

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАЛОТОКСИЧНОГО РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ФОРСИРОВАННЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Тер-Мкртичян Г.Г.¹, Мазинг М.В.¹, Ветошников А.Г.¹

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ)», (125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2), e-mail: georg@nami.ru

В статье проведен анализ методов осуществления малотоксичного рабочего процесса дизельного двигателя топливоподающей аппаратурой. Описан ряд основных мероприятий по оптимизации и улучшению рабочего процесса в цилиндре дизельного двигателя: многофазное впрыскивание для повышения эффективности управления протеканием процесса сгорания топлива в цилиндре двигателя, управление давлением впрыска для увеличения интенсивности подачи топлива, регулирование угла опережения впрыска топлива для удовлетворения требований, касающихся полноты сгорания топлива. Анализ показал, что наиболее эффективными способами снижения содержания вредных выбросов в отработавших газах при максимально возможном улучшении экономических и энергетических показателей являются повышение давления впрыска топлива с его регулировкой по режимам работы дизельного двигателя, управление характеристикой впрыска и возможность управления углом опережения впрыска топлива.

Ключевые слова: малотоксичный рабочий процесс, топливная система, отработавшие газы, дизельные двигатели.

PROVIDING THE CLEAN BURN PROCESS OF ADVANCED HIGH-POWER DIESEL ENGINES

Ter-Mkrtichian G.G.¹, Mazing M.V.¹, Vetoshnikov A.G.¹

¹State research Centre of Russian Federation – “Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute (NAMI)”, (125438, Moscow, 2, Avtomotornayast.), e-mail: georg@nami.ru

The article analyzes the methods of clean burn diesel engine processing by fuel-injection equipment. It describes a number of basic measures to optimize and improve the engine cycle in the diesel engine cylinder: multi-phase fuel injection to improve the efficiency of the flow of combustion in the engine cylinder, control injection pressure to increase the flow rate of the fuel, control the angle of injection of fuel to meet the requirements for complete combustion of fuel. The analysis showed that the most effective ways of reducing emissions in the exhausted gases at the maximum possible improvement of the economic and energy indicators are increasing the injection pressure of the fuel to its adjustable operating modes of diesel, injection control feature and the ability to control the angle of injection of fuel.

Keywords: clean burn process, fuel system, exhaust gas, diesel engines.

Введение

С каждым годом законодательные нормативы по ограничению выбросов вредных веществ становятся более жесткими. Поэтому приоритетным направлением в двигателестроении является осуществление малотоксичного рабочего процесса. Управление процессами впрыска, распыливания топлива и параметрами воздушного заряда в цилиндре, а именно температурой, давлением, скоростью движения в камере сгорания, позволяет обеспечить малотоксичный процесс сгорания, снижая содержание вредных выбросов в отработавших газах при максимально возможном улучшении экономических и энергетических показателей.

Компоненты вредных выбросов для дизелей можно разделить на две группы: продукты полного сгорания, к которым в первую очередь относятся оксиды азота NO_x и

продукты неполного сгорания, т.е. твердые или дисперсные частицы РТ. Организация рабочего процесса в цилиндре двигателя, принцип его работы, конструкция и регулировка систем питания, топливоподачи и снабжения воздухом определяют содержание этих компонентов в отработавших газах[1].

По оптимизации и улучшению рабочего процесса в цилиндре дизеля существует ряд основных мероприятий: многофазный впрыск, управление формой характеристики и моментом начала впрыска топлива, обеспечение рециркуляции отработавших газов, уменьшение интенсивности воздушного вихря в камере сгорания, повышение давления впрыска, качества распыливания топлива и улучшение формы струй.

Весомая часть способов совершенствования дизелей в целях улучшения их экологических показателей относится к топливоподаче и топливоподающей аппаратуре.

Для достижения комплексного снижения токсичности отработавших газов дизеля при сохранении или даже улучшении достигнутых показателей топливной экономичности необходимы качественно новые функции топливоподающей системы, отсутствующие или недостаточно эффективно реализованные в существующей аппаратуре традиционного типа. Перспективные нормативные ограничения («ЕВРО-5» и выше) требуют качественной организации процесса сгорания в каждом цилиндре дизеля, на каждом рабочем цикле и на всех режимах его работы, в том числе и на неустановившихся [5].

Функции дизельных топливоподающих систем традиционного типа заключаются, главным образом, в определении того, сколько топлива подать за цикл и в какой период времени. В то время как для перспективных систем, предназначенных для снижения токсичности отработавших газов дизелей в соответствии с требованиями наиболее строгих стандартов, всё более актуальными становятся также вопросы каким образом подать это топливо [2].

Достигать необходимых результатов возможно путем изменения параметров рабочего процесса в цилиндре дизеля, управляя моментом начала впрыска, его продолжительностью и интенсивностью, поскольку процессы впрыска топлива, смесеобразования и начала сгорания происходят практически одновременно в современном дизеле. Более того, многие перспективные устройства очистки отработавших газов от вредных веществ функционируют непосредственно вместе с работой топливной системы.

Управление давлением впрыскивания по режимам работы дизелей

Повышение давления впрыска увеличивает интенсивность подачи топлива, что является одним из самых эффективных методов сокращения продолжительности подачи одного и того же объёма топлива в камеру сгорания. Улучшение качества распыливания топлива ускоряет его выгорание в диффузионной фазе процесса, что также является

показателем положительного влияния повышения давления впрыска на показатели рабочего процесса дизеля.

При анализе влияния давления впрыска на показатели дизеля эффективность его повышения показываются в виде диаграмм (рисунок 1). Определённый предел снижения токсичности отработавших газов соответствует конкретному уровню давления впрыска. При достижении этого предела, воздействуя на рабочий процесс дизеля, одновременное снижение эмиссии NO_x и РТ возможно только при повышении давления и соответствующей оптимизации прочих параметров рабочего процесса.

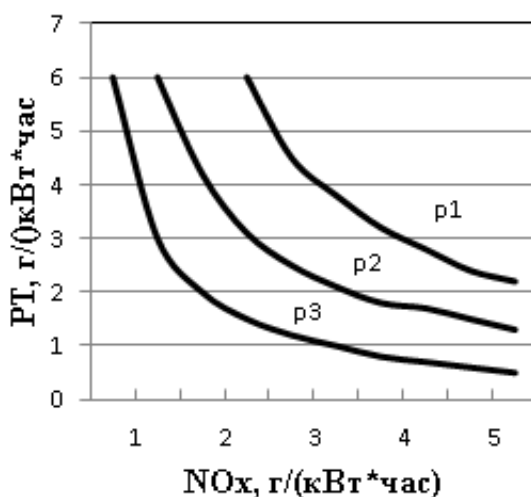


Рисунок 1–Влияние давления впрыска топлива на уровень выбросов вредных веществ

Очевидно, что увеличение давления влечет за собой соответствующие изменения продолжительности впрыска, тонкости распыливания топлива, расстояния действия топливных факелов распыливания, поэтому при значительном повышении давления улучшение показателей дизеля в целом предполагает значительную модернизацию двигателя. Существенное изменение конструкции двигателя подразумевает изменение размеров и формы камеры сгорания, впускных каналов в головке цилиндра, механизма соплового отверстия распылителя, а также некоторых вспомогательных систем. Помимо этого, из-за многократного увеличения нагрузки, необходимо применение более энергоёмкого привода при повышении динамических показателей топливоподающей системы. Таким образом, неэффективно и нецелесообразно значительное повышение динамических параметров впрыска топлива в дизеле, не оптимизируя при этом другие соответствующие системы и агрегаты.

Также к недостаткам традиционной топливоподающей аппаратуры можно отнести зависимость давления впрыска от частоты вращения и нагрузки. При постоянном изменении давления впрыска показатели топливной системы двигателя значительно ближе к

оптимальным значениям, чем при постоянном давлении. Но при этом остается нерешенным вопрос об обеспечении наилучшей зависимости давления впрыска от частоты вращения вала, цикловой подачи и ряда других режимных параметров. Зачастую производители ДВС сталкиваются с проблемой нахождения оптимальной зависимости для давления впрыска, определить которую достаточно тяжело. Так, при доводке дизеля удобнее применять топливную аппаратуру, построенную на базе штатной, при этом она не обязательно должна быть типа Common-Rail[3].

В действительности достаточно сложно сформулировать конкретный вывод о законе протекания кривых давления впрыска. Соответственно, он будет изменяться для различных двигателей, в зависимости от различных целевых функций и важнейших технических требований к ним.

Управление формой характеристики впрыска топлива

Задача по формированию наиболее оптимальной характеристики впрыска является сегодня одной из приоритетных, и все современные дизельные топливоподающие системы имеют возможность управлять формой этой характеристики и разделять дозы впрыскиваемого топлива на несколько частей с регулированием фазового интервала между ними в течение одного цикла.

При рабочем процессе дизеля, не включающем предварительного впрыска (пилотного), основной объем топлива воспламеняется медленно. По этой причине актуально применение пилотного впрыска сверхмалого объема топлива (1...3 мм³), который характеризуется протеканием предпламенных химических реакций даже при отсутствии видимого сгорания, непосредственно перед подачей основной дозы топлива. За счет распространения в центре камеры сгорания вблизи соплового отверстия распылителя нестабильных продуктов неполного окисления топлива, таких как гидроперекиси, альдегиды, топливо воспламеняется гораздо быстрее в такой химической среде.

При отсутствии предварительной подачи видимое сгорание в цилиндре происходит с большей задержкой после начала впрыскивания, топливо, распределенное по объему камеры сгорания, воспламеняется одновременно во многих местах. Характерный для дизелей с объемным смесеобразованием «жесткий» рабочий процесс имеет повышенное содержание NO_x в отработавших газах, так как течение начальной фазы этого процесса мало зависит от формы характеристики впрыскивания и характеризуется, как правило, высокой скоростью. Поэтому снижение задержки воспламенения с помощью предварительного впрыска ведёт к тому, что тепловыделение в фазе «быстрого» сгорания происходит более плавно, по мере поступления топлива в цилиндр. И подбором оптимальных параметров предварительного впрыска на большинстве режимов можно заметно снизить содержание токсичных веществ в

отработавших газах (преимущественно NO_x) и уровень шума дизеля, не ухудшив при этом его топливную экономичность (рисунок 2).

Временной фактор (величина интервала между предварительной и основной подачами) определяет степень окисления предварительно поданного топлива, то есть химическую активность среды, в которую будет производиться впрыскивание основной порции.

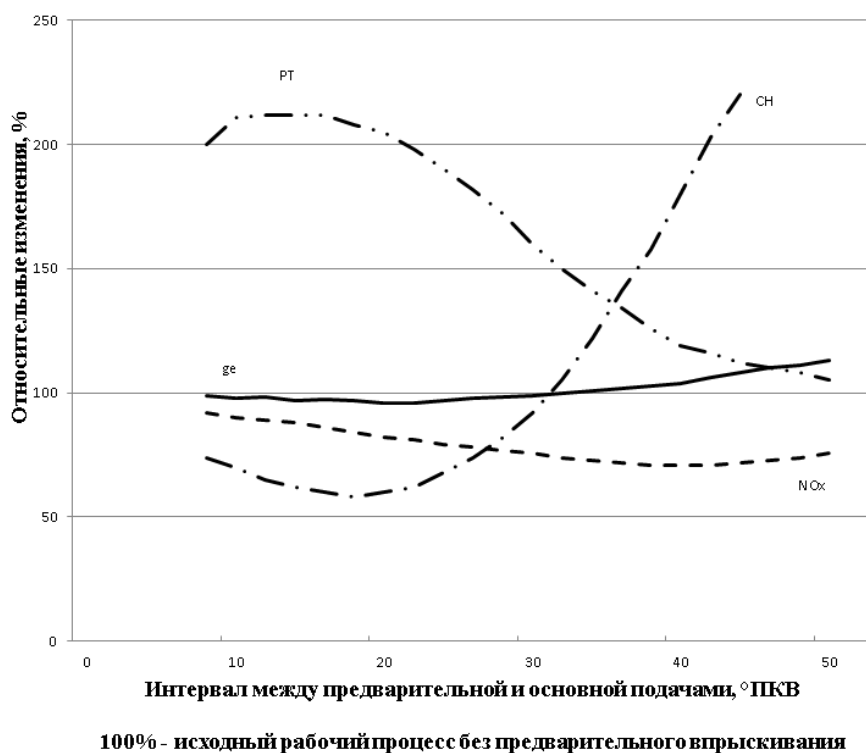


Рисунок 2 – Влияние величины интервала между предварительной и основной подачами на выбросы вредных веществ с ОГ в дизеле

В последнее время для дальнейшего повышения эффективности управления протеканием процесса сгорания топлива в цилиндре двигателя применяются многофазные характеристики впрыска с разделением процесса впрыскивания на 4...6 фаз.

На многофазной характеристике впрыска можно выделить несколько характерных участков (рисунок 3).

1. Ранний предварительный впрыск сверхмалых объёмов топлива для снижения периода задержки воспламенения основной подачи и снижения уровня шума от процесса сгорания. Момент впрыскивания этой дозы устанавливается в диапазоне от 90° до 10° перед ВМТ.
2. Поздний предварительный впрыск малой дозы топлива для снижения выбросов вредных веществ и уменьшения шума процесса сгорания. Момент впрыскивания этой дозы - от 40° перед ВМТ до 0° .

3. Плавное нарастание интенсивности впрыска основной дозы топлива. Момент начала основного впрыскивания устанавливается в диапазоне от 25° перед ВМТ до 15° после ВМТ.
4. Короткое интенсивное поствпрыскивание для интенсификации окисления продуктов неполного сгорания топлива на завершающих стадиях рабочего процесса в цилиндре, а также в окислительном нейтрализаторе. Момент начала впрыскивания устанавливается в диапазоне 50...75° после ВМТ.
5. Поздний впрыск (на такте выпуска) для периодического восстановления оксидов азота в нейтрализаторе DeNO_x. Момент начала впрыскивания устанавливается в диапазоне от 120 до 220° после ВМТ.

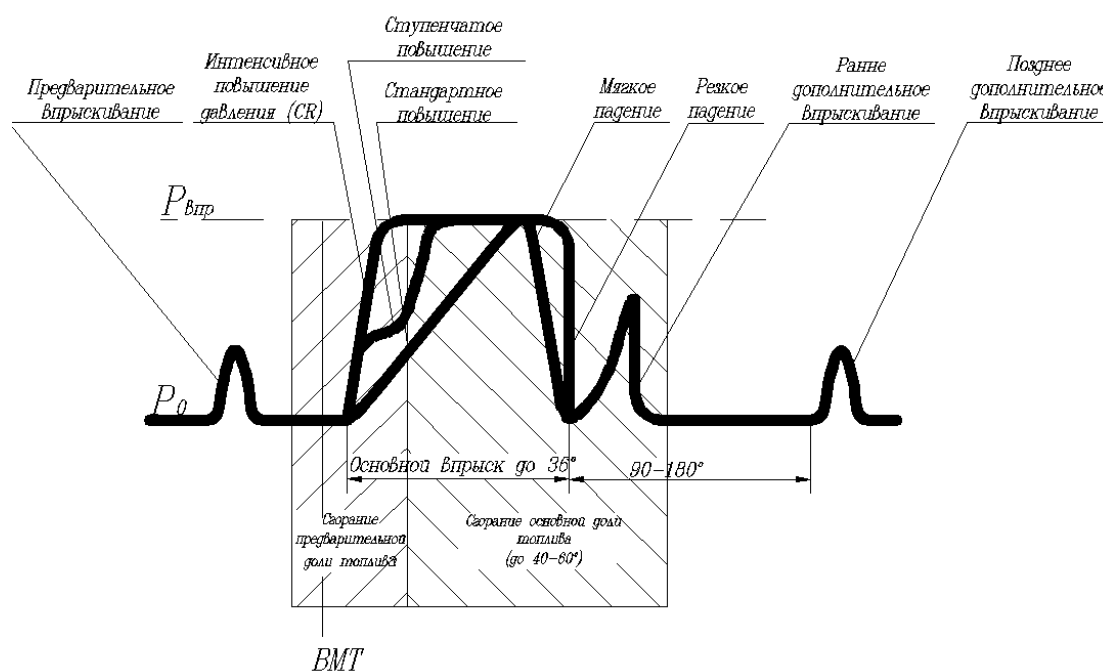


Рисунок 3–Многофазная характеристика впрыскивания

Управление углом опережения впрыска топлива

Момент начала впрыска топлива в камеру сгорания дизеля относительно момента достижения поршнем в данном цилиндре ВМТ также оказывает влияние и на показатели экономичности дизеля, и на параметры токсичности его отработавших газов.

Раннее относительно ВМТ впрыскивание (на линии сжатия) приводит к повышению температуры в цилиндре в начале сгорания за счёт сжимающего действия поршня и за счёт выделения теплоты от сгорания топлива. Это способствует более интенсивному и полному выгоранию топлива, за счет чего показатели топливной экономичности повышаются происходит снижение выбросов продуктов неполного сгорания с отработавшими газами. Такое «жёсткое» начало процесса сгорания обуславливает повышенное содержание NO_x в отработавших газах при высокой концентрации окислителя. Поздний впрыск, когда большая его часть происходит после ВМТ (на линии расширения), приводит к снижению «жёсткости»

начальной стадии процесса сгорания, при этом выбросы NO_x уменьшаются, но одновременно снижается и полнота сгорания топлива. Понижение температур цикла и уменьшение времени, отводимого на процессы смесеобразования и сгорания, ухудшают показатели топливной экономичности и повышают содержание продуктов неполного сгорания топлива в отработавших газах.

Исходя из необходимости одновременного снижения выбросов NO_x и продуктов неполного сгорания топлива при сохранении или даже улучшении показателей топливной экономичности дизеля, требования к моменту начала впрыска при изменении нагрузочного режима работы дизеля становятся всё более противоречивыми. Так, для снижения выбросов NO_x необходим более поздний впрыск (возможно даже после ВМТ), который не приводит к резким повышениям температуры и давления в процессе сгорания. В то же время для повышения полноты сгорания топлива (обеспечивающей низкое содержание продуктов неполного сгорания в отработавших газах и высокие показатели топливной экономичности) необходим оптимальный ранний впрыск для интенсификации сгорания и увеличения продолжительности периода между завершением впрыска и открытием выпускных клапанов.

Осуществление позднего впрыска топлива для снижения выбросов NO_x в дизеле не сложно, однако для получения комплекса высоких показателей требуется также удовлетворение и других требований, касающихся полноты сгорания топлива. Стоит отметить также необходимость установки момента начала подачи индивидуально для каждого режима работы дизеля.

Анализ технических характеристик современных дизелей показывает, что указанное увеличение продолжительности периода между завершением впрыска и открытием выпускных клапанов достигается некоторым сокращением продолжительности процесса впрыскивания и уменьшением частоты вращения коленчатого вала. Например, номинальная частота вращения коленчатого вала автотранспортных дизелей с рабочим объёмом цилиндра $V_h = 2$ л, соответствующих требованиям стандартов свыше «ЕВРО-2», не превышает 1900 мин^{-1} [4]. Значительное влияние временного фактора на рабочий процесс дизеля подтверждается также и тем, что наилучшие показатели топливной экономичности дизелей достигаются на средних скоростных режимах, где интервал времени, отводимый на процессы смесеобразования и сгорания топлива, достаточно велик.

Выводы

Для осуществления малотоксичного рабочего процесса с пониженным содержанием вредных выбросов в отработавших газах необходимо:

- поэтапное повышение максимальных давлений впрыска в соответствии с ужесточением экологических норм;

- расширение функций топливной системы по управлению рабочим процессом двигателя для каждого нагрузочного и скоростного режима двигателя с регулированием формы характеристики топливоподачи в фазе впрыскивания (ступенчатой, прямоугольной, трапециевидной формы);
- разделение процесса впрыска на несколько фаз, включая управляемое впрыскивание малых доз топлива до и после основной дозы для снижения шума и дожигания органических компонентов и обеспечения работы нейтрализатора типа DeNO_x;
- гибкое управление фазами впрыска в зависимости от режима работы;
- максимально возможное снижение неравномерности подачи топлива по цилиндрам и, при необходимости, отключение цилиндров по программе;
- самодиагностика топливной системы.

Список литературы

1. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и система управления дизелей: учебник для вузов. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344с.
2. Курманов В.В., Мазинг М.В. Дизельная топливная аппаратура нового поколения для обеспечения экологических норм // Автомобили и двигатели: сб. науч. трудов. Вып. 236. - М. : Изд. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2006. - С. 62-68.
3. Мазинг М.В., Курманов В.В. Топливная аппаратура для автомобильных дизелей экологического класса IV // Труды НАМИ. – 2013. - № 252. – С. 32-42.
4. Тер-Мкртчян Г.Г. Управление движением поршней в двигателях внутреннего сгорания. – М. :Металлургиздат, 2011. – 304 с.
5. W. AddyMajewski, HannuJääskeläinen Engine Design for Low Emissions [Электронный ресурс] // DieselNet Technology Guide: Technical reference papers on diesel engine and emission technologies: сайт. – URL: http://www.dieselnet.com/tech/engine_design.php (дата обращения: 26.08.2013).

Рецензенты:

Каменев В.Ф., д.т.н., профессор, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г.Москва.

Сайкин А.М., д.т.н., ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г.Москва.