

**УДК 621.436.12**

**Перспективные направления развития аккумуляторных топливных систем дизелей**

**М.Г. Шатров, Л.Н. Голубков, В.И. Мальчук, А.Ю. Дунин, П.В. Душкин**  
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

**Perspective directions of development of accumulator fuel systems of diesel engines**

**M.G. Shatrov, L.N. Golubkov, V.I. Malchuk, A.U. Dunin, P.V. Dushkin**

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

*Дальнейшие исследования конструкции и рабочего процесса аккумуляторных топливных систем (АТС) направлены на обеспечение развития транспортных дизелей с целью снижения их массогабаритных показателей, повышения эффективности и соответствия ужесточающимся требованиям к составу отработавших газов. Большое внимание уделяется организации процессов смесеобразования и сгорания двигателей в условиях их форсирования увеличением давления наддува и номинальной частоты вращения коленчатого вала. В этой связи мероприятия по совершенствованию АТС направлены на: повышение давления впрыскивания до 300 МПа и выше; организацию двух и более кратной подачи топлива за цикл; управление формой характеристики впрыскивания и распределением топлива по зонам камеры сгорания дизеля в соответствии с режимом его работы (зональное смесеобразование). Прикладные научные исследования и экспериментальные разработки по этим направлениям проводятся при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации по соглашению № 14.580.21.0002 от 27.07.2015 г. Уникальный идентификатор ПНИЭР: RFMEFI58015X0002.*

*Ключевые слова: аккумуляторная топливная система, электрогидравлическая форсунка, топливная струя, распылитель, управление*

*Further study of the design and operation of common rail fuel system, aimed at the development of transport diesel engines to reduce weight and overall dimensions, increase efficiency and meet increasingly stringent requirements for exhaust gas composition. Great attention is paid to organization of processes of formation of the mixture and combustion with regard to their advancement at higher boost pressure and the rotational speed of the engine. In this regard, measures to improve common rail fuel system, aimed at: increasing the discharge pressure up to 300 MPa and above; two or more multiple fuel injection within one cycle; control of the shape characteristics of the fuel injection and fuel distribution in the zones in the combustion chamber of the diesel engine in accordance with the mode of its operation.*

*Keywords: common rail fuel system, electro-hydraulic injector, fuel jet, atomizer, control*

### **Влияния давления впрыскивания до 300 МПа на рабочий процесс топливной системы**

Для проведения исследований были отобраны два варианта электрогидравлической форсунки (ЭГФ) с электромагнитным приводом управляющего клапана). Форсунка ЭГФ №2 отличается от ЭГФ №1 наличием топливного аккумулятора, встроенного в корпус, и конструкцией управляющего клапана, разгруженного от силы давления топлива.

Несмотря на устойчивую работу ЭГФ №1 при  $p_{ак}=200$  МПа дальнейшее повышение давления в топливном аккумуляторе вызвало отклонения от нормальной работы форсунки:

- при давлении  $p_{ак}=250$  МПа и выше у ЭГФ наблюдается увеличение расхода топлива на управление;
- повышенный расход вызывает сильный нагрев топлива, самой форсунки и ТНВД. Температура корпуса в зоне управляющего клапана в котором происходит дросселирование топлива достигает  $130$  °С;
- работа форсунки становится нестабильной (низкая межцикловая стабильность) и требуется высокая мощность на привод ТНВД (более  $7,5$  кВт).

Одной из причин описанных отклонений данных является создание давлением топлива осевой нагрузки на клапан в направлении обратном действию пружины, прижимающей клапан к седлу. При  $p_{ак}=250$  МПа и выше усилие пружины становится недостаточным для преодоления давления и, как следствие, нарушается герметичность закрытого клапана и процесс его посадки на седло.

При работе ЭГФ №2 в диапазоне давлений  $p_{ак}=100 \dots 300$  МПа нарушения ее рабочего процесса не наблюдались. По сравнению с ЭГФ №1 привод данной форсунки оказался более быстродействующим.

Для ЭГФ №1 изготовлен опытный одноструйный распылитель с диаметром распыливающего отверстия  $0,12$  мм для проведения видеорегистрации струй топлива.

На рис. 1 показаны результаты обработки фотографий топливных струй, полученных при открытии электромагнитного клапана ЭГФ №1 одинаковым управляющим импульсом длительностью  $\tau=0,7$  мс. Представленные результаты, получены при впрыскивании топлива в воздушную среду без противодействия. Видеорегистрация струй проводилась в проходящем через нее свете высокоскоростной видеокамерой с частотой  $5000$  Гц.

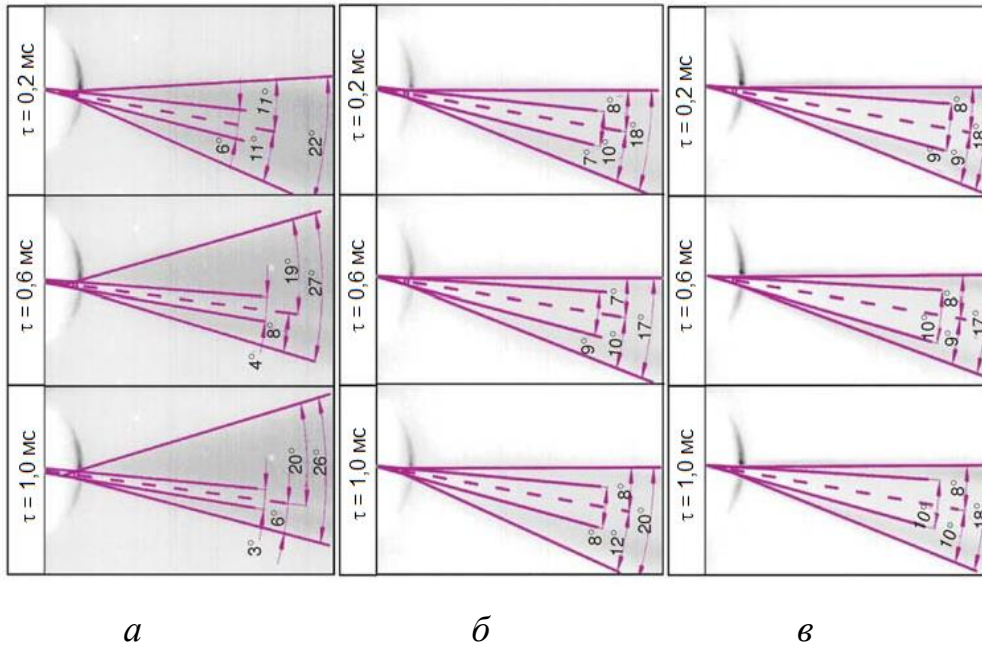


Рис. 1. Фотографии топливных струй при различных значениях давления  $p_{ак}$ :

$a - p_{ак}=50$  МПа;  $б - p_{ак}=150$  МПа;  $в - p_{ак}=250$  МПа;

$\tau$  – время с момента начала впрыскивания

При давлении в аккумуляторе 50 МПа угол конуса ядра струи, состоящего из распадающихся на капли макрообъемов топлива, составляет  $3...6^\circ$  (рис. 1,а) и коррелируется с результатами, полученными ранее в МАДИ:  $3...5^\circ$  [1]. При увеличении давления впрыскивания угол конуса ядра растет, так при 150 МПа он составляет  $7...9^\circ$  (рис. 1,б), а при 250 МПа –  $9...10^\circ$  (рис. 1,в).

Повышение давления в аккумуляторе способствует снижению угла пограничного слоя струи, содержащего смесь воздуха и капель топлива, с  $22...27^\circ$  при 50 МПа (рис. 1,а) до  $17...18^\circ$  при 250 МПа (рис. 1,в).

В процессе впрыскивания наибольшие колебания пограничного слоя струи относительно ее оси зарегистрированы при  $p_{ак}=50$  МПа (рис. 1,а), их можно приблизительно оценить в пределах  $10^\circ$ . Затем, с увеличением  $p_{ак}$  колебания ядра уменьшаются и становятся практически незаметными при 250 МПа (рис. 1,в).

Впрыскивание топлива вызывает существенные колебания давления топлива в форсунке. В результате наложения волн при многократном впрыскивании возможно как усиление, так и гашение колебательного процесса. Если вторую подачу осуществлять на заднем (увеличение давления) фронте волны или в зоне минимума – происходит гашение колебаний. При второй подаче на переднем (падающем) фронте волны или в зоне максимума колебания усиливаются.

Для оценки влияния интервала  $\Delta t$  между управляющими импульсами двукратного впрыскивания на величину цикловой подачи второй порции при давлениях 200...300 МПа проведены расчетные исследования.

Расчетный анализ рабочего процесса ЭГФ № 2 проведен с применением программного комплекса, разработанного в МАДИ.

Моделировались два одинаковых управляющих импульса длительностями  $\tau_1 = \tau_2$ . При этом  $\tau_1$  выбирался из условия обеспечения величины количества топлива  $Q_1 \approx 3...4$  мг, поданного за первое впрыскивание.

Результаты расчета работы ЭГФ № 2 представлены на рис. 2.

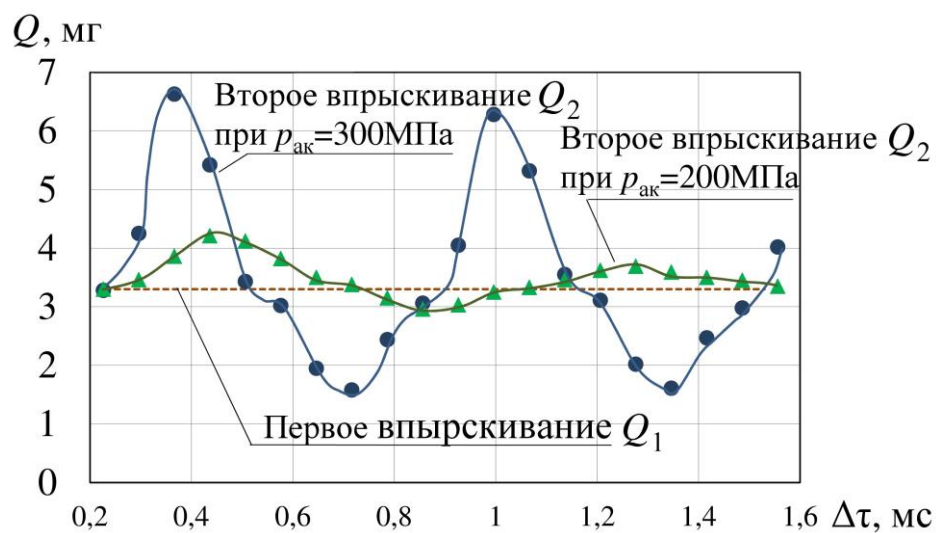


Рис. 2. Количество топлива  $Q_2$ , подаваемое за второе впрыскивание при двухфазном впрыскивании ( $Q_1 = 3,3$  мг)

С увеличением давления  $p_{ак}$  волновой процесс и его влияние на топливоподачу усиливается. При давлении  $p_{ак}=200$  МПа разброс цикловых подач второй порции составляет  $Q_2 = 2,36...4,62$  мг, а при  $p_{ак}=300$  МПа –  $Q_2 = 1,58...6,63$  мг.

### **Управление характеристикой впрыскивания топлива**

Проведены исследования предложенного способа изменения формы характеристики впрыскивания воздействием на управляющие импульсы, подаваемые на управляющий электромагнитный клапан электрогидравлической форсунки.

Длительность предварительного импульса определяет амплитуду предварительного этапа характеристики впрыскивания, а интервал между предварительным и основным импульсом – амплитуду между предварительным и основным этапами характеристики впрыскивания.

Интервал между основным и дополнительным импульсами тока подбирается таким образом, чтобы дополнительный этап характеристики впрыскивания начинался после окончания основного, но без интервала между ними.

Технический результат предлагаемого изобретения – обеспечение управления формой характеристики впрыскивания, при одновременном упрощении и удешевлении конструкции электрогидравлической форсунки по сравнению с существующими аналогами.

Применение предлагаемого способа обеспечило формирование как предварительных (режим №7, рис. 3), так и последующих (за основным) впрыскиваний (режимы №7 и 8).

С помощью формирования управляющих импульсов тока возможно получение ступенчатой характеристики впрыскивания (режим №9).

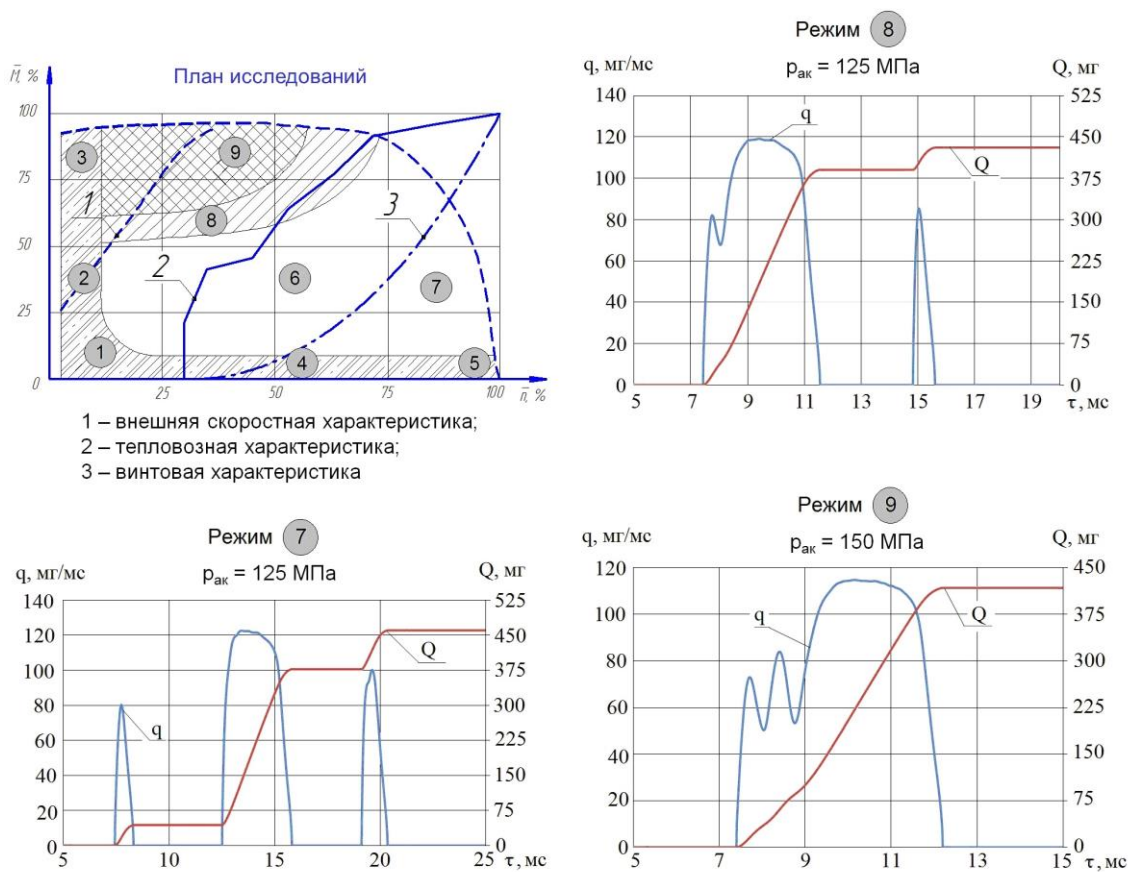


Рис. 3. Возможности управления характеристикой впрыскивания

### Применение распылителей, корректирующих подачу топлива по зонам камеры сгорания дизеля

Для оценка влияния положения входных кромок на параметры, определяющие процесс впрыскивания топлив проведена серия экспериментов с различными вариантами конструкции распылителей. Вариант №1 отличался расположением входных кромок распыливающих отверстий на поверхности колодца распылителя в подыгольном объеме. Характерная особенность варианта №2: входные кромки распыливающих отверстий расположены на запирающем конусе. У обоих вариантов распылителей одинаковые диаметры распыливающих отверстий.

С увеличением высоты подъема иглы у наименьшее значение коэффициента расхода  $\mu_c$  топлива через распыливающие отверстия было у варианта №2 (рис. 4).

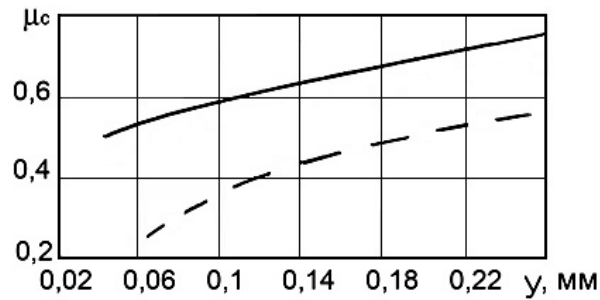


Рис. 4. Коэффициенты расхода топлива через распыливающие отверстия распылителей: ————— – вариант №1; - - - - - – вариант №2

Полученные результаты объясняются следующим. У варианта №2 распылителя поток топлива при втекании в распыливающие отверстия совершает большой поворот (на  $30^\circ$ ) на высокой скорости. Это создает большую энергию турбулентных пульсаций потока, что обеспечивает более мелкое распыливание топлива.

Ниже представлен вариант опытного распылителя (рис. 5), выполненный на базе серийного изделия Ногинского завода топливной аппаратуры. Этот распылитель корректирует подачу топлива по зонам камеры сгорания с учетом режима работы дизеля, особенностей его конструкции и рабочего цикла.

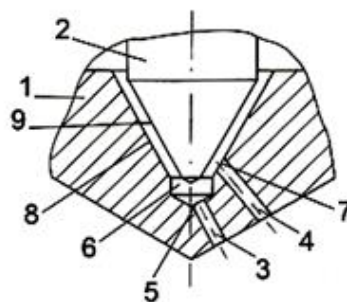


Рис. 5. Схема корректирующего распылителя:

1 – корпус; 2 – запирающая игла; 3, 4 – распыливающие отверстия; 6 – подыгольный объем; 8, 9 – запирающие конуса корпуса и иглы; 5, 7 – входные кромки распыливающих отверстий



Конструкция распылителя предусматривает отверстия двух групп – 3 и 4. Входные кромки 5 отверстий первой группы с коэффициентом расхода  $\mu_{c1}$  расположены в подыгольном объеме 6, а входные кромки 7 отверстий второй группы (коэффициент расхода  $\mu_{c2}$ ) – на запирающей конической поверхности 8 корпуса распылителя.

Результаты сопоставления значений  $\mu_{c1}$  и  $\mu_{c2}$  показаны на рис. 6. Сравнение проведено для двух значений числа кавитации КС (отношение разности давлений на входе и выходе из канала распыливающего отверстия к давлению на выходе из канала) при различных подъемах иглы  $y$ .

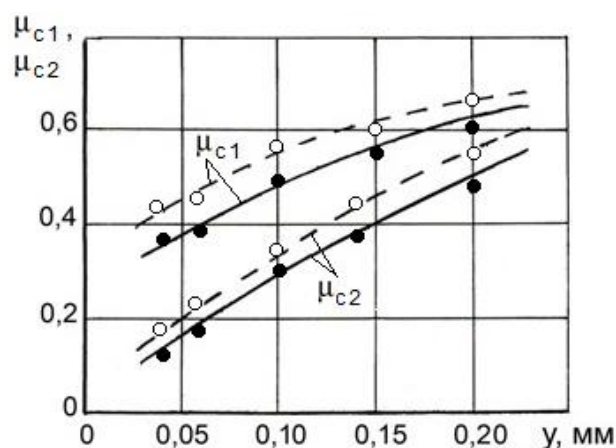


Рис. 6. Влияние положения иглы и числа кавитации на коэффициент расходов распыливающих отверстий: — — — — КС = 3; ————— КС = 60

Коэффициенты расхода  $\mu_{c1}$  и  $\mu_{c2}$ , соответствующие отверстиям 3 и 4, существенно отличаются и зависят от положения иглы. При  $y > 0,2$  мм  $\mu_{c1} > \mu_{c2}$  на 10 ... 20%, при  $y < 0,1$  мм  $\mu_{c1} > \mu_{c2}$  в 2 ... 3 раза. Это создает предпосылки к коррекции подачи топлива по распыливающим отверстиям, а следовательно, по зонам камеры сгорания с учетом режима работы дизеля.

Показанная на рис. 5 конструкция распылителя дает возможность более эффективно использовать весь воздух, находящийся в камере сгорания. Отверстия первой группы с  $\mu_{c1}$  ориентируются на дальние стенки ка-

меры сгорания, расположенной в поршне, а отверстия второй группы с  $\mu_{с2}$  – на ближние.

### **Выводы**

1. При увеличении давления впрыскивания угол конуса ядра струи, состоящего из распадающихся на капли макрообъемов топлива, растет. Повышение давления в аккумуляторе способствует снижению угла пограничного слоя струи, содержащего смесь воздуха и капель топлива, с  $22...27^\circ$  при 50 МПа до  $17...18^\circ$  при 250 МПа.

2. С увеличением давления в аккумуляторе  $p_{ак}$  волновой процесс и его влияние на топливоподачу усиливается. Так изменение интервала между впрыскиваниями при работе форсунки ЭГФ №2 с давлением  $p_{ак}=200$  МПа привело к разбросу цикловых подач второй порции  $Q_2 = 2,36...4,62$  мг, а при  $p_{ак}=300$  МПа –  $Q_2 = 1,58...6,63$  мг.

3. Предложен способ изменения формы характеристики впрыскивания воздействием на управляющие импульсы, подаваемые на электромагнитный клапан форсунки. С помощью формирования управляющих импульсов тока возможно получение ступенчатой характеристики впрыскивания.

4. Расположение входных кромок распыливающих отверстий в сочетании с управлением движением запирающей иглы распылителя электрогидравлической форсунки обеспечивает направленное воздействие на распределение топлива по зонам камеры сгорания дизеля.

### **Литература**

[1] *Топливные системы и экономичность дизелей* / И.В. Астахов, Л.Н. Голубков, В.И. Трусков, А.С. Хачиян и др. – М.: Машиностроение, 1990. 288 с.