

УДК 621.646.2-523-525:621.45

**В.С. БОЙКО, В.И. КОНОХ***Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»,  
Днепропетровск***ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА ВРЕМЯ  
СРАБАТЫВАНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОКЛАПАНА**

*Исследовано влияние газосодержания в рабочей жидкости и ее температуры на динамические характеристики электрогидроклапана. Получены расчетные зависимости времени открытия клапана от количества нерастворенного газа в жидкости, а также экспериментальные и расчетные зависимости времени закрытия от давления насыщенных паров. Основываясь на расчетных и экспериментальных данных, можно оценить время срабатывания электрогидроклапана в широком диапазоне температур и газосодержания рабочей жидкости, что важно для выполнения требуемых характеристик запуска и останова двигательной установки.*

**Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, огневые испытания, электрогидроклапан, время срабатывания, газосодержание, давление насыщенных паров.

**Введение**

В жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) многократного включения с уровнем тяг до 10 кН эффективным является применение электрогидроклапанов (ЭГК) в линиях питания камеры двигателя компонентами топлива. Они позволяют осуществлять запуск, отключение двигателя и дренаж компонентов топлива из зарубашечных полостей камеры сгорания. Переходный процесс запуска и останова двигателя может составлять (0,1...0,8) с, при этом время срабатывания ЭГК находится в диапазоне (0,05...0,08) с. Таким образом, для выполнения требуемых характеристик запуска и останова двигательной установки необходимо обеспечить высокие и стабильные показатели быстродействия ЭГК. Эту задачу решает электрогидроклапан (рис. 1), выполненный по схеме с усилением.

Конструктивно ЭГК [1] выполнен в виде модуля и применяется в двигателе верхней ступени ракеты-носителя легкого класса. Работает ЭГК следующим образом. При подаче электрического сигнала на катушку электромагнита 1 якорь 3 притягивается к плавающему стопу 2 и перемещает управляющие клапаны 5, открывая проходное сечение канала дренажа 6 и перекрывая впускное седло поршня 4. Давление в управляющей полости Д падает, и основной клапан 7, под действием возникшего усилия от перепада давлений между входной А и управляющей полостями, перемещается, открывая основное про-

ходное сечение клапана и отсекая выходную полость С от дренажной В.

При снятии электрического сигнала канал дренажа 6 перекрывается, давление во входной и управляющей полостях выравнивается, а основной клапан 7, под действием пружины 10, перемещается, перекрывая основное проходное сечение ЭГК и сообщая выходную полость с дренажной.

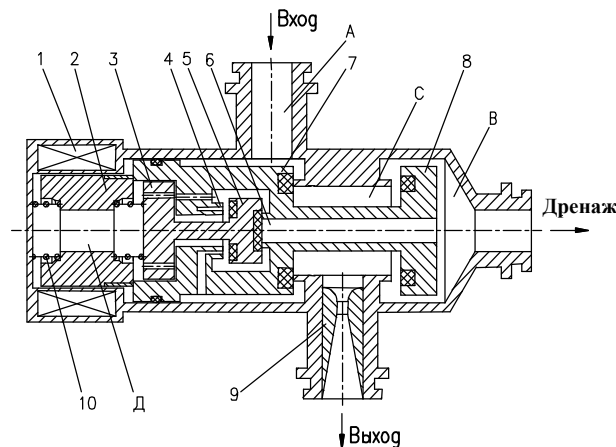


Рис. 1. ЭГК с усилением для подачи компонентов топлива в камеру ЖРД:

1 - электромагнит; 2 - плавающий стоп; 3 - якорь; 4 - впускное седло поршня; 5 - управляющие клапаны; 6 - канал дренажа; 7 - основной клапан; 8 - дренажный клапан; 9 - сопло Вентури; 10 - пружина; А, В, С, Д - соответственно входная, дренажная, выходная и управляющая полости ЭГК

Время срабатывания электрогидроклапана зависит от многих факторов, одним из которых является свойство рабочей жидкости (компонентов топлива). В процессе эксплуатации ЖРД могут возникнуть условия, при которых запуск или останов происходит на компонентах топлива с повышенными температурой и газосодержанием. При этом ЭГК должны обеспечить надежный запуск и останов двигателя.

### Оценка влияния температуры компонентов топлива на время закрытия ЭГК

При огневых испытаниях ЖРД отмечена зависимость времени закрытия ЭГК окислителя («Ок») и горючего («Г») от температуры компонентов топлива (рис. 2) при останове двигателя.

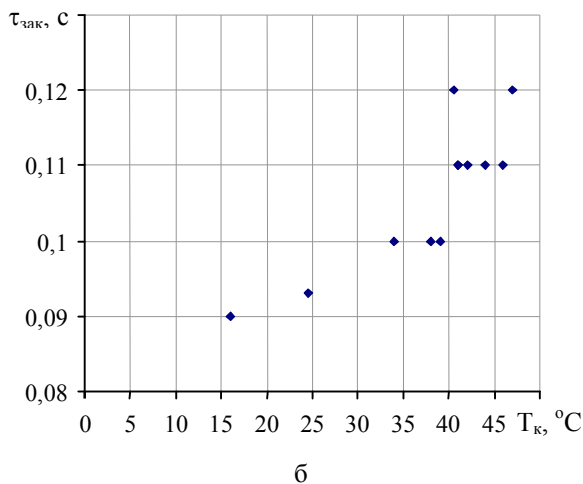
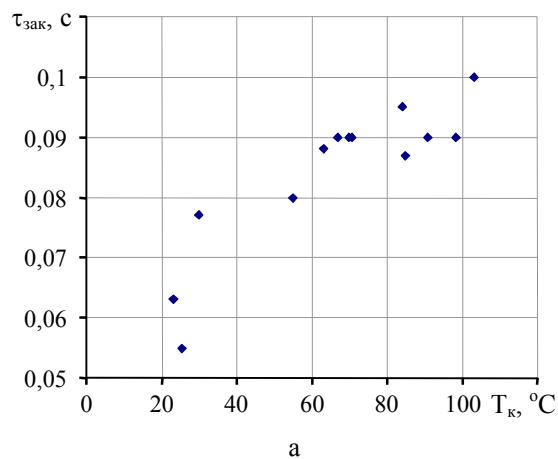


Рис. 2. Экспериментальная зависимость времени закрытия ЭГК «Г» (а) и «Ок» (б) от температуры компонентов топлива при огневых испытаниях двигателя

Существенно эта зависимость проявляется на ЭГК окислителя. Причиной этому являются физические свойства самого окислителя – азотного тетра-

оксида, имеющего существенную зависимость давления насыщенных паров ( $p_{нас}$ ) от температуры (рис.3).

Перед закрытием ЭГК его управляющая полость освобождена от компонента и давление в ней равно давлению окружающей среды. При снятии напряжения с обмотки электромагнита управляющий клапан перекрывает дренажный канал и управляющая полость заполняется компонентом топлива. При достижении определенного давления в управляющей полости основной клапан начинает закрываться. Таким образом, время закрытия ЭГК зависит от объема управляющей полости и расхода рабочей жидкости ее заполняющей. Возможны два случая заполнения управляющей полости: с противодействием и без него. Первый случай реализуется, когда компонент имеет высокое давление насыщенных паров, а второй- когда это давление низкое.

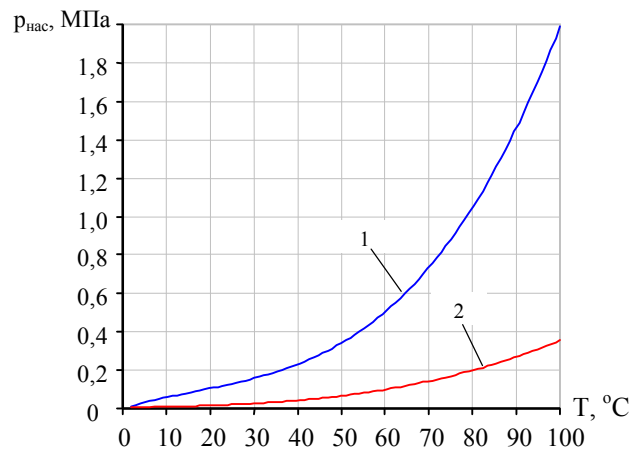


Рис. 3. Зависимость давления насыщенных паров ( $p_{нас}$ ) от температуры компонентов (Т): 1 – азотный тетраоксид (АТ); 2 – несимметричный диметилгидразин (НДМГ)

При заполнении управляющей полости жидкостью без противодействия, давление в ней начнет повышаться только когда весь объем будет заполнен. Эта картина реализуется при срабатывании клапана на воде или НДМГ. Если же в объем управляющей полости с низким давлением попадает АТ, то образуется газовая подушка, состоящая из его паров. Таким образом, компонент топлива втекает в объем управляющей полости, в котором появилось давление. В данном случае величина этого давления зависит от температуры компонента. При этом расход в полость уменьшается, что приводит к росту времени заполнения управляющей полости и, как следствие, к увеличению времени закрытия ЭГК.

Ниже приведены результаты оценки времени закрытия ЭГК «Ок» и «Г» с целью сравнения с экспериментальными данными и проведения проект-

ных расчетов параметров клапана по созданной математической модели.

Управляющую полость в момент закрытия ЭГК можно рассматривать как полость с отсеченным газовым объемом (рис. 4).

При оценке приняты следующие допущения:

- при переходном процессе взаимных превращений фаз нет;
- быстро протекающие процессы сжатия или расширения в газовой полости являются адиабатическими;
- температура компонента принята равной температуре корпуса клапана.

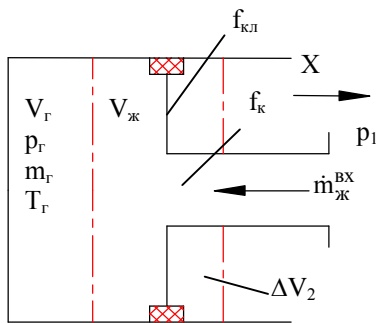


Рис. 4. Расчетная схема

Изменение давления газа в управляющей полости  $p_г$  при отсутствии притока и оттока газа и массообмена можно определить из уравнения состояния идеального газа, считая, что масса газа в управляющей полости постоянна:

$$p_г = \frac{m_г RT_г}{V_г},$$

где  $V_г$  – объем газа в газовой подушке управляющей полости;

$RT_г$  – параметры работоспособности газа;

$m_г$  – масса газа в управляющей полости.

Изменение температуры газа в газовой подушке, за счет ее быстрого расширения или сжатия, определяется с учетом адиабатического изменения состояния газа

$$T_г = T_г^0 \left( \frac{p_г}{p_г^0} \right)^{\frac{k-1}{k}},$$

где  $T_г^0$ ,  $p_г^0$  – начальные значения температуры и давления газа в управляющей полости.

Таким образом, давление в управляющей полости определяется величиной объема газовой подушки в зависимости от расхода жидкости и перемещения клапана

$$V_г = V_2^* + \Delta V_2 - V_ж,$$

где  $V_2^*$  – начальный объем управляющей полости;

$V_ж$  – объем жидкости, поступившей в управляющую полость;

$\Delta V_2 = f_{кл} \cdot X$  – изменение объема полости от перемещения клапана ( $X$ ),  $f_{кл}$  – площадь клапана. Перемещение клапана определяется из общего уравнения движения, основанного на втором законе Ньютона.

Объем жидкости, поступающей в управляющую полость, определится из выражения

$$\frac{dV_ж}{dt} = \frac{\dot{m}_{ж}^{BX} - \dot{m}_{ж}^X}{\rho_ж},$$

где  $\dot{m}_{ж}^{BX} = \mu f_k \sqrt{2\rho_ж g(p_1 - p_г)}$ ,  $f_k$  – площадь перепускного канала в управляющую полость,  $p_1$  – давление на входе;

$\dot{m}_{ж}^X = f_{кл} \rho_ж \cdot \frac{dX}{dt}$  – эквивалентный расход жидкости в управляющую полость от перемещения клапана.

При расчете считалось, что физические параметры жидкости и пары компонентов находятся на линии насыщения. При этом плотность компонента ( $\rho_ж$ ) и плотность его пара ( $\rho_п$ ) определялись по следующим выражениям [2]

$$\rho_ж = A_p (16,47 - 9\bar{T}),$$

$$\rho_п = 1,77 A_p \bar{T}^{10},$$

где  $A_p$  – коэффициент термодинамического подобия;

$\bar{T} = \frac{T_i}{T_{кр}}$  – приведенная температура,  $T_i$ ,  $T_{кр}$  – температура и критическая температура.

Результаты расчетов и экспериментальные данные представлены на рис. 5.

Анализируя результаты экспериментальных и расчетных данных можно отметить:

- результаты оценочных расчетов хорошо совпадают с данными, полученными при огневых испытаниях двигателя. Так отличие расчетного времени закрытия клапана «Ок» не отличается от экспериментального более чем на 6%, а клапана «Г» - на 13%;

- при температурах горючего в управляющей полости ЭГК (23...100)°С, время закрытия клапана составляет (0,055...0,1) с. В этом диапазоне температур, давление насыщенных паров компонента изменяется с 0,018 до 0,35 МПа;

- при температурах окислителя в управляющей полости ЭГК (16...47)°С, время закрытия клапана составляет (0,09...0,12) с. В этом диапазоне темпе-

ратур, давление насыщенных паров компонента изменяется с 0,08 до 0,3 МПа.

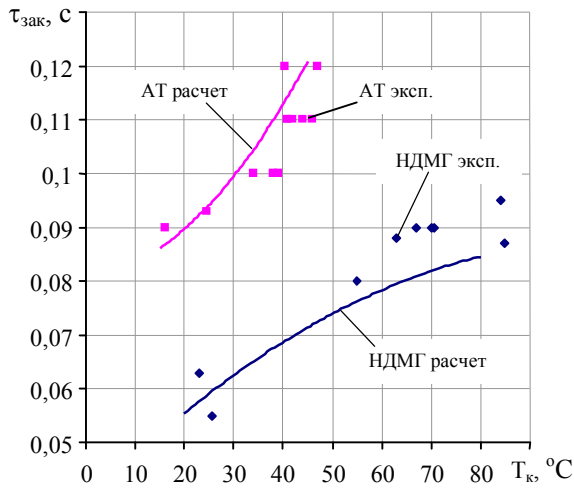


Рис. 5. Расчетная и экспериментальная зависимость времени закрытия ЭГК от температуры корпуса клапана

### Влияния газосодержания рабочей жидкости на время срабатывания ЭГК

Известно, что жидкость в замкнутых полостях ЭГК, находящаяся под давлением, обладает определенной упругостью. Упругие свойства жидкости характеризуются модулем объемного сжатия, который в общем случае зависит от рода жидкости, ее давления и температуры, а также от количества нерастворенного в ней газа.

Наличие пузырьков газа в рабочей жидкости снижает модуль ее объемного сжатия, а, следовательно, и скорость звука. В данном случае считается, что газ и жидкость образуют гомогенную двухфазную смесь, размер пузырьков небольшой, а их плотность значительно меньше плотности жидкости. Тогда для полостей ЭГК скорость звука в пузырьковой смеси рассчитывается по формуле [3].

$$a_{см} = \frac{a_г}{\sqrt{\alpha(1-\alpha)\frac{\rho_ж}{\rho_г} + (1-\alpha)^2\left(\frac{a_г}{a_ж}\right)^2 + (1-\alpha)\frac{E_ж}{E}\eta\left(\frac{a_г}{a_ж}\right)^2}},$$

где  $\alpha = \frac{V_г}{V_г + V_ж}$  - объемное газосодержание;

$V_г, V_ж$  - объемы газа и жидкости в рассматриваемой полости ЭГК;

$\rho_г, \rho_ж$  - плотность газа и жидкости;

$a_г, a_ж$  - скорость звука в газе и жидкости;

$E_{см} = \rho_{см} a_{см}^2$  - модуль объемного сжатия смеси;

$\rho_{см} = \alpha \cdot \rho_г + (1-\alpha)\rho_ж$  - плотность газожидкостной смеси;

$\eta = \frac{d}{\delta}$  - безразмерный параметр трубы,  $d$  и  $\delta$  - соответственно диаметр и толщина стенки трубы.

При этом учитывалась упругость стенок трубопровода, а количеством движения газовых пузырей пренебрегли.

Проведена расчетная оценка времени срабатывания электрогидроклапана с усилением и дренажом при различном газосодержании гелия в АТ, НДМГ и воздуха в воде. При этом рабочее давление и расход компонентов топлива соответствовали значениям, представленным в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета оценки времени срабатывания электрогидроклапана

Рабочая жидкость	АТ	НДМГ	Вода
Давление на входе, МПа	3	3	3,6
Расход рабочей жидкости, кг/с	0,52	0,26	0,3
Газ насыщения	Гелий		Воздух

Результаты расчетов представлены на рис. 6.

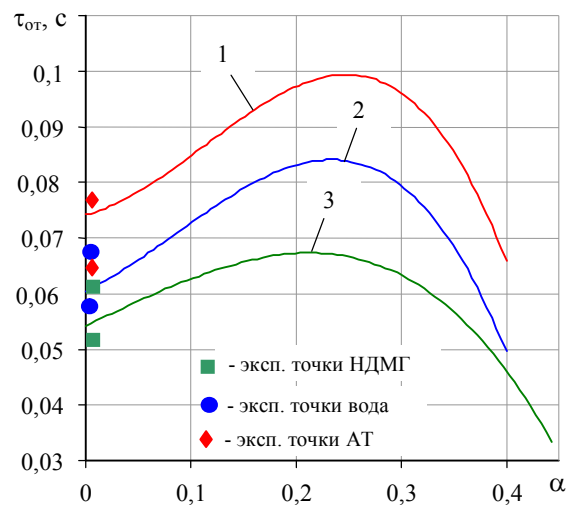


Рис. 6. Расчетная зависимость времени открытия ЭГК от объемного содержания газа в рабочей жидкости: 1 - АТ и гелий; 2 - вода и воздух; 3 - НДМГ и гелий

Анализируя результаты расчетов можно отметить:

- с повышением газосодержания в рабочей жидкости до  $\alpha=(0,21...0,25)$  время открытия ЭГК повышается (на 22...40%);

- при значениях газосодержания  $\alpha > (0,21...0,25)$  время открытия уменьшается и приближается к значениям характерным при срабатывании ЭГК на газе.

## Заключение

Время срабатывания электроклапана существенно зависит от параметров рабочей жидкости. Одними из таких параметров являются давление насыщенных паров компонента и количество нерасстворенного в нем газа. Получена расчетная оценка временных характеристик ЭГК от температуры компонента топлива и его газосодержания, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными.

## Литература

1. Пат. 89948 Україна, МПК F 16K 32/02. Електрогідроклапан [Текст] / Шнякін В.М, Конох В.І, Котрехов Б.І, Трояк А.Б, Бойко В.С.; Заявник та патентовластник Дніпропетровськ. Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля. - а 2006 02543; заяв. 09.03.2006; друк. 25.03.2010, Бюл. №6. – 4 с.: іл.

2. Беляев, Е.Н. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Е.Н. Беляев, В.К. Чванов, В.В. Черваков; под ред. В.К. Чванова. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 228 с.

3. Уоллис, Г. Одномерное двухфазное течение [Текст] / Г. Уоллис. – М.: Мир, 1972. – 293 с.

*Поступила в редакцію 22.01.2013, рассмотрена на редколлегии 13.02.2013*

**Рецензент:** д-р техн. наук, начальник сектора В.С. Хорошилов, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

### ОЦІНКА ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОЇ РІДИНИ НА ЧАС СПРАЦЬОВУВАННЯ ЕЛЕКТРОГІДРОКЛАПАНА

*В.С. Бойко, В.І. Конох*

Досліджено вплив тиску насичених парів компонента та кількість нерозчиненого в ньому газу на динамічні характеристики електрогідроклапана з посиленням. Отримано розрахункові залежності часу відкриття клапана від кількості нерозчиненого газу, а також експериментальні й розрахункові залежності часу закриття від тиску насичених парів робочого тіла. Ґрунтуючись на розрахункових та експериментальних даних, можливо оцінити час спрацьовування ЕГК у широкому діапазоні температур і газонасичення компонентів палива, що важливо для забезпечення необхідних характеристик запуску та вимкнення рідинного ракетного двигуна.

**Ключові слова:** рідинний ракетний двигун, вогневі випробування, електрогідроклапан, час спрацьовування, газонасичення, тиск насичених парів.

### ASSESSMENT OF WORKING FLUID PARAMETERS IMPACT ON ELECTROMAGNETIC HYDRAULIC VALVE RESPONSE TIME

*V.S. Boyko, V.I. Konokh*

Effect of gas content in and temperature of propellant on dynamic characteristics of electromagnetic hydraulic valve with amplification was examined. Calculated relationship between valve opening time and amount of non-dissolved gas, and experimental and estimated dependence between valve opening time and saturated vapor pressure were obtained. Based on estimated and experimental data response time of electromagnetic hydraulic valve can be evaluated within wide range of propellant temperature and gas content values, which is important for meeting compliance to assigned characteristics of engine starting and shutdown.

**Key words:** liquid-propellant rocket engine, firing test, electromagnetic hydraulic valve, response time, gas content, saturated vapor pressure.

**Бойко Василь Станиславович** – ведущий инженер-конструктор отдела агрегатов автоматики ЖРД ГП «КБ «Южное»», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com.

**Конох Владимир Иванович** – канд. техн. наук, начальник отдела агрегатов автоматики ЖРД ГП «КБ «Южное»», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com.