

УДК 621.43

Д.В. МЕШКОВ

*Национальный технический университет «ХПИ», Украина*

## ВЛИЯНИЕ МНОГОФАЗНОГО ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА СИСТЕМОЙ COMMON RAIL НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЫСТРОХОДНОГО ДИЗЕЛЯ

Проанализировано влияние параметров впрыскивания топлива аккумуляторной топливной системой на экономические и экологические показатели быстроходного дизеля. Рассмотрены характеристики подачи топлива: давление впрыскивания, угол опережений впрыскивания, цикловая подача: количество фаз подачи топлива и их назначение, массовое соотношение между порциями, рациональные углы подачи.

**аккумуляторная топливная система, дизель, токсичность, многофазное впрыскивание, давление впрыскивания, угол опережения подачи**

### Введение

Мировой опыт проектирования двигателей внутреннего сгорания (ДВС) показывает, что дальнейшее совершенствование экономических и экологических показателей дизелей невозможно без применения электронных систем управления рабочим процессом. В настоящее время практически все ведущие фирмы, которые специализируются на выпуске автотракторных двигателей, ведут научные исследования по изучению и внедрению таких систем. Причем данные системы не ограничиваются управлением топливоподачей, а включают в себя также системы управления турбокомпрессором, автоматической коробкой переключения передач, системой рециркуляции отработавших газов и др. Все это входит в единую систему электронного управления, которая осуществляет комплексное управление транспортным средством на основании показаний датчиков.

Одним из направлений дальнейшего совершенствования показателей топливной аппаратуры является применение многофазного впрыскивания топлива в цилиндр ДВС, что благотворно влияет на экологические показатели двигателя и ведет к значительному снижению уровня его шума [1].

Топливные системы Common Rail (CR) появились в серийном производстве в 1997 году. Они имели такие достоинства как гибкое регулирование

давления, угла опережения впрыскивания и цикловой подачи, отличались также возможностью создания двухфазного впрыскивания [1].

Следует отметить, что в последние годы произошел значительный прогресс в технических показателях топливных форсунок системы CR: повысилось максимальное давление впрыскивания, применены быстродействующие пьезоэлектрические клапаны, увеличены фазы отдельного впрыскивания [2]. Более того, в перспективных топливных системах будет увеличено количество фаз отдельного впрыскивания с целью дальнейшего совершенствования экономических и экологических показателей дизелей [3 – 6].

### 1. Формулирование проблемы

Создание отечественной аккумуляторной топливной системы автотракторного дизеля невозможно без изучения закономерностей влияния параметров топливоподачи на экономические и экологические показатели быстроходных дизелей. Стоит отметить, что в то время как, вопросы влияния давления впрыскивания и угла опережения подачи являются достаточно хорошо изученными в практике отечественного двигателестроения, вопросы, касающиеся изучения многофазного впрыскивания топлива в цилиндр ДВС, только начинают активно

исследоваться. Организации КП «ХКБД», НТУ «ХПИ», ХНАДУ и др. интенсивно занимаются исследованием элементов аккумуляторных топливных систем дизелей.

В настоящий момент на кафедре ДВС НТУ «ХПИ» создана оригинальная конструкция топливной форсунки для данного типа систем. В основу данной разработки положен патент Украины 9799U [7]. Особенностью данной топливной форсунки является использование в качестве исполнительного элемента силового быстродействующего пьезоэлектрического клапана. Такое решение позволяет получить приемлемое значение перемещения исполнительного элемента при малых затратах электрической энергии и относительной простоте конструкции. Дополнительными достоинствами предложенного решения являются относительно низкая стоимость изготовления системы и простота переоснащения как уже эксплуатирующихся двигателей, так и вновь выпускаемых.

Исходя из вышеизложенного, целью работы является определение предварительных значений параметров топливоподачи перспективной топливной системы.

## **2. Влияние параметров топливной аппаратуры на показатели автотракторного дизеля**

Основными параметрами, характеризующими процесс впрыскивания являются давление, угол опережения впрыскивания, характеристики многофазного впрыскивания, тонкость распыливания и распределение топлива в камере сгорания, момент начала сгорания, цикловая подача топлива в зависимости от угла поворота коленчатого вала и нагрузки на двигатель.

Качество подготовки смеси в цилиндре двигателя существенно влияет на удельный эффективный расход топлива, крутящий момент, состав отработавших газов (ОГ) и уровень производимого шума [4].

**2.1. Давление впрыскивания топлива.** При топливоподаче потенциальная энергия давления топлива превращается в кинетическую энергию его струи. Высокий уровень давления впрыскивания

приводит к большей скорости выхода топлива из распыливающих отверстий. Чем выше относительная скорость между подаваемым топливом в цилиндр ДВС и воздухом, а также чем выше плотность воздушного заряда в камере сгорания, тем тоньше осуществляется распыл топлива. Увеличение давления впрыскивания топлива относится к числу редких факторов, с помощью которых можно добиться выполнения противоречивых задач: снижение выбросов  $NO_x$ , уменьшению жесткости сгорания, за счет снижения периода задержки воспламенения и механической нагруженности дизеля с одной стороны, и снижение расхода топлива, выбросов твердых частиц,  $CO$ ,  $CH$  – с другой [1, 2].

Для обеспечения максимального крутящего момента и малой дымности ОГ при низких нагрузках уровень давления впрыскивания топлива для автотракторных дизелей должен находиться в диапазоне 80...140 МПа [4].

Однако важным является не только повышение давления впрыскивания, но и его оптимальное регулирование по режимам работы ДВС [4].

**2.2. Угол опережения впрыскивания (УОВ).** УОВ топлива в камеру сгорания существенно влияет на начало сгорания топливоздушная смеси и вместе с этим – на уровень выброс вредных веществ с отработавшими газами дизелей.

Положение поршня относительно ВМТ при впрыскивании оказывает влияние на смесеобразование наряду с конфигурацией впускного канала, движением воздуха в камере сгорания, его плотностью и температурой [1, 2].

Таким образом, УОВ влияет на уровень выбросов твердых частиц, продуктов неполного сгорания, оксидов азота ( $NO_x$ ).

Оптимальное значение УОВ топлива меняется в зависимости от режима работы двигателя, что требует введения его регулирования [2, 4]. В поле характеристик работы автотракторного дизеля оптимальные значения начала сгорания для достижения низкого расхода топлива находятся в пределах 0...8 град. п.к.в. до ВМТ. С учетом этого факта и ограничений

по выбросам вредных веществ с обработавшими газами требуются следующие УОВ топлива [2].

Двигатели грузовых автомобилей и тракторов с непосредственным впрыскиванием топлива (без рециркуляции ОГ) для выполнения норм EURO-IV должны иметь УОВ: холостой ход – 4...12 градусов до ВМТ; полная нагрузка – от 3...6 градусов до ВМТ до 2-х градусов после ВМТ.

На холодном двигателе УОВ увеличивается на 3...10 градусов поворота коленчатого вала. Продолжительность сгорания при полной нагрузке соответствует 40...60 градусов поворота коленчатого вала.

При значительном увеличении УОВ при начале сгорания поданного топлива, увеличивается работа сжатия цикла. Затраченное на это количество тепла уменьшает индикаторный КПД двигателя и повышает расход топлива. Кроме того, повышенный уровень давлений приводит к увеличению шума работы дизеля. Смещение момента начала сгорания повышает также температуру в камере сгорания, в результате чего увеличивается выброс  $NO_x$  и уменьшается выброс  $CH$  [5]. Уменьшение УОВ способно привести к неполному сгоранию и соответственно к повышению уровня эмиссии несгоревших углеводородов  $CH$ , поскольку температура в камере сгорания двигателя быстро снижается [4].

**2.3. Многофазное впрыскивание.** Проектируемая опытная ТА должна иметь возможность осуществления многофазного впрыскивания. Фазы топливоподачи подразделяются: предварительное впрыскивание (ПВ), основное впрыскивание (ОВ), дополнительное впрыскивание (ДВ) и позднее дополнительное впрыскивание (ПДВ) [4]. Схематичное изображение процесса топливоподачи системой CR представлено на рис. 1.

ПВ предшествует ОВ. Во время ПВ в цилиндр подается небольшая порция топлива (1...2,5 мм<sup>3</sup>), которые при испарении и сгорании обеспечивают увеличение температуры и давления в камере сгорания, что при подаче в цилиндр основной порции топлива уменьшает период задержки воспламенения, снижает уровень шума сгорания, обеспечивает

оптимальное сгорание. Расстояние между ПВ и ОВ для легковых дизелей составляет 5...15 град. п.к.в., а для грузовых 6...12 град. п.к.в. до начала ОВ [4]. Угол начала подачи ПВ может составлять до 90 град. п.к.в. до ВМТ. Помимо этого, расстояние между ПВ и ОВ и их количественное соотношение может меняться в зависимости от режима работы дизеля, что также является оптимизационным параметром при создании перспективной ТА.

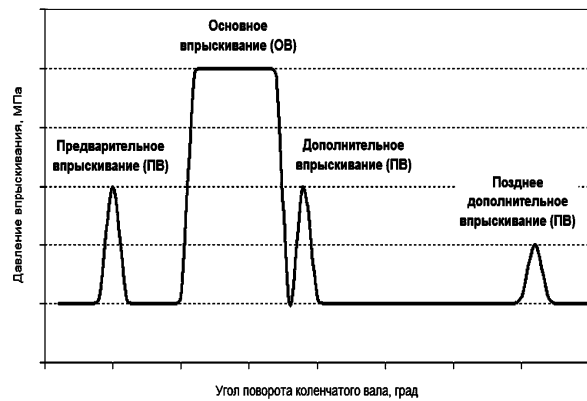


Рис. 1. Схема топливоподачи системой CR

Следует различать два режима работы дизеля, где применение ПВ преследует различные цели: на режимах частичной нагрузки для снижения шума сгорания и ограничения сажеобразования и на режимах, близких к полной нагрузке для снижения выбросов  $CH$ , снижения шума сгорания. Взаимосвязь с параметрами работы дизеля ПВ представлена в табл. 1.

Таким образом, можно выделить следующие позитивные эффекты применения ПВ:

- сокращение периода задержки воспламенения;
  - повышение среднего эффективного давления в цилиндре;
  - значительное снижение уровня шума работы дизеля за счет уменьшения величины приращения давления и снижения максимального давления цикла.
- При этом к ПВ предъявляются такие требования:
- отсутствие влияния ПВ на ОВ за счет колебаний давления в топливном аккумуляторе и соединительном трубопроводе;
  - по возможности меньшая порция топлива, подаваемая во время ПВ (1...2,5 мм<sup>3</sup>).

Следует также учитывать, что чрезмерно раннее ПВ увеличивает шум сгорания, а слишком большая порция ПВ увеличивает выброс твердых частиц (ТЧ).

Таблица 1

Взаимосвязь ПВ с параметрами работы дизеля

Цикловая подача ПВ	Частичная нагрузка	Полная нагрузка
	около 1 мм <sup>3</sup> /цикл	до 2,5 мм <sup>3</sup> /цикл
Расстояние между ПВ и ОВ 20...30 град. п.к.в.	Выброс ТЧ: ↓ Шум работы: ↓ Выброс СН: ↑ Выброс СО: ↑ Выброс NO <sub>x</sub> : ↑	Выброс ТЧ: ↓ Шум работы: ↓

ОВ оказывает значительное влияние на процесс сгорания топлива. Организация ОВ должна обеспечивать следующие параметры работы дизеля:

- достижение максимального крутящего момента;
- незначительные выбросы ВВ с ОГ;
- Возможно низкий расход топлива;
- низкий уровень шума сгорания.

Для достижения данных целей к топливной системе предъявляются следующие требования:

- обеспечение стабильности момента начала впрыскивания;
- точное дозирование цикловой подачи;
- оптимальная длительность впрыскивания;
- оптимальное распределение топлива по объему камеры сгорания дизеля.

Следует отметить, что уменьшение УОВТ ОВ снижает выброс NO<sub>x</sub>. Так, например, слишком позднее впрыскивание увеличивает выброс СН и расход топлива. Важно отметить, что отклонение начала впрыскивания ОВ от нужной величины на 1 град. п.к.в. до 15% повышает выброс NO<sub>x</sub> и СН.

ДВ осуществляется через 1...5 град. п.к.в. после завершения ОВ, что происходит при еще продолжающемся сгорании топлива в цилиндре (до 200 град. п.к.в. после ВМТ). Обычно ДВ выполняется через 120...180 град. п.к.в. после ВМТ. При этом сжигаются частицы образовавшейся сажи, что приводит к уменьшению ее выбросов на 20...70% [4].

Топливо, подаваемое во время ПДВ, применяется как восстановитель для действия нейтрализатора NO<sub>x</sub>, либо же для увеличения температуры ОГ для регенерации твердых частиц в сажевом фильтре [8]. Осуществляется ПДВ во время рабочего хода или выпуска через 90...180 град. п.к.в. по окончании ОВ. Топливо, поданное за ПДВ в цилиндр ДВС не сгорает, а испаряется под воздействием высокой температуры и выбрасывается с ОГ. Газообразная смесь из ОГ и испаренного топлива направляется в нейтрализатор NO<sub>x</sub>, где топливо служит восстановителем этих оксидов. Недостатком данного мероприятия является то, что топливо, подаваемое во время ПДВ, может приводить к разжижению моторного масла.

При осуществлении ПДВ должен быть достигнут компромисс между процессами испарения и сгорания топлива, а именно:

- в случае слишком раннего ПДВ после ОВ, топливо частично сгорает, чем значительно ухудшаются экологические показатели двигателя;
- в случае если расстояние между ОВ и ПДВ слишком велико, то температура в цилиндре двигателя недостаточна для испарения топлива и система каталитической нейтрализации ОГ не работает.

Требования к ПДВ:

- точное дозирование топлива;
- суммирование подачи из нескольких отдельных впрыскиваний на отдельных рабочих тактах;
- обеспечение момента впрыскивания, таким образом, чтобы топливо было хорошо подготовлено для работы в катализаторе, но не сгорало в цилиндре.

### 3. Давление топлива в аккумуляторе

Давление топлива в аккумуляторе в системах СР является оптимизационным параметром. Данный параметр оказывает влияние на следующие характеристики дизеля: шум сгорания; выброс твердых частиц; выброс СН и NO<sub>x</sub>.

В табл. 2 показано влияние давления топлива в аккумуляторе на перечисленные характеристики.

Таблица 2

Влияние давления топлива в аккумуляторе на характеристики дизеля

Цикловая подача ПВ	Повышение давления топлива в аккумуляторе	Понижение давления топлива в аккумуляторе
Выброс $NO_x$	↑	↓
Выброс $CH$	↓	↑
Выброс ТЧ	↓	↑
Шум работы	↑	↓

Следует отметить, что ведущие мировые производители ТА, такие как Robert Bosch GmbH и Siemens AG, пошли по пути дальнейшего увеличения фаз впрыскивания топлива. Так в последних образцах ТА фирмы Bosch реализовано до 10 отдельных фаз впрыскивания [6]. Декларируется, что данное мероприятие позволяет добиться снижения вредных выбросов на 15...20%. Помимо этого ОВ может быть выполнено следующим образом: ступенчатое повышением давления при интенсификации топливоподачи, либо с пологим началом впрыскивания, крутой основной фазой и резким окончанием подачи [1].

### Заключение

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Давление впрыскивания топлива в цилиндр ДВС должно находиться в пределах 80...140 МПа.
2. Значение УОВТ должно составлять: холостой ход – 4...12 град. до ВМТ; полная нагрузка – от 3...6 град. до ВМТ до 2-х град. после ВМТ.
3. При запуске холодного двигателя необходимо увеличивать УОВТ на 3...10 град. п.к.в.
4. Показана необходимость таких мероприятий как предварительное, дополнительное и позднее дополнительное впрыскивание.
5. Предварительное впрыскивание топлива должно происходить за 6...12 град. п.к.в. до начала основного впрыскивания (до 90 град. п.к.в. до ВМТ).
6. Для снижения выбросов сажи осуществляется дополнительное впрыскивание через 1...5 град. п.к.в. после завершения основного впрыскивания.

7. Для улучшения работы нейтрализатора ОГ, через 90...180 град. п.к.в. по окончании основного впрыскивания, осуществляется позднее дополнительное впрыскивание.

### Литература

1. Иващенко Н.А., Вагнер В.А., Грехов Л.В. Дизельные топливные системы с электронным управлением. – Барнаул: АлтГТУ, 2000. – 111 с.
2. Robert Bosch GmbH. Dieselmotor-Management, vollständige überarbeitete und erweiterte Auflage, 2002. – 443 s.
3. Марченко А.П., Мешков Д.В., Рыкова И.В., Тенденции развития форсунок аккумуляторных топливных систем типа Common Rail // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукраинский научн.-техн. журн. – 2005. – № 1. – С. 68-74.
4. Maier R., Projahn U., Krieger K. Anforderungen an Einspritzsysteme für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. Teil 1 // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 2002. – Vol. 63, № 9. – S. 658-673.
5. Maier R., Projahn U., Krieger K. Anforderungen an Einspritzsysteme für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. Teil 2 // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 2002. – Vol. 63, № 10. – S. 856-860.
6. Böcking F., Dohle U., Hammer J. Pkw-Common-Rail-Systeme für künftige Emissionsanforderungen // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. – 2005. – Vol. 66, № 7-8. – S. 552-557.
7. Пат. 9799 U України, F02M51/06, F02M47/00. Паливний інжектор / В.С. Коваль, В.В. Лаврінченко, А.П. Марченко, Д.В. Мешков, В.М. Хорунжий. – № u200503134; Заявл. 05.04.2005; Опубл. 17.10.2005 Бюл. № 10/2005.
8. Tsuzuki M., Tahara J., Sugiyama T. Field Trial for Diesel Passenger Cars with DPNR // Auto Technology. – 2003. – № 4. – S. 70-74.

Поступила в редакцию 13.06.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Г. Дьяченко, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.