

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОДАЧИ ТОПЛИВА АККУМУЛЯТОРНОЙ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМОЙ

NEW OPPORTUNITIES TO IMPROVE THE FUEL SUPPLY SYSTEM WITH A BATTERY FUEL SYSTEM

А.Ю. ДУНИН, К.Т.Н.
Л.Н. ГОЛУБКОВ, Д.Т.Н.
В.И. МАЛЬЧУК, К.Т.Н.
П.В. ДУШКИН, К.Т.Н.
И.Е. ИВАНОВ, Д.Т.Н.

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, dvs@madi.ru

A.YU. DUNIN, PhD in Engineering
L.N. GOLUBKOV, DSc in Engineering
V.I. MAL'CHUK, PhD in Engineering
P.V. DUSHKIN, PhD in Engineering
I.E. IVANOV, DSc in Engineering

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, dvs@madi.ru

В статье показано воздействие повышения давления впрыскивания (до $p_{ак} = 250$ МПа) на динамику развития топливной струи. Повышение давления в аккумуляторе привело к уменьшению угла пограничного слоя струи. Показано уменьшение колебаний пограничного слоя струи относительно ее оси. Наибольшие колебания зарегистрированы при $p_{ак} = 50$ МПа. Затем, с увеличением $p_{ак}$ колебания ядра уменьшаются и становятся практически незаметными при 250 МПа. Предложен способ управления формой дифференциальной характеристики впрыскивания электрическим импульсом, который подается на электромагнит управляющего клапана электрогидравлической форсунки аккумуляторной топливной системы. Импульс состоит из предварительного, основного и следующего за ним дополнительного. Длительность предварительного импульса определяет амплитуду начального этапа характеристики впрыскивания, а интервал между предварительным и основным импульсом – амплитуду между начальным и основным этапами характеристики впрыскивания. Интервал между основным и дополнительным электрическими импульсами подбирается таким образом, чтобы последующий этап характеристики впрыскивания начинался после окончания основного, но без интервала между ними. Подбором длительностей управляющих электрических импульсов и интервалов между ними можно получить заданную форму дифференциальной характеристики впрыскивания – от ступенчатой до характеристики с наклонным передним фронтом. В распылителях с двумя группами отверстий (корректирующий распылитель) коэффициент расхода отверстий в подыгольном объеме и на запирающем конусе существенно отличаются и зависят от положения иглы. Это создает предпосылки к коррекции подачи топлива по распыливающим отверстиям и, следовательно, по зонам камеры сгорания с учетом режима работы дизеля.

Ключевые слова: дизель, аккумуляторная топливная система, давление впрыскивания, управление формой характеристики впрыскивания, коррекция подачи топлива по зонам камеры сгорания.

The article shows the effect of increasing the injection pressure (up to $p = 250$ MPa) on the dynamics of the development of the fuel jet. An increase in the pressure in the accumulator led to a decrease in the angle of the boundary layer of the jet. A decrease in the oscillations of the boundary layer of the jet about its axis is shown. The greatest variations were recorded at $p_{ак} = 50$ MPa. Then, as the $p_{ак}$ increases, the vibrations of the nucleus decrease and become practically imperceptible at 250 MPa. A method for controlling the shape of the differential injection characteristic by an electric pulse, which is applied to an electromagnet of the control valve of the electrohydraulic injector of battery fuel system, is provided. The impulse consists of the preliminary, the main and the following additional one. The duration of the preliminary impulse determines the amplitude of the initial stage of the injection characteristic, and the interval between the preliminary and main pulse is the amplitude between the initial and main stages of the injection characteristic. The interval between the main and additional electric pulses is selected in such a way that the subsequent stage of the injection characteristic begins after the termination of the main, but without an interval between them. By selecting the durations of the control electric pulses and the intervals between them, it is possible to obtain a predetermined shape of the differential injection characteristic from stepped to a characteristic with an inclined leading edge. In nozzles with two groups of holes (correction sprayer), the flow rate of the holes in the sub-head volume and on the locking cone is significantly different and depends on the position of the needle. This creates the prerequisites for correcting the fuel supply through the spray holes and, consequently, along the zones of the combustion chamber, taking into account the mode of operation of the diesel engine.

Keywords: diesel, battery fuel system, injection pressure, control of the shape of the injection characteristic, correction of fuel supply to the combustion chamber zones.

Введение

Современные исследования по совершенствованию конструкции и рабочего процесса аккумуляторных топливных систем (АТС) направлены на повышение энергоэффективности дизелей и их соответствие 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 одними из перспективных направлений совершенствования АТС являются: повышение давления впрыскивания до 300 МПа и выше [1, 2]; организация двух и более кратной подачи топлива за цикл; управление формой характеристики впрыскивания [3, 4] и распределением топлива по зонам камеры сгорания дизеля в соответствии с режимом его работы (зональное смесеобразование).

Цель исследований

Цель экспериментальных исследований заключалась в оценке влияния повышения давления впрыскивания на форму и строение струи впрыскиваемого топлива. Полученные сведения необходимы для дальнейшего уточнения существующих математических моделей, описывающих процессы истечения топлива из распылителя электрогидравлической форсунки (ЭГФ).

Поскольку впрыскивание топлива вызывает существенные колебания давления на входе в форсунку, была проведена расчетная оценка влияния управляемых параметров впрыскивания на колебательный процесс в каналах ЭГФ.

Расположение входных кромок распыливающих отверстий в сочетании с управлением движением запирающей иглы распылителя ЭГФ обеспечивает управление распределением топлива по зонам камеры сгорания дизеля в соответствии с режимом его работы. Цель проведенных исследований – оценка влияния положения входных кромок на параметры, определяющие процесс впрыскивания топлива.

Объект и результаты исследований

Для проведения исследований были отобраны два варианта ЭГФ с электромагнитным приводом управляющего клапана (рис. 1). Вторая форсунка ЭГФ № 2 (рис. 1, б) отличается от первой ЭГФ № 1 (рис. 1, а) наличием то-

пливного аккумулятора, встроенного в корпус, и конструкцией управляющего клапана, разгруженного от силы давления топлива [1, 2].

Расходные характеристики (зависимость количества цикловой подачи топлива от продолжительности управляющего импульса, подаваемого от блока управления на электромагнит клапана ЭГФ), определялись взвешиванием порции топлива, собранной за контрольное число циклов.

Расходная характеристика ЭГФ № 1 показана на рис. 2.

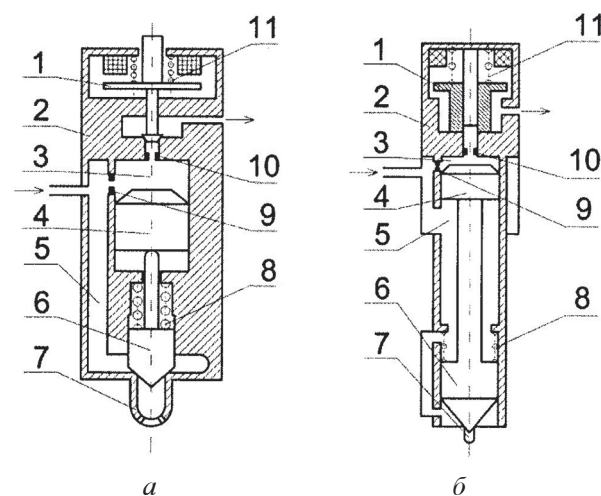


Рис. 1. Схемы электрогидравлических форсунок № 1 (а) и 2 (б), отобранных для проведения экспериментального обоснования выбора конструктивных решений разрабатываемой топливной системы:

- 1 – якорь управляющего клапана; 2 – корпус форсунки; 3 – управляющая камера; 4 – поршень мультипликатора; 5 – внутренняя полость форсунки; 6 – игла распылителя; 7 – подыгольный объем; 8 – пружина иглы; 9 – наполнительный жиклер; 10 – выпускной жиклер; 11 – пружина клапана

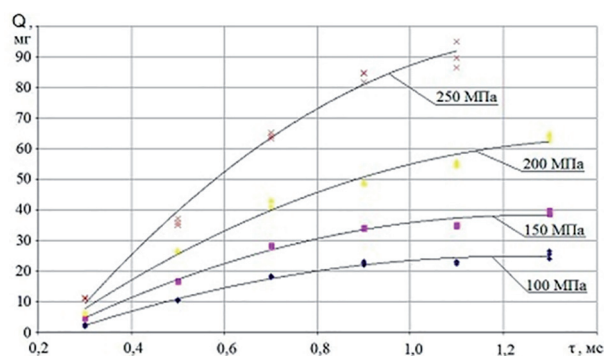


Рис. 2. Зависимость цикловой подачи Q ЭГФ № 1 от длительности управляющего импульса τ и давления топлива в аккумуляторе $p_{ак}$

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 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- 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 $p_{ак} = 100\text{...}300$ МПа нарушения ее рабочего процесса не наблюдались. Расходная характеристика ЭГФ № 2 приведена на рис. 3. По сравнению с ЭГФ № 1 привод данной форсунки оказался более быстродействующим.

Для ЭГФ № 1 изготовлен опытный одноструйный распылитель с диаметром распы-

ливающего отверстия 0,12 мм для проведения видеорегистрации струй топлива.

На рис. 4 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.

При давлении в аккумуляторе 50 МПа угол конуса ядра струи, состоящего из распадающихся на капли макрообъемов топлива, составляет $3\text{...}6^{\circ}$ (рис. 4, а) и коррелируется с результатами, полученными ранее в МАДИ – $3\text{...}5^{\circ}$ [5]. При увеличении давления впрыскива-

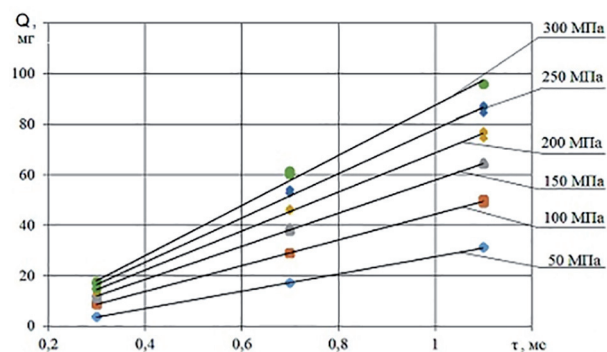


Рис. 3. Зависимость цикловой подачи Q ЭГФ № 2 от длительности управляющего импульса τ и давления топлива в аккумуляторе $p_{ак}$

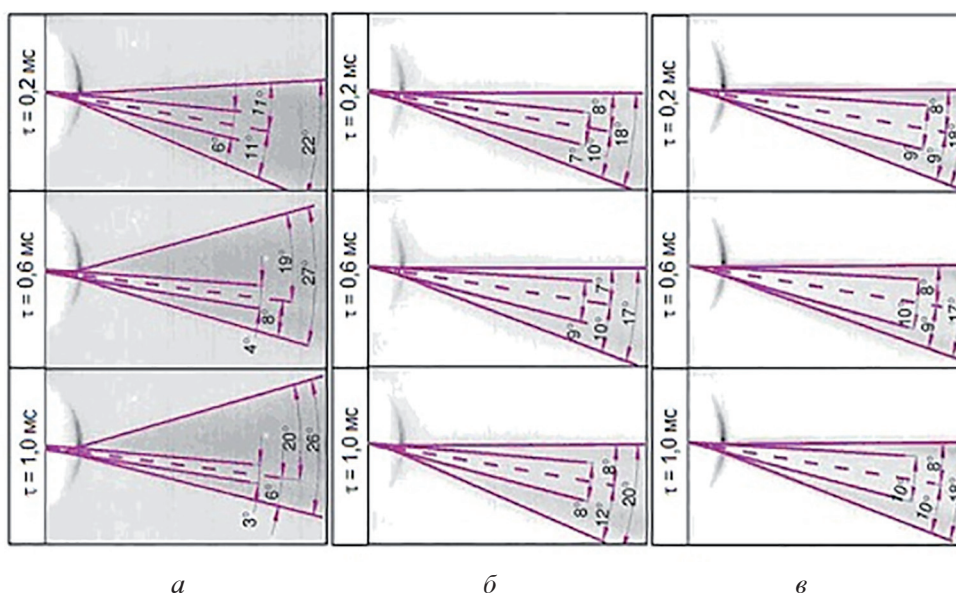


Рис. 4. Фотографии топливных струй при различных значениях давления $p_{ак}$: а – $p_{ак} = 50$ МПа; б – $p_{ак} = 150$ МПа; в – $p_{ак} = 250$ МПа; τ – время с момента начала впрыскивания

ния угол конуса ядра растёт: так, при 150 МПа он составляет 7...9° (рис. 4, б), а при 250 МПа – 9...10° (рис. 4, в).

Повышение давления в аккумуляторе способствует снижению угла пограничного слоя струи, содержащего смесь воздуха и капель топлива, – с 22...27° при 50 МПа (рис. 4, а) до 17...18° при 250 МПа (рис. 4, в).

В процессе впрыскивания наибольшие колебания пограничного слоя струи относительно ее оси зарегистрированы при $p_{ак} = 50$ МПа (рис. 4, а), их можно приблизительно оценить в пределах 10°. Затем, с увеличением $p_{ак}$ колебания ядра уменьшаются и становятся практически незаметными при 250 МПа (рис. 4, 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 Δt 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 τ_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. 5.

С увеличением давления $p_{ак}$ волновой процесс и его влияние на топливоподачу усиливаются. 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.

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 (рис. 6).

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. 7), так и последующих (за основным) впрыскиваний (режимы 7 и 8).

С помощью формирования управляющих импульсов тока возможно получение ступенчатой характеристики впрыскивания (режим 9).

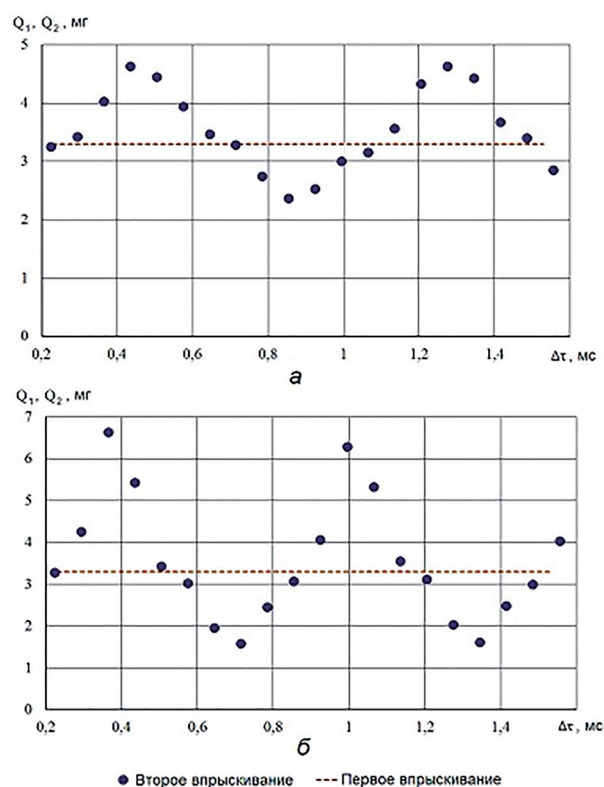


Рис. 5. Количество топлива Q_2 , подаваемое за второе впрыскивание при двухфазном впрыскивании ($Q_1 = 3,3$ мг): а – $p_{ак} = 200$ МПа; б – $p_{ак} = 300$ МПа

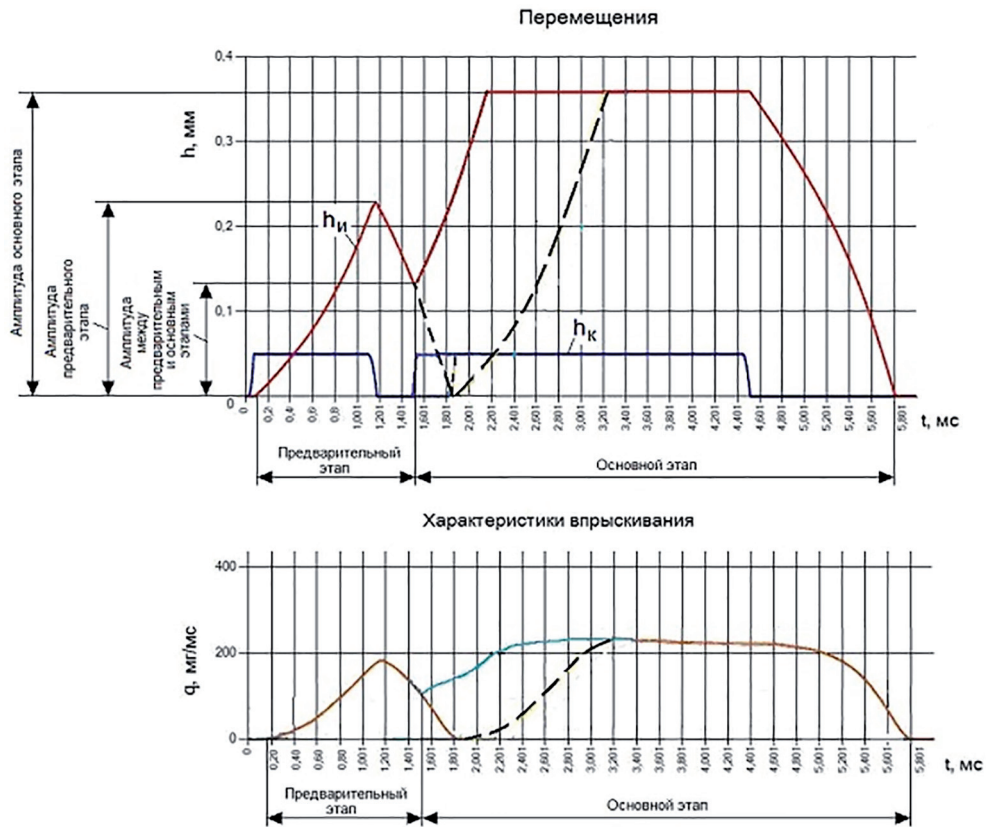


Рис. 6. Влияние изменения начала основного управляющего импульса на подъем управляющего клапана h_k , ход иглы h_n распылителя электрогидравлической форсунки и формирование характеристики впрыскивания $q(t)$ (t – время)

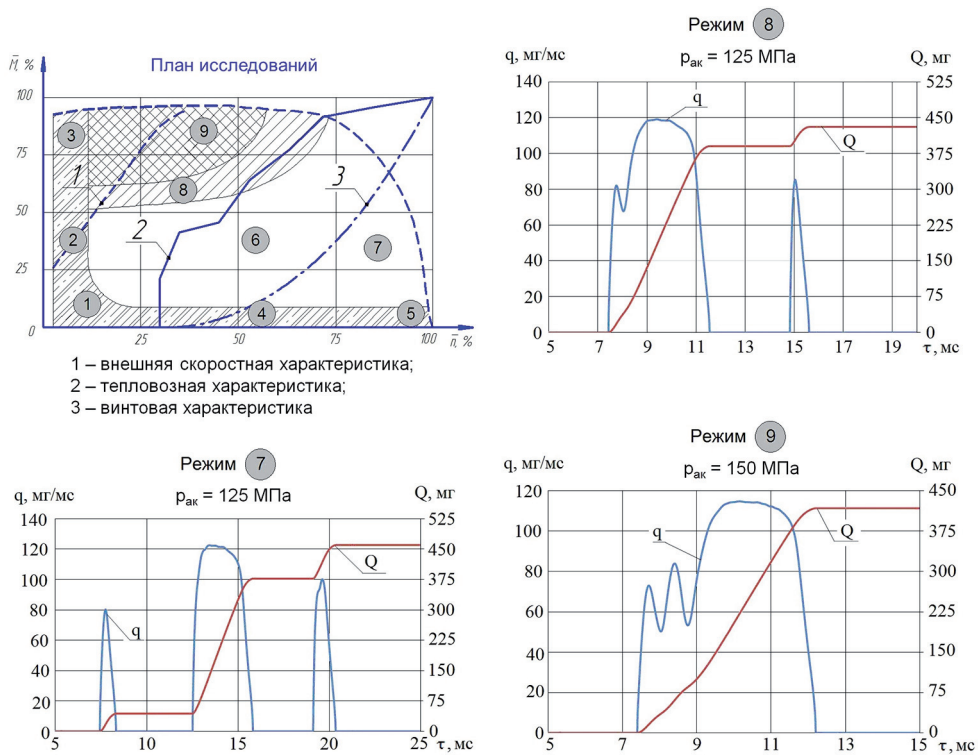


Рис. 7. Возможности управления характеристикой впрыскивания

Для оценки влияния положения входных кромок на параметры, определяющие процесс впрыскивания топлив проведена серия экспериментов с различными вариантами конструкции распылителей (рис. 8). Вариант № 1 отличался расположением входных кромок 4 распыливающих отверстий 3 на поверхности колодца распылителя в подыгольном объеме 5. Характерная особенность варианта № 2: входные кромки распыливающих отверстий расположены на запирающем конусе 6. У обоих вариантов распылителей одинаковые диаметры распыливающих отверстий.

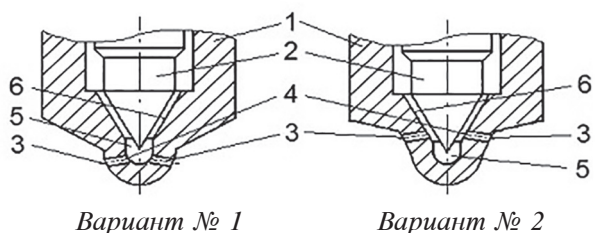


Рис. 8. Схемы вариантов исследуемых распылителей:

- 1 – корпус распылителя; 2 – игла;
- 3 – распыливающие отверстия; 4 – входные кромки распыливающих отверстий; 5 – подыгольный объем; 6 – запирающий конус корпуса распылителя

С увеличением высоты подъема иглы у наименьшее значение коэффициента расхода μ_c топлива через распыливающие отверстия при всех y было у варианта № 2 (рис. 9).

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

Ниже представлен вариант опытного распылителя (рис. 10), 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.

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

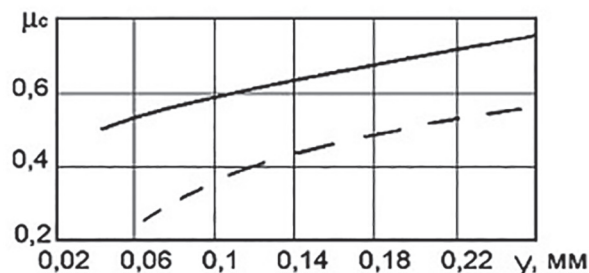


Рис. 9. Коэффициенты расхода топлива через распыливающие отверстия распылителей: — вариант № 1; - - - вариант № 2

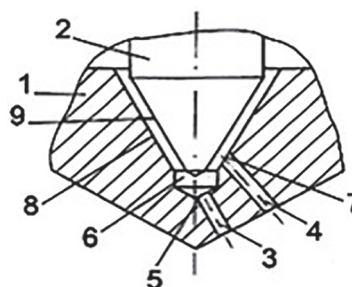


Рис. 10. Схема корректирующего распылителя:

- 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

Результаты сопоставления значений μ_{c1} и μ_{c2} показаны на рис. 11. 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 .

Коэффициенты расхода μ_{c1} и μ_{c2} , соответствующие отверстиям 3 и 4, существенно от-

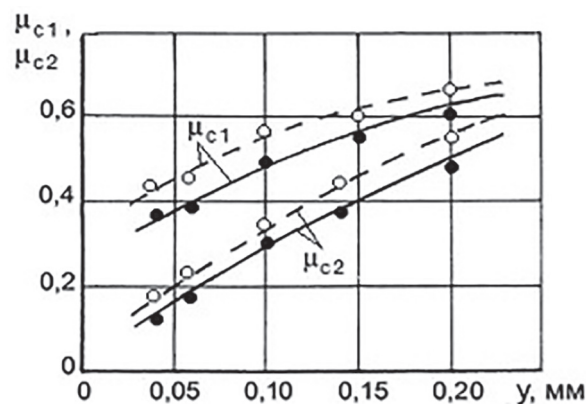


Рис. 11. Влияние положения иглы и числа кавитации на коэффициент расходов распыливающих отверстий: - - - КС = 3; — КС = 60

личаются 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 и, следовательно, по зонам камеры сгорания с учетом режима работы дизеля.

Показанная на рис. 10 конструкция распылителя дает возможность более эффективно использовать весь воздух, находящийся в камере сгорания. Отверстия первой группы с μ_{c1} ориентируются на дальние стенки камеры сгорания, расположенной в поршне, а отверстия второй группы с μ_{c2} – на ближние.

Выводы

1. При увеличении давления впрыскивания угол конуса ядра струи, состоящего из распающихся на капли макрообъемов топлива, растет: так, при 50 МПа он составляет 3...6°, а при 250 МПа – 9...10°. Повышение давления в аккумуляторе способствует снижению угла пограничного слоя струи, содержащего смесь воздуха и капель топлива, с 22...27° при 50 МПа до 17...18° при 250 МПа.

2. С увеличением давления в аккумуляторе $p_{ак}$ волновой процесс и его влияние на топливоподачу усиливаются. 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. Предложенный способ изменения формы характеристики впрыскивания воздействием на управляющие импульсы, подаваемые на электромагнитный клапан форсунки, обеспечивает формирования как предварительных, так и последующих (за основным) впрыскиваний. С помощью формирования управляющих импульсов тока возможно получение ступенчатой характеристики впрыскивания.

4. В распылителях с двумя группами отверстий (корректирующий распылитель) коэффициенты расхода отверстий в подыгольном объеме μ_{c1} и на запирающем конусе μ_{c2} 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 и, следовательно, по зонам камеры сгорания с учетом режима работы дизеля.

Литература

1. Shatrov M.G., Golubkov L.N., Dunin A.U., Yakovenko A.L., Dushkin P.V. Influence of high injection pressure on fuel injection performances and diesel engine working process // *Thermal science*. 2015. Vol. 19. No. 6. P. 2245–2253. DOI: 10.2298/TSCI151109192S.
2. Shatrov M.G., Golubkov L.N., Dunin A.U., Yakovenko A.L., Dushkin P.V. Research of the injection pressure 2000 bar and more on diesel engine parameters // *International Journal of Applied Research*. 2015. Vol. 10. No. 20. P. 41098–41102.
3. Leonhard R., Parche M., Alvarez-Avila C., Krauß J., Rosenau B. Pressure-amplified common rail system for commercial vehicles // *MTZ worldwide*. 2009. Vol. 70. No. 5. P. 10–15.
4. Wiartalla A., Ruhkamp L., Koerfer T. Future Emission Demands for Ship and Locomotive Engines – Challenges, Concepts and Synergies from HD-Applications // *CIMAC Congress 2010*. No. 174. P. 10.
5. Астахов И.В., Голубков Л.Н., Трусов В.И., Хачиян А.С., Рябикин Л.М. Топливные системы и экономичность дизелей. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.

References

1. Shatrov M.G., Golubkov L.N., Dunin A.U., Yakovenko A.L., Dushkin P.V. Influence of high injection pressure on fuel injection performances and diesel engine working process // *Thermal science*. 2015. Vol. 19. No. 6. P. 2245–2253. DOI: 10.2298/TSCI151109192S.
2. Shatrov M.G., Golubkov L.N., Dunin A.U., Yakovenko A.L., Dushkin P.V. Research of the injection pressure 2000 bar and more on diesel engine parameters // *International Journal of Applied Research*. 2015. Vol. 10. No. 20. P. 41098–41102.
3. Leonhard R., Parche M., Alvarez-Avila C., Krauß J., Rosenau B. Pressure-amplified common rail system for commercial vehicles // *MTZ worldwide*. 2009. Vol. 70. No. 5. P. 10–15.
4. Wiartalla A., Ruhkamp L., Koerfer T. Future Emission Demands for Ship and Locomotive Engines – Challenges, Concepts and Synergies from HD-Applications // *CIMAC Congress 2010*. No. 174. P. 10.
5. Astakhov I.V., Golubkov L.N., Trusov V.I., Khachiyanyan A.S., Ryabikin L.M. *Toplivnyye sistemy i ekonomichnost' dizeley* [Fuel systems and efficiency of diesel engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990. 288 p.