

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 топливоздушная 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.

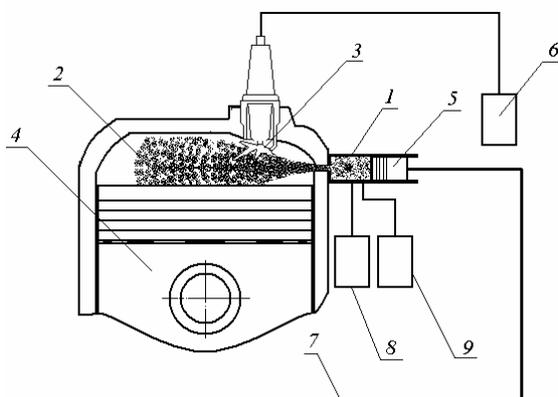
3. Появляется определенность и управляемость момента воспламенения и облегчается запуск двигателя при отрицательных температурах.

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 топливовоздушного факела и т. д. Это длительный и трудоемкий процесс.

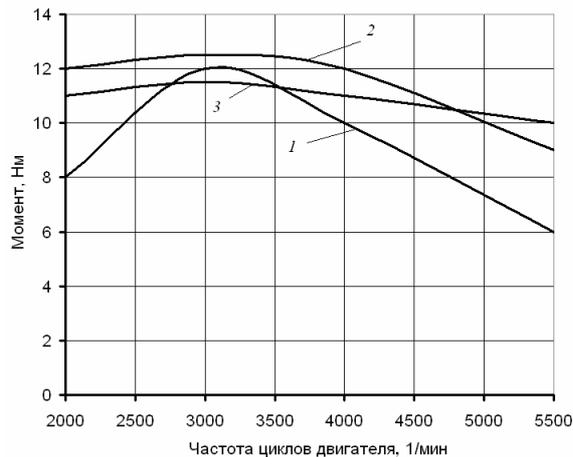
Интенсивность турбулентности в поршневом ДВС растет пропорционально частоте вращения коленчатого вала, поэтому продолжительность (в углах поворота коленчатого вала (ПКВ)) образования ТВС необходимого уровня неоднородности практически не зависит от частоты вращения. В противоположность этому длительность 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.

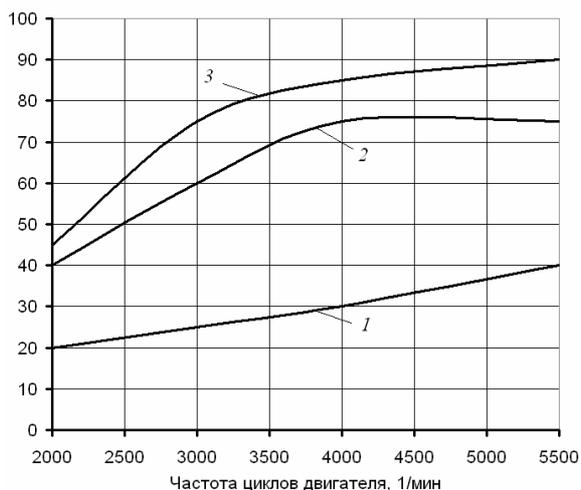
Во-вторых, различной детонационной стойкостью использованных топливоздушных смесей при одинаковой степени неоднородности. При возникновении детонации имеют значение не только абсолютные скорости реакции, но и их зависимости от температуры, которые определяются эффективной энергией активации. Чем слабее 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 топливоздушной 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.