

ПУТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

к.п.н. Стрельцов Р.В., к.т.н. Бердников А.А., к.т.н. Васильев В.Г.,

к.т.н. Дюнов В.А., к.п.н. Мельников Е.И., Ладанов В.И.

Пермский военный институт войск национальной гвардии России, Пермь, Россия

Streltsov86@rambler.ru

В статье рассматриваются вопросы, связанные с предназначением системы питания топливом дизельных двигателей, представлены требования, предъявляемые к данной системе. Проводится анализ способов усовершенствования топливных систем дизельных двигателей. Описывается принцип работы топливного насоса высокого давления, который обеспечивает точное дозирование топлива в соответствии с режимом работы двигателя и подает его в установленный момент в форсунку с заданной интенсивностью. Специальные устройства для завихрения топлива в камере сгорания, пленочное смесеобразование, наддув и другие вносят большое разнообразие в требования, предъявляемые к распределению топлива во времени и в пространстве. Удовлетворение этих требований является сложной и трудоемкой задачей, одним из таких устройств является форсунка. Форсунка непосредственно осуществляет распыливание топлива в камере сгорания дизеля под воздействием импульса давления, сформированного топливного насоса высокого давления. Выполнить изменяющиеся требования к характеристике впрыска можно в случае, если конструкция топливной системы будет соответствующим образом изменена. В первую очередь необходимо устранить существенные недостатки, присущие современным топливным системам, а именно: некоторые несоответствия принципа действия отдельных элементов топливной системы условиям протекания рабочего процесса дизеля; неудовлетворительное распределение топлива во времени; нестабильность начальных условий. В статье представлено разработанное устройство для отключения подачи топлива к форсунке, обеспечивающее возможность отвода топлива, не поступившего в цилиндр двигателя в результате просачивания между деталями распылителя форсунки и отключение подачи топлива к форсунке при отключении цилиндра двигателя с целью улучшения качественных характеристик топливной системы дизельных двигателей.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, система питания, топливный насос высокого давления, форсунка, усовершенствование, цилиндр двигателя, золотниковый распределитель.

Введение

Характерной особенностью настоящего периода развития современного двигателестроения является увеличение надежности серийных двигателей, улучшение их пусковых качеств, увеличение топливной экономичности. Автомобильный двигатель прошел длительный путь развития и с технической точки зрения является весьма совершенным. Однако ранее большее внимание в процессе его совершенствования уделялось достижению максимальной мощности, малой массы и габаритов двигателя, минимальных производственных затрат. В настоящее время как важнейший критерий оценки двигателя выступает минимизация потребления им топлива.

Снижение потребления топлива достигается не просто, и, кроме того, оно может оказывать неблагоприятное влияние на другие параметры двигателя. Ввиду увеличивающегося потребления нефти вследствие постоянного

роста моторизации возникла необходимость более экономно расходовать имеющиеся запасы ископаемого топлива и энергично искать его заменители, особенно для использования в автомобильной технике.

Система питания топливом дизельного двигателя предназначена для:

- хранения запаса топлива, его очистки от воды и различных механических примесей;
- строгого дозирования топлива в соответствии с режимом работы двигателя и цикловой подачей порции топлива в цилиндры в соответствии с порядком работы;
- подачи топлива в цилиндр на определенном участке рабочего цикла по заданному закону;
- равномерного распределения топлива по камере сгорания в соответствии с принятым законом смесеобразования.

Ко всем системам питания топливом дизельных двигателей предъявляются следующие требования:

- минимальная стоимость и масса, высокая технологичность. В настоящее время стоимость автомобильного дизеля еще значительно выше стоимости соответствующего карбюраторного двигателя, в том числе в результате наличия топливной аппаратуры;

- стабильность показателей подачи топлива в течение всего срока эксплуатации, недопустимость самопроизвольного впрыска и подсекания топлива;

- удобства обслуживания, ремонта, регулирования;

- обеспечение максимального ресурса в пределах ресурса двигателя. Ресурс топливной аппаратуры быстроходных дизелей достигает 5–10 тыс. ч. [2];

- автоматическое изменение подачи насосом и угла опережения впрыска топлива в зависимости от окружающей среды, теплового состояния двигателя;

- минимальная неравномерность подачи топлива по цилиндрам и по циклам;

- минимальный собственный уровень шума (менее 80 Дб на расстоянии 1 м.) и уменьшение уровня шума самого двигателя;

- обеспечение устойчивой работы и распыливания топлива на режимах малых нагрузок и при пуске;

- возможность прокачки системы для удаления воздушно-паровых пробок;

- обеспечение необходимых динамических качеств двигателя на переходных режимах работы;

- виброустойчивость и герметичность для предупреждения потерь топлива и попадания пыли, воды и воздуха;

- минимальная токсичность и дымность отработавших газов [2, 4].

Цель исследования

Разработка устройства, обеспечивающего возможность отвода топлива, не поступившего в цилиндр двигателя в результате просачивания между деталями распылителя форсунки, с целью улучшения качественных характеристик топливной системы дизельных двигателей.

Материалы, методы исследования и обсуждение результатов

Система питания дизеля включает в себя совокупность приборов, обеспечивающих дозированную подачу топлива в цилиндры в соответствии с режимом работы двигателя.

Смесеобразование в дизеле состоит в последовательном осуществлении процессов распыливания, прогрева и испарения топлива, а также смешивания его паров с воздухом. При этом совершенство подготовки рабочей смеси, скорость и полнота ее последующего сгорания в наибольшей степени зависят от микро- и макроструктуры заряда, а также вихревого движения воздуха в камере.

Процесс распыливания представляет собой сложное явление и заключается в дроблении топлива на мелкие капли вследствие начальных возмущений, возникающих при движении струи в каналах распылителя, и под влиянием сил аэродинамического сопротивления разовой среды, в которую вводится топливо. Начальные возмущения струи вызваны шероховатостью и вибрацией стенок соплового отверстия и в значительной степени зависят от скорости истечения топлива, а также от геометрической формы каналов.

С повышением скорости истечения, во-первых, усиливаются возмущения в струе топлива, приводящие к возникновению вихревых движений внутри струи и на ее периферии, а во-вторых, возрастает воздействие аэродинамических сил на поверхность струи. В результате совместного влияния указанных факторов струя начинает распадаться на отдельные нити и крупные капли, которые под влиянием сил аэродинамического сопротивления принимают форму колец с тонкой пленкой в средней части. Впоследствии эти пленки дробятся на мелкие капли, а кольца распадаются. Дробление капель продолжается до тех пор, пока силы поверхностного натяжения не станут больше суммарных сил, вызывающих распад струи.

В процессе дробления струя теряет резко очерченный контур и начинает «размываться» принимая форму конусного факела, состоящего из отдельных капелек топлива [5].

Таким образом, определяющим условием дробления струи топлива и осуществления тонкого распыливания является повышение скорости истечения из сопла распылителя. Тонкость же распыливания зависит от диаметра сопла распылителя и отношения длины соплового отверстия к его диаметру.

Процесс впрыска топлива осуществляется в результате совместной работы топливного насоса высокого давления и форсунки.

Топливный насос высокого давления обеспечивает точное дозирование топлива в соот-

ветствии с режимом работы двигателя и подает его в установленный момент в форсунку с заданной интенсивностью. Истечение топлива из форсунки при открытой игле осуществляется за счет его вытеснения плунжером. Необходимое значение скорости плунжера обеспечивается профилем кулачка насоса.

В реальных условиях давления и характеристика впрыска топлива, задаваемые профилем кулачка, существенно искажаются вследствие влияния дросселирования топлива во впускных и отсечных отверстиях втулки плунжера, а также вследствие утечки топлива из надплунжерного пространства, которая особенно заметна при работе двигателя на малых частотах вращения. Для того чтобы уменьшить отрицательное влияние этого фактора, плунжерные пары изготавливают с высокой точностью, обеспечивая зазор в пределах 0,6–2 мкм, и проверяют на гидравлическую плотность (ГОСТ 9927-71).

В процессе эксплуатации вследствие разного изнашивания плунжерной пары ее гидравлическая плотность снижается, что отрицательно сказывается на характеристике впрыска. Вместе с тем следует отметить, что наиболее существенное влияние на ресурс плунжерных пар оказывает степень очистки топлива от абразивных частиц, что необходимо в первую очередь учитывать при эксплуатации.

Кроме того, работоспособность топливного насоса зависит от плотности торцовых стыков между втулкой и седлом нагнетательного клапана, а также между втулкой и головкой насоса. Существенным также является влияние сжимаемости топлива и упругих деформаций топливопроводов высокого давления.

Большое влияние на характеристику впрыска и особенно на ее начальную и конечную фазы оказывает разгрузка топливопровода высокого давления, которая осуществляется с помощью нагнетательных клапанов. Нагнетательный клапан разобщает топливопровод от надплунжерного пространства после окончания подачи топлива и сохраняет в нем определенное остаточное давление.

Однако наличие нагнетательного клапана способствует возникновению в топливопроводе интенсивных колебательных процессов, которые снижают скорость посадки иглы форсунки и даже могут вызывать «подвпрыски» топлива. Поэтому конструкцией нагнетательных клапанов предусмотрено разгрузочное действие, за

счет которого после разобщения нагнетательного провода обеспечивается увеличения его объема и более резкое падение давления у форсунки. Разгрузочный ход клапана определяет величину остаточного давления в топливопроводе, которое в значительной степени влияет на характеристику впрыска. С повышением остаточного давления увеличивается давление впрыска, но замедляется скорость посадки иглы форсунки и появляется возможность дополнительных впрысков.

Учитывая влияние остаточного давления на характеристику и стабильность впрыска, параметры и работа нагнетательного клапана и его пружины должны подвергаться объективному контролю при сборке насосов и в процессе их эксплуатации.

Существенное влияние на стабильность и равномерность цикловых подач оказывает объем и состояние внутренних поверхностей топливопроводов высокого давления. Поэтому для контроля идентичности гидравлического сопротивления их проливают на стенде постоянной подачи (ГОСТ 8519-73).

Равномерность подачи топлива по цилиндрам двигателя обеспечивается идентичностью конструктивно регулировочных параметров топливного насоса, нагнетательного трубопровода и форсунки. Основным средством обеспечения высокой степени равномерности подачи топлива в отдельные цилиндры является уменьшение чувствительности насосной секции к изменению гидравлического сопротивления нагревательного тракта.

Как было сказано выше, форсунка непосредственно осуществляет распыливание топлива в камере сгорания дизеля под воздействием импульса давления, сформированного ТНВД.

Для обеспечения качественного распыления топливный насос высокого давления создает импульс давления, характеризующийся значительной крутизной переднего фронта и достаточным максимальным значением. Однако в начальной фазе впрыска, когда запорный конус иглы только отрывается от седла, проходное сечение между ними незначительно и оказывает сильное дросселирующее влияние на поток топлива. Вследствие этого давление в колодце перед сопловыми отверстиями оказывается существенно меньшим, чем в камере перед иглой, истечение топлива из сопел происходит при недостаточно высокой скорости, а его распыливание ухудшается.

Таким образом, важнейшим условием повышения качества распыливания топлива является сокращение продолжительности неблагоприятных начальной и конечной фаз впрыска путем ускорения полного подъема и посадки иглы форсунки. Для этого необходимо обеспечить высокую подвижность иглы, а также уменьшить дросселирование топлива при ее промежуточных положениях.

Конструктивное оформление, а следовательно, и условия протекания процессов смесеобразования и сгорания в дизелях непрерывно изменяются. Специальные устройства для завихрения топлива в камере сгорания, пленочное смесеобразование, наддув и другие вносят большое разнообразие в требования, предъявляемые к распределению топлива во времени и в пространстве. Удовлетворение этих требований является сложной и трудоемкой задачей.

Выполнить изменяющиеся требования к характеристике впрыска можно в случае, если конструкция топливной системы будет соответствующим образом изменена. В первую очередь необходимо утратить существенные недостатки, присущие современным топливным системам:

- некоторые несоответствия принципа действия отдельных элементов топливной системы условиям протекания рабочего процесса дизеля;
- неудовлетворительное распределения топлива во времени;
- нестабильность начальных условий.

Современные топливные системы за период запаздывания воспламенения впрыскивают 75–80 %, а иногда 100 % от общего количества топлива, впрыснутого за цикл. Это обстоятельство приводит к повышенной жесткости работы дизеля, что вызывает неприятные последствия. Устранить данный недостаток можно, если подобрать элементы топливной системы по характеристике впрыска, выбранной в соответствии с современными представлениями о взаимосвязи процессов топливоподачи, смесеобразования и сгорания. В этих условиях весьма перспективны топливные системы с регулированием количества подаваемого топлива путем изменения начала и конца процесса впрыска.

Нестабильность начальных условий процесса впрыска с возможным образованием различных остаточных объемов можно устранить путем подпитки (наддува) линии нагнетания

топливной системы. Это требует разработки дополнительных устройств для осуществления наддува линии нагнетания, что несколько усложняет топливную систему, но существенно улучшает рабочий процесс дизеля на режимах малых подач и чисел оборотов.

Условия протекания рабочего процесса в основном влияют на работу форсунки, конец распылителя которой непосредственно выходит в камеру сгорания. На характеристику впрыска может влиять давление газов в цилиндре двигателя. Принцип действия форсунки должен быть таким, чтобы давление газов улучшало параметры процесса впрыска. Однако современные форсунки закрытого типа с игольчатым запорным клапаном этому требованию не удовлетворяют. Недостатком таких форсунок является неправильное направление движения иглы во время открытия и закрытия проходного сечения под конусом. Во время открытия проходного сечения давление газов в цилиндре двигателя помогает подъему иглы и ее движению, в связи с чем для обеспечения необходимого высокого давления начала подъема иглы вынуждены устанавливать жесткую пружину, которая в эксплуатации иногда приносит много неприятностей. Во время закрытия иглой проходного сечения давление газов препятствует посадке иглы на седло. Вследствие этого окончание впрыска затягивается, становится нерезким, вялым, что является неблагоприятным для рабочего процесса дизеля и может привести к значительному закоксовыванию и загромождению распыливающих отверстий. Возможно, что вялое окончание процесса впрыска является основной причиной, вызывающей закоксовывание распыливающих отверстий. Такое несоответствие направления движения иглы давлению газов благоприятствует проникновению газов в объем распылителя, что усиливает закоксовывание распыливающих отверстий и часто вызывает перегрев и зависание запорной иглы. При использовании наддува, который в настоящее время приобрел широкое распространение, этот недостаток закрытой форсунки вследствие возрастания давления газов будет значительно увеличиваться, что может привести к ограничению давления наддува.

Указанные недостатки усугубляются насосным действием иглы форсунки. В начале впрыска подъем иглы усиливает опасность проникновения газов в объем форсунки, а в конце подачи выталкивание иглой топлива из

объема, который она освободила при своем подъеме, будет еще больше растягивать конец процесса впрыска [1].

Более благоприятны для организации процесса впрыска клапанные форсунки с непосредственным выходом клапана в камеру сгорания, а также клапанные форсунки с многоструйными распылителями. В последние время появились также форсунки нейтрального типа, с гидравлической пружиной и золотниковым закрытым организмом, и клапанные форсунки с запорным шариковым клапаном. Эти форсунки испытывались на двигателях и показали, что на номинальном режиме они обеспечивают не худшие по сравнению с закрытыми форсунками технико-экономические показатели двигателя. На режимах малых подач и чисел оборотов двигатель с такими форсунками работает более устойчиво и экономично.

В исследованиях отмечается, что величина давления начала впрыскивания, выбранная из условий оптимальной дальности струи и качественного распыливания топлива для экономической работы дизеля на наиболее часто используемых режимах работы должна изменяться. Так, для повышения технико-экономических параметров судовых дизелей и уменьшения минимально устойчивой частоты вращения коленчатого вала рекомендуют совместное изменение давления гидрозатвора форсунок от 30 до 12 МПа и угла опережения впрыскивания топлива до 7 градусов поворота коленчатого вала.

Для автомобильных дизелей при запуске двигателя и его работе на холостом ходу для повышения технико-экономических параметров и уменьшения минимально устойчивой частоты вращения коленчатого вала необходимо уменьшить начальное давление и угол опережения впрыскивания топлива. Выполнения этого условия можно достичь путем модернизации и усовершенствования конструкции и работы форсунок, имеющихся на данный момент.

Рассмотрим устройство для отключения подачи топлива к форсунке [3].

Данное устройство позволяет обеспечить возможность отвода топлива, не поступившего в цилиндр двигателя в результате просачивания между деталями распылителя форсунки.

Решение поставленной задачи достигается тем, что устройство для отключения подачи топлива к форсунке, содержащее перепускное устройство, патрубки высокого и низкого дав-

ления, снабжено подводящим каналом высокого давления, сливным каналом и золотником, управляемым электромагнитом.

На рис. 1 представлено устройство для отключения подачи топлива к форсунке, которое состоит из перепускного устройства 1, патрубков высокого 2 и низкого 3 давления, подводящего канала высокого давления 4, сливного канала 5, золотника 6, электромагнита 7.

Работает устройство для отключения подачи топлива к форсунке следующим образом. Подвод топлива к форсунке для подачи его в цилиндр двигателя обеспечивается перепускным устройством 1. При этом золотник 6 перепускного устройства 1 находится в положении, как показано на рис. 2. В этом случае топливо через патрубок высокого давления 2 поступает в перепускное устройство 1 и далее по подводящему каналу высокого давления 4 (рис. 1) к форсунке. Одновременно осуществляется отвод топлива, не поступившего в цилиндр двигателя в результате просачивания между деталями распылителя форсунки. Топливо отводится по сливному каналу 5 перепускного устройства 1 и далее через патрубок низкого давления 3 на слив.

При отключении подачи топлива к форсунке золотник 6 (рис. 3), управляемый электромагнитом 7 (рис. 1), займет положение, показанное на рис. 3. В этом случае подводящий канал высокого давления 4 и сливной канал 5

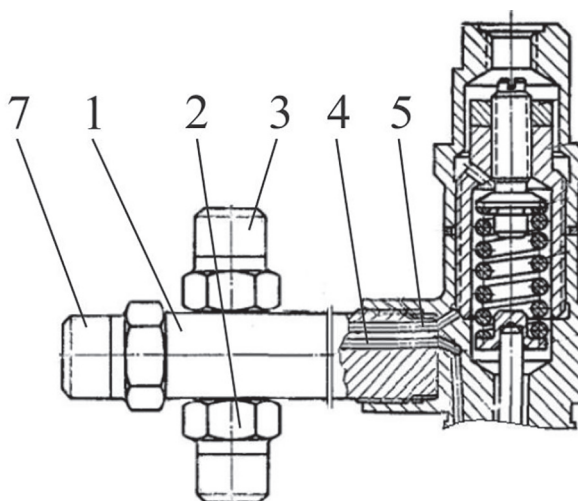


Рис. 1. Устройство для отключения подачи топлива к форсунке:

- 1 – перепускное устройство; 2 – патрубок высокого давления; 3 – патрубок низкого давления;
- 4 – подводящий канала высокого давления;
- 5 – сливной канал; 6 – золотник; 7 – электромагнит

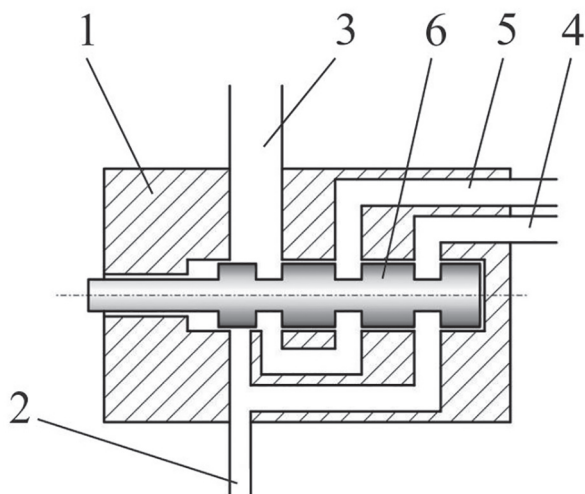


Рис. 2. Работа перепускного устройства при подаче топлива:

- 1 – перепускное устройство; 2 – патрубок высокого давления; 3 – патрубок низкого давления; 4 – подводящий канала высокого давления; 5 – сливной канал; 6 – золотник

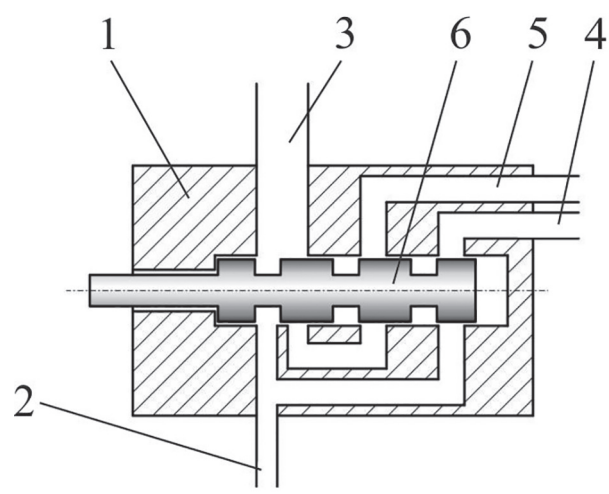


Рис. 3. Работа перепускного устройства при сливе топлива:

- 1 – перепускное устройство; 2 – патрубок высокого давления; 3 – патрубок низкого давления; 4 – подводящий канала высокого давления; 5 – сливной канал; 6 – золотник

перекроются золотником 6, а топливо, поступающее в перепускное устройство 1 через патрубок высокого давления 2, проходит к патрубку низкого давления 3 на слив.

Заключение

Применение указанного технического решения позволит обеспечить отвод топлива, не поступившего в цилиндр двигателя в результате просачивания между деталями распылителя форсунки, и отключение подачи топлива к форсунке при отключении цилиндра двигателя.

Литература

1. Астахов И.В. Подача и распыливание топлива в дизелях, М: Машиностроение, 1972.
2. Белов П.М. Двигатели армейских машин. Часть 1, М: Воениздат, 1971.
3. Бердников А.А., Титков Н.В. Форсунка для дизельно-парового двигателя / Актуальные вопросы совершенствования военной и специальной техники: сборник научных материалов. Выпуск 4 // Пермь, ПВИ войск национальной гвардии, 2018.
4. Ефимов С.И., Иващенко Н.А., Ивин В.И. и др. Двигатели внутреннего сгорания, М: Машиностроение 1985.

5. Костин А.К., Пугачев Б.П., Кочинев Ю.Ю. Работа дизелей в условиях эксплуатации, Л: Машиностроение, 1989.

References

1. Astahov I.V. *Podacha i raspylivanie topliva v dizelyah* [Feed and atomization of fuel in diesel engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 1972.
2. Belov P.M. *Dvigateli armejskih mashin* [Army vehicles engines]. СHаст' 1. Moscow: Voениzdat Publ., 1971.
3. Berdnikov A.A., Titkov N.V. Diesel steam engine nozzle. *Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya voennoj i special'noj tekhniki: sbornik nauchnyh materialov* [Actual issues of improving military and special equipment: a collection of scientific materials]. Vypusk 4. Perm', PVI vojsk nacional'noj gvardii Publ., 2018 (in Russ.).
4. Efimov S.I., N.A. Ivashchenko, V.I. Ivin i dr. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Internal combustion engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 1985.
5. Kostin A.K., B.P. Pugachev, YU.YU. Kochinev. *Rabota dizelej v usloviyah ehkspluatacii* [Diesel operation under operating conditions]. Leningrad: Mashinostroenie Publ. 1989.

WAYS TO IMPROVE DIESEL ENGINE FUEL SYSTEMS

Ph.D. **R.V. Strel'cov**, Ph.D. **A.A. Berdnikov**, Ph.D. **V.G. Vasil'ev**, Ph.D. **V.A. Dyunov**, Ph.D. **E.I. Mel'nikov**, **V.I. Ladanov**
Perm Military Institute of the Internal Troops of the Ministry of the Interior of the Russian Federation, Perm. Russia
Streltsov86@rambler.ru

The article discusses issues related to the purpose of supplying fuel to diesel engines, presents the requirements for this system. An analysis of ways to improve the fuel systems of diesel engines is done. The principle of operation of the high-pressure fuel pump is described, which provides accurate dosing of fuel in accordance with the engine operation mode and delivers it at a set time to the injector with a given intensity. Special devices for turbulence of the fuel in the combustion chamber, film mixing, pressurization and others make a great variety of requirements for the distribution of fuel in time and environment. Meeting these requirements is a complex and time-consuming task, one of such devices is the nozzle. The nozzle directly atomizes the fuel in the combustion chamber of a diesel engine under the influence of a pressure pulse generated by a high-pressure fuel pump. It is possible to fulfill the changing requirements for the injection characteristics if the design of the fuel system is changed accordingly. First of all, it is necessary to lose the essential shortcomings inherent in modern fuel systems, namely: some inconsistencies of the principle of operation of individual elements of the fuel system with the flow conditions of the diesel engine process; poor distribution of fuel over time; initial conditions instability. The article presents a developed device for shutting off the fuel supply to the nozzle, providing the possibility of diverting fuel that has not entered the engine cylinder as a result of leakage between the parts of the nozzle and disabling fuel supply to the nozzle when the engine cylinder is turned off to improve the quality characteristics of the diesel engine fuel system.

Keywords: internal combustion engine, power system, high pressure fuel pump, injector, improvement, engine cylinder, spool valve.