

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»



# **АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ И ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКСЫ: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

Сборник материалов  
V Международной научно-практической  
конференции, посвященной 90-летию  
ФГБОУ ВО «СибАДИ»

03 – 04 декабря 2020 года

Омск  
СибАДИ  
2021

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ФОРСУНКАМИ

А. Л. Иванов<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент;  
Ю. П. Макушев<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент;  
П. С. Быков<sup>1</sup>, студент группы ДВСб-18А1;  
В. В. Рындин<sup>2</sup>, кандидат технических наук, профессор

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», Омск, Россия.

<sup>2</sup> Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова (ПГУ), Павлодар, Республика Казахстан

**Аннотация.** Рассмотрены конструктивные особенности и принцип действия клапана управления форсунок с пьезоэлектрическим управлением. Расчетным путем определена сила, создаваемая пьезоэлементом при подаче электрического напряжения в 150 В и сила, действующая на клапан управления от давления топлива в 160 МПа. Определена зависимость изменения толщины пьезоэлемента от величины подводимого напряжения. Предложена установка для контроля расхода топлива на управление форсунок. Предложен прибор и методика оценки хода клапана управления форсункой. Даны рекомендации по диагностике и контролю основных параметров пьезопривода и клапана управления.

**Ключевые слова:** расчёт, диагностирование пьезопривода, клапан управления, напряжение, гидротолкатель.

## CALCULATED STUDY AND DIAGNOSIS OF THE CONTROL SYSTEM OF PIEZOELECTRIC INJECTORS

A. L. Ivanov<sup>1</sup>, candidate of technical Sciences Sciences, associate Professor;  
Y. P. Makushev<sup>1</sup>, candidate of technical Sciences. Sciences, associate Professor;  
P. S. Bykov<sup>1</sup>, student gr. Dvsb-18A1;  
V. V. Ryndin<sup>2</sup>, candidate of technical Sciences. doctor of science, Professor

<sup>1</sup> Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «The Siberian State Automobile and Highway University», Omsk, Russia

<sup>2</sup> Pavlodar State University named after S. Toraiygrova (PSU), Pavlodar, Republic of Kazakhstan

**Annotation.** The design features and operating principle of the piezoelectric control valve for injectors are considered. The force generated by the piezoelectric element when an electric voltage of 150 V is applied and the force acting on the control valve from the fuel pressure of 160 MPa is calculated. The dependence of the piezoelectric element thickness change on the input voltage is determined. An installation for monitoring fuel consumption for injectors control is proposed. The device and method of evaluating the stroke of the nozzle control valve are proposed. Recommendations are given for diagnostics and control of the main parameters of the piezo actuator and control valve.

**Keywords:** calculation, diagnostics of the piezo drive, control valve, voltage, hydraulic pusher.

### Введение

В пьезоэлектрическом преобразователе активными элементами являются пластины, изготовленные из природного кварца. Возможно применение пьезокерамического материала, например, ЦТБС-8 (цирконат  $ZrO_2$ , титанат бария  $BaTiO_3$ , окись свинца  $PbO$ ).

## Направление 2. Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса

Применение форсунок с быстродействующим пьезоприводом позволяет:

- управлять углом опережения впрыска топлива (раньше или позже относительно верхней мертвой точки);
- уменьшать задержку воспламенения топлива за счет высокого давления и сверхтонкого распыливания топлива;
- дозировать с высокой точностью количество впрыскиваемого топлива на различных скоростных и нагрузочных режимах работы двигателя;
- управлять формой и длительностью импульса впрыска;
- быстро и независимо управлять форсунками (длительность одного впрыска 100 – 200 мкс), что позволит осуществлять несколько впрысков в один и тот же цилиндр в течение одного цикла;
- обеспечивать малое потребление топлива и минимальный уровень выброса в атмосферу вредных примесей отработавших газов.

На рисунке 1,а показан разрез форсунки с пьезоэлектрическим управлением хода иглы [1]. В форсунке пьезоэлектрический элемент воздействует через толкатель 6 на переключающий клапан 8, открывая его. За полный впрыск она способна до пяти раз подавать порции топлива в камеру сгорания двигателя, что не в состоянии выполнить форсунка с электрогидравлическим управлением.

На рисунках 1,б и в приведены характеристика подачи топлива пьезофорсункой с двумя предварительными впрысками, основным, двумя дополнительными впрысками и рычажный механизм.

Примем, что давление топлива на входе в форсунку равно 160 МПа. Пьезопривод 3 находится в сжатом (исходном) состоянии без подключения напряжения. Топливо под давлением 160 МПа, поступает через входное отверстие диаметром 0,25 мм в камеру управления 10 и карман корпуса распылителя 15. Площадь поршня управления 11 из конструктивных соображений выполнена большего размера, чем площадь поперечного сечения иглы 14. Сила определяется произведением площади сечения на давление. По этой причине сила со стороны поперечного сечения поршня будет больше, чем со стороны иглы и она будет закрыта.

При включении управляющего сигнала (напряжения) на пьезопривод 3, который имеет 200 – 400 пьезопластин, он расширяется в осевом направлении на 20 – 30 мкм. Малое удлинение пьезопривода увеличивают в 2 – 3 раза при помощи рычажного мультипликатора 5.

При воздействии толкателя 6 на клапан 8 он открывается. Под действием перепада давления топливо удаляется через сливной канал 7 из замкнутого объема камеры управления 10, снижая давление над поршнем 11. Баланс сил изменится. Сила со стороны поршня будет меньше, чем сила со стороны иглы.

Игла 14 под действием высокого давления переместится в верхнее положение и перейдет в открытое состояние, обеспечивая начало подачи и распыливания топлива. Продолжительность подачи топлива и его величина (цикловая подача) зависят от длительности сигнала (напряжения), подаваемого на пьезопривод. При изменении полярности напряжения пьезопривод вернется в исходное (начальное) положение, клапан 8 под действием пружины 9 закроет сливное отверстие.

Конструкции форсунок с пьезоэлектрическим управлением совершенствуются с целью повышения надежности, долговечности, экономичности работы двигателя и снижения токсичности отработавших газов.

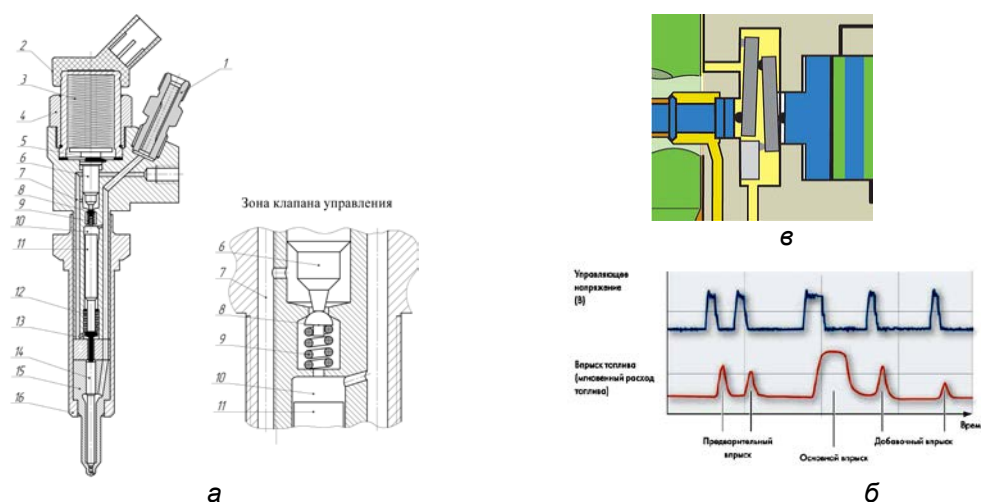


Рисунок 1 – Общий вид форсунки с пьезоэлектрическим управлением хода иглы (а), осциллограмма подачи топлива форсункой (б), рычажный механизм (в):

- 1 – штуцер для подвода топлива из аккумулятора; 2 – разъём электрический; 3 – пьезопривод;
- 4 – гайка; 5 – рычажный мультипликатор; 6 – толкатель клапана; 7 – канал для слива топлива;
- 8 – клапан переключающий; 9 – пружина клапана; 10 – камера управления;
- 11 – поршень управления; 12 – пружина иглы; 13 – толкатель иглы; 14 – игла распылителя;
- 15 – корпус распылителя; 16 – стакан

## АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ И ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКСЫ: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ

Сборник материалов V Международной научно-практической конференции

На рисунке 2,а приведен разрез форсунки с пьезоэлектрическим управлением, но с другим конструктивным исполнением, чем на рисунке 1 [2]. Игла отличается от обычных распылителей тем (рисунок 2,б), что пружина 11 находится внутри распылителя и прижимает её к запорному конусу. Игла имеет максимальный ход 0,15 – 0,2 мм и перемещается в короткой прецизионной втулке с диаметральным зазором 2,0 – 4,0 мкм. Втулка прижата пружиной 11 к блоку (пластине) дросселей впуска и выпуска топлива 10. На рисунке 2,б показана часть переключающего клапана (грибка) с видом уплотняющей конусной поверхности.

При внешнем диаметре посадочного конуса клапана равном 2,5 мм (рисунок 2,б), его площадь будет равна  $4,9 \text{ мм}^2$  ( $4,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ). При давлении топлива в камере управления 160 МПа ( $160 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ ) сила прижатия клапана к седлу (конусной поверхности пластины) будет равна 784 Н.

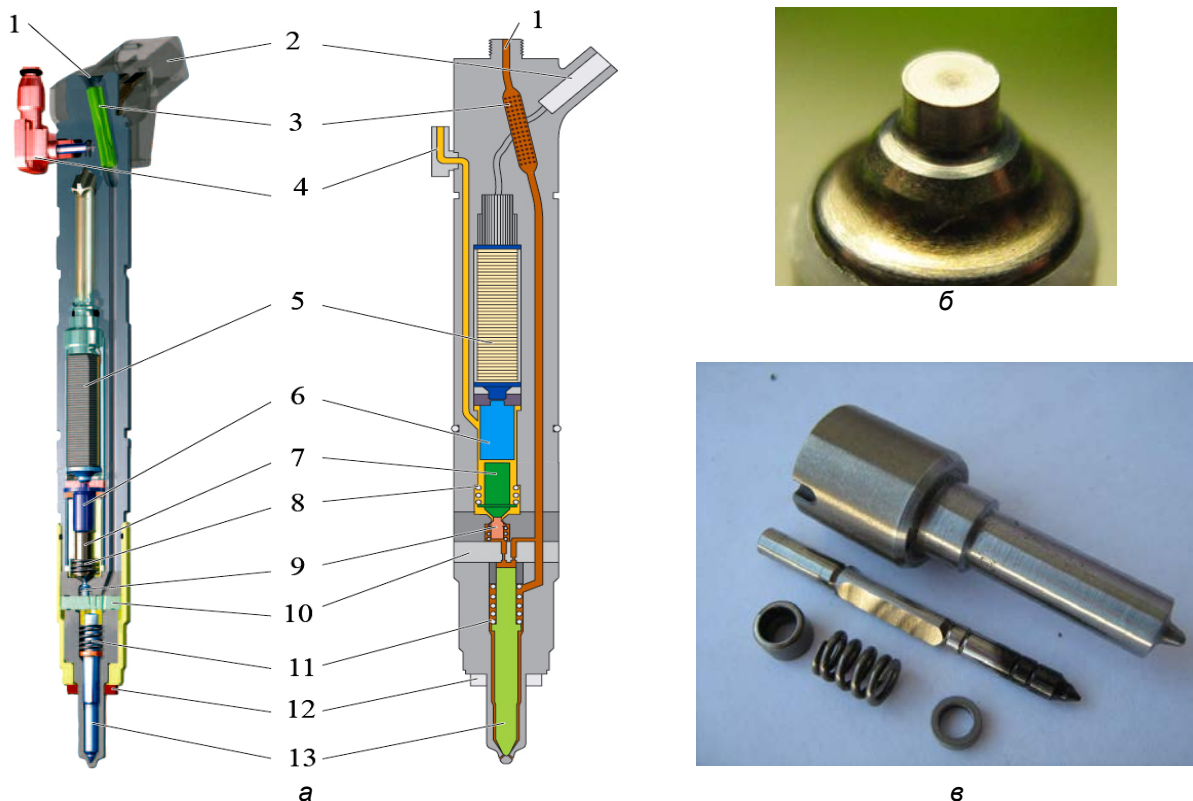


Рисунок 2 – Разрез форсунки с пьезоэлектрическим управлением (а):

- 1– нагнетательный канал; 2 – электрический разъём; 3 – сетчатый фильтр; 4 – сливной канал;
- 5 – пьезопривод; 6 – поршень; 7 – поршень толкателя; 8 – пружина толкателя;
- 9 – переключающий клапан с пружиной; 10 – блок дросселей слива и впуска топлива;
- 11 – пружина иглы; 12 – уплотнение; 13 – игла распылителя.

Переключающий клапан (грибок) с видом уплотняющей конусной поверхности (б). Корпус распылителя, игла, прецизионная направляющая, пружина, шайба (в)

Принцип работы пьезофорсунки нового поколения будет более понятным при анализе рисунка 3.

На рисунке 3,а управляющий клапан 9 и игла распылителя 13 под действием силы пружин закрыты. В камере управления над иглой и в полости между иглой и корпусом распылителя давление топлива одинаково (равно давлению в аккумуляторе). Часть конуса иглы по внешнему диаметру посадочного конуса находится в закрытом состоянии.

Диаметр иглы равен 4 мм, а диаметр посадочного конуса 2 мм. При площади иглы  $12,56 \text{ мм}^2$ , а посадочного конуса  $3,14 \text{ мм}^2$  дифференциальная площадка будет равна  $9,42 \text{ мм}^2$ . Так как площадь иглы больше площади дифференциальной площадки, то сила от давления топлива на торец иглы сверху будет больше, чем снизу и игла останется в закрытом состоянии.

При подаче постоянного напряжения на пьезоэлемент он мгновенно удлиняется, и действуя на поршень 6 и толкатель 7, открывает клапан управления 9 (рисунок 3, б). Давление топлива над иглой резко снизится (топливо вытекает в сливную магистраль 4 через выпускной дроссель 17 и открытый переключающий клапан 9). Усилие на иглу снизу будет больше, чем сверху и она поднимется,

## Направление 2. Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса

открывая путь топлива к сопловым отверстиям. Процесс подачи топлива протекает до тех пор, пока будет поступать постоянное напряжение на пьезопривод 5. При изменении полярности питания пьезопривод вернется в первоначальное сжатое состояние, управляющий клапан 9 под действием пружины 14 закроется. Давление над торцом иглы 13, через дроссель подвода топлива высокого давления 16, резко повысится и игла 13 закроется, прекращая подачу топлива.

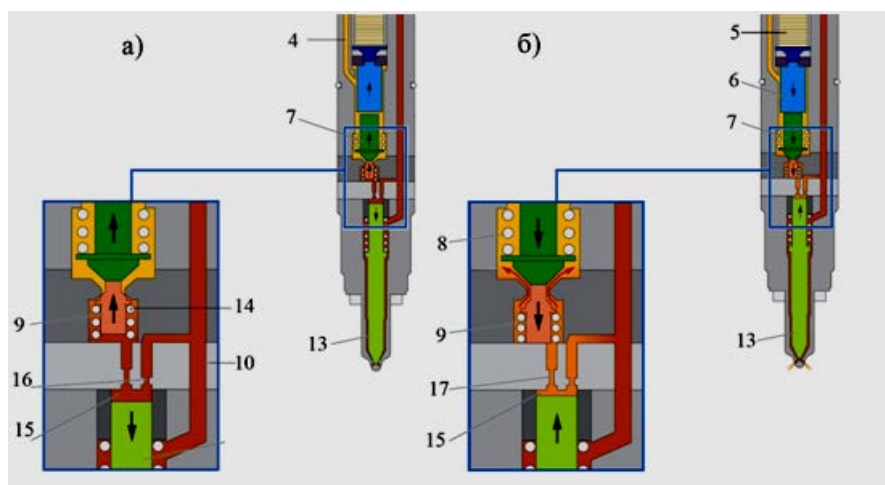


Рисунок 3 – Схема работы пьезофорсунки: а) клапан и игла закрыты; б) клапан и игла открыты;  
4 – сливная магистраль; 5 – пьезопривод; 6 – поршень; 7 – толкатель; 8 – пружина толкателя;  
9 – управляющий клапан; 10 – блок дросселей (дроссельная пластина); 13 – игла распылителя;  
4 – пружина клапана управления; 15 – камера управления иглой;  
16 – дроссель подвода высокого давления; 17 – выпускной дроссель (калиброванное отверстие)

На рисунке 4 показана гидropередача форсунки с пьезоприводом и клапаном управления в сборе (а) и в разобранном виде (б). На рисунке 4,б видны (по часовой стрелке) шайба упорная, шток (поршень) верхний, кожух с гильзой гидропривода, шток нижний, клапанная пластина, дроссельная пластинка, пружина клапана, клапан (грибок).

Необходимо отметить, что грибок клапана (его начальный ход 0,04 – 0,05 мм) приводится в движение не от пьезопривода, а через гидравлическую передачу (гидротолкатель) или гидрокомпенсатор.

Назначение гидropередачи – компенсация температурного расширения цепи привода управляющего клапана в процессе работы форсунки, а также снижение динамических нагрузок на его детали. В результате разности площадей сечения штоков (верхнего и нижнего), взаимодействующих между собой через топливо, гидropередача увеличивает ход грибкового клапана.

**Площадь верхнего штока (поршня) в два раза больше площади нижнего штока.** Между ними находится жидкость, коэффициентом объемного сжатия которой пренебрегаем. При перемещении верхнего штока от пьезопривода на 30 мкм, нижний шток вместе с клапаном переместится примерно на 60 мкм.



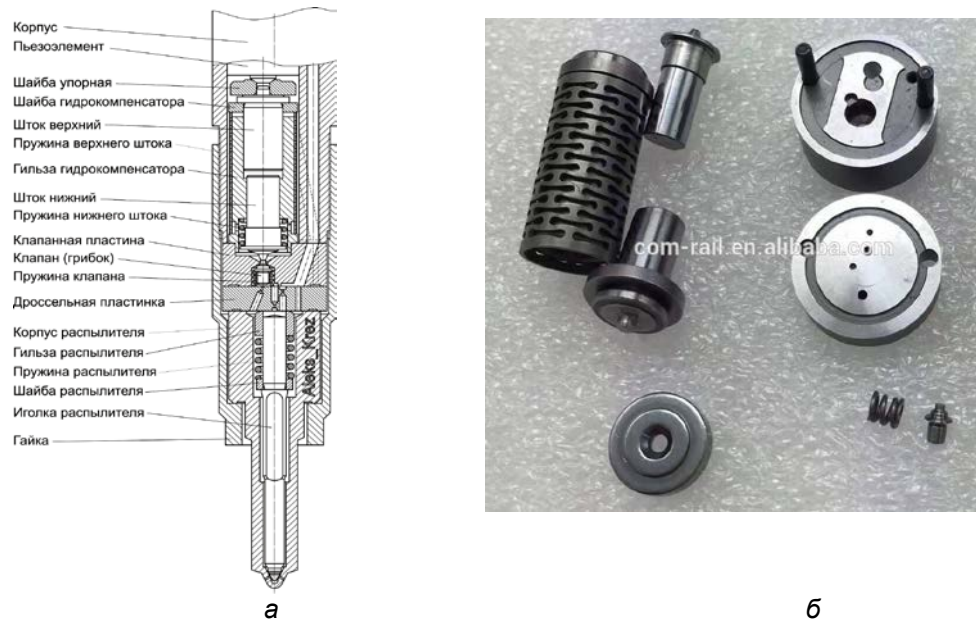


Рисунок 4 – Гидропередача с клапаном управления в сборе (а) и в разобранном виде (б)

**1. Расчетное определение силы пьезопривода для управления клапанным узлом форсунки**

Для выполнения диагностических работ по анализу технического состояния пьезопривода и клапана управления форсункой необходимо знать силу, создаваемую пьезоприводом при подаче электрического напряжения, его общее удлинение. Важно знать силу, действующие на закрытый клапан от давления топлива в камере управления и его максимальный ход. Для обеспечения работоспособности форсунки сила пьезопривода должна быть больше силы от давления топлива, которая закрывает клапан.

Расчет силы пьезопривода выполнен по методике, предложенной в работах [2, 3]. Материал пьезоэлемента – цирконат  $ZrO_2$ , титанат бария  $BaTiO_3$ , окись свинца  $PbO$ , ЦТБС – 8.

1. Площадь сечения пьезоэлемента (ПЭ)

$$A_n = \pi \cdot D^2 / 4 = 3,14 \cdot 3,2^2 / 4 = 8 \text{ см}^2 (8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2), \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр пластины ПЭ, 32 мм.

2. Коэффициента упругости ПЭ

$$K_y = A_n \cdot Y / h = 8 \cdot 10^{-4} \cdot 7,7 \cdot 10^{10} / 4,5 \cdot 10^{-4} = 13,7 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}, \quad (2)$$

где  $Y$  – модуль Юнга, определяющий упругие и резонансные свойства материала,  $7,7 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ;  $h$  – толщина пластины ПЭ, 0,45 мм.

3. Сила, создаваемая ПЭ при подаче электрического напряжения в 150 В, равна

$$F = A_n \cdot U / (g_{33} \times h) = 8 \cdot 10^{-4} \cdot 150 / (25,4 \cdot 10^{-3} \times 4,5 \cdot 10^{-4}) = 10498 \text{ Н}. \quad (3)$$

где  $g_{33}$  – электрическая константа по напряжению в режиме приема,  $25,4 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot \text{м/Н}$ .

4. Изменение толщины вдоль оси одного пьезоэлемента в магнитном поле, создаваемым напряжением 150 В, определим из выражения

$$\Delta Y = F / K = 10498 / 13,7 \cdot 10^{10} = 770 \cdot 10^{-10} \text{ м} (770 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}). \quad (4)$$

Увеличение высоты (толщины) одного ПЭ составит 0,077 мкм. Если взять пакет из 350 пластин, то при входном напряжении 150 В общее удлинение составит 27 мкм. При использовании рычажного механизма или гидропривода с передаточным числом 2 общий ход исполнительного механизма составит 54 мкм, что вполне достаточно для хода клапана 0,04 – 0,05 мм.

В таблице 1 приведены результаты расчета прироста толщины одного пьезоэлемента в зависимости от подводимого напряжения. Материал пьезокерамики ЦТБС-8, толщина 0,4 мм. Из анализа таблицы 1 следует, что толщина одного пьезоэлемента увеличивается с ростом напряжения.

Таблица 1 – Изменение толщины ПЭ в зависимости от подводимого напряжения

Величина напряжения, В	0	100	200	300	400	500
Изменение толщины, мкм	0	0,052	0,104	0,156	0,21	0,26

Рассмотрим изменение силы прижатия клапана к седлу при увеличении внешнего диаметра его посадочного конуса (см. рисунок 2,б) от 2 до 5 мм при постоянном давлении в полости клапана  $P = 160$  МПа ( $160 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>). При диаметре внешнего посадочного конуса клапана (грибка) 2 мм его активная площадь сечения  $A_k$  будет равна  $3,14$  мм<sup>2</sup> ( $3,14 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>).

5. Определим максимальную силу  $F_k$ , действующую на запорный орган (грибок) от давления топлива в его полости

$$F_k = A_k \times P = 3,14 \cdot 10^{-6} \times 160 \cdot 10^6 = 502 \text{ Н.} \quad (5)$$

В таблице 2 приведены результаты расчета  $F_k$  в зависимости от внешнего диаметра посадочного конуса. Из анализа таблицы 2 следует, что величина силы, действующей на запорный орган (клапан), увеличивается с ростом внешнего диаметра посадочного конуса.

Чтобы уменьшить силу инерции и увеличить скорость движения клапана в момент переключения, его масса выбирается минимальной. Но уменьшение размеров клапана, должно быть согласовано с допустимыми контактными напряжениями в уплотняющем пояске.

Сила пьезоэлемента (см. формулу 3) значительно превышает силу прижатия клапана к седлу даже при его диаметре 5 мм и в нужный момент времени он будет открыт. Внешний диаметр посадочного конуса клапана у форсунок с пьезоэлектрическим управлением может лежать в пределах 2 – 3 мм.

Таблица 2 – Изменение силы прижатия клапана к седлу  $F_k$  при увеличении внешнего диаметра посадочного конуса

Величина $F_k$ , Н	502	1130	2009	3140
Внешний диаметр посадочного конуса, мм	2	3	4	5

## **2. Диагностирование форсунок с пьезоэлектрическим управлением хода иглы распылителя**

В процессе длительной эксплуатации форсунок с пьезоприводом происходит ухудшение технических характеристик пьезопривода, отрыв электродов от пьезоэлементов, что приводит к уменьшению хода клапана управления и нарушению процесса впрыска топлива [2].

При диагностировании пьезопривода форсунок необходимо проверить величину управляемого напряжения и перемещение пьезопривода.

Пьезопривод осуществляет перемещение толкателя на величину примерно 30 мкм. Данный ход с точностью до 0,05 мкм рекомендуется в работе [4] определять при помощи лазерного интерферометра. Питание от напряжения каждой пластины пьезопривода параллельное и автономное. Если произошел обрыв цепи питания одной или нескольких пьезопластин, то пьезопривод продолжает работать в штатном режиме, но его ход уменьшается. Это приведет к неполному открытию клапана, ухудшению или отказу работы форсунки.

Во всех форсунках должно быть обеспечено равенство хода клапана (грибка) и их герметичность. При требуемой герметичности клапанов, например четырех форсунок двигателя, величина сливаемого топлива из камеры управления каждой из форсунок должна быть одинаковой [5] (например,  $30 \pm 2$  см<sup>3</sup> в минуту на режиме холостого хода).

Герметичности клапана и изменение его хода можно оценить по величине объема сливаемого топлива, необходимого для управления форсункой. Слив топлива из камеры управления форсунки необходим для подъема иглы распылителя и впрыска топлива в камеру сгорания двигателя. Если сливаемое топливо вместе с утечками превысит предельное значение, то в первую очередь проверяют герметичность клапана управления.

Наиболее изнашиваемой деталью пьезофорсунки является управляющий клапан (см. рисунок 2,б). В процессе длительной эксплуатации на запорных поверхностях грибка и клапанной пластины появляются дефекты в виде промоин, это приводит к снижению герметичности клапана и потери работоспособности форсунки.

Основным способом восстановления плотности управляющего клапана является взаимная притирка грибка с клапанной пластиной. Данный способ является самым простым и дает хороший результат, но только при незначительном износе. При больших износах пары «грибок – конусная клапанная пластина» её заменяют.

На рисунке 5,а показана установка для контроля величины объема сливаемого топлива из штуцера форсунок с пьезоэлектрическим управлением.

## АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ И ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКСЫ: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ

*Сборник материалов V Международной научно-практической конференции*

На рисунке 5,б приведен прибор в собранном виде для измерения хода клапана управления с точностью до 0,001 мм, а на рисунке 5,в показан наконечник прибора с коническим штоком для перемещения и измерения хода клапана.

В нижнюю часть корпуса прибора (рисунок 5,в) устанавливают клапанную пластину (см. рисунок 4,б) совместно с клапаном (без пружины). На клапанную пластину вместе с клапаном накладывают дроссельную пластину или пластину с отверстием для контроля хода клапана. При помощи специальной втулки с резьбой и опорной поверхностью указанные детали вместе с клапаном прижимают к корпусу измерительного прибора. Конический шток прибора имеет пружину и прижимает клапан к дроссельной пластине (это ход клапана). Затем показания шкалы прибора устанавливают на нуль. При помощи стержня (который вставляется в отверстие дроссельной пластины) перемещают клапан до упора. Это и есть ход клапана, который нам фиксирует прибор (например, 0,04 мм).

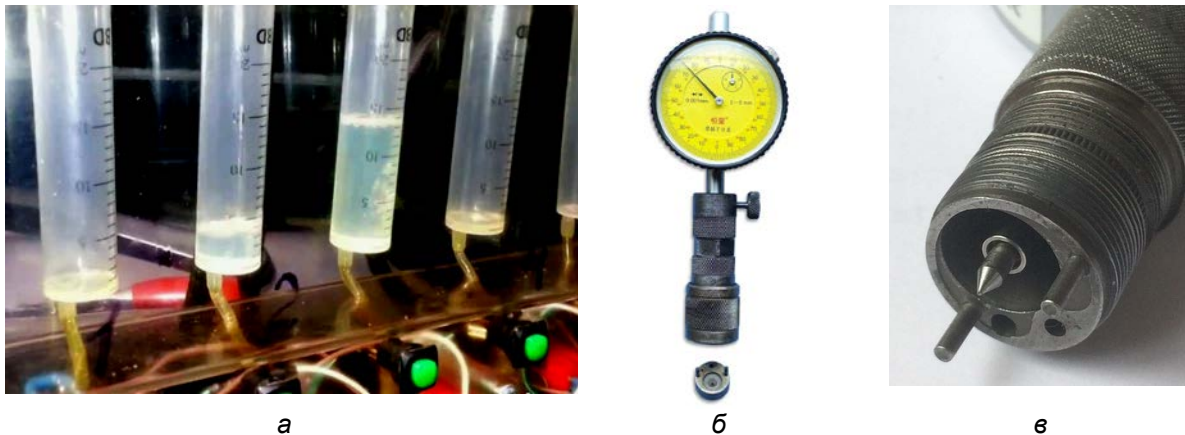


Рисунок 5 – Контроль сливаемого топлива из форсунок с пьезоэлектрическим управлением (а); прибор для измерения хода клапана управления в собранном виде (б); наконечник прибора с коническим штоком для измерения хода клапана (в)

Комплект форсунок подбирается с одинаковыми гидравлическими и электрическими характеристиками. Каждая форсунка имеет собственный индивидуальный код, определяющий такие характеристики, как расход топлива, время реакции, зависимость рабочих параметров от давления. Коды предназначены для точного управления впрыском топлива.

Замена, настройка форсунок выполняются с использованием специального тестового оборудования. Выбраковка одной форсунки обычно требует замены, регулировки и тестирования всего комплекта форсунок.

### Выводы по работе

1. Рассмотрены конструктивные особенности и принцип действия привода клапана форсунок с пьезоэлектрическим управлением.
2. Расчетным путем определены силы, действующие на клапан управления от давления топлива и от пьезопривода.
3. Определено изменения толщины пьезоэлемента от величины подводимого напряжения.
4. Предложена установка для контроля расхода топлива на управление форсункой.
5. Предложен прибор и методика оценки хода клапана форсунки с пьезоэлектрическим управлением.
6. Даны рекомендации по диагностированию главных параметров пьезопривода и клапана управления (грибка).

### Библиографический список

1. Макушев, Ю. П. Системы подачи топлива и воздуха дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигadlo, Л. Ю. Волкова. – Омск: СибАДИ, 2017. – 208 с.
2. Макушев, Ю. П. Расчетные исследования форсунок дизелей с пьезоэлектрическим управлением / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова. Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии». – 2017. – №1 (151). – С. 17-21.
3. Бобцов, А. А. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений: учебное пособие / А. А. Бобцов, С. В. Быстров, В. И. Бойков и др. / СПб ГУ ИТМО. – СПб. 2011. – 131 с.
4. Стрелец, А. А. Определение величины перемещения пьезопривода форсунки / А. А. Стрелец // Электротехника и электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 39- 41.
5. Губертус, Гюнтер. Диагностика дизельных двигателей / Г. Губертус. Серия «Автомеханик»; пер. с нем. Ю. Г. Грудского. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. – 176 с.