

В.И. Дудкин, Е.М. Янкин

### Пути совершенствования системы питания дизельного двигателя

Дизельный двигатель, в котором источником для воспламенения топлива служит внутренняя тепловая энергия рабочего тела, неприхотлив к свойствам топлива, климатическим условиям, надежен в эксплуатации, имеет высокие эколого-экономические показатели, но при этом обладает большим весом, габаритами и шумностью работы. Если раньше дизели, в отличие от карбюраторных двигателей, привлекали к себе внимание своей экономичностью, неприхотливостью и надежностью в эксплуатации, то в последнее время к этому добавились его высокие экологические показатели. Существующее многообразие дизелей во многом определяется его системой питания (СП), играющей ведущую роль в образовании смеси и имеющей большие потенциальные возможности по совершенствованию.

Проведем исследование СП дизельного двигателя как сложной технической системы (ТС) с использованием системного подхода [1], который состоит в поэтапном анализе эволюции функционально-структурной организации (ФСО) системы и предназначен для выявления тенденции развития и определения путей по ее модернизации. Принцип построения системного подхода отражает средство его формализации – графический оператор, представляющий собой квадратную экранную матрицу третьего порядка (рис.), где экраны соответствуют элементам иерархии сложной ТС, а матрица экранов отражает происходящие в ней изменения в ходе эволюции ТС. В общем случае субстанциональное наполнение системы предполагается произвольным, а под иерархией ТС подразумевается ФСО ее строения, при этом элементы иерархии могут быть как структурными, так и функциональными. Направлениями диагональных стрелок на схеме отображается известная закономерность трансформации ФСО в процессе эволюции ТС: функции перемещаются вниз – на микроуровень, а структурные элементы – на верхний уровень иерархии системы. При этом перемещение элемента без изменений по ступеням иерархии отражено сохранением цвета и положением геометрической фигуры на экране. Изменение конфигурации экрана матрицы, цвета и взаимного расположения в нем фигур по горизонтали

отражают динамику изменения в ходе эволюции внутреннего содержания элемента системы, что связано с возможным первоначальным его усложнением, а затем упрощением. При этом усложнение ФСО в целом может быть вызвано приобретением ТС на каком-то этапе ее развития новых функций, а упрощение – совершенствованием качества полезных функций.



Схема системного оператора

Начало проектирования поршневых ДВС с воспламенением топлива от сжатия связано с попыткой Р. Дизеля реализовать изотермический ввод теплоты в цикл по С. Карно, а в результате – созданием в конце XIX в. первых образцов компрессорных дизелей с изобарным вводом теплоты по циклу Дизеля. СП двигателей включала механическое управление подачи топлива (сначала угольной пыли, а затем и сырой нефти) в цилиндр и его пневматическое распыление предварительно сжатым так называемым форсуночным воздухом. Подача топлива начиналась при положении поршня в ВМТ по достижении максимального давления сжатия, которое поддерживалось на одном уровне процессом горения непрерывно поступающей в цилиндр смеси топлива с воздухом. Недостатки компрессорного дизеля состояли в низких механическом КПД из-за затрат энергии на получение сжатого воздуха и термическом КПД цикла Дизеля, большой инерционности СП, ограничивающей быстроходность дизеля.

Качественные изменения в СП произошли в результате внедрения механического способа управления впрыскиванием и распылением

жидкого топлива, где впрыскивание топлива осуществлялось насосным ходом запорной иглы распылителя, а распыление – с помощью сопловых отверстий малого диаметра при прохождении топлива под высоким давлением. В России первый четырехтактный дизельный двигатель с такой системой питания был изготовлен на заводе Мекса в Москве и успешно прошел испытания 12 октября 1912 г. Сначала способ применялся в СП нераздельного типа, где насосная секция и форсунка конструктивно объединялись в так называемую насос-форсунку, а в 20-х гг. началось освоение СП раздельного типа, где полости насосной секции и форсунки сообщались через линию нагнетания топлива, а управление движением запорной иглы распылителя велось гидромеханическим способом. Конструкции этих систем нашли широкое применение и на конкурентной основе интенсивно совершенствуются до сих пор. Узким местом в работе СП с насос-форсункой является низкое давление в начале впрыскивания, что снижает качество распыления, ухудшая тем самым экономичность рабочего процесса и увеличивая содержание сажи в отработавших газах.

В СП раздельного типа ухудшение качества распыления происходит из-за падения давления в конце впрыскивания, снижая экономичность и увеличивая выброс сложных углеводородов.

Проблему улучшения эколого-экономических показателей дизелей с СП нераздельного типа решают применением аккумулятора высокого давления и электронного управления процессом впрыскивания, согласующего начало подачи топлива с режимом работы дизеля. Однако стоимость электронного оборудования соизмерима со стоимостью самого двигателя.

В современных СП раздельного типа высокой результативности по ускорению впрыскивания и распыления топлива удалось добиться путем согласования геометрии профиля сопловых отверстий с повышением максимального давления впрыскивания до  $P_{\max} = 200$  МПа.

Анализ образцов лучших отечественных и зарубежных распылителей с использованием специально созданных для этого технических средств по контролю геометрии проточной части распылителя и качества распыления [2, 3] показал, что повышения динамики впрыскивания и распыления можно добиться не только традиционным подбором отношения длины соплового отверстия к его диаметру, но и профилированием соплового отверстия по длине, например, приданием ему конфузорной формы с созданием радиусных кромок на входе со сто-

роны колодца. Однако необходимость повышения уровня технологии при изготовлении деталей топливной аппаратуры ведет также к увеличению стоимости двигателя. К тому же повышение динамических нагрузок в приводных звеньях топливного насоса снижает надежность и долговечность работы СП двигателя.

В конце апреля 1979 г. при проведении НИР на экспериментальном отсеке двигателя размерностью 13/14 с камерой типа ЯМЗ В.И. Дудкинским был зафиксирован кратковременный резкий подъем экономичности, после чего двигатель остановился [4]. Как показал тщательный анализ, причиной неуправляемого поведения двигателя явилась установка на колпак форсунки герметичного датчика, который предназначался для регистрации подъема иглы распылителя. Это обстоятельство привело к тому, что после запуска предварительно разогретого двигателя небольшое количество воздуха, зажатое датчиком в дренажной полости, за счет разряжения, периодически создаваемого на линии высокого давления, в промежутке между циклами впрыскивания порциями поступало из надъгольной полости в подыгольную и шло на образование эмульсии – механической смеси газа с топливом. Образование смеси завершилось в период впрыскивания, под воздействием ударной волны высокого давления, исходящей со стороны плунжерной пары, путем взаимного диффузного проникновения компонентов, способствующего растворению газа в топливе. При этом растворившаяся часть газа ослабляла межмолекулярные связи в жидком топливе, а нерастворенная, находящаяся в топливе под высоким давлением в виде мелких пузырьков, при впрыскивании в среду с меньшим давлением дополняла механическое распыление – пневматическим, что и вызвало рост экономичности. Через  $\approx 5$  мин. после выработки воздуха произошло гидрозапирание иглы распылителя, вызвавшее остановку дизеля. Для имитации внештатной ситуации пришлось идти на нарушение инструкции по эксплуатации дизеля, оснащенного ТС раздельного типа, действовавшей с 20-х гг. Через дренаж форсунки на линию высокого давления был подан сжатый воздух. Вместо остановки, как это следовало из инструкции, работа двигателя оказалась устойчивой на всех эксплуатационных режимах, более того, минимально устойчивая частота вращения коленчатого вала снизилась на  $\approx 100^{-1}$  мин при работе двигателя на холостом ходу. При этом время впрыскивания сократилось на 20%, повысилась интенсивность распыления топлива в конце подачи.

Это привело к росту экономичности на 5–7% и снижению выброса сажи с отработавшими газами на 30–50%. Обратим внимание, что для получения такой же эффективности в работе современной СП с механическим распылением топлива давление впрыскивания повышают до  $P_{\max} = 200$  МПа, а при пневмомеханическом оно снижается до уровня  $P_{\max} = 20$  МПа, т.е. на порядок ниже.

В результате информационного поиска было обнаружено наличие работ в направлении насыщения жидкого топлива газовой присадкой, в которых осуществлялась предварительная подготовка топлива путем образования смеси его с газом (воздухом) либо вне двигателя путем поверхностного насыщения в специальной емкости [5] под давлением 0,35 МПа, либо на том же уровне давления, но на линии низкого давления [6]. При этом содержание воздуха в топливе на этой линии из-за значительного влияния нерастворенного воздуха на коэффициент сжимаемости топлива практически ограничено пределом его насыщения.

По закону Генри, объем воздуха  $V_B$  приведенный к нормальным условиям, растворенный в объеме топлива  $V_T$ , находится из соотношения:  $V_B = kV_T P$ , а его процентное содержание:

$$S(\%) = \frac{k \cdot P \cdot \rho_B \cdot 100\%}{\rho_T + k \cdot P \cdot \rho_B}, \quad (1)$$

где  $P$  – абсолютное давление среды (МПа);  $k = 1,2$  – коэффициент растворимости воздуха в дизельном топливе;  $\rho_B, \rho_T$  – плотность соответственно воздуха и топлива.

При давлении  $P \approx 0,35$  МПа содержание воздуха в топливе при условии насыщения составляет всего  $S \approx 0,1\%$ , в то время как для устойчивого получения описанного выше положительного эффекта содержание присадки воздуха в топливе требуется иметь  $S \geq 2\%$  [7].

Данный способ питания дизеля и вариант его реализации были признаны изобретением [8, 9]. Другое важное направление в развитии дизелестроения связано с использованием в качестве источника химической энергии газообразного топлива и сжиженного газа, преимущество которых перед жидким топливом состоит в лучших эколого-экономических показателях рабочего процесса и низкой стоимости. Первые шаги в этом направлении были сделаны в 1934 г. профессором МВТУ Е.К. Мазингом. Он перевел питание компрессорного двигателя с жидкого топлива на газообразное и реализовал цикл Дизеля. Однако созданный компрессорный газодизель обладал недостатками морально устаревшего прототипа и не был принят к производству. Дальнейшее развитие газодизеля шло по пути реализации цикла Тринклера с использованием запальной дозы жидкого топлива, и к настоящему времени сложились два конкурирующих направления – с внешним и внутренним образованием смеси газа со свежим зарядом. При этом дизели с внешним смесеобразованием имеют высокое качество образования смеси, но к большим затратам механической энергии для достижения этого качества добавляется сложность в процессе эксплуатации количественного согласования подачи газа и запальной дозы топлива, а также серьезные проблемы по обеспечению взрывобезопасности. Более перспективным считается газодизель с внутренним смесеобразованием, например, с вводом присадки сжиженного газа в топливо на входе в форсунку [10], находящийся на стадии промышленного освоения на дизелях ЯМЗ, КамАЗ.

Сведем результаты исследования развития системы питания газодизеля с внутренним смесеобразованием в таблицу, ячейки которой выполняют функцию экранов оператора (рис.).

Анализ таблицы подтверждает закономерность развития сложных ТС, в данном случае

Эволюция ФСО СП газодизельного двигателя с внутренним смесеобразованием

| Система в прошлом                       | Система питания раздельного типа сегодня |                                      |                                      | Система в перспективе                |
|---|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|   | Малов, 1972                              | Файнлейб, 1970                       | Патрахальцев, 91                     |                                      |
| Мазинг, 1934                            | Малов, 1972                              | Файнлейб, 1970                       | Патрахальцев, 91                     | Система в перспективе                |
| Система питания компрессорного дизеля   | <b>Насыщение топлива газом</b>           | Система подачи топлива               | Система подачи топлива               | <i>Линия высокого давления топл.</i> |
| <i>Линия высокого давления воздуха</i>  | Система питания дизеля                   | <b>Насыщение топлива газом</b>       | <i>Линия высокого давления топл.</i> | Канал в форсунке                     |
| Канал в форсунке                        | Система подачи топлива                   | <i>Линия высокого давления топл.</i> | <b>Смешение с жидким газом</b>       | Канал в распылителе                  |
| <b>Образование газо-воздушной смеси</b> | <i>Линия высокого давления топл.</i>     | Канал в форсунке                     | Канал в форсунке                     | <b>Образование эмульсии</b>          |

ФСО системы питания: структурные элементы конструкции топливной аппаратуры переходят на верхний уровень иерархии системы, а функции (образование смеси топлива) – на нижний. Дадим характеристику динамике изменения ФСО СП газодизеля по этапам ее эволюции.

В прошлом газодизельный процесс был реализован на базе компрессорного двигателя Дизеля (Мазинг, 1934). Разница состояла лишь в замене жидкого топлива – газообразным. Несущей средой для топлива был воздух, который по линии высокого давления поступал в форсунку на участок смещения с газовым топливом, а затем образованная смесь подавалась в камеру сгорания. Достоинство газодизеля состояло в отсутствии потребления жидкого топлива и в связи с этим он обладал высокими экологическими показателями, а недостатками являлись большая инерционность СП, низкие термический и механический КПД.

На сегодняшний день вариант газодизельного процесса реализован на базе дизеля с СП раздельного типа, реализующего цикл Тринклера [10], где в качестве источника химической энергии используется смесь дизельного топлива с жидким газом, вводимым в топливо на линию высокого давления на входе в форсунку. Достоинствами газожидкостного дизеля являются высокие термический и механический КПД, а также частичное замещение жидкого топлива жидким газом, что улучшает экологи-

ческие показатели. Недостаток – невозможность применения газообразного топлива.

В перспективном варианте реализации газожидкостного дизеля за базу принят также дизель с СП раздельного типа [8], в котором ввод газовой присадки осуществляется в поддыгольную полость распылителя, что позволяет снять ограничения по коэффициенту ее сжимаемости. Функциональное назначение присадки состоит в замещении основного топлива; интенсификации впрыскивания и распыления топлива; регулирующем воздействии на кинетические и теплообменные процессы. К решаемым задачам относятся: экономия дорогостоящих топлив, улучшение эколого-экономических показателей рабочего процесса, повышение мощности двигателя, многотопливность двигателя.

### Выводы

Проведен системный анализ эволюции систем питания дизельного двигателя, в результате чего определены альтернативные пути развития гидромеханического способа впрыскивания в системах раздельного типа, состоящие в применении присадок к топливу, организации газодизельного процесса и создании газожидкостного дизеля. Это вызвано повышением требований к эколого-экономическим показателям дизельных двигателей.

### Литература

1. Волков В.И. Изобретательские задачи в процессах переноса. Барнаул, 1997.
2. Дудкин В.И., Грачев В.С. К некоторым вопросам системного подхода в оценке влияния параметров распылителя на рабочий процесс двигателя // Совершенствование быстроходных дизелей: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Барнаул, 1993.
3. А.с. RU №15016. Устройство для получения контрольного слепка проточной части корпуса распылителя форсунки дизеля / В.И. Дудкин, В.А. Герман. Оpubл. 10.09.2000. Бюл. №25.
4. Разработка методики анализа и исследования рабочего процесса дизелей АМЗ на основе установления связи индикаторного КПД с характеристиками подвода и отвода тепла в цикле: Отчет по НИР, АПИ / Гос. регистр. №79031730. 1980.
5. Малов Р.В. Снижение токсичности дизельного выпуска воздействием на рабочий процесс // Автомобильная промышленность. 1972. №7.
6. А.с. 289215 СССР. Способ питания двигателя внутреннего сгорания / Б.Н. Файнлейб, Е.Ф. Смирнов. Оpubл. 08.12.70. Бюл. №1.
7. Дудкин В.И. Резервы повышения индикаторной экономичности и пути их реализации в современных тракторных дизелях: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1984.
8. А.с. 1023120А СССР. Способ впрыска топлива в дизель / В.И. Дудкин, Д.Д. Матиевский. Оpubл. 15.06.83. Бюл. №22.
9. А.с. 1087681 СССР. Система питания двигателя внутреннего сгорания / В.А. Вагнер, Д.Д. Матиевский, В.И. Дудкин, А.Л. Новоселов, А.Е. Свстула. Оpubл. 23.04.84. Бюл. №15.
10. Патрахальцев Н.Н., А.С. Камышников, П.Д. Лупачев. Газодизель с внутренним смесобразованием // Автомобильная промышленность. 1991. №8.