

УДК (UDC) 621.431

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННО-УПРАВЛЯЕМОЙ ФОРСУНКИNUMERICAL INVESTIGATION OF INFLUENCE OF THE DESIGN PARAMETERS ON
THE OPERATING SPEED OF THE ELECTRONICALLY CONTROLLED INJECTORКеримов З.Х., Джафарли М.К.
Kerimov Z.Kh., Jafarli M.K.Азербайджанский Технический Университет (Баку, Азербайджан)
Azerbaijan Technical University (Baku, Azerbaijan)

Аннотация. Одной из актуальных проблем транспортной энергетики является удовлетворение требованиям, предъявляемым как к экологическим, так и к технико-экономическим показателям автомобильных двигателей. Поэтому для удовлетворения этим требованиям был предложен новый рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания и разработана новая конструкция электронно-управляемой форсунки двигателя. Одним из существенных требований, предъявляемых к разработанной конструкции электронно-управляемой форсунки, является высокое быстродействие. Поэтому целью настоящей работы является проведение исследований по повышению быстродействия форсунки. С помощью математического моделирования исследовано влияние различных конструктивных параметров на работоспособность и быстродействие форсунки. Приведены и проанализированы результаты численных исследований. В результате определены рациональные значения конструктивных параметров разработанной электронно-управляемой форсунки.

Ключевые слова: аккумуляторная топливная система, непосредственный впрыск бензина, электронно-управляемая форсунка.

Дата принятия к публикации: 05.05.2020
Дата публикации: 25.06.2020

Сведения об авторах:

Керимов Зияфат Хейрулла оглу – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобильная техника», Азербайджанский Технический Университет, e-mail: kerimov_z@yahoo.com

Джафарли Мирали Камран оглу – старший преподаватель кафедры «Автомобильная техника», Азербайджанский Технический Университет, e-mail: mkceferli@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6942-8863

Abstract. One of the actual problems of transport energetic is to meet the requirements for both environmental and technical and economic characteristics of automobile engines. Therefore, to meet these requirements, a new working process for the internal combustion engine was proposed and a new design of the electronically controlled injector was developed in accordance with the requirements of the new working process. One of the essential requirements for the developed design of an electronically controlled injector is high operating speed. Therefore, the objective of this work is the implementation of research to improve the operating speed of the injector. By the method of mathematical modeling investigated the influence of various design parameters on the performance and the operating speed of the injector. The results of the numerical investigations are presented and analyzed. As a result, the rational values of the design parameters of the developed electronically controlled injector are determined.

Keywords: accumulator fuel system, direct petrol injection, electronically controlled injector.

Date of acceptance for publication: 05.05.2020
Date of publication: 25.06.2020

Authors' information:

Kerimov Ziyafat Kheyruulla ogly – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair «Automotive Engineering», Azerbaijan Technical University, e-mail: kerimov_z@yahoo.com

Jafarli Mirali Kamran ogly – senior teacher of the Chair «Automotive Engineering», Azerbaijan Technical University, e-mail: mkceferli@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6942-8863

1. Введение

В последние несколько десятилетий как к экологическим, так и к технико-экономическим показателям автомобильных двигателей

предъявляются все более жесткие требования. Для удовлетворения этим требованиям на кафедре «Автомобильная техника» Азербайджанского Технического Университета (АзТУ) был предложен новый рабочий процесс

двигателя с непосредственным впрыском бензина в цилиндр, расслоенным зарядом и форкамерно-факельным зажиганием [1].

За счет особенностей организации рабочего процесса двигателя предусматривается повышение удельной мощности, топливной экономичности двигателя, снижение количества токсичных продуктов сгорания в выхлопных газах, а также значительное повышение детонационной стойкости рабочего процесса. Особенности предложенного рабочего процесса предъявляют к системе впрыска бензина некоторые повышенные требования, основными из которых являются осуществление двухэтапного впрыска с возможностью отдельного регулирования момента начала и продолжительности каждого этапа, а также возможность впрыска малых доз топлива для формирования запального заряда в полости форкамеры [2]. Для удовлетворения этим требованиям в [3] была разработана конструкция электронно-управляемой форсунки, предназначенной для работы в составе электронно-управляемой топливной системы с аккумулятором давления автомобильного двигателя.

2. Постановка задачи

В большинстве современных автомобильных дизельных двигателей и двигателей с непосредственным впрыском бензина применяются электронно-управляемые топливные системы с аккумулятором давления. Для реализации преимуществ этих топливных систем, таких как многоэтапное и многоступенчатое впрыскивание за отводимое короткое время для подачи топлива, электронно-управляемые форсунки этих систем должны иметь высокое быстродействие [4-8].

Под быстродействием электронно-управляемой, то есть электрогидравлической форсунки подразумевается время от начала подачи управляющего электрического импульса на управляющий элемент (электромагнит или пьезо-актюатор) до начала подъема иглы (или впрыскивающего клапана) форсунки и время от снятия управляющего электрического импульса до посадки иглы (или впрыскивающего клапана) форсунки [9]. Поэтому

быстродействие электрогидравлической форсунки зависит от быстродействия управляющего клапана и гидравлической системы форсунки [10].

Следует отметить, что конструкции электромагнитных приводов, являющихся одними из управляющих элементов форсунок, постоянно совершенствуются [11]. Однако несмотря на это, пьезоэлектрические приводы, используемые в качестве управляющего элемента, несомненно, обладают в несколько раз более высоким быстродействием [12-14]. Поэтому в рассматриваемой конструкции форсунки в качестве управляющего элемента применен пьезо-актюатор.

Что касается быстродействия гидравлической системы форсунки, то этот вопрос сложнее, так как большинство электрогидравлических форсунок, применяемых в автомобильных двигателях, имеют достаточно сложную гидромеханическую систему. Это обусловлено тем, что по ряду определенных причин управление распыливающей иглой (или впрыскивающим клапаном) осуществляется не непосредственно от управляющего элемента (электромагнита, пьезо-актюатора и др.), а через гидравлическую систему, состоящую из жиклеров, каналов и полостей [9]. Поэтому быстродействие гидравлической системы форсунки зависит от конструкции и параметров этой системы [10].

Процессы, происходящие в каналах и полостях форсунки, характеризуются не только сложным характером протекания этих процессов, но и их воздействием друг на друга. Сам же характер протекания процессов определяется конструктивными параметрами – диаметрами и длинами каналов, размерами полостей, объемами и площадями, а также параметрами механической части – массами, жесткостями и перемещениями иглы (или впрыскивающего клапана) и управляющего клапана [9].

Вследствие взаимовлияния и взаимосвязи процессов, имеющих место при работе электрогидравлической форсунки, набор конструктивных параметров должен быть таким, чтобы обеспечивать работоспособность и большое быстродействие форсунки в широком диапазоне режимов (от минимального до

максимального значения давления топлива в аккумуляторе и продолжительности управляющего импульса) [9]. Следует отметить, что электрогидравлическая форсунка, имеющая даже самую простую конструкцию, для обеспечения работоспособности и, тем более эффективности, тоже обязательно требует рационализации конструктивных параметров [15].

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является повышение быстродействия разработанной электронно-управляемой форсунки.

Для достижения поставленной цели необходимо проведение следующих исследований:

- исследование влияния конструктивных параметров на работоспособность и быстродействие форсунки;
- определение рациональных значений конструктивных параметров, обеспечивающих повышение быстродействия разработанной электронно-управляемой форсунки.

4. Решение задачи

На рис. 1 представлена конструктивная схема исследуемой электронно-управляемой форсунки. В форсунке использована сопловая часть обычной клапанно-сопловой форсунки с гидравлическим управлением впрыскивающего клапана, которая изначально предусматривалась для применения в составе системы с плунжерным насосом высокого давления. Полость управляющего клапана с помощью трубопровода высокого давления и входного канала сообщается с полостью аккумулятора давления.

При поступлении управляющего напряжения от блока электронного управления пакет пьезоэлементов расширяется и воздействует на управляющий клапан, последний открывается и в камеру управления поступает топливо под высоким давлением. Впрыскивающий клапан открывается и начинается впрыск топлива [3, 16].

С прекращением управляющего электрического импульса управляющий клапан под

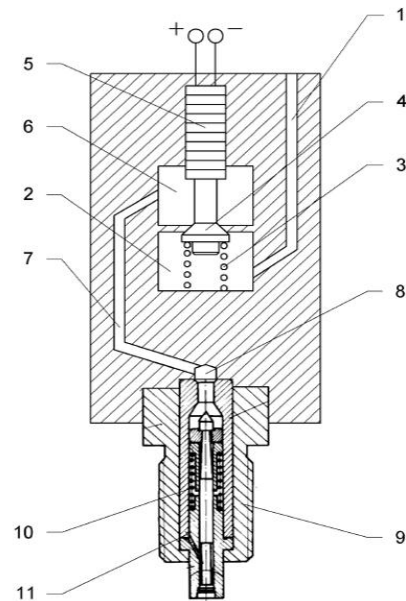


Рис. 1. Принципиальная схема электронно-управляемой форсунки [3, 16]:
1 - входной канал; 2 - полость управляющего клапана; 3 - пружина управляющего клапана; 4 - управляющий клапан; 5 - пакет пьезоэлементов; 6 - камера управления; 7 - соединительный канал; 8 - полость клапанно-сопловой форсунки; 9 - сопловая часть клапанной форсунки; 10 - пружина впрыскивающего клапана; 11 - впрыскивающий клапан

действием пружины возвращается в исходное (закрытое) состояние, прекращая поступление топлива в камеру управления. В результате продолжения истечения топлива из полости клапанно-сопловой форсунки давление топлива в полости клапанно-сопловой форсунки падает, впрыскивающий клапан закрывается, прекращая впрыск топлива. В полостях управления и клапанно-сопловой форсунки, а также в канале управления устанавливается некоторое остаточное давление, ниже давления открытия впрыскивающего клапана. Подробно работа форсунки описана в [3, 16].

Основными конструктивными параметрами гидравлической системы форсунки, влияющими на ее работоспособность и быстродействие являются:

- диаметр и длина входного канала;
- объем полости управляющего клапана;
- жесткость пружины управляющего клапана;

- масса управляющего клапана;
- эффективное проходное сечение управляющего клапана;
- объем камеры управления;
- диаметр и длина соединительного канала;
- объем полости клапанно-соплового распылителя;
- жесткость пружины впрыскивающего клапана;
- масса впрыскивающего клапана.

Как было отмечено, конструкция форсунки разработана на основе сопловой части уже существующей клапанной форсунки и проведенные первичные численные исследования показали целесообразность использования этой сопловой части [17-19]. Поэтому не предусматривалось исследование конструктивных параметров сопловой части форсунки, таких как жесткость пружины и масса впрыскивающего клапана. Минимальное значение жесткости пружины управляющего клапана было определено из условия не отрывания конца клапана от конца пакета пьезоэлементов актюатора при прекращении управляющего электрического импульса и обратном перемещении конца пакета.

Управляющий клапан должен иметь, по возможности, большее проходное сечение при малом его ходе, чтобы не оказывать дросселирующего действия на проходящее топливо и способствовать более полной передаче давления из аккумулятора в полость впрыскивающего клапана [16]. Однако ограниченные размеры и жесткие условия компоновки форсунки не позволяют осуществить это требование в полной мере и приходится принимать компромиссное решение, выбирая по возможности большее эффективное проходное сечение управляющего клапана.

В результате вышеизложенного, можно сделать вывод о необходимости исследования влияния следующих конструктивных параметров на работоспособность и быстродействие форсунки:

- диаметра и длины входного канала;
- объема полости управляющего клапана;
- объема камеры управления;
- диаметра и длины соединительного канала;

- объема полости клапанно-соплового распылителя.

Были проведены расчетные исследования с применением математической модели, представленной в [20]. При математическом моделировании гидродинамических процессов в аккумуляторной системе впрыска бензина за основу была принята методика моделирования, предложенная в [21, 22]. Ее адекватность ранее многократно проверялась на различных системах впрыска топлива.

Для проведения численных исследований математическая модель была реализована в виде компьютерной программы. Длина входного канала L_{TP} изменялась в пределах 0,1...0,4 м с шагом 0,1 м; длина соединительного канала L_{TPO} – в пределах 0,035...0,095 м с шагом 0,02 м; диаметр входного канала D_{TPB} – в пределах 0,002...0,004 м с шагом 0,001 м; диаметр соединительного канала D_{TPBO} – в пределах 0,001...0,004 м с шагом 0,001 м; объем полости управляющего клапана V_f – в пределах 800...1600 мм³ с шагом 200 мм³; объем камеры управления V_U – в пределах 300...1100 мм³ с шагом 200 мм³; объем полости клапанно-соплового распылителя V_S – в пределах 240...560 мм³ с шагом 80 мм³.

В результате численных исследований для различных конструктивных параметров разработанной форсунки была получена исчерпывающая информация об изменении давлений и скоростей топлива во всех полостях системы и сечениях трубопроводов и каналов, а также о кривых движения клапанов в зависимости от времени или угла поворота коленчатого вала двигателя. На рис. 2-8 приведены некоторые результаты численных исследований – кривые изменения давления топлива в полостях аккумулятора давления P_{akk} , управляющего клапана P_f камеры управления P_U и клапанно-соплового распылителя P_S , а также кривые перемещений пьезоэлектрического актюатора вместе с

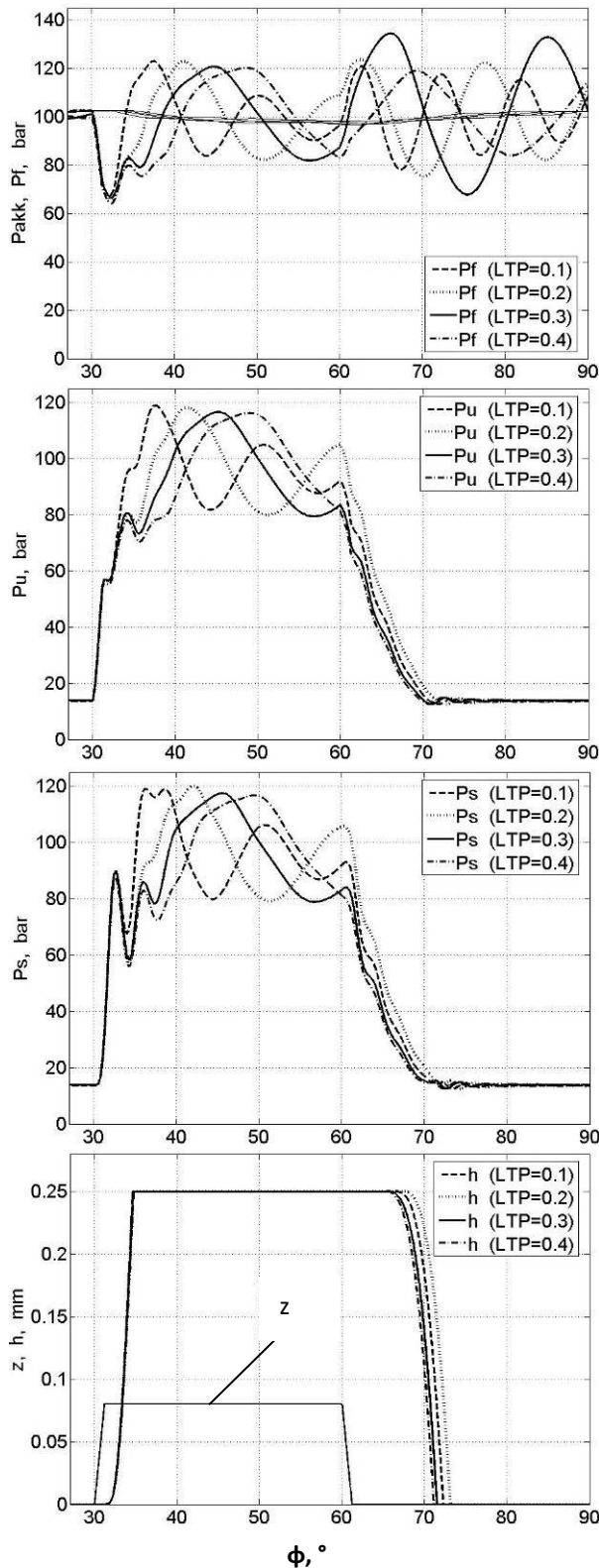


Рис. 2. Влияние длины входного канала L_{TP} на работоспособность и быстродействие форсунки

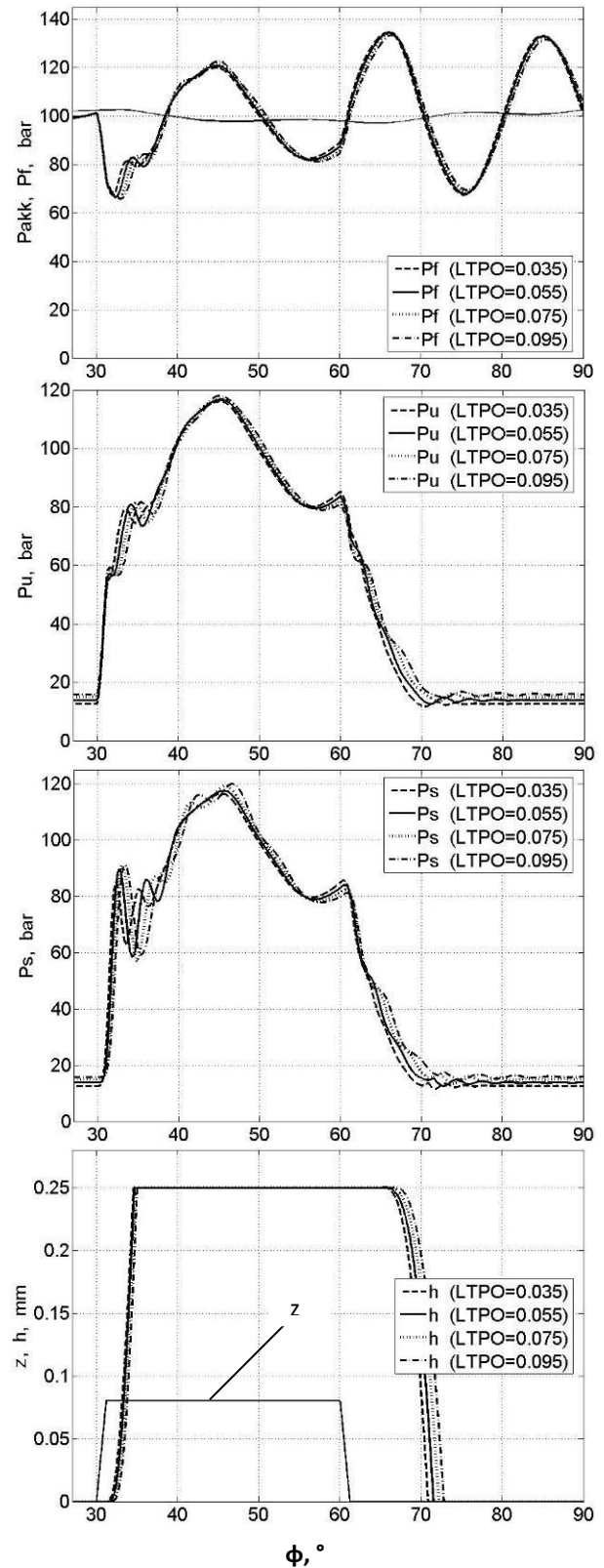


Рис. 3. Влияние длины соединительного канала L_{TPO} на работоспособность и быстродействие форсунки

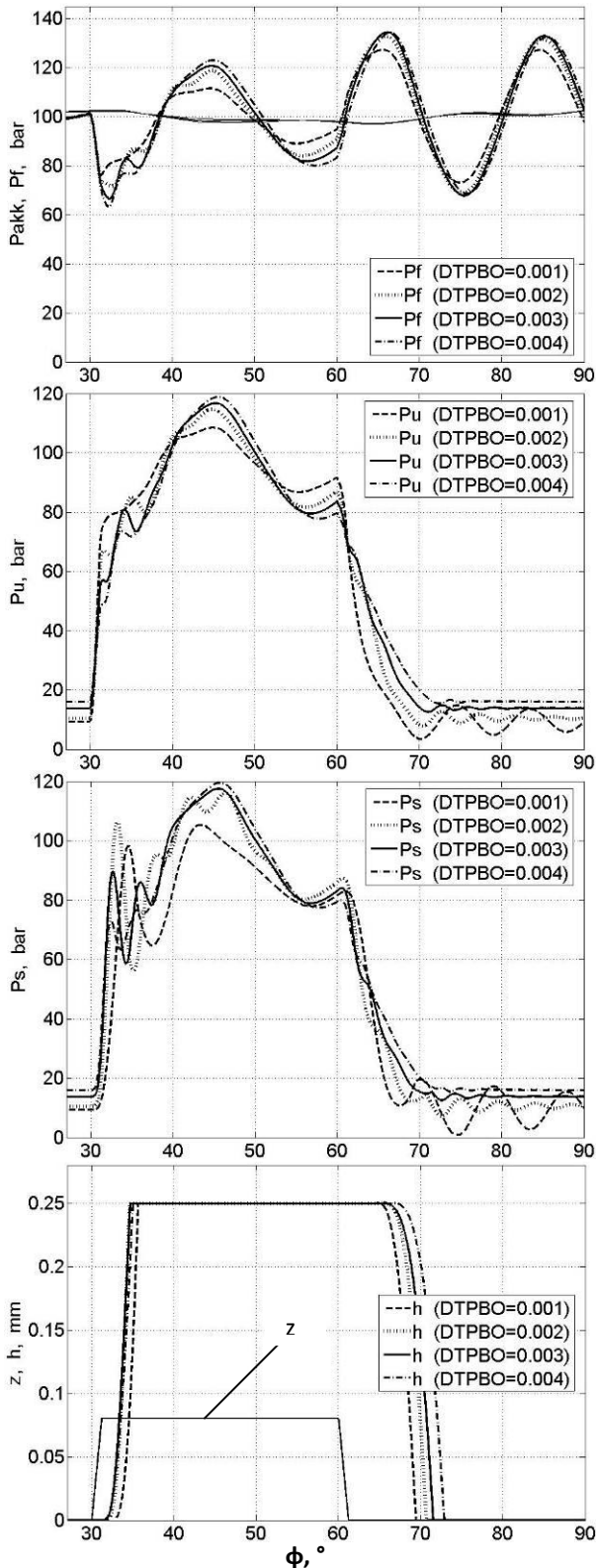


Рис. 4. Влияние диаметра соединительного канала D_{TPBO} на работоспособность и быстродействие форсунки

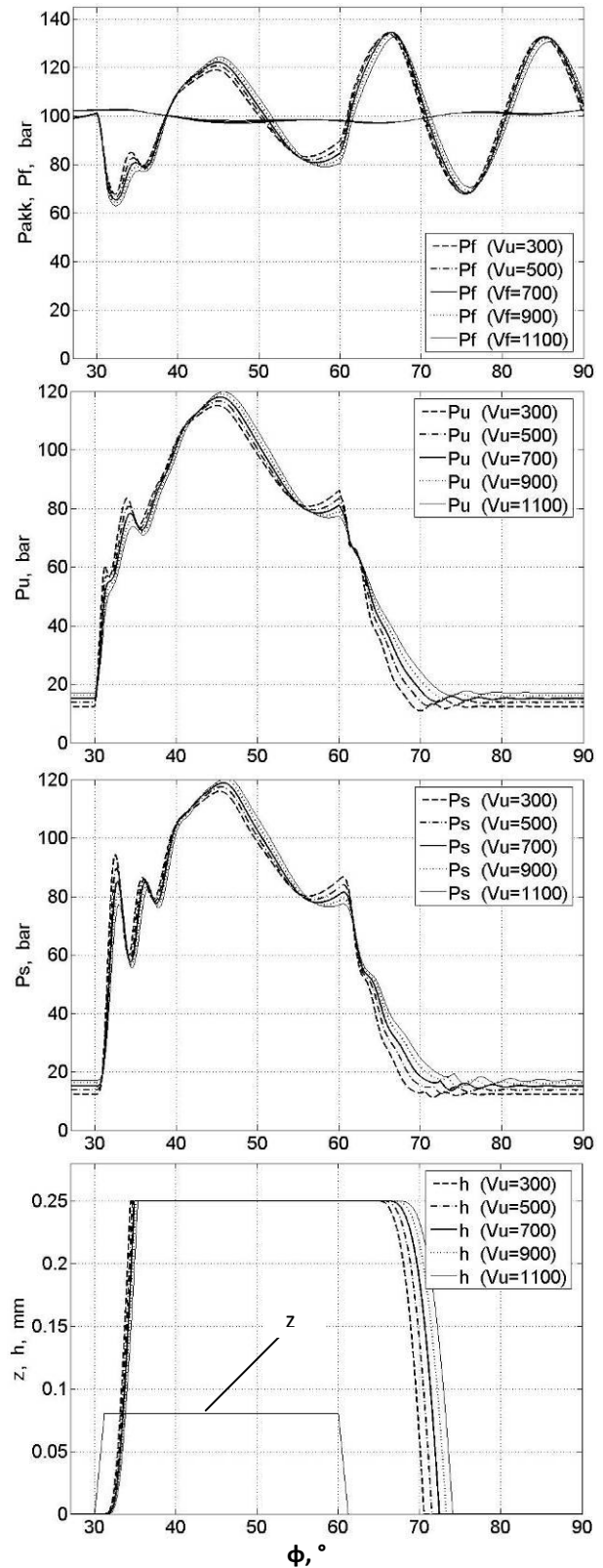


Рис. 5. Влияние объема камеры управления V_u на работоспособность и быстродействие форсунки

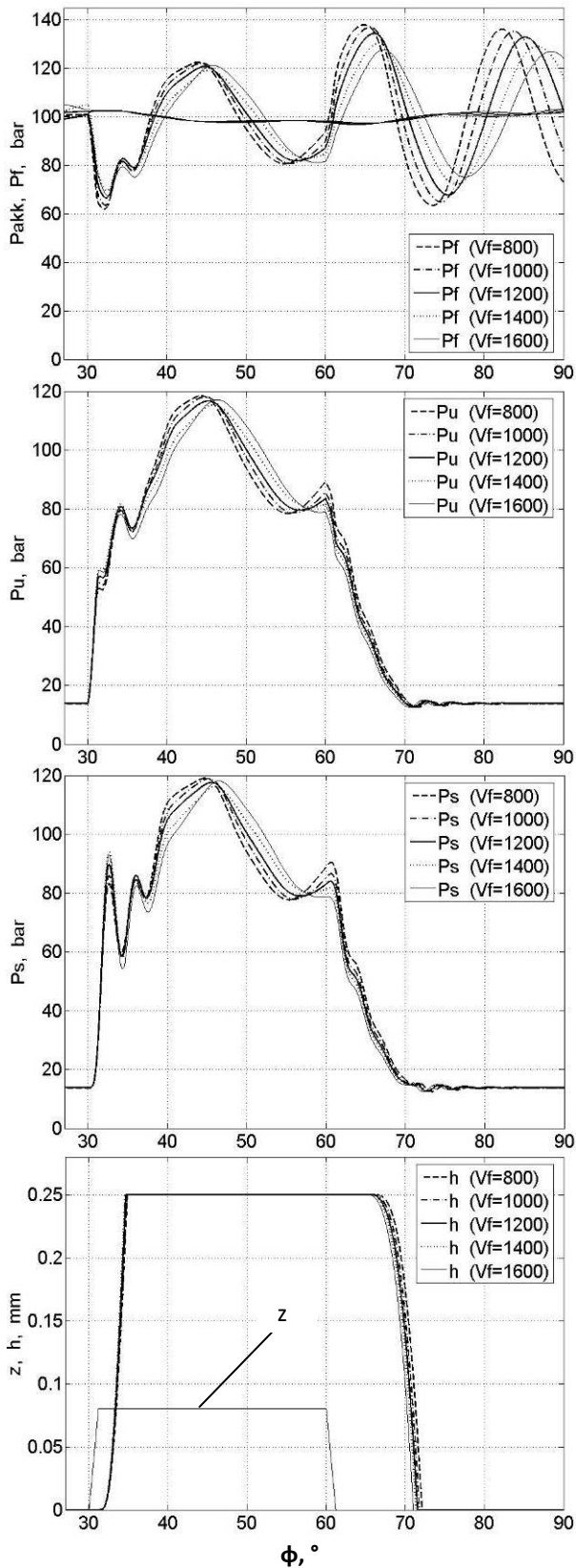


Рис. 6. Влияние объема полости управляющего клапана V_f на работоспособность и быстродействие форсунки

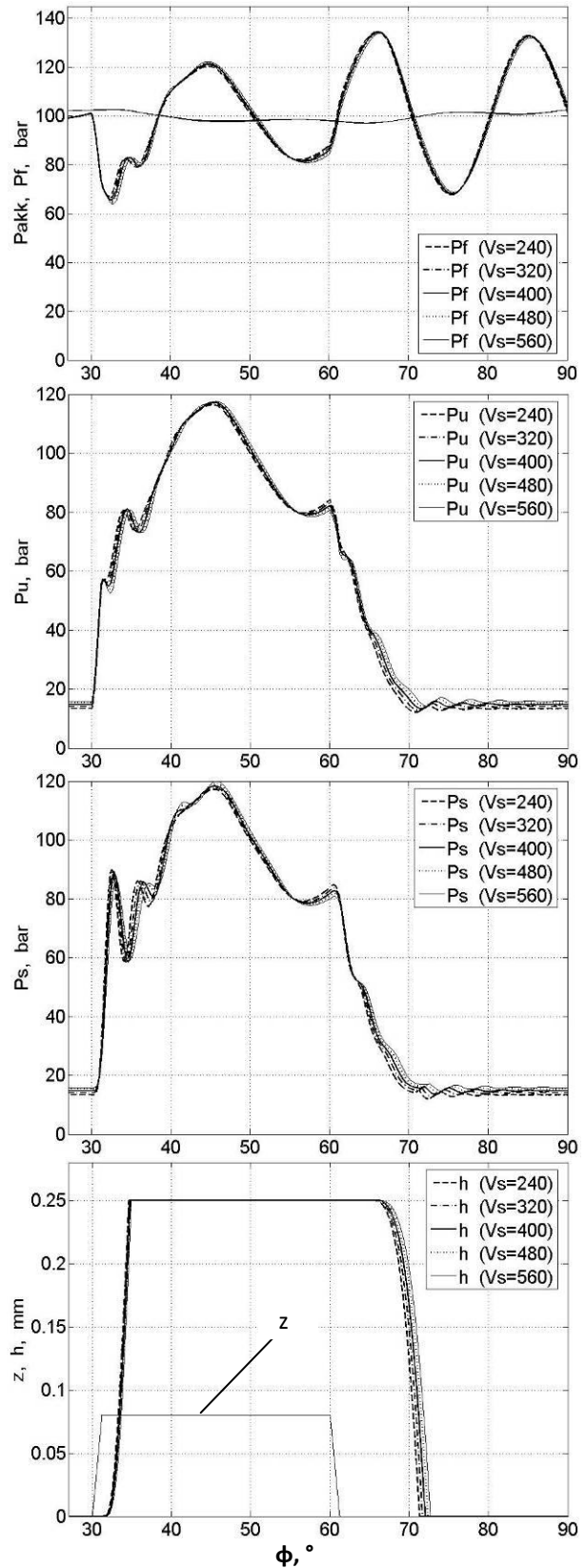


Рис. 7. Влияние объема полости клапанно-сопловой распылителя V_s на работоспособность и быстродействие форсунки

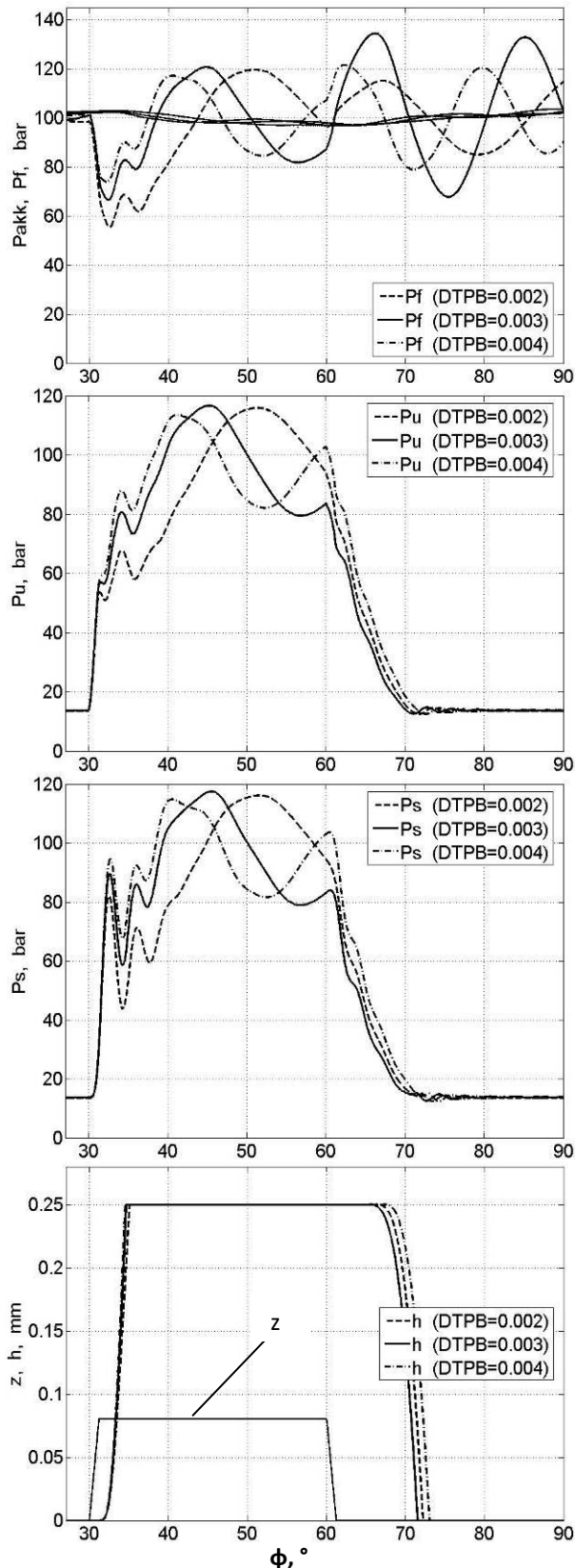


Рис. 8. Влияние диаметра входного канала $D_{ТПВ}$ на работоспособность и быстродействие форсунки

управляющим клапаном z и впрыскивающего клапана h в зависимости от угла поворота газораспределительного вала φ в сочетании с различными значениями конструктивных параметров форсунки. Расчеты были проведены для частоты вращения коленчатого вала двигателя 4000 мин^{-1} , продолжительности управляющего импульса актюатора $2,5 \text{ мс}$ и давления топлива на выходе топливного насоса высокого давления P_n , т.е. практически давления в аккумуляторе 100 бар .

Кривые, приведенные на рис. 2-8, свидетельствуют о том, что форсунка является работоспособной при всех исследуемых значениях каждого из конструктивных параметров. Также видно, что с началом подъема управляющего клапана и перетекания топлива из полости управляющего клапана в полость управления в последней наблюдается спад давления с последующими сильными колебаниями давления топлива. Колебания давления через трубопровод высокого давления передаются и обратно в полость аккумулятора, в которой из-за значительного объема полости колебания имеют меньшую амплитуду и частоту. При различных значениях конкретных конструктивных параметров разработанной форсунки кривые не отличаются по характеру, изменяются лишь их абсолютные значения.

Как видно из кривых изменений давления топлива в полостях камеры управления P_U и клапанно-соплового распылителя форсунки P_S , наблюдаются характерные формы кривых давления для полостей распылителей форсунок с электронным управлением. Давление начинает нарастать со значения давления, оставшегося от впрыска предыдущего цикла, равного примерно $10 \dots 15 \text{ бар}$, которое можно назвать остаточным давлением. Небольшой перепад давлений и различия в форме этих кривых при конкретных значениях конструктивных параметров естественны в силу сообщения этих полостей через управляющий канал с небольшим проходным сечением. После закрытия управляющего клапана и прекращения подачи топлива в полость клапанно-соплового распылителя, по мере вытекания из этой полости впрыски-

ваемого через впрыскивающий клапан топлива, последний закрывается, прекращая впрыск топлива. По завершении процесса впрыска в обеих полостях давления выравниваются и прекращается процесс колебания на том же остаточном значении.

Как видно из кривых перемещений пьезоэлектрического актюатора вместе с управляющим клапаном z и впрыскивающего клапана h , после срабатывания управляющего клапана вместе с актюатором почти сразу же начинается перемещение впрыскивающего клапана. Это свидетельствует о достаточной эффективности предложенной конструкции с точки зрения быстродействия конструкции. Однако при прекращении подачи управляющим клапаном закрытие впрыскивающего клапана немного запаздывает, так как последний начинает закрываться после вытекания части топлива из полости клапанно-соплового распылителя и падения в ней давления до давления закрытия впрыскивающего клапана. Это обстоятельство делает конечную фазу процесса впрыска менее быстрой по сравнению с начальной фазой. Поэтому рационализация конструктивных параметров должна ориентироваться на более быстрое реагирование впрыскивающего клапана форсунки в конечной фазе процесса впрыска, то есть на уменьшение задержки закрытия впрыскивающего клапана после закрытия управляющего клапана.

Анализ рис. 2 показывает, что длина входного канала не влияет на быстродействие открытия форсунки. Но этот параметр оказывает влияние на быстродействие закрытия форсунки. Так, наибольшее быстродействие закрытия клапана форсунки достигается при $L_{TP} = 0,4$ м, а наименьшее быстродействие – при $L_{TP} = 0,2$ м. Таким образом, хотя $L_{TP} = 0,4$ м является рациональным значением с точки зрения быстродействия форсунки, однако с точки зрения конструкции и компоновки это значение слишком велико. Поэтому было принято компромиссное решение считать рациональным значением $L_{TP} = 0,3$ м.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 3, показывают, что с увеличением длины со-

единительного канала быстродействие открытия и закрытия форсунки уменьшается. Так, при $L_{TPO} = 0,035$ м быстродействие открытия и закрытия форсунки являются самыми высокими. Таким образом, хотя $L_{TPO} = 0,035$ м является рациональным значением с точки зрения быстродействия, однако с точки зрения конструкции и компоновки это значение слишком мало. Поэтому, было принято компромиссное решение считать рациональным значением $L_{TPO} = 0,055$ м.

Из рис. 8 видно, что с увеличением диаметра впускного канала быстродействие открытия форсунки увеличивается и при значении $D_{TPB} = 0,004$ м оно достигает максимального значения. Быстродействие закрытия форсунки становится максимальным при $D_{TPB} = 0,003$ м. Однако учитывая тот факт, что быстродействие закрытия форсунки намного меньше при $D_{TPB} = 0,004$ м, было принято компромиссное решение считать рациональным значением $D_{TPB} = 0,003$ м.

Анализ рис. 4 показывает, что при значении $D_{TPBO} = 0,003$ м быстродействие открытия форсунки становится самым высоким. С увеличением диаметра соединительного канала быстродействие закрытия форсунки уменьшается и, таким образом, является максимальным при $D_{TPBO} = 0,001$ м. Учитывая тот факт, что быстродействие открытия форсунки намного меньше при $D_{TPBO} = 0,001$ м, было принято компромиссное решение считать рациональным значением $D_{TPBO} = 0,003$ м.

Из рис. 5 видно, что с увеличением объема камеры управления быстродействие открытия и закрытия форсунки уменьшается. Так, при $V_U = 300$ мм³ быстродействие открытия и закрытия форсунки являются максимальными. Таким образом, хотя $V_U = 300$ мм³ является рациональным значением с точки зрения быстродействия форсунки, однако с точки зрения конструкции и компоновки это значение слишком мало. Поэтому было принято компромиссное решение считать рациональным значением $V_U = 700$ мм³.

Из рис. 6 видно, что объем полости управляющего клапана не влияет на быстродействие открытия форсунки. Но с увеличением значения этого параметра быстродействие закрытия форсунки повышается. Наибольшее значение достигается при $V_f = 1600 \text{ мм}^3$. Следует отметить, что полость управляющего клапана выполняет роль внутреннего аккумулятора, размещенного внутри самой форсунки. Поэтому неудивительно положительное влияние большого объема этой полости. Однако по конструктивным соображениям невозможно чрезмерное увеличение объема этой полости. Поэтому $V_f = 1200 \text{ мм}^3$ принято в качестве рационального значения.

Рассмотрение рис. 7 показывает, что объем полости клапанно-соплового распылителя не оказывает существенного влияния на быстродействие открытия форсунки. Но с увеличением значения этого параметра быстродействие закрытия форсунки уменьшается. Таким образом, наибольшее быстродействие закрытия форсунки наблюдается при

$V_s = 240 \text{ мм}^3$. Хотя $V_s = 240 \text{ мм}^3$ является рациональным значением с точки зрения быстродействия форсунки, однако по конструктивным соображениям рациональным значением было принято считать $V_s = 320 \text{ мм}^3$.

5. Заключение

В результате проведенных расчетных исследований влияния конструктивных параметров на работоспособность и быстродействие форсунки с использованием ее математической модели были определены рациональные значения конструктивных параметров исследованной электронно-управляемой форсунки.

В дальнейшем предусматривается практическая реализация конструкции форсунки с рациональными конструктивными параметрами, а также проведение экспериментальных исследований гидродинамических процессов в составе аккумуляторной системы непосредственного впрыска бензина.

Список литературы

1. Евразийский патент № 023968, МПК F02B 19/10; F02B 17/00. Форкамерный двигатель с непосредственным впрыском топлива в цилиндр и принудительным зажиганием / Керимов З.Х., Мамедзаде Х.Ш., Джафарли М.К.; патентовладелец Керимов З.Х. Заявка № 201400220; заявл. 17.12.13; опубл. 29.07.16. Бюллетень Евразийского патентного ведомства № 7'2016. С. 659-660.
2. Керимов З.Х., Джафарли М.К. Особенности рабочих процессов двигателей с непосредственным впрыском бензина и расслоенным зарядом и пути их дальнейшего развития // Научные труды Азербайджанской Государственной Морской Академии. 2016. № 1. С. 93-102.
3. Керимов З.Х., Джафарли М.К. Разработка новой конструкции электронно-управляемой форсунки для двигателя с непосредственным впрыском бензина и форкамерно-факельным зажиганием // Известия высших технических учебных заведе-

References

1. Eurasian Patent № 023968. *Forkamernyy dvigate' s neposredstvennym vpryskom topliva v tsilindr i prinuditel'nyy zazhiganiem* [Pre-chamber spark ignition engine with direct fuel injection into the cylinder]. Kerimov Z.Kh., Mammedzade Kh.Sh., Jafarli M.K. Declared 17.12.13. Published 29.07.16. Bulletin No. 7'2016. (in Russian)
2. Kerimov Z.Kh., Jafarli M.K. The features of the working processes of the direct petrol injection and stratified charge engines and their further development ways. *Nauchnye trudy Azerbajdzhanskoj Gosudarstvennoy Morskoy Akademii*, 2016, No. 1, pp. 93-102. (in Russian)
3. Kerimov Z.Kh., Jafarli M.K. Elaboration of new construction of the electronic controlled injector for the direct petrol injection and pre chamber-torch ignition engine. *Izvestiya vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy Azerbaydzhana*, 2017, Vol. 19, No. 3 (107), pp. 63-71. (in Russian)

ний Азербайджана. 2017. Т. 19. № 3 (107). С. 63–71.

4. Пойда А.Н., Сивых Д.Г., Капустин Д.А. Выбор материала для пьезоэлектрического привода управляющего клапана электрогидравлической форсунки автотракторного дизеля // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2011. Вип. 107. Том 2. С. 69-76.

5. Драган Ю.Е. Методика учета сжимаемости топлива и деформации штанги при математическом моделировании электрогидравлических форсунок // Двигатели внутреннего сгорания. 2007. № 2. С. 35-39.

6. Ефимов К.В. Оптимизация параметров электрогидравлической форсунки для дизеля с микропроцессорной системой управления: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 23 с.

7. Абаляев А.Ю., Пигарина А.А. Как увеличить быстродействия электрогидравлической форсунки? // Автомобильная промышленность. – 2000. – № 9. – С. 10-11.

8. Абаляев А.Ю., Пигарина А.А. Методы и результаты расчета гидравлических трактов электрогидравлических форсунок // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць. Харків, 2001. Вип. 23. Двигуни та енергоустановки. С. 56-59.

9. Прохоренко А.А., Самойленко Д.Е., Мешков Д.В. Оптимизация конструктивных параметров пьезоэлектрической дизельной форсунки // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. 2010. № 1 (10). С. 47-53.

10. Козеев А.А. Оптимизация рабочего процесса электрогидроуправляемой форсунки // Состояние, проблемы и перспективы развития АПК. Материалы междунар. научно-практ. конф., посвященной 80-летию Башкирского ГАУ, часть II. Уфа: Башкирский ГАУ, 2010. С. 50-54.

11. Врублевский А.Н., Грицюк А.В., Воронков А.И., Бовда А.М. Результаты испытаний новых материалов для электромагнитов системы топливоподачи дизеля // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2009. Вып. 46. С. 126-130.

4. Poyda A.N. Sivikh D.G., Kapustin D.A. The choice of material for the piezoelectric actuator of the control valve of the electrohydraulic injector of autotractor diesel engine. *Visnik Kharkivskogo Natsionalnogo Tekhnichnogo Universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka*, 2011, Vol. 2, No. 107, pp. 69-76. (in Russian)

5. Dragan U.E. Technique of the compressibility fuel account and deformation of a bar at mathematical modelling electrohydraulic nozzles. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2007, No. 2, pp. 35-39. (in Russian)

6. Efimov K.V. *Optimizacija parametrov jelektrogidravlicheskoj forsunki dlja dizelja s mikroprocessornoj sistemoj upravlenija* [Optimization of parameters of electro-hydraulic injection for a diesel engine with microprocessor control system]. Abstract of Diss. Cand. Sci. (Engineering). Moscow. 2004. 23 p. (in Russian)

7. Abalyaev A.Yu., Pigarina A.A. How to increase the operating speed of the electrohydraulic injector? *Avtomobilnaja promyshlennost*, 2000, No. 9, pp. 10-11. (in Russian)

8. Abalyaev A.Yu., Pigarina A.A. Methods and results of calculation of hydraulic paths of electro-hydraulic injectors. In: *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija: Zb. nauk. prats* [Aerospace technic and technology: collection of scientific papers]. Kharkov, 2001, Issue. 23. Engines and power plants, pp. 56-59. (in Russian)

9. Prochorenko A.A. Samojlenko D.E., Meshkov D.V. Optimization of design parameters of a piezoelectric diesel injector. *Visti Avtomobilno-dorozhnogo institutu*, 2010, No. 1 (10), pp. 47-53. (in Russian)

10. Kozeev A.A. Optimization of the working process of an electro-hydraulic controlled injector. *Sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya APK. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu Bashkirskogo GAU* [Status, problems and prospects of development of the agricultural sector. *Materials of the international scientific-practical conference dedicated to the 80th anniversary of the Bashkir State Agrarian University*]. Ufa, 2010, Part

12. Прохоренко А.А. Самойленко Д.Е., Мешков Д.В. Математическая модель процесса топливоподачи системой Common Rail с пьезоэлектрической форсункой // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. 2009. № 1 (8). С. 6-12.
13. Иващенко Н.А. Грехов Л.В., Чжао Цзяньхуэй. Методика расчета быстродействующего привода управляющего клапана топливоподающей аппаратуры // Двигатели внутреннего сгорания. 2012. № 1. С. 65-69.
14. Куклиновский В.В. Пьезоэлектрический привод топливных форсунок микропроцессорных систем управления автомобильными дизельными двигателями: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03: защищена 12.11.09 / Куклиновский Виктор Владимирович. М., 2009. 24 с.
15. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. М.: Легион-Автодата, 2004. 344 с.
16. Джафарли М.К. Анализ конструктивных особенностей электронно-управляемой форсунки, разработанной для двигателя с непосредственным впрыском бензина и форкамерно-факельным зажиганием // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. №9 (87), Ч. 1 С. 30-35.
17. Джафарли М.К. Некоторые результаты численного исследования гидродинамических процессов в аккумуляторной топливной системе непосредственного впрыска бензина с новой конструкцией электронно-управляемой форсунки / Материалы IX Междунар. молодежной научн. конф. «Молодежь и XXI век–2019», Курск, Юго-Западный государственный университет. Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2019. Т. 5. С. 103-108.
18. Керимов З.Х., Джафарли М.К. Гидродинамическая математическая модель аккумуляторной топливной системы непосредственного впрыска бензина с новой конструкцией электронно-управляемой форсунки и некоторые результаты ее применения // Сб. статей участников XII Междунар. научно-практ. конф. «Инновации в технологиях и образовании», Белово, филиал, pp. 50-54. (in Russian)
11. Vrublevsky A.N., Gritsyuk A.V., Voronkov A.I., Bovda A.M. The results of tests of new materials for electromagnets of the diesel fuel system. *Vestnik Kharkovskogo nacionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, 2009, Vol. 46, pp. 126-130. (in Russian)
12. Prochorenko A.A. Samojlenko D.E., Meshkov D.V. Mathematical model of the fuel feed process by the system of Common Rail with the piezoelectric injector. *Visti Avtomobilno-dorozhnogo institutu*, 2009, No. 1 (8), pp. 6-12. (in Russian)
13. İvaschenko N.A. Grekhov L.V., Zhao Jianhui. The method of calculating for high-speed actuator of control valve for fuel injection system. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2012, No.1, pp. 65-69. (in Russian)
14. Kuklinovsky V.V. *Pezoelektricheskiy privod toplivnykh forsunok mikroprotsessornykh sistem upravleniya avtomobilnymi dizelnymi dvigatelyami* [The piezoelectric drive of fuel injectors of microprocessor control systems for automotive diesel engines]. Abstract of Diss. Cand. Sci. (Eng.). Moscow. 2009. 24 p. (in Russian)
15. Grekhov L.V. Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizeley* [Fuel equipment and control systems of diesel engines]. Moscow, 2005. 344 p. (in Russian)
16. Jafarli M.K. Analysis of the constructive features of the electronically controlled injector developed for the direct petrol injection and pre chamber-torch ignition engine. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2019, Vol. 1, No. 9 (87), pp. 30-35. (in Russian)
17. Jafarli M.K. Some results of numerical investigation of hydrodynamic processes in the accumulator direct petrol injection system with new designed electronically controlled injector. In: *Materialy IX Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «Molodezh i XXI vek–2019»* [Materials of the IX Int. Youth Scientific Conf. «Youth and the XXI Century–2019»]. Kursk, Publishing Company «University Book», 2019, Vol. 5, pp. 103-108. (in Russian)

ал Кузбасского государственного технического университета в г. Белово. Белово: Изд-во КузГТУ, Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, Изд-во университета Св. Кирилла и Св. Мефодия. 2019. Ч. 1. С. 295-301.

19. Керимов З.Х., Джафарли М.К. Численное исследование работы аккумуляторной системы непосредственного впрыска бензина с новой конструкцией электронно-управляемой форсунки в зависимости от управляющих параметров // Материалы Междунар. научно-практ. конф. «Автомобиле- и тракторостроение», Минск, Белорусский национальный технический университет. Минск: БНТУ, 2019. Т. 1. С. 181-184.

20. Керимов З.Х., Джафарли М.К. Особенности математической модели гидродинамических процессов в аккумуляторной системе непосредственного впрыска бензина с новой конструкцией электронно-управляемой форсунки // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. Т. 23. № 1 (83). – С. 3-10.

21. Керимов З.Х. Математическое моделирование гидродинамических процессов с учетом двухфазной среды в граничных полостях дизельной системы впрыска топлива // Авиационно-космическая техника и технология. 2004. Вып. 8 (16). С. 63–69.

22. Керимов З.Х. Некоторые результаты математического моделирования волновых процессов в двухфазной среде в дизельной топливовпрыскивающей системе // Двигатели внутреннего сгорания. 2004. №1. С. 20–24.

18. Kerimov Z.Kh. Jafarli M.K. Hydrodynamic mathematical model of the accumulator direct petrol injection system with new designed electronically controlled injector and some results of its application. In: *Sbornik statey uchastnikov XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsii v tekhnologiyakh i obrazovanii»* [Collection of articles of participants of the XII Int.l scientific-practical conf. «Innovation in technology and education»]. Belovo, Kemerovo, Veliko Tarnovo, 2019, Vol.1, pp. 295-301. (in Russian)

19. Kerimov Z.Kh., Jafarli M.K. Numerical investigation of operation of the common rail direct petrol injection system with a new designed electronically controlled injector depending on the control parameters. In: *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Avtomobile- i traktorostroenie»* [Materials of the Int. scientific-practical conf. «Automotive and tractor manufacturing»]. Minsk, BNTU, 2019, Vol. 1, pp. 181-184. (in Russian)

20. Kerimov Z.Kh., Jafarli M.K. The features of the mathematical model of the hydrodynamic processes in the accumulator direct petrol injection system with new designed electronically controlled injector. *Vestnik Ufimskogo Gosudarstvennogo Aviacionnogo Tehnicheskogo Universiteta*, 2019, Vol. 23, No. 1 (83), pp. 3-10. (in Russian)

21. Kerimov Z.Kh. Mathematical modeling of hydrodynamic processes taking into account a two-phase medium in the boundary volumes of the diesel fuel injection system. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2004, No. 8 (16), pp. 63-69. (in Russian)

22. Kerimov Z.Kh. Some results of mathematical modeling of wave processes in the two-phase medium in the diesel fuel-injection system. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2004, No. 1, pp. 20-24. (in Russian)