2. Возникают условия для более мягкого (сравнимого с бензиновыми двигателями) сгорания на начальном этапе, что дает возможность использовать более однородные, чем в дизеле, смеси [5]. Отсутствие раннего самовоспламенения при работе на низкооктановых топливах определяется более низкими, чем в дизеле, степенями сжатия.

3. Появляется определенность и управляемость момента воспламенения и облегчается запуск двигателя при отрицательных температурах.

Цель данной работы: экспериментальное исследование возможности реализации многотопливности в оптимальном диапазоне степеней сжатия (12–15), с сохранением удельной мощности бензинового двигателя при использовании различных топлив.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ И АППАРАТУРА

На рис. 1 представлена схема конструктивной реализации предлагаемого рабочего процесса [4, 5]. Топливо с небольшим количеством воздуха поступает в полость компрессор-форсунки 1, где происходит предварительная стадия смесеобразования – подогрев, дробление, перемешивание и частичное испарение топлива. Поршень 5 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 (ТВС). Зажигание смеси осуществляется искровым разрядом 3 от свечи зажигания на периферии топливовоздушного факела. Компрессор-форсунка оснащена необходимыми устройствами для дозирования топлива 8 и воздуха 9 в зависимости

от рабочего объема двигателя и режима его работы. Система зажигания имеет традиционную конструкцию и параметры разряда, характерные для современных бензиновых двигателей.

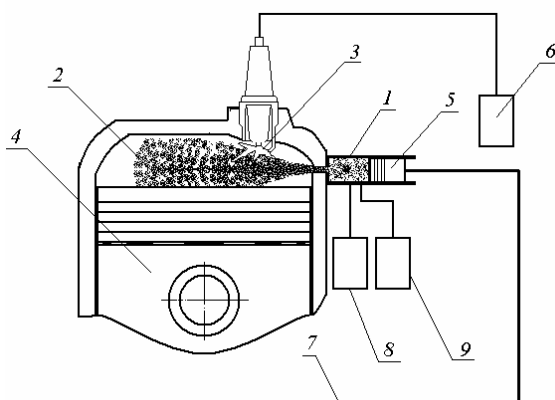


Рис. 1. Схема конструкции для реализации унифицированного рабочего процесса: 1 – компрессор-форсунка; 2 – факел обогащенной ТВС; 3 – искровой разряд; 4 – поршень; 5 – поршень компрессор-форсунки; 6 – коммутатор системы зажигания; 7 – привод компрессор-форсунки от вала двигателя (условно); 8, 9 – устройства дозирования топлива и воздуха для компрессор-форсунки

Рабочий процесс реализован на базе двухтактного двигателя ТМЗ–200М. Геометрическая степень сжатия в серийном варианте равна 8,5. На выбор двигателя в значительной мере повлиял его высокий диапазон эксплуатационных частот рабочих циклов (2000–5500 циклов/с). С одной стороны, это позволяет оценить возможность устранения характерного для дизелей ограничения по максимальной частоте циклов. Соответственно, определится возможность реализации удельной мощности, близкой к бензиновым двигателям при переходе с одного топлива на другое. С другой стороны, во избежание самовоспламенения дизельного топлива раньше момента искрового воспламенения, которое может возникнуть при работе двигателя с высокой степенью сжатия на низких частотах вращения, угол опережения впрыска (УОВ) топлива не должен быть значительно больше угла, соответствующего дизельным двигателям. Но тогда при доводке унифицированного рабочего процесса придется столкнуться с проблемами, решаемыми при доводке рабочих процессов дизельных двигателей. Необходимо будет учесть большое количество факторов, таких как углы опережения впрыска и зажигания, продолжительность впрыска, форма и размеры камеры сгорания, ее соответствие форме и размерам топливоздушного факела и т. д. Это длительный и трудоемкий процесс.

Интенсивность турбулентности в поршневом ДВС растет пропорционально частоте вращения коленчатого вала, поэтому продолжительность (в углах поворота коленчатого вала (ПКВ)) образования ТВС необходимого уровня неоднородности практически не зависит от частоты вращения. В противоположность этому длительность индукции самовоспламенения в углах поворота коленчатого вала возрастает с увеличением частоты вращения. Это значит, что высокая частота циклов дает возможность получить достаточно равномерное распределение топлива по объему камеры сгорания за счет более ранних углов опережения впрыска и тем самым избежать длительного доводочного процесса.

Для того чтобы при анализе результатов можно было сосредоточиться на внутрицилиндровых процессах, выпускная труба в экспериментах отсутствовала. На экспериментальном двигателе имеется возможность регулирования степени сжатия, углов опережения зажигания и впрыска, местоположения искрового зазора свечи зажигания. В соответствии с результатами численного эксперимента [2, 5], степень сжатия принята равной 12,5. Согласно этим работам увеличение степени сжатия выше данного значения не вызывает роста эффективного КПД двигателя. В качестве топлива использовались бензин и дизельное топливо.

Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде типа 1 DS 541 N с балансирным динамометром. Испытательный стенд обеспечивает возможность измерения и стабилизации частоты и момента вращения испытуемых машин.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты подтвердили возможность реализации многотопливного рабочего процесса в эксплуатационном диапазоне частот циклов базового двигателя. На рис. 2 приведена внешняя скоростная характеристика двигателя при оптимальных углах опережения впрыска и зажигания соответственно для дизельного топлива, бензина «Нормаль 80», а также карбюраторного варианта двигателя. Критерием оптимальности при выборе угла опережения впрыска и зажигания являлась максимальная мощность двигателя. При отклонении угла опережения впрыска относительно оптимального наблюдалось уменьшение мощности двигателя. При снижении – из-за ухудшения смесеобразования, при увеличении – из-за детонации.

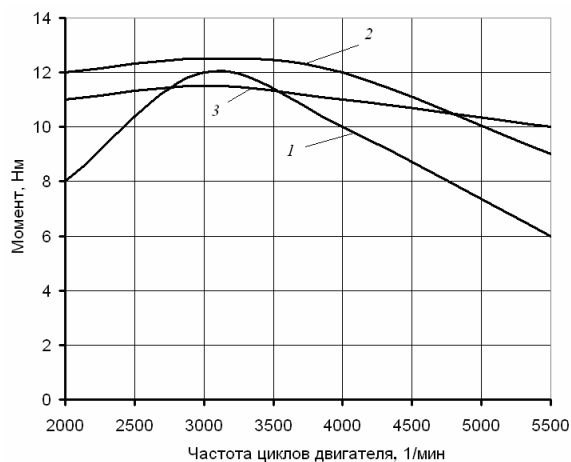


Рис. 2. Внешняя скоростная характеристика двигателя: 1 – бензин (карбюраторный вариант); 2 – бензин (впрыск); 3 – дизельное топливо

Максимально допустимый угол опережения впрыска в случае использования бензина больше (рис. 3). Это можно объяснить действием двух факторов. Во-первых, вследствие более низкого октанового числа скорость реакций, ведущих к воспламенению, у дизельного топлива выше. Поэтому при равных УОВ ниже доля ТВС, сгоревшей к моменту самовоспламенения. Согласно работе [5], чем она меньше, тем уже диапазон допускаемых характеристик выгорания и соответственно ниже допустимая степень однородности смеси даже при условии отсутствия детонационного сгорания.

Во-вторых, различной детонационной стойкостью использованных топливовоздушных смесей при одинаковой степени неоднородности. При возникновении детонации имеют значение не только абсолютные скорости реакции, но и их зависимости от температуры, которые определяются эффективной энергией активации. Чем слабее эти зависимости, тем более вероятно одновременное возникновение самовоспламенения в больших объемах смеси, несмотря на наличие в ней температурной неоднородности [6, 7]. Эффективная энергия активации реакций, ведущих к самовоспламенению, тем выше, чем больше октановое число топлива. Следовательно, даже при одинаковой степени неоднородности, скорость реакции и объем, химически подготовленный (в смеси прошли многостадийные химические превращения) к тепловому взрыву, у дизельного топлива будет больше. Также больше, чем у бензина, будет и интенсивность распространяющихся волн, возникших в результате самовоспламенения. В связи с этим неоднородность заряда при работе на дизельном топливе должна быть больше. В результате – пониженный по сравне-

нию с бензином момент двигателя на низких частотах (рис. 2).

С увеличением частоты вращения длительность индукции самовоспламенения в углах поворота коленчатого вала увеличивается, следовательно, возрастает доля топливовоздушной смеси, сгоревшей к моменту самовоспламенения. Согласно работе [5], чем она выше, тем шире диапазон допускаемых характеристик выгорания. Если доля смеси, сгоревшей к моменту самовоспламенения, превышает 50%, становится допустимым практически любой характер выгорания, ввиду того, что максимальная скорость нарастания давления не превышает значений, реализуемых в современных дизелях. При этом координаты ее максимума имеют более позднее расположение по углу п.к.в., а абсолютная величина скачка давления значительно меньше значений, соответствующих дизелям. Это означает, что в отличие от дизелей взрывообразное сгорание допустимо и степень однородности смеси будет ограничивать лишь вероятность образования детонации, что в свою очередь дает возможность использовать более однородные, чем в дизеле, смеси.

Так как с ростом частоты циклов появляется возможность использования более однородных смесей, то с целью увеличения времени на смесеобразование повышали угол опережения впрыска (рис. 3). Но в случае использования дизельного топлива возрастание частоты вращения выше 4000 об./мин. уже не вызывает увеличения максимально допустимого угла опережения впрыска. Этот факт связан с возникновением детонации, вызванной уменьшением степени неоднородности смеси сверх определенного для данного топлива уровня, что проявлялось в виде характерного звука и ухудшения характеристик двигателя.

При высоких частотах вращения проявляются положительные следствия многоочагового воспламенения и сгорания. Развитие в несгоревшей части предпламенных реакций и возникновение очагов самовоспламенения способствуют быстрому завершению тепловыделения в конце основной фазы сгорания и в фазе догорания. Чем ниже октановое число топлива и выше частота циклов, тем более заметен данный эффект [6]. Этим, видимо, и объясняется больший момент при работе двигателя на высоких частотах циклов в случае использования дизельного топлива (рис. 2).

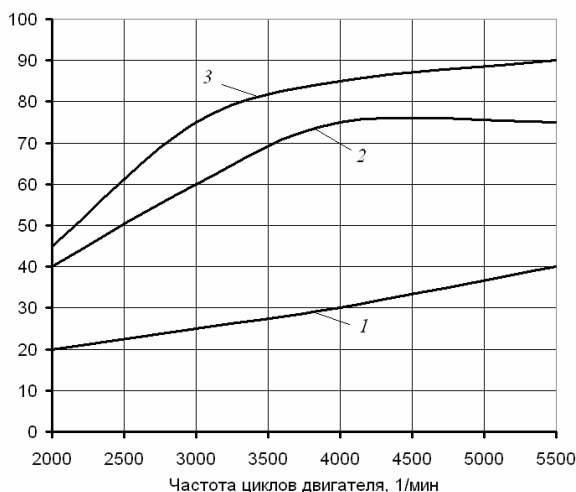


Рис. 3. Регулировочные данные двигателя:
1 – УОЗ град. ПКВ; 2 – УОВ (диз. топливо) град. ПКВ; 3 – УОВ (бензин) град. ПКВ

Как уже упоминалось, положительный результат будет проявляться до тех пор, пока возникшие при многоочаговом воспламенении ударные волны еще не перерастают в детонационные такой интенсивности, которая ухудшает эффективные показатели двигателя.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально подтверждена возможность реализации многотопливного бездетонационного рабочего процесса при степени сжатия 12,5, реализуемого за счет управления моментом начала подачи обогащенной топливовоздушной смеси в рабочую камеру и моментом первичного воспламенения искрой.

2. Экспериментально показано отсутствие ограничений по частоте вращения при работе двигателя с предлагаемым рабочим процессом на дизельном топливе, по крайней мере, до максимально допустимой паспортной частоты вращения двухтактного двигателя ТМЗ-200М, равной 5500 об./мин.

3. Способность работы двигателя при степени сжатия 12,5 без ограничений по максимальной частоте циклов определяет возможность реализации удельной мощности, близкой к бензиновым двигателям, при переходе с одного топлива на другое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стечкин Б. С.** Избранные труды: Теория тепловых двигателей. М.: Физматлит, 2001. 432 с.
2. **Гарипов М. Д., Сакулин Р. Ю.** Влияние степени сжатия и способа регулирования нагрузки на эффективные показатели поршневых ДВС // Ползуновский вестник. 2006. № 4. С. 54–57.
3. **Phatak R.G., Komiyama K.** Investigation of a spark – assisted diesel engine // SAE Techn. Pap. Ser. 1983. № 830588. P. 8.
4. **Гарипов М. Д., Гарипов К. Н., Хафизов А. Г.** Искровое воспламенение в условиях глубокого расслоения топливовоздушного заряда в рабочей камере ДВС // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 6(24). С. 114–120.
5. **Еникеев Р. Д., Гарипов М. Д.** Рабочий процесс перспективного поршневого ДВС // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 7, № 3. С. 12–22.
6. **Воинов А. Н.** Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977. 277 с.
7. **Свиридов Ю. Б.** Смесеобразование и сгорание в дизелях. Л.: Машиностроение, 1972. 224 с.

ОБ АВТОРЕ



Гарипов Марат Данилович, доц. каф. двиг. внутр. сгорания. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. перспективн. раб. процессов ДВС, биотоплив.