

UOT 621.431

**ELEKTRON İDARƏETMƏLİ YENİ KONSTRUKSIYALI FORSUNKASI OLAN  
BİLAVASİTƏ SİLİNDRƏ BENZİN PÜSKÜRMƏ SİSTEMİNDƏKİ  
HİDRODİNAMİK PROSESLƏRİN RİYAZİ MODELİ  
VƏ ONUN TƏTBİQİNİN BƏZİ NƏTİCƏLƏRİ**

**Kərimov Z.X., Cəfərli M.K.**

*Azərbaycan Texniki Universiteti,  
Bakı şəh., H.Cavid pr., 25  
E-mail: ird@aztu.edu.az*

**Xülasə.** Məqalədə bilavasitə silindrə benzin püskürməli və forkamer-məşəllə alıqdırmalı mühərriklərin göstəricilərinin yaxşılaşdırılması məqsədilə təklif olunmuş yeni işçi prosesin spesifik tələblərinə cavab verən elektron idarəetməli pyezo-intiqallı yeni konstruksiyalı forsunkanın konstruksiyasına və iş prinsipinə baxılmışdır. Təzyiq akkumulyatorlu bilavasitə silindrə benzin püskürmə sisteminin, o cümlədən sistemin yeni konstruksiyalı forsunkasının həcmələri və borularındakı hidrodinamik proseslərin riyazi modeli nəzərdən keçirilmiş, riyazi modelin tətbiqi ilə sistemdəki hidrodinamik proseslərin hesabi tədqiqinin bəzi nəticələri verilmişdir. Hesabi tədqiqatların nəticələri işlənmiş yeni konstruksiyalı forsunkanın iş qabiliyyətli olmasını, onun yeni işçi prosesin tələblərinə tam cavab verməsini, beləliklə də konstruksiyanın praktiki reallaşdırılmasının və onun eksperimental tədqiqinin məqsədəuyğun olduğunu göstərmişdir.

**Abstract.** The construction and operation principle of electronically controlled and piezo actuating new designed injector that meets the specific requirements of a new working process proposed for improving the performances of direct gasoline injection and prechamber-torque ignition engines are considered. The main properties of the mathematical model of the direct gasoline injection system with pressure accumulator, including hydrodynamic processes within the volumes of the nozzle and in the pipelines of the system, as well as some results of calculation investigations of the hydrodynamic processes occurring in the system are given. The results of computational investigations show the operability of the developed construction, the satisfaction of its characteristics to requirements of the working process, the feasibility of practical implementation of construction and its experimental application.

**Аннотация.** В статье рассмотрены конструкция и принцип работы форсунки новой конструкции с электронным управлением и пьезоприводом, удовлетворяющей специфичным требованиям нового рабочего процесса, предложенного с целью улучшения показателей двигателей с непосредственным впрыском бензина в цилиндр и форкамерно-факельным зажиганием. Приведены основные положения математической модели аккумуляторной системы непосредственного впрыска бензина в цилиндр, в том числе, гидродинамических процессов в полостях форсунки новой конструкции и в трубопроводах системы, а также некоторые результаты расчетного исследования гидродинамических процессов, происходящих в системе. Результаты расчетных исследований показывают работоспособность разработанной конструкции, удовлетворение ее характеристик требованиям рабочего процесса, целесообразность практической реализации конструкции и ее экспериментального применения.

**Açar sözlər:** bilavasitə benzin püskürməli mühərrik, təzyiq akkumulyatorlu benzin püskürmə sistemi, elektron idarəetməli forsunka, hidrodinamik proseslər, hesabi eksperiment metodu

**Key words:** direct petrol injection engine, accumulator fuel injection system, electronically controlled injector, hydrodynamic processes, computational experiment method

**Ключевые слова:** двигатель с непосредственным впрыском бензина, система впрыска бензина с аккумулятором давления, электронно-управляемая форсунка, гидродинамические

*процессы, метод вычислительного эксперимента*

**Giriş.** Məlum olduğu kimi, müasir dövrdə daxili yanma mühərriklərinin texniki-iqtisadi və eləcə də ekoloji göstəriciləri qarşısında sərt tələblər qoyulur. Bu tələbləri təmin etmək energetikanın aktual problemlərindən biridir. Bu problemi mühərrikin konstruksiya edilməsi nöqtəyi-nəzərindən həll etmək üçün mühərrikin işçi prosesini təkmilləşdirmək lazımdır. Buna görə də Azərbaycan Texniki Universitetinin (AzTU) "Avtomobil texnikası" kafedrasında bilavasitə silindrə benzin püskürməli və forkamer-məşəllə alışdırılmalı mühərrikin yeni işçi prosesi ixtira səviyyəsində təklif olunmuşdur [1].

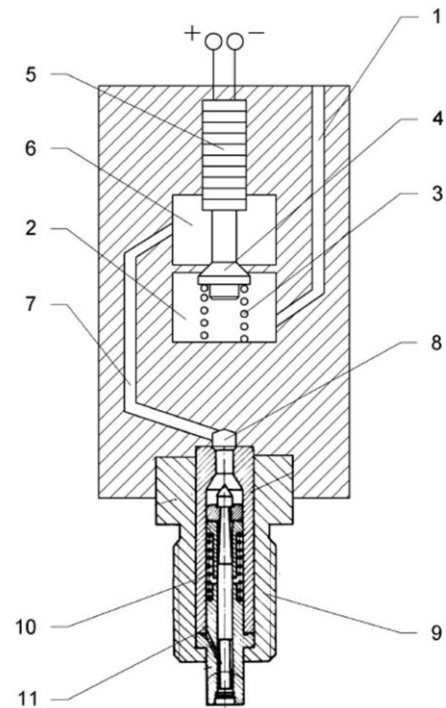
**Məsələnin qoyuluşu.** Təklif olunmuş yeni işçi proses mühərrikin yanacaq püskürmə sisteminə bir sıra spesifik tələblər qoyur. Bilavasitə silindrə benzin püskürməli və forkamer-məşəllə alışdırılmalı mühərriklərin ənənəvi yanacaq püskürmə sistemləri və eləcə də bu sistemlərin forsunkaları həmin tələblərin bir çoxuna cavab vermir [2]. Buna görə də [3] işində yeni işçi prosesli mühərrik üçün lazımı tələblərə cavab verən yeni konstruksiyalı forsunka işlənmişdir. Bu forsunka pyezointiqaqlı elektron idarəetməli forsunka olub, təzyiqliq akkumulyatorlu benzin püskürmə sisteminin tərkibində işləmək üçün nəzərdə tutulmuşdur.

Elektron idarəetməli yeni konstruksiyalı forsunka (şək. 1.) idarəedici klapanın həcmi (2) təzyiqliq akkumulyatorunun həcmi ilə yüksək təzyiqliq yanacaq borusu vasitəsilə birləşdirən giriş kanalına (1), idarəetmə kamerini (6) idarəedici klapanın həcmi ilə birləşdirən idarəedici klapanı (4) və klapanlı-soplolıq tozlandırıcının həcmi (8) ilə birləşdirən idarəedici kanala (7) və yanacağıq püskürmək üçün püskürdücü klapanı (11) malikdir.

Forsunka aşağıdakı kimi işləyir. Yanacaq təzyiqliq akkumulyatorundan idarəedici klapanın həcminə yüksək təzyiqliq yanacaq borusundan və giriş kanalından keçərək daxil olur. İdarəedici klapanın bağlı vəziyyətində bu klapanın həcmindəki yanacaq akkumulyatordakı təzyiqliq altında olur. İdarəedici klapanın həcmindəki yanacağın təzyiqliqinin və klapanın yayının (3) elastiklik qüvvəsinin hesabına klapanın konusu öz yəhərinə sıxılaraq, yanacağın idarəetmə kamerinə yolunu bağlayır. İdarəetmə kamerinin və klapanlı-soplolıq tozlandırıcının həcmələrində, eləcə də idarəetmə kanalında yanacaq əvvəlki püskürmə siklindən qalan qalıq təzyiqliq altında olur. Bu qalıq təzyiqliq püskürdücü klapanın (11) açılma təzyiqliqindən aşağıdır. Buna görə də pyezoelementə (5) idarəedici elektrik gərginliyinin verilmədiyə müddətdə püskürdücü klapan bağlı vəziyyətdə qalır.

Elektron idarəetmə blokundan idarəedici gərginlik verildikdə pyezoelementlər paketi genişlənir və idarəedici klapanı təsir göstərir. Nəticədə idarəedici klapan açılaraq yüksək təzyiqliq yanacağın idarəetmə kamerinə gedən yolunu açmış olur. Yanacaq idarəetmə kanalından keçərək, idarəetmə kamerindən klapanlı-soplolıq tozlandırıcının həcminə yüksək təzyiqliq altında daxil olur və nəticədə bu həcmdə təzyiqliq yüksəlir. Buradakı təzyiqliq püskürdücü klapanın açılma təzyiqliqindən yüksək olduqda, püskürdücü klapan açılır və yanacaq püskürülməsi baş verir.

Elektron idarəetmə blokundan verilən idarəedici elektrik impulsunun kəsilməsi ilə idarəedici klapan əvvəlki vəziyyətinə qayıdaraq, idarəedici kamerə yanacağın daxil olmasını kəsir. Bunun nəticəsində və həmçinin klapanlı-soplolıq tozlandırıcının həcmindən yanacağın silindrə püskürülməsi-



**Şək. 1.** Elektron idarəetməli pyezointiqaqlı yeni konstruksiyalı forsunkanın prinsipial sxemi [3]

nin davam etməsi nəticəsində, klapanlı-soplolu tozlandırıcının həcmində yanacaqın təzyiqi düşür. Bu həcmə əlaqədə olan idarəetmə kanalında və idarəetmə kamerində də təzyiq düşür. Klapanlı-soplolu tozlandırıcının həcmində təzyiqin püskürdücü klapanın bağlanma təzyiqindən aşağı düşməsi zamanı bu klapan bağlanır, nəticədə yanacaqın püskürülməsi kəsilir. İdarəetmə kamerində və klapanlı-soplolu tozlandırıcının həcmində, eləcə də idarəetmə kanalında püskürdücü klapanın açılma təzyiqindən aşağı olan müəyyən qalıq təzyiq yaranır.

Təklif olunmuş yeni konstruksiyalı forsunkanın praktiki reallaşdırılmasından əvvəl onun iş qabiliyyəti qiymətləndirilməli və konstruktiv parametrlərinin optimal qiymətləri müəyyənləşdirilməlidir. Bunun üçün sistemdəki və o cümlədən yeni konstruksiyalı forsunkadakı hidrodinamik proseslər hesabi eksperimentlər vasitəsilə tədqiq olunmalıdır. Buna görə də təqdim olunan işin məqsədi elektron idarəetməli yeni konstruksiyalı forsunkaya malik yanacaq püskürmə sisteminin boruları və həcmilərindəki hidrodinamik prosesləri riyazi modelləşdirmək və həmin riyazi modeli tətbiq etməklə sistemdəki hidrodinamik prosesləri tədqiq etməkdir.

**Məsələnin həlli.** Elektron idarəetməli yeni konstruksiyalı forsunkası olan təzyiq akkumulyatorlu benzin püskürmə sistemindəki hidrodinamik proseslər riyazi modelləşdirilərkən [4, 5] işlərinə təklif olunmuş yanacaq püskürmə sistemindəki hidrodinamik proseslərin maye fazasının bütövlüyünün qırılmasının nəzərə alınması ilə modelləşdirilməsi metodu əsas götürülmüşdür. Qeyd etmək lazımdır ki, həmin riyazi modelləşdirmə metodunun adekvatlığı əvvəllər müxtəlif püskürmə sistemlərində dəfələrlə yoxlanılmış və kifayət qədər yüksək adekvatlığa malik olması sübut olunmuşdur.

Riyazi modeldə yanacaq püskürmə sisteminin borular və kanallarındakı mayenin qərarlaşmamış axını konservativ dəyişənlərlə ifadə olunmuş qərarlaşmamış birölçülü axın tənlikləri – kəsilməzlik və hərəkət miqdarı tənlikləri sistemi ilə təsvir olunmuşdur [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w^2 + p)}{\partial x} = -\frac{\lambda_T}{2d_T} \rho w^2, \quad (2)$$

Burada

- $\rho$  – borudakı mühitin sıxlığı;
- $p$  – borudakı mühitin təzyiqi;
- $w$  – axının sürəti;
- $x$  – borunun uzunluğu boyunca koordinat;
- $\tau$  – zaman;

$\lambda_T, d_T$  – uyğun olaraq, borunun hidravlik müqavimət əmsalı və daxili diametridir.

(1) və (2) tənliklərində mühitin sıxlığı  $\rho$  və axının saniyəlik hərəkət miqdarı  $\rho w$  konservativ dəyişənlərdir. (2) tənliyinin sağ tərəfindəki hədd isə borunun hidravlik müqavimətini dəf etməyə sərf olunan hərəkət miqdarını nəzərə alır.

Mühitin təzyiqini təyin etmək üçün (1) və (2) tənliklərinə məlum ifadə əlavə olunur [5]:

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial \tau}, \quad (3)$$

burada  $c$  – axında təzyiq dalğasının yayılma sürətidir.

Sistemin həcmilərindəki hidrodinamik proseslər müvafiq sərhəd şərtləri tənlikləri ilə təsvir olunmuşdur. Məsələn, forsunkanın idarəedici klapanının həcmi üçün sərhəd şərti tənliyi – bu həcmdə olan maye kütləsi üçün kütlə balansı tənliyi aşağıdakı kimidir [4]:

$$\frac{dG_i}{d\tau} = f_{gk} \rho_{gk\zeta} w_{gk\zeta} - \mu_{ikl} f_{ikl} \rho_{ik} w_{ik} \quad (4)$$

Burada:

$G_i$  – forsunkanın idarəedici klapanının həcmindəki yanacağın kütləsi;

$f_{gk}$  – giriş kanalının en kəsik sahəsi;

$\mu_{ikl} f_{ikl}$  – idarəedici klapanın effektiv keçid sahəsi;

$\rho_{gk\zeta}$  və  $\rho_{ik}$  – uyğun olaraq, giriş kanalının çıxışındakı və idarəetmə kamerindəki mayenin sıxlığı;

$w_{gk\zeta}$  və  $w_{ik}$  – uyğun olaraq, giriş kanalının çıxışındakı və idarəetmə kamerindəki mayenin axın sürətləridir.

Borunun elementar hesabı məntəqələrində və eləcə də sərhəd həcmələrində sıxlığın  $\rho \geq \rho_0$  qiymətində hesab edilir ki, mühit birləşməli maye mühitidir və (3) ifadəsindən mühitin təzyiqinin cari qiyməti müəyyən edilir.  $\rho < \rho_0$  olduqda isə mühit ikifazlı qaz-maye mühiti hesab olunur və təzyiq aşağıdakı kimi təyin edilir [6]:

$$p = \frac{\rho \rho_0 \chi}{\rho_0 - \rho(1 - \chi)} \quad (5)$$

Burada:

$\rho_0$  – atmosfer təzyiqində maye yanacağın sıxlığı;

$\chi$  – Henri qanunundakı havanın yanacaqda həllolma qabiliyyətini göstərən əmsaldən asılı olaraq yanacağın verilən temperaturu üçün təyin edilən sabit əmsal.

Yanacaq sisteminin boruları və kanallarındakı hidrodinamik prosesləri təsvir edən riyazi model tənlikləri ((1) və (2) tənlikləri) birözlü xüsusi törəməli diferensial tənliklərdir. Bu tənliklər S.K.Qodunovun “ixtiyarli kəsilmənin dağılması” adlanan sonlu fərqlər metodu ilə həll edilmişdir. Həcmərdəki hidrodinamik prosesləri təsvir edən sərhəd şərtləri tənlikləri (4) adi diferensial tənliklərdir. Bu tənliklər Eylerin I tərtib sonlu fərqlər sxemi vasitəsilə həll edilmişdir. Hərəkət edən mexaniki elementlərin, yəni klapanların hərəkət tənlikləri isə Nyutonun II qanunu əsasında tərtib olunmuş və Eylerin I tərtib sonlu fərqlər sxemi vasitəsilə həll edilmişdir.

Qeyd etmək lazımdır ki, riyazi modeldə püskürmə sisteminin boru, kanal və həcmələrindəki hidrodinamik proseslərə təsir göstərən bütün amillər nəzərə alınmışdır.

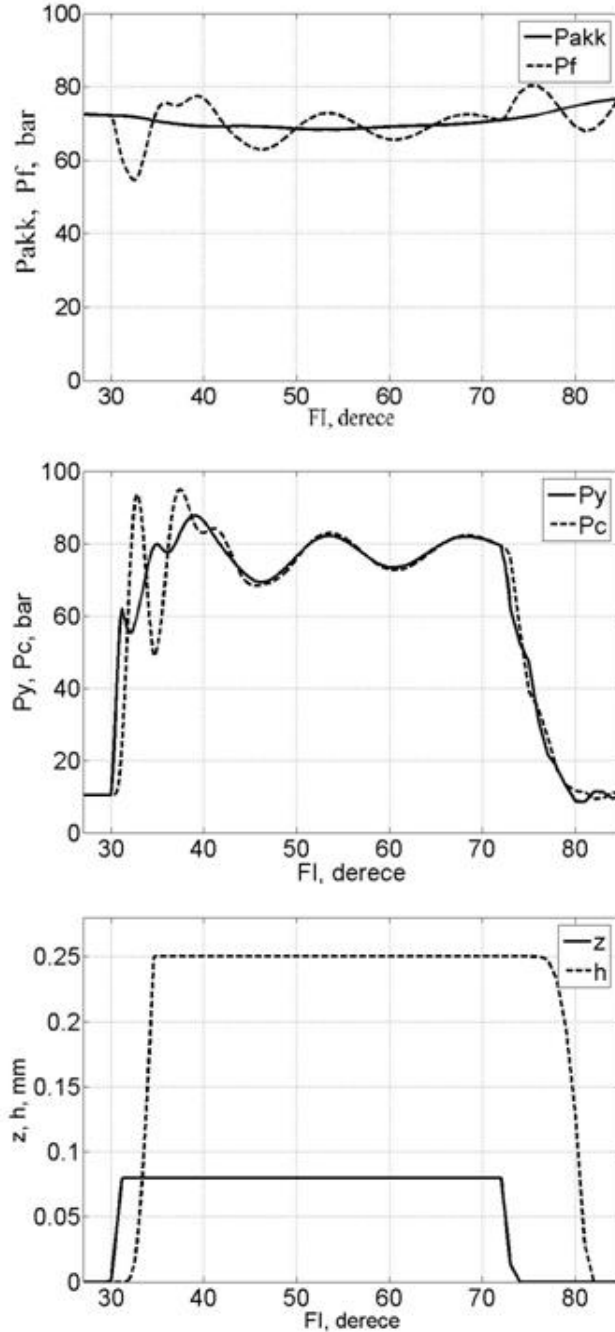
Tərtib olunmuş riyazi model elektron idarəetməli yeni konstruksiyalı forsunkası olan bilavasitə silindrə benzin püskürmə sistemindəki hidrodinamik proseslərin tədqiqi üçün tətbiq olunmuşdur. Bu məqsədlə riyazi model kompüter proqramı şəklində reallaşdırılmışdır və onun vasitəsilə bir sıra hesabi eksperimentlər aparılmışdır.

Hesabi tədqiqatlar müxtəlif rejimlərdə aparılmışdır. Belə ki, pyezo-aktuatora idarəedici impulsun verilmə və kəsilmə anının dəyişdirilməsi ilə püskürmənin davamiyyət müddəti, deməli həm də püskürülən yanacağın siklik miqdarı geniş hədlərdə dəyişdirilmişdir. Bundan başqa, həm də dirsəkli valın dövrlər sayı və yüksək təzyiqli yanacaq nasosunun çıxışındakı təzyiq (deməli həm də təzyiq akkumulyatorundakı yanacağın təzyiqi) geniş hədlərdə dəyişdirilmişdir. Nəticədə zamandan və ya dirsəkli valın dönmə bucağından asılı olaraq müxtəlif rejimlərdə sistemin həcmələrindəki və borularının bütün hesabi kəsiklərindəki yanacağın təzyiqinin və sürətinin dəyişməsi, eləcə də hərəkətli elementlərin (klapanların) hərəkət əyriləri haqqında müfəssəl informasiyalar əldə olunmuşdur.

**Alınmış nəticələrin analizi.** Riyazi modelləşdirmənin bəzi nəticələri şəkl. 2-də göstərilmişdir.

Hesabi tədqiqatların nəticələrinin qrafik vizuallaşdırılması göstərir ki, qazpaylama valının dönmə bucağının  $\varphi = 30^\circ$  qiymətində idarəedici klapanın qalxmağa başlaması və bunun hesabına yanacağın idarəedici klapanın həcmindən idarəetmə kamerinə axması nəticəsində idarəetmə kamerində təzyiq yüksəlməyə başlayır, idarəedici klapan həcmində isə təzyiqin düşməsi və bundan sonra intensiv təzyiq rəqsləri müşahidə edilir. Bu təzyiq rəqsləri forsunkanın giriş kanalı və yüksək

təzyiqli yanacaq borusu vasitəsilə təzyiq akkumulyatoruna geri qaydır. Təzyiq akkumulyatorunun həcmnin idarəedici klapanın həcmindən xeyli böyük olması səbəbindən burada təzyiq rəqsləri böyük olmayan amplitudaya malik olur.



**Şək. 2.** Təzyiq akkumulyatorundakı ( $P_{akk}$ ), idarəedici klapanın həcmindəki ( $P_f$ ), idarəetmə həcmindəki ( $P_y$ ) və tozlandırıcının həcmindəki ( $P_c$ ) yanacağın təzyiqinin və eləcə də pyezo-aktuatorla idarəedici klapanın ( $z$ ) və püskürdücü klapanın gedişinin ( $h$ ) mühərrik valının dönmə bucağından ( $F_i$ ) asılı olaraq dəyişmə əyriləri (Qrafiklər yüksək təzyiqli yanacaq nasosunun çıxışındakı təzyiqin 80 bar qiymətinə uyğundur)

Qrafikdən tozlandırıcının həcmindəki təzyiq əyrisinin formasının elektron idarəetməli forsunkaların tozlandırıcı həcmindəki təzyiq əyrisinin xarakterik formasına uyğunluğu müşahidə olunur. Görünür ki, burada təzyiq əvvəlki püskürmə siklindən qalan təqribən 10 bar-a bərabər olan qalığ təzyiqdən başlayaraq yüksəlir. Tozlandırıcının həcmi ilə idarəetmə həcmnin bir-biri ilə en

kəşik sahəsi kiçik olan idarəedici kanal vasitəsilə əlaqələndirilməsi səbəbindən, bu iki həcm təzyiqlik ayrılıqlarının forması arasında kiçik fərq və kiçik təzyiqlik düşkünlüyü olur. İdarəedici klapanın bağlanması və bunun hesabına klapanlı-sopluq tozlandırıcının həcminə yanacaq verilişinin kəsilməsindən sonra bu həcmdən püskürdücü klapan vasitəsilə püskürülən yanacaq çıxdıqca, təzyiqlik düşür və püskürdücü klapan püskürməni kəsərək bağlanır. Püskürmə prosesinin kəsilməsi ilə hər iki həcmdə təzyiqlər bərabərləşir və təzyiqlik rəqsləri sönərək, həmin qalıq qiymətində qərarlaşır.

Pyezo-aktuatorla idarəedici klapanın düz və əks istiqamətdə birgə hərəkətə başlaması anları püskürmənin davamiyyət müddətinin və beləliklə də, püskürülən yanacağın sikkilik miqdarının idarə olunması üçün idarəedici təsirləridir. Buna görə də bu anlar riyazi modelə verilənlər qismində daxil edilir. Püskürdücü klapan isə ona təsir edən təzyiqlər fərqi nəticəsində hərəkət edir.

Göründüyü kimi, idarəedici klapanın hərəkətə gəlməsi ilə dərhal püskürdücü klapan hərəkət etməyə başlayır. Bunun özü çeviklik nöqtəyi-nəzərindən təklif olunmuş konstruksiyanın kifayət qədər effektiv olmasını sübut edir. Lakin idarəedici klapanın bağlanması zamanı püskürdücü klapanın bağlanması müəyyən qədər gecikir. Belə ki, püskürdücü klapan tozlandırıcının həcmindən püskürülən yanacağın çıxışı nəticəsində burada təzyiqlik düşməsi səbəbindən bağlanmağa başlayır. Bu cəhət püskürmə prosesinin başlanğıc fazası ilə müqayisədə son fazasının çevikliyi azaldır. Lakin, buna baxmayaraq, forsunkanın belə konstruksiyasında püskürmə prosesi tam idarə olunandır və konstruksiya lazımi tələblərə cavab verir. Bunu həm də püskürmə prosesinin kiçik təzyiqlik rəqsləri ilə müşayiət olunması və püskürdücü klapanın  $0,25 \text{ mm}$ -ə qədər kifayət qədər böyük gedişinə baxmayaraq, püskürmə prosesi ərzində həmin klapanın etibarlı halda dayaqda oturması sübut edir.

**Nəticə.** Elektron idarəetməli yeni konstruksiyalı forsunkası olan bilavasitə silindrə benzin püskürmə sistemindəki hidrodinamik proseslərin riyazi model vasitəsilə aparılmış hesabi eksperimentləri təklif olunan yeni konstruksiyalı forsunkanın iş qabiliyyətli olmasını, işçi prosesin qoyduğu bütün tələbləri təmin etməsini, eləcə də konstruksiyanın praktiki reallaşdırılmasının və onun sonrakı eksperimental tədqiqatlarının aparılmasının məqsədə uyğunluğunu tam sübut etmişdir.

### **Ədəbiyyat**

1. Керимов З.Х., Мамедзаде Х.Ш., Джафарли М.К. Форкамерный двигатель с непосредственным впрыском топлива в цилиндр и принудительным зажиганием. Евразийский Патент № 023968 (Номер заявки 201400220). (Дата приоритета с 17.12.2013) Бюллетень ЕАПВ 7'2016.
2. Керимов З.Х., Джафарли М.К. Системы впрыска бензина с аккумулятором давления и проблемы их применения в форкамерно-факельном двигателе с новым рабочим процессом // Azərbaycan Texniki Universiteti, Elmi əsərlər, Texnika elmləri, AzTU, Bakı, 2016, № 4. Cild 1. səh. 68-74.
3. Керимов З.Х., Джафарли М.К. Разработка новой конструкции электронно-управляемой форсунки для двигателя с непосредственным впрыском бензина и форкамерно-факельным зажиганием // Azərbaycan Ali Texniki Məktəblərinin Xəbərləri. ADNSU. Bakı. 2017. Cild 19, № 3 (107). səh. 63-71.
4. Керимов З.Х. Математическое моделирование гидродинамических процессов с учетом двухфазной среды в граничных полостях дизельной системы впрыска топлива // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков. 2004. Вып.8 (16). с. 63–69.
5. Керимов З.Х. Некоторые результаты математического моделирования волновых процессов в двухфазной среде в дизельной топливовпрыскивающей системе // Двигатели внутреннего сгорания. Харьков, Украина. 2004. №1. с. 20-24.
6. Керимов З.Х., Годжаев К.М. Ускоренный метод математического моделирования процесса впрыска топлива в дизельных двигателях // Журн. "Механика-Машиностроение". Министерство Образования Азербайджанской Республики. Баку. 2009. №2. с. 81-84.

*Tövsiyə edib: t.ü.f.d., dos. A.Ş.İsmayılov*