

УДК 621.436

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ФОРСУНОК ПОВЫШЕННОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ДВС**

©2009 В. Н. Гришанов, В. А. Звягинцев, Ю. Д. Лысенко

Самарский государственный аэрокосмический университет

Предлагаются конструктивные решения форсунок различных типов для ДВС, позволяющих повысить их быстродействие, качество распыления топлива, возможности управления и ряд других показателей.

*Двигатель внутреннего сгорания, распыление, скорость, управление*

Современные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) отличает высокая экономичность и пониженный уровень выброса вредных веществ в атмосферу. Тем не менее, требования к ДВС по указанным показателям продолжают ужесточаться. В большинстве ДВС топливо подается путем впрыска с помощью форсунок, а дозирование топлива осуществляется клапаном. От динамических свойств клапана во многом зависит управляемость процесса дозирования, а, следовательно, и возможность оптимизации преобразования химической энергии в механическую.

Одним из важнейших направлений совершенствования систем впрыска в ДВС является повышение быстродействия форсунок в моменты их открытия и закрытия, для которых характерно низкое качество распыления топлива. При этом конструкции форсунок должны отвечать требованиям экономической целесообразности их широкомаштабного тиражирования.

Наиболее часто используются форсунки, содержащие седло с распылителем, корпус, расположенный в его рабочей полости клапан, привод электромагнитного, гидравлического или электрогидравлического типа, а также возвратную пружину клапана, непосредственно поджимающую клапан к седлу или входящую в состав привода.

Авторами на основе математического и физического моделирования форсунок различных типов проведен анализ возможностей повышения их быстродействия путем применения возвратных пружин специальных конструкций, выполняющих ряд дополнительных функций помимо поджатия клапана к седлу. При этом для электромагнитных форсунок ставились задачи снижения массы подвижных элементов и создания условий для использования обладающих высоким быстродействием электромагнит-

ных приводов с малым тяговым усилием в системах высокого давления. Для форсунок с гидравлическим и электрогидравлическим управлением ставилась задача снижения зависимости величины и скорости перемещения клапана от величины подачи и расхода топлива в рабочую и управляющую полости форсунки. Кроме того для всех типов форсунок ставилась задача поиска новых возможностей управления впрыском за счет согласования характеристик возвратной пружины, гидравлической силы, поджимающей клапан к седлу, и привода.

На этой основе создана конструкция электромагнитной форсунки с плоской листовой пружиной, центральная часть которой выполняет функции якоря и клапана, а спиральные лепестки периферийной части – функции магнитопровода, пружины и направляющей клапана (Рис. 1). Данная конструкция помимо высокой технологичности обеспечивает однозначность положений всех точек контакта уплотняемых поверхностей седла и клапана, что позволяет снизить необходимое по условиям герметичности контактное давление, обеспечиваемое пружиной. Достижимое при этом снижение суммарного усилия поджатия клапана к седлу в сочетании с малой массой подвижных элементов, совмещаемых в одной детали, и высокой жесткостью пружины позволило использовать электромагнитный привод с малым тяговым усилием а, соответственно, и высоким быстродействием.

Одной из основных особенностей такой форсунки является зависимость жесткости и магнитной проводимости пружины, и, как следствие, соотношения длительностей процессов открытия и закрытия форсунки от размеров спиральных лепестков. Задача повышения быстродействия при открытии и закрытии решалась путем расчета жесткости пружины и переходных процессов электро-

магнитного привода с привлечением программных продуктов ELCAT и ANSYS и последующим решением системы дифференциальных уравнений движения клапана с использованием программы MATCAD. В процессе моделирования работы форсунки была установлена возможность реализации пульсирующего впрыска при постоянном значении сигнала управления.

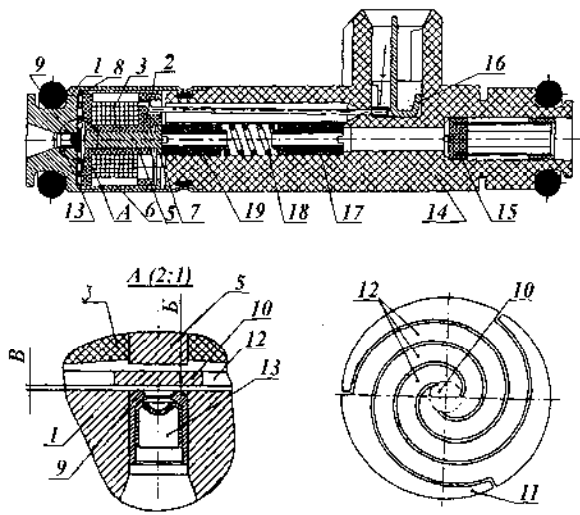


Рис. 1. Конструкция экспериментальной форсунки инжекторного ДВС: 1 - корпус из немагнитного материала; 2 - электромагнит; 3 - катушка электромагнита; 4 - цельный магнитопровод; 5 - сердечник; 6 - корпус; 7 - основание; 8 - запорный элемент из магнитного материала; 9 - опорное седло; 10 - центральная часть запорного элемента; 11 - периферийная часть запорного элемента; 12 - упругие элементы; 13 - распылитель; 14 - коллектор подключения к топливной системе; 15 - фильтр; 16 - клеммы подключения электромагнита; 17 - винт; 18 - винтовая пружина; 19 - упор

Экспериментальная оценка быстродействия лабораторного образца созданной конструкции проводилась на специальном стенде путем сравнительных исследований с серийными образцами ведущих европейских производителей (Бош, Сименс). Для исследования параметров движения клапана, расположенного в труднодоступном месте по ряду критериев был выбран бесконтактный амплитудный оптоволоконный датчик отражательного типа. Такого рода датчик достаточно прост в реализации и позволяет преобразовать перемещение клапана в изменение мощности излучения, перетекающего из передающего оптоволоконна в приемное, отражаясь от перемещающегося клапана. Некоторые результаты экспериментов приведены на рис. 2, 3, 4.

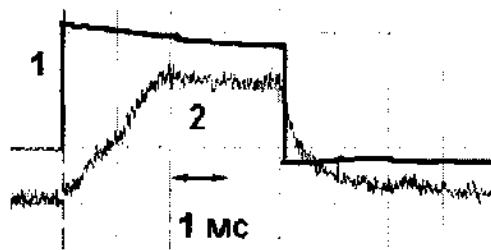


Рис. 2. Совмещенная осциллограмма напряжения и тока типовой форсунки: 1 - напряжение; 2 - ток

Из рис. 2 видно, что для серийной форсунки из-за большой индуктивности привода передний и задний фронты импульсов тока затянуты на 2 мс по сравнению с соответствующими фронтами импульсов напряжения. Динамика перемещения клапана (рис. 3) демонстрирует миллисекундное запаздывание открытия клапана по отношению к фронту импульса напряжения и запаздывание в 2 мс по отношению к срезу импульса напряжения.

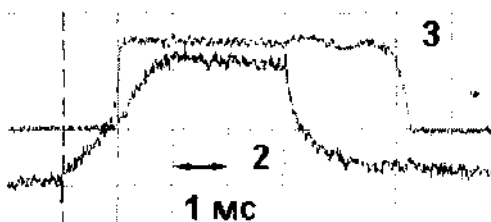


Рис. 3. Совмещенная осциллограмма перемещения клапана и тока типовой форсунки: 2 - ток; 3 - перемещение

Для образца форсунки разработанной конструкции длительность фронта и среза тока не превышает 200 мкс, а временная зависимость перемещения клапана без заметных задержек копирует форму импульса тока (рис. 4).

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что быстродействие новой конструкции в несколько раз выше, чем у известных аналогов.

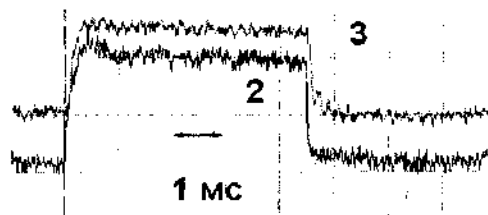


Рис. 4. Совмещенная осциллограмма перемещения клапана и тока экспериментальной форсунки: 2 - ток; 3 - перемещение

Одним из наиболее перспективных путей повышения быстродействия форсунок авторы считают использование пружины для разгрузки клапана от поджимающей его к седлу гидравлической силы в сочетании с использованием привода, управляющего натяжением пружины, т.е. величиной и направлением усилия ее воздействия на клапан, контактирующий с седлом.

Привод управления натяжением пружины может выполнять как вспомогательную функцию, обеспечивая частичную разгрузку клапана и снижение потребного усилия основного привода, так и выполнять функцию управления работой форсунки в целом, воздействуя на клапан через его пружину и изменяя тем самым величину и направление равнодействующей от гидравлической силы и усилия деформирования пружины. Управление величиной натяжения пружины клапана может осуществляться путем перемещений седла или опоры пружины относительно корпуса с применением приводов электромагнитного, гидравлического или электрогидравлического типа. При этом согласование характеристик привода, гидравлической силы и деформирования пружины клапана позволяет как адаптировать форсунки к особенностям существующих систем впрыска, так и создавать новые схемы управления впрыском.

Конструкция форсунки с электромагнитным приводом перемещения опоры пружины отличается от известных наличием упругой связи между якорем и клапаном. Якорь в ней фактически свободно подвешен между пружиной клапана и своей возвратной пружиной, что принципиально изменяет характер взаимодействия клапана с электромагнитным приводом.

Начало процесса открытия клапана запаздывает относительно начала процесса перемещения якоря, начинающегося при практически нулевом значении усилия трогания с момента подачи управляющего сигнала, а завершаются оба этих процесса почти одновременно, когда клапан скачкообразным ходом полного открытия догоняет якорь. Процессы закрытия клапана и возврата якоря в исходные положения начинаются одновременно с момента отхода якоря от сердечника электромагнитного привода. Однако, клапан под действием гидравлической силы опережает якорь, совершая скачкообразный ход полного закрытия. Повы-

шение быстродействия достигается за счет разделения процессов перемещения клапана и якоря, а также за счет снижения потребного тягового усилия привода.

Предварительные результаты моделирования работы такой форсунки показали возможность ее использования при существенном повышении давления в рабочей полости по сравнению с обычной схемой при использовании одного и того же привода и обеспечении одинакового быстродействия.

Описанный характер срабатывания клапана обеспечивается и при перемещениях опоры пружины посредством поршня (рис. 5,а) гидравлического привода. В этом случае конструкция форсунки аналогична конструкции применяемой в дизелях закрытой форсунки с иглой, но имеет отличия, заключающиеся в наличии гидравлической силы, поджимающей клапан к седлу, и наличии упругой связи между нижней частью иглы, выполняющей функции клапана, и верхней частью, выполняющей функции поршня, которые придают форсунке ряд новых свойств.

При увеличении давления в рабочей полости форсунки от нулевого значения до давления трогания поршня усилие поджатия клапана к седлу возрастает до максимального значения, в отличие от закрытой форсунки с иглой, в которой при этом давлении клапан начинает отходить от седла. Поэтому при питании форсунки от плунжерного насоса имеется возможность существенно поднять остаточное давление в магистрали высокого давления (по предварительным расчетам до 95% давления открытия), что будет способствовать снижению интенсивности вредных волновых процессов в магистрали и влияния их на герметичность форсунки.

• Герметичность форсунки в закрытом состоянии не нарушается при незначительных смещениях поршня привода от исходного положения. Поэтому поршень форсунки может быть снабжен электромагнитным замком, обеспечивающим срабатывание или пропуск впрыска в системе с одноплунжерным насосом, питающим поочередно несколько форсунок. Замки в этих форсунках будут выполнять функции распределителя. При этом люфты и быстродействие замков не повлияют на герметичность форсунок при пропуске впрыска и на их быстродействие при срабатывании.

- В пределах хода полного открытия клапан форсунки не имеет промежуточных устойчивых положений и может занимать либо крайние положения закрытия или открытия, либо находиться в состоянии скачкообразного хода. Поэтому исключается возможность распыления топлива на стационарных режимах при малых давлениях в подклапанной полости, характерных для закрытой форсунки с иглой при пуске и холостом ходе дизеля, когда клапан открыт частично. При этом рабочая полость гидропривода выполняет также функции гидроаккумулятора, накапливающего топливо перед отходом клапана от седла и поддерживающего высокое давление в подклапанной полости до начала скачкообразного хода закрытия клапана.

- Перемещения поршня и, как следствие, режим работы форсунки существенно зависят от объемной подачи топлива в рабочую полость. При больших подачах форсунка срабатывает однократно как обычная закрытая форсунка с иглой с описанными ранее особенностями перемещения клапана относительно поршня. При подачах, меньших некоторого критического значения, форсунка работает в пульсирующем режиме с чередованием периодов аккумуляирования и впрыска топлива, длительность которых является идентифицируемой для целей управления функцией подачи. Поэтому форсунка обеспечивает возможность управления впрыском путем изменения количества топлива, подаваемого в рабочую полость, например, путем поочередного соединения рабочей полости с магистралью слива и дросселируемой пропорциональным электромагнитным клапаном магистралью подачи топлива от гидроаккумулятора постоянного давления. При этом цикловая доза впрыска может выдаваться одной или несколькими порциями.

- Скачкообразные ходы клапана на полную величину рабочего хода клапана обеспечиваются при весьма малых ходах поршня, что позволяет устранить основной недостаток электрогидрофорсунок – вялое закрытие, и повысить скорость отсечки топлива.

В настоящее время анализируются и моделируются различные конструкции пружины клапана, включая варианты витой и прорезной пружин, выполнение поперечных надрезов на игле и др.

На рис. 5, б показана электромагнитная форсунка с упругочувствительным гидроприводом перемещения седла, положение которого определяет величину усилия воздействия составной пружины на контактирующий с ним клапан, называемое натяжением. При увеличении давления в рабочей полости форсунки возрастает поджимающая клапан к седлу гидравлическая сила от перепада давления в рабочей и подклапанной полостях. Одновременно сильфон упругочувствительного привода смещает в сторону полости впрыска седло и контактирующий с ним клапан, изменяя натяжение составной пружины по величине и направлению. Таким образом, достигается снижение потребного для открытия клапана усилия, что позволяет использовать быстродействующие электромагнитные приводы с малым тяговым усилием в системах высокого давления.

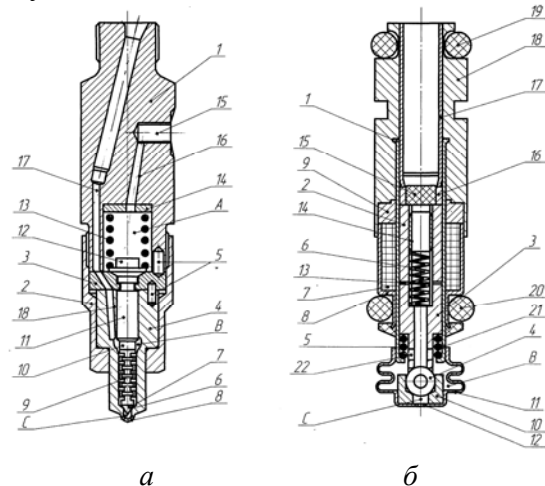


Рис. 5. Форсунки с приводом управления натяжением пружины клапана, выполняющим функции: а – основного привода управления впрыском; б – дополнительного привода, снижающего усилие открытия клапана электромагнитной форсунки основного привода

Конструкция форсунки допускает возможность использования электромагнитного привода в качестве распределительного устройства в системах впрыска с одноплунжерным насосом, питающим поочередно несколько форсунок. При отсутствии управляющего сигнала на электромагнитном приводе цикл изменения давления в рабочей полости сопровождается совместными смещениями седла и клапана в направлении полости впрыска и обратно без открытия форсунки. При подаче управляющего сигнала на привод форсунка срабатывает аналогично форсункам с подвижным седлом.

Таким образом, на данном этапе разработан ряд форсунок различных типов, отличающихся оригинальными конструкциями возвратных пружин клапана, которые выполняют разнообразные функции помимо поджатия клапана к седлу, что обеспечило не только высокое быстродействие форсунок, но и новые возможности управления ими.

Выявлены возможности использования в электромагнитных форсунках пружины в качестве клапана, его направляющей, магнитопровода, якоря одновременно, что позволило минимизировать размеры и массы подвижных элементов форсунки, а также

применить быстродействующие приводы малой тяги с возможностью работы предложенных конструкций в системах с высоким рабочим давлением.

Предложены варианты сочетания пружины с приводом управления, изменяющим ее натяжение, которые при определенном согласовании характеристик привода, гидравлической силы и деформации пружины позволяют как адаптировать форсунки к особенностям существующих систем впрыска, так и создавать новые системы управления впрыском.

## **DEVELOPMENT AND STUDY OF THE DESIGNS OF SPRAYERS WITH INCREASED SPEED FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE (ICE)**

©2009 V. N. Grishanov, V. A. Zvyagintsev, U. D. Lysenko

Samara State Aerospace University

In the article proposed constructive solutions of sprayers of different types for ICE, which are able to increase their speed, quality of the propellant atomization, control capability and also some other indices.

*Internal combustion engine, sprayer, speed, control*

### **Информация об авторах**

**Гришанов Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматические системы энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. 335-18-12. E-mail: [vladgrishanov@yandex.ru](mailto:vladgrishanov@yandex.ru). Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Звягинцев Виктор Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. 335-18-12. E-mail: [Bogdanovich@ssau.ru](mailto:Bogdanovich@ssau.ru). Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Лысенко Юрий Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. 335-18-12. E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Grishanov Vladimir Nikolaevich**, candidate of technical science, the senior lecturer of department of automatic systems of power plants of Samara state aerospace university. Phone: 335-18-12. E-mail: [vladgrishanov@yandex.ru](mailto:vladgrishanov@yandex.ru). Area of research: teplomassoobmen, thermodynamics.

**Zvyagintsev Victor Aleksandrovich**, candidate of technical science, the senior lecturer of department of production of aircrafts and quality management is in an engineer of Samara state aerospace university. Phone: 335-18-12. E-mail: [Bogdanovich@ssau.ru](mailto:Bogdanovich@ssau.ru). Area of research: teplomassoobmen, thermodynamics.

**Lysenko Yurii Dmitrievich**, candidate of technical science, the senior lecturer of department of production of aircrafts and quality management is in an engineer of Samara state aerospace university. Phone: 335-18-12. E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Area of research: teplomassoobmen, thermodynamics.