

УДК 621.436.038

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ НА ПРОЦЕСС ТОПЛИВОПОДАЧИ

А.Н. Врублевский, доцент, к.т.н., ХНАДУ

Аннотация. Приведены результаты расчетного исследования электрогидравлической форсунки для аккумуляторной топливной аппаратуры высокооборотного дизеля серии ДТ. В результате анализа полученных характеристик процесса топливоподачи определены пределы изменения и соотношения конструктивных и регулировочных параметров форсунки, что послужило отправной точкой многокритериального синтеза топливной системы с электронным управлением впрыскивания.

Ключевые слова: аккумуляторная топливная аппаратура, электрогидравлическая форсунка, топливоподача.

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОЇ ФОРСУНКИ НА ПРОЦЕС ПАЛИВОПОДАЧІ

О.М. Врублевський, доцент, к.т.н., ХНАДУ

Анотація. Наведено результати розрахункового дослідження електрогідравлічної форсунки для акумуляторної паливної апаратури високообертового дизеля серії ДТ. В результаті аналізу отриманих характеристик процесу паливоподачі визначено межі зміни та співвідношення конструктивних та регульовальних параметрів форсунки, що слугує відправною точкою багатокритеріального синтезу паливної системи з електронним керуванням упорскування.

Ключові слова: акумуляторна паливна апаратура, електрогідравлічна форсунка, паливоподача.

INFLUENCE OF ELECTROHYDRAULIC INJECTOR PARAMETERS ON FUEL SUPPLY PROCESS

A. Vrublevsky, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences,
KhNADU

Abstract. The results of calculation research of electrohydraulic injector for accumulator fuel equipment of high-speed diesel engine of DT type are presented in the article. As a result of obtained data analysis of fuel supply process there have been determined the limits of fuel injector constructive and adjusting changes and proportion that served as a starting point of multicriterion synthesis of electronic control injection fuel system.

Key words: accumulator fuel equipment, electrohydraulic injector, fuel supply.

Введение

В последние десятилетия появился и бурно развивается новый класс дизельной топливной аппаратуры (ТА), отвечающий самым высоким требованиям, предъявляемым к

процессу топливоподачи (ТП). Это аккумуляторная ТА с электронным управлением впрыскивания. Данная ТА и ее элементы стала объектом большинства исследований процесса ТП. Конструкция аккумуляторной ТА постоянно усложняется, а ее изготовле-

ние требует разработки новых высоких технологий. Важнейшим элементом любой ТА с электронным управлением является форсунка, определяющая закон топливоподачи. Волновые явления в топливных каналах форсунки, деформация иглы и мультипликатора, течение топлива в малых зазорах, сжимаемость топлива и другие процессы влияют на ТП. Выбору и обоснованию основных конструктивных и регулировочных параметров электрогидравлической форсунки (ЭГФ), от которых зависит позитивное или негативное влияние указанных явлений на процесс ТП, посвящено данное исследование.

Анализ публикаций

Определить зависимость давления впрыскивания от значений основных параметров ЭГФ возможно при проведении двухфакторных численных экспериментов. В таком случае результаты эксперимента представляются графически, а расчет пробных точек в двухмерной плоскости параметров не занимает много времени. Многие параметры ЭГФ можно сгруппировать в пары по следующим признакам: влияние на рассматриваемое явление; конструктивная связь; функциональное назначение. Выбор в качестве критерия качества максимального давления впрыскивания p_a при анализе параметров ЭГФ на процесс ТП оправдан, так как закон топливоподачи в системе электронного впрыскивания в большинстве случаев стремится к прямоугольному.

При проведении численного эксперимента в данной работе используются математические модели аккумуляторной ТА, предложенные в [1, 2, 3]. Для выбора пробных точек в плоскости параметров используются различные методы составления плана численного эксперимента (построение кубической решетки, рототабельные планы и др.) Как отмечено в [4], использование данных методов может оказаться недостаточным для анализа влияния изменяемых параметров на исследуемый процесс. В данной работе для выбора параметров в пробных точках используется генератор ЛП-т последовательностей, предложенный для решения оптимизационных задач Соболев И.М. [4]. Приведенные ниже результаты позволили выявить закономерности изменения давления p_a в зависимости от варьируемых параметров.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – выявить основные явления и определить параметры, определяющие характер протекания процесса топливоподачи, организованного при использовании в аккумуляторной топливной системе электрогидравлической форсунки с электромагнитным клапаном. Для достижения данной цели необходимо провести серию расчетов, при которых исходные данные – конструктивные и регулировочные параметры форсунки будут соответствующим образом изменяться. Проведение численных экспериментов и дальнейший анализ их результатов является задачей данного исследования.

Объект исследования

Объектом исследования является электрогидравлическая форсунка, используемая в отечественной аккумуляторной топливной аппаратуре с электронным управлением разработки КП ХКБД. Расчетная схема ЭГФ (рис. 1) включает полости высокого (А, Б, В, Д) и низкого (Е, К, Л, М) давления, соединяющие данные полости топливные каналы, а также электромагнит клапанного типа и пружины сжатия. Указанная схема используется в большинстве серийно выпускаемых электромагнитных форсунок. Подробно работа исследуемой форсунки описана в [2].

Методика численного эксперимента предусматривала в каждой серии расчета согласованного изменения только двух параметров. При этом остальные параметры ЭГФ фиксировались и были равны величинам, принятым для базового образца.

Зависимость ТП от выбора длин трубопровода и мультипликатора

Зависимость изменения основных параметров (p_a , q_c , q_z) в период ТП от характера протекания волновых явлений можно выяснить, проанализировав результаты численного эксперимента, в ходе которого варьировались значения длины топливопровода $L_{тр}$, соединяющего ЭГФ и топливный аккумулятор, и длины мультипликатора L_m . Так, при фиксированном давлении $p_{ак}$ уровень максимального давления впрыскивания P_a изменяется в зависимости от длины $L_{тр}$. Например, при $p_{ак} = 100$ МПа и $L_{тр} = 150$ мм, $p_a = p_{ак}$ (рис. 2).

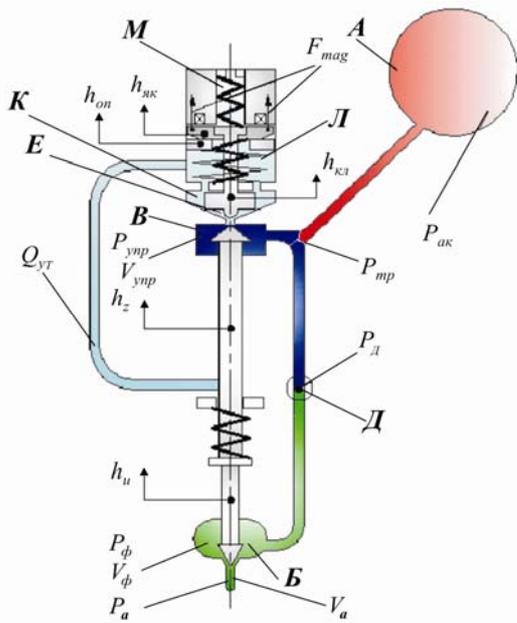


Рис. 1. Расчетная схема ЭГФ

Увеличение $L_{тр}$ в два раза (до 300 мм) снизит давление p_a до 85 МПа. Характерными для зависимости $p_a = f(L_{тр})$ являются участки провалов давления, что непосредственно связано с процессом распространения прямых и отраженных волн давления по топливопроводу в период ТП.

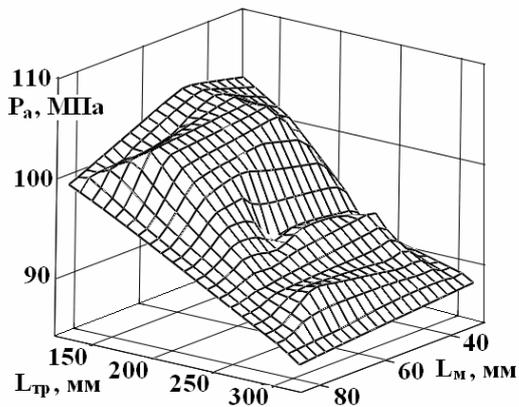
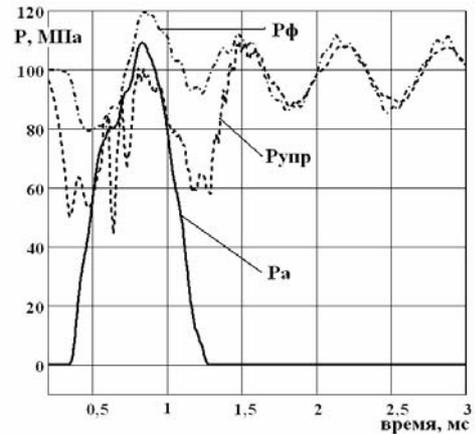


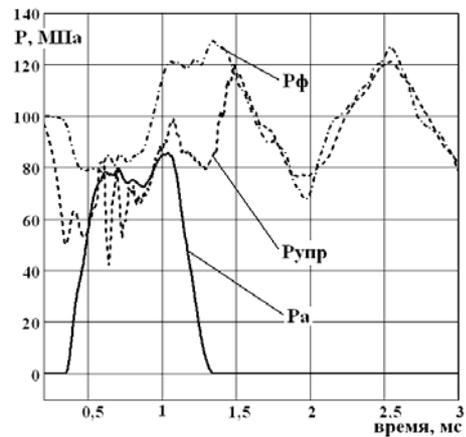
Рис. 2. Зависимость максимального давления впрыскивания p_a от длин топливопровода $L_{тр}$ и мультипликатора L_m при $p_{ак} = 100$ МПа

При $L_{тр} = 300$ мм период восстановления уровня давления топлива в сечении штуцера форсунки $p_ф$ приближается к длительности впрыскивания (рис. 3, а). После снижения давления происходит увеличение давления до уровня, превышающего давление в топливном аккумуляторе $p_{ак}$. Причем достигаемый максимум $p_ф$ составляет 130 МПа при начальном уровне $p_{ак} = 100$ МПа.

Представляется возможным эффективно использовать волновые явления для увеличения давления впрыскивания при организации многофазного впрыскивания, когда в процессе первого впрыскивания формируется отраженная волна. Сложение прямой и отраженной волн приведет к увеличению p_a в последующие впрыскивания.



а



б

Рис. 3. Изменение давления топлива в полостях ЭГФ при длине трубопровода: а – 150 мм; б – 300 мм

Численный эксперимент позволил определить характер зависимости p_a от длины L_m . Изменение L_m в диапазоне от 40 до 80 мм оказывает меньшее влияние на величину давления p_a , так как скорость распространения волн давления в топливе и материале мультипликатора различна, а также вследствие большей протяженности топливопровода изменение $L_{тр}$ оказывает большее влияние на процесс ТП, чем выбор величины L_m . Но и в этом случае на зависимости $P_a = f(L_m)$ можно выделить участки провалов P_a (рис. 2). Например, при $L_{тр} = 150$ мм, где получено максимальное значение p_a , рационально выбрать

длину мультипликатора $L_m = 50$ мм. В случае использования $L_{тр} = 270$ мм максимальная величина давления p_a достигается при $L_m = 68$ мм. Результаты численного эксперимента показали, что используя волновые явления, можно добиться необходимого соотношения $p_a > p_{ак}$. Также следует заметить, что зависимость ТП от $L_{тр}$ и L_m неоднозначна и получить за счет волновых явлений $p_a > p_{ак}$ при всех значениях $p_{ак}$ и длительности впрыскивания невозможно. Вероятно, в данном случае следует осуществить поиск компромиссного решения, когда в широком диапазоне $p_a \geq p_{ак}$.

Влияние на ТП эффективных проходных сечений жиклеров камеры управления

В исследуемой аккумуляторной ТА начало и конец топливоподачи определяется уровнем давления $p_{упр}$ в полости управления **В** (рис. 1). В период между впрыскиваниями полость **В** и топливный аккумулятор **А** сообщаются через отверстие сечением $\mu f_{вп}$ и $p_{упр} = p_{ак}$. Снижение $p_{упр}$ происходит в период открытия с помощью электромагнитного клапана второго отверстия камеры управления с эффективным проходным сечением $\mu f_{вып}$. Анализ зависимости параметров ТП от величины сечений данных отверстий посвящено множество исследований, например [5, 6]. Для рассматриваемой ТА в данной работе получены аналогичные зависимости (рис. 4).

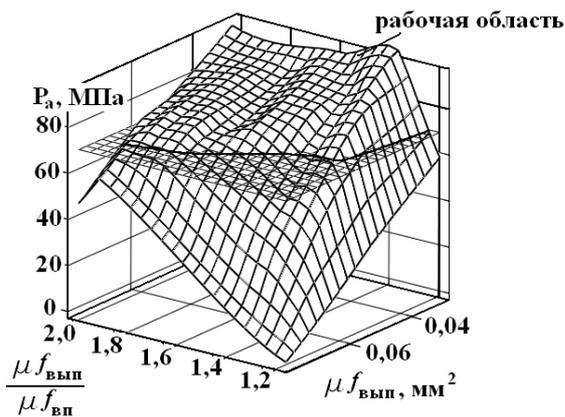


Рис. 4. Зависимость p_a от эффективного проходного сечения выпускного жиклера $\mu f_{вып}$ и отношения $\mu f_{вып} / \mu f_{вп}$ при $P_{ак} = 80$ МПа

На поверхности $p_a = f(\mu f_{вып}, \mu f_{вып} / \mu f_{вп})$ можно выделить достаточно протяженную так называемую «рабочую область», в которой обеспечивается впрыскивание топлива.

На условной границе рабочей области происходит резкое ухудшение параметров ТП (рис. 4) в связи с недостаточной разгрузкой полости управления. Расчет показал, что наилучшие показатели ТП, в частности, максимальное p_a , будут получены при отношении $\mu f_{вып} / \mu f_{вп}$, изменяющемся в пределах от 2,0 до 1,4. А величину $\mu f_{вып}$ рационально выбирать не более $0,06 \text{ мм}^2$.

Зависимость ТП от выбора хода иглы

От выбора максимального перемещения иглы распылителя ЭГФ зависит не только величина эффективного проходного сечения распылителя, но и максимальная величина объема **В**. Определенная минимизация данного объема оказывает положительный эффект на процесс ТП. Происходит это вследствие снижения влияния сжимаемости топлива, находящегося в камере управления между впрыскиваниями. Подробно влияние сжимаемости топлива на процесс ТП в аккумуляторной ТА рассматривалось в работе [7]. Примененная в исследуемой ЭГФ конструкция распылителя обеспечивает необходимое проходное сечение ($0,2222 \text{ мм}^2$) уже при $h_{и} = 0,15$ мм [1]. При этом снижение давления при перетекании топлива из полости $V_{ф}$ в полость V_a (рис. 1) не превышает 10 %, а скорость перемещения иглы ≤ 1 м/с. Однако при $h_{и} = 0,15$ мм значительное влияние на процесс топливоподачи будет оказывать предварительная продольная деформация мультипликатора и иглы, сопоставимые с величиной $h_{и}$ [8]. Причем с увеличением давления $p_{ак}$ это влияние будет возрастать. С другой стороны, выбор $h_{и} > 0,3$ мм приводит к росту скорости иглы до 2 м/с и более и к большей зависимости ТП от эффекта соударения торца мультипликатора о дно втулки [1]. Результат численного эксперимента процесса ТП при различных значениях $h_{и}$ и $p_{ак}$ показывает, что максимальные значения давления p_a достигаются при $h_{и} \leq 0,25$ мм (рис. 5).

Зависимость ТП от выбора диаметра и угла седла клапана управления

Сила, с которой действует давление топлива $p_{упр}$ на клапан управления ЭГФ, определяется диаметром $d_{кл}$ и углом седла α сферического клапана. С другой стороны, быстрое действие форсунки зависит от характеристики изменения проходного сечения при подъеме кла-

пана, что также определяется углом $d_{кл}$ и α при фиксированном значении хода клапана (в данном случае ход около 0,05 мм). Численный эксперимент показал, что в неоптимизированной ЭГФ при незначительном изменении $d_{кл}$ и α от заданных значений (1,5 мм и 100°) ТП соответствует небольшая часть поверхности (рис. 6).

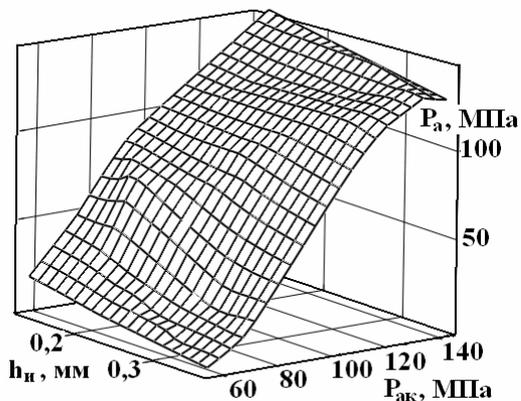


Рис. 5. Зависимость p_a от выбора величины хода иглы о давления $p_{ак}$

В оптимизированной ЭГФ по методу, предложенному в [9], возможно изменение исследуемых параметров в широком диапазоне. Следовательно оптимизированная ЭГФ устойчива к отклонениям параметров, неизбежным при изготовлении и в процессе эксплуатации.

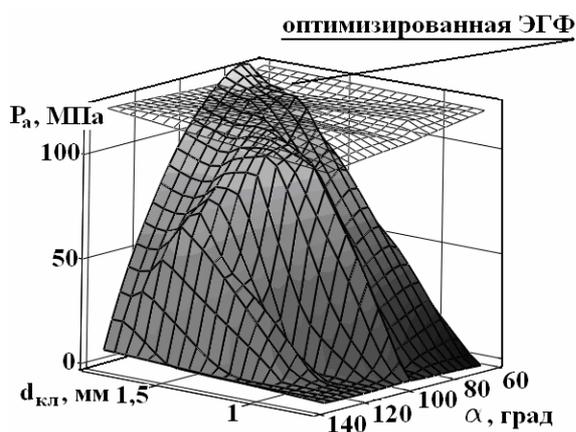


Рис. 6. Зависимость давления впрыскивания от диаметра и угла седла клапана управления ЭГФ ($p_{ак} = 100$ МПа)

Зависимость ТП от давления $p_{ак}$ и силы предварительной деформации пружины клапана

Значение силы предварительной деформации пружины клапана $F_{кл}$ определяется не только

в результате моделирования работы гидромеханической схемы ЭГФ. Выбор $F_{кл}$ также зависит от характеристик электромагнита, применяемого в форсунке. Причем при выборе возможных значений $F_{кл}$ меньшее определяется исходя из требования обеспечения топливоподачи без подвпрыскиваний, а максимально возможное значение $F_{кл}$ определяется характеристиками электромагнита. По указанным условиям в исследуемой ЭГФ эффективное впрыскивание обеспечивается в «рабочей области» (рис. 7), которой соответствует значение силы $F_{кл}$, равное 30 – 45 Н. Для достижения большего быстродействия ЭГФ и увеличения давления впрыскивания необходимо увеличить $F_{кл}$ до 100 Н и выше. Этого возможно добиться только при улучшении характеристик электромагнита, либо в случае применения другого актуатора (например, пьезопривода или магнитостриктора).

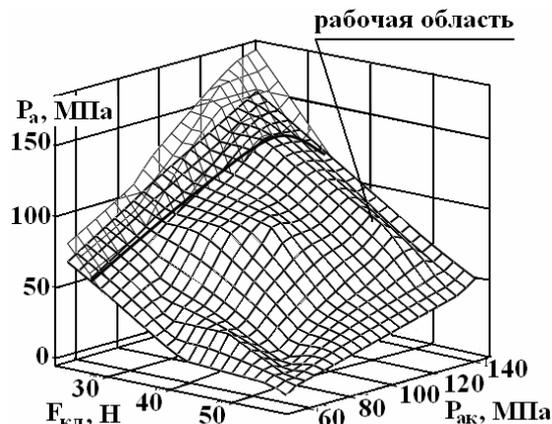


Рис. 7. Зависимость давления впрыскивания от выбора силы $F_{кл}$ и давления $p_{ак}$

Сила, развиваемая электромагнитами применяемых в ЭГФ, достигают предельных для данных устройств значений. Поэтому увеличение давления $p_{ак}$ в аккумуляторной ТА до 160 МПа и более требует применения электромагнитных клапанов, разгруженных от сил давления топлива [5]. Это усложняет конструкцию, повышает стоимость ЭГФ, но оставляет хорошие перспективы для дальнейшего использования электромагнитов в аккумуляторной ТА.

Представленные результаты исследований позволяют выбрать наиболее весомые для обеспечения эффективной ТП параметры, количество которых более десяти, а влияние на ТП противоречиво. В таком случае объяснимо желание провести многопараметриче-

скую многокритериальную оптимизацию ЭГФ. Привести такую оптимизацию возможно, используя метод исследования пространства параметров [4].

Выводы

В результате численного эксперимента получены зависимости процесса топливоподачи от выбора конструктивных и регулировочных параметров электрогидравлической форсунки.

Исследован процесс распространения импульса давления в форсунке и зависимость данного процесса от выбора длин мультипликатора и топливопровода, соединяющего форсунку и гидроаккумулятор. Определено, что при определенном сочетании данных параметров возможно получить уровень давления впрыскивания, превышающий давление в источнике сжатого топлива – гидроаккумуляторе.

Определена область эффективной работы форсунки путем исследования зависимости давления впрыскивания от следующих пар параметров:

- камеры и клапана управления;
- входного и выходного жиклеров;
- объема и давления камеры управления;
- диаметра и седла клапана управления;
- силы предварительной деформации пружины клапана и давления в полости управления.

Результаты данного исследования явились отправной точкой для проведения первого этапа оптимизационного синтеза аккумуляторной топливной аппаратуры, состоящего из выбора оптимизируемых параметров и границ их изменения.

Литература

1. Врублевский А.Н. Особенности математического моделирования гидромеханических процессов ЭГФ / А.Н. Врублевский, А.Л. Григорьев, А.В. Грицок и др. // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукр. научн.-техн. журнал. – 2007. – №1. – С. 44 – 52.
2. Врублевский А.Н. Математическая модель движения элементов и течения топлива в полостях низкого давления электро-

гидравлической форсунки / А.Н. Врублевский // Автомобильный транспорт: сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2008. – Вып. 22. – С. 109 – 117.

3. Врублевский А.Н. Математическая модель быстродействующего электромагнита для топливной системы ДВС / А.Н. Врублевский, А.Л. Григорьев, А.М. Бовда // Автомобильный транспорт: сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2006. – Вып. 19. – С. 138 – 143.
4. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Дрофа. 2006. – 175 с.
5. Грехов Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 344 с.
6. Емельянов Л.А. Развитие комплекса математических моделей дизеля, оснащенного аккумуляторной топливной системой с электронным управлением: автореф. дисс. канд. техн. наук. 05.04.02 – «Тепловые двигатели» / Леонид Александрович Емельянов. – М.: МАДИ (ГТУ). 2007. – 18 с.
7. Драган Ю.Е. Методика учета сжимаемости топлива и деформации штанги при математическом моделировании электрогидравлических форсунок / Ю.Е. Драган // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукр. научн.-техн. журнал. – 2007. – №2. – С. 44 – 52.
8. Seykens X.L.J., Somers L.M.T., Baert R.S.G. Detailed Modeling of Common Rail Fuel Injection Process. MECCA, III. 2005. – P. 30 – 39.
9. Врублевский А.Н. Многокритериальный синтез топливной системы с электронным управлением впрыскивания / А.Н. Врублевский, А.Л. Григорьев, А.В. Денисов // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукр. научн.-техн. журнал. – 2008. – №1. – С. 91 – 98.

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 25 марта 2010 г.