

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК ДЛЯ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» для студентов, обучающихся по программам высшего образования, в качестве методических указаний

Составители: В.С. Егорычев
В.В. Лапшин

САМАРА
Издательство СГАУ
2016

УДК 621.431.75(075)
ББК 39.55я7

Составители: ***В.С. Егорычев, В.В. Лапшин***

Рецензент д-р техн. наук, проф. А. Г. Г и м а д и е в

Исследование жидкостных центробежных форсунок ДЛА: метод. указания / сост. *В.С. Егорычев, В.В. Лапшин.* – Самара: Изд-во СГАУ, 2016. – 24 с.

В методических указаниях приведены краткие теоретические сведения о форсунках жидкого топлива. Рассмотрены устройство, принцип действия и физическая картина течения жидкости в центробежных форсунках ракетных и авиационных двигателей. Проанализированы выводы, следующие из теории простейшей центробежной форсунки, когда рабочая жидкость, подводимая через одно круглое тангенциальное отверстие, является невязкой и несжимаемой. Рассмотрены объект испытаний и новый учебно-исследовательский стенд, на котором проводятся исследования центробежных форсунок. Даны методики проведения эксперимента, обработки его результатов, анализа полученных результатов эксперимента и сопоставления их с теорией.

Предназначены для студентов факультета двигателей летательных аппаратов, обучающихся по специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей.

Разработаны на кафедре теории двигателей летательных аппаратов.

УДК 621.431.75(075)
ББК 39.55я7

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.....	5
2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О ФОРСУНКАХ И РЕЖИМАХ ИСТЕЧЕНИЯ	5
2.1 Расходная характеристика и коэффициент расхода.....	6
2.2 Течение рабочего тела в центробежных форсунках	7
3 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ	13
4 СТЕНД ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ФОРСУНОК	13
5 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА	16
6 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	17
7 ЗАДАНИЕ И ОТЧЁТ ПО РАБОТЕ	19
8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	21
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	22
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	23

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемые методические указания необходимы студентам для самостоятельной подготовки к лабораторной работе по учебной дисциплине «Теория, расчёт и проектирование ракетных двигателей», её качественного самостоятельного проведения, обработки, анализа и представления результатов испытаний, а также сдачи зачёта по работе. Они посвящены исследованию рабочего процесса и характеристик жидкостных центробежных форсунок ДЛА, получению экспериментальной расходной характеристики центробежной форсунки, анализу результатов экспериментального исследования.

Необходимость написания настоящих методических указаний продиктована тем, что в известной на сегодняшний день учебной литературе по ЖРД практически отсутствуют методики экспериментального и расчётного определения действительных значений коэффициентов расхода различных типов центробежных жидкостных форсунок, их анализа и расчёта с требуемой погрешностью в процессе проектирования ракетного или авиационного двигателя.

Руководствуясь стремлением реализовать в процессе подготовки будущих специалистов инновационные технологии, авторы обобщили в настоящих методических указаниях опыт подготовки и проведения испытаний центробежных форсунок ДЛА на новом стенде гидравлических испытаний, имеющем современную автоматизированную систему измерения, сбора, обработки и представления результатов эксперимента в ходе проведения испытаний.

1 ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель лабораторной работы заключается в практическом ознакомлении с устройством, принципом действия и режимами работы центробежных форсунок жидкого топлива ДЛА, проведении на новом учебно-исследовательском стенде гидравлических испытаний центробежных форсунок и анализе полученных экспериментальных параметров и характеристик.

Для достижения указанной цели необходимо:

- ✓ изучить теорию центробежных форсунок по данным методическим указаниям к лабораторной работе и указанной в них литературе;
- ✓ ознакомиться с назначением, устройством и принципом действия центробежных форсунок, применяемых в ДЛА, с устройством и конструкцией учебно-исследовательского стенда гидравлических исследований форсунок;
- ✓ рассмотреть на прозрачной модели центробежной форсунки особенности течения и распыления рабочей жидкости;
- ✓ провести по предложенной методике гидравлические испытания центробежных форсунок с различной геометрической характеристикой;
- ✓ обработать результаты эксперимента;
- ✓ провести анализ полученных экспериментальных параметров и характеристик форсунок с учётом течения вязкой и теплопроводной рабочей жидкости.

2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О ФОРСУНКАХ И РЕЖИМАХ ИСТЕЧЕНИЯ

Форсунка – это устройство, предназначенное для впрыска и распыливания компонентов топлива в камере сгорания двигателей летательных аппаратов или газогенераторов, а также первоначального их распределения в объёме камеры сгорания.

Форсунка является основным элементом смесительной головки двигателя. Практически всё многообразие форсунок, применяемых в ДЛА, представляет собой различные комбинации двух основных типов: струйных и центробежных.

Работа любой форсунки жидкого топлива характеризуется качеством распыла, который определяется следующими параметрами:

1. Тонкостью распыла, оцениваемой некоторым средним размером капель, получающихся при распылении.
2. Однородностью распыла, т.е. интервалом изменения размеров капель в факеле распыленного топлива. Чем меньше этот интервал диаметров образовавшихся капель, тем однороднее распыл топлива.
3. Дальностью факела – глубиной проникновения распыленного топлива в газовую среду.

4. Равномерностью расходонапряжённости, т.е. равномерностью распределения массового расхода жидкости в поперечном сечении факела распыла.

5. Средним углом распыла $2\bar{\alpha}$, измеряемым у среза сопла форсунки. Основной для всех типов форсунок является расходная характеристика.

2.1 Расходная характеристика и коэффициент расхода

Расходной характеристикой форсунки называется зависимость расхода рабочей жидкости через форсунку от перепада давления на ней, т.е. $\dot{m} = f(\Delta p_\phi)$.

Чтобы получить действительный массовый расход жидкости через форсунку, следует в самом общем случае интегрировать уравнение неразрывности для трёхмерного течения. Это включает в себе определённые математические трудности и не гарантирует правильного решения, т.к. в исходных уравнениях невозможно правильно учесть все особенности реального течения.

Идеальный массовый расход рабочей жидкости через форсунку, т.е. расход, соответствующий одномерному невязкому течению, запишется

$$\dot{m}_{ид} = \rho W_{ид} F_\phi, \quad (1)$$

где ρ – плотность рабочей жидкости, F_ϕ – площадь канала форсунки на выходе, $W_{ид}$ – идеальная скорость истечения жидкости из форсунки.

Площадь сопла форсунки в выходном сечении

$$F_\phi = \frac{\pi d_c^2}{4}. \quad (2)$$

Величина идеальной скорости истечения жидкости может быть найдена по формуле Торричелли

$$W_{ид} = \sqrt{\frac{2\Delta p_\phi}{\rho}}, \quad (3)$$

где $\Delta p_\phi = p_{ex} - p_k$ – перепад давления на форсунке.

Идеальный массовый расход рабочей жидкости через форсунку тогда запишется

$$\dot{m}_{ид} = F_\phi \sqrt{2\rho\Delta p_\phi}. \quad (4)$$

Коэффициентом расхода форсунки называют отношение действительного расхода через форсунку к идеальному расходу

$$\mu_\phi = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ид}}. \quad (5)$$

С использованием коэффициента расхода форсунки уравнение для определения действительного массового расхода жидкости через форсунку будет иметь вид

$$\dot{m} = \mu_{\phi} F_{\phi} \sqrt{2\rho \Delta p_{\phi}} = \mu_{\phi} F_{\phi} \sqrt{2\rho(p_{ex} - p_{к})}. \quad (6)$$

Коэффициент расхода форсунки μ_{ϕ} всегда меньше единицы. Он учитывает следующие основные причины снижения действительного расхода рабочей жидкости по сравнению с идеальным расходом:

- струя жидкости заполняет не всё сечение сопла форсунки на выходе, т.е. коэффициент сжатия струи $\varepsilon = \frac{F_{жс}}{F_{\phi}} < 1$, где $F_{жс}$ – площадь струи жидкости в выходном сечении форсунки;

- действительная эпюра вектора скорости в выходном сечении форсунки отличается от прямоугольной эпюры, соответствующей идеальному случаю одномерного течения, в основном из-за трения.

Величина коэффициента расхода при заданном перепаде давления определяет пропускную способность форсунки, а значит, и смесительной головки двигателя. Для работы двигателя важна не только сама величина коэффициента расхода форсунки, но и его стабильность. Изменение величины μ_{ϕ} вызывает перераспределение компонентов топлива в объёме камеры сгорания и снижает эффективность процесса смесеобразования. Это может привести к аварийной ситуации.

Расходную характеристику форсунок получают, как правило, экспериментально, однако её можно рассчитать теоретически. Для этого необходимо изучить механизм течения рабочей жидкости в проточной части центробежной форсунки.

2.2 Течение рабочего тела в центробежных форсунках

Рассмотрим принцип действия центробежной форсунки. Любая центробежная форсунка обязательно имеет камеру закручивания. Вращение рабочей жидкости достигается либо за счёт её тангенциального подвода в камеру закручивания, либо за счёт использования шнека.

Изобразим на рис. 1 схему простейшей центробежной форсунки с одним входным тангенциальным каналом и рассмотрим физическую картину течения жидкости в ней.

Рабочая жидкость подаётся в камеру закручивания форсунки по тангенциальному входному каналу (см. рис. 1), поэтому входная скорость W_{ex} имеет окружную составляющую $W_{ex,u}$. Жидкость, вращаясь, течёт через форсунку. Таким образом, в центробежной форсунке движение жидкости

трёхмерное. Частицы жидкости имеют окружную W_u , осевую W_x и радиальную W_r , составляющие скорости.

Примем, что вся масса поступающей в камеру закручивания жидкости сосредоточена на оси входного канала, а трение и местное сопротивление отсутствуют. Если считать жидкость идеальной, то для некоторой её частицы постоянной массы, вращающейся на радиусе r в камере закручивания форсунки, уравнения сохранения момента количества движения и энергии запишутся соответственно

$$W_{\text{ex}} R_{\text{ex}} = W_u r, \quad (7)$$

$$p_{\text{ex}} + \frac{\rho W_{\text{ex}}^2}{2} = p + \frac{\rho}{2} (W_u^2 + W_x^2 + W_r^2), \quad (8)$$

где r – радиус вращения частицы относительно оси форсунки, p – статическое давление в рабочей жидкости на этом радиусе.

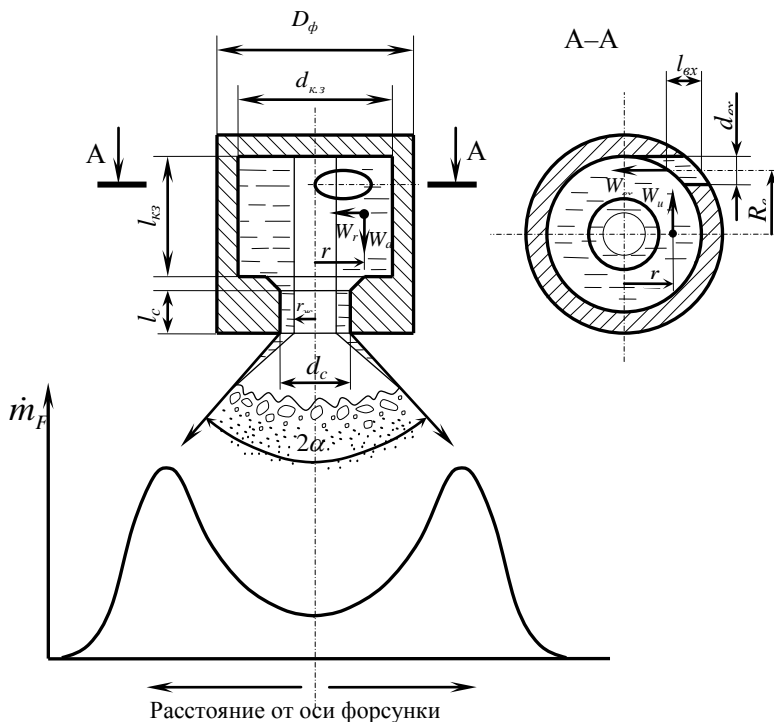


Рис. 1. Схема простейшей центробежной форсунки с одним тангенциальным входным каналом и физическая картина течения жидкости в ней

Из уравнений (7) и (8) следует, что при постоянном расходе жидкости через форсунку с уменьшением радиуса r окружная составляющая скорости W_u увеличивается, а давление жидкости p падает. При приближении к оси сопла ($r \rightarrow 0$) W_u стремится к бесконечности, а давление жидкости к бесконечно большому отрицательному значению, что лишено физического смысла.

Практически давление жидкости снижается по мере приближения к оси форсунки лишь до давления среды p_k , куда происходит истечение. Центральная часть форсунки оказывается свободной от жидкости, она заполняется веществом среды с тем же давлением p_k . Этот газ, эжектируемый закрученной рабочей жидкостью, начинает вращаться, образуя вихрь с радиусом $r_{жс}$. По высоте этот вихрь распространяется на всю камеру закручивания форсунки. Величина радиуса приосевого вихря рабочей жидкости $r_{жс}$ определяется отношением её окружной и осевой скоростей движения $\frac{W_u}{W_x}$. Чем выше это отношение, тем больше радиус $r_{жс}$. Радиальной составляющей скорости W_r из-за её малости пренебрегают.

Течение жидкости по соплу форсунки будет осуществляться не через всю площадь геометрического сечения диаметром d_c , а лишь через кольцевую площадь сечения от радиуса $r_c = \frac{d_c}{2}$ до радиуса $r_{жс}$, называемую живым сечением сопла форсунки. Коэффициент заполнения жидкостью выходного сечения сопла форсунки или живого сечения форсунки запишется

$$\varphi = \frac{F_{жс}}{F_c} = 1 - \frac{r_{жс}^2}{r_c^2}. \quad (9)$$

Итак, жидкость покидает форсунку в виде закрученной концентрической пелены. Далее в идеальном случае частицы жидкости движутся по прямым линиям, касательным к траектории вращения. Однако реально в пелене действуют силы поверхностного натяжения, заставляющие траектории искривляться в направлении к оси форсунки. Образуется поверхность усечённого однополосного гиперboloида вращения. Так как диаметр d_c невелик, то этот гиперboloид считается конусом с углом 2α при вершине. Толщина пелены жидкости по мере удаления от среза сопла форсунки быстро уменьшается и под действием внешних и внутренних сил она распадается на мелкие капли, образуя факел распыла.

Тангенс угла прямолинейных траекторий частиц с осью форсунки составит

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{W_u}{W_x}. \quad (10)$$

Обычно оперируют средним углом распыла $2\bar{\alpha}$, вычисляя его по некоторому среднему значению окружной составляющей скорости движения частицы жидкости \bar{W}_u .

Изменяя геометрические параметры центробежной форсунки, можно в широких пределах при заданном перепаде давления изменить её основные параметры. Это даёт возможность конструктору простыми методами значительно влиять на качество смесеобразования.

Большой диапазон возможных величин углов распыла ($2\alpha = 30 \dots 120^\circ$), самопроизвольное дробление пелены на мелкие капли в непосредственной близости от среза сопла являются положительными качествами центробежных форсунок. Центробежные форсунки обеспечивают высокую тонкость распыла рабочей жидкости.

Отрицательным качеством центробежных форсунок является низкое значение их коэффициента расхода, т.к. жидкость при истечении заполняет только кольцевую периферическую часть сопла форсунки.

Теория простейшей центробежной форсунки была разобрана Г.Н. Абрамовичем. Он рассматривал течение невязкой несжимаемой жидкости в форсунке с одним входным тангенциальным каналом, когда вся масса входящей жидкости сосредоточена на оси канала (см. рис. 1).

Был определен критерий подобия процессов течения жидкости в центробежных форсунках (критерий гидродинамического подобия), названный Абрамовичем геометрической характеристикой центробежной форсунки A .

$$A = \frac{R_{ex} r_c}{r_{ex}^2}. \quad (11)$$

Из теории простейшей центробежной форсунки следуют важные выводы:

1. Реальная центробежная форсунка, используемая в ДЛА, может отличаться геометрически от рассмотренной простейшей форсунки наличием нескольких входных каналов с осью, наклоненной под углом β к оси сопла форсунки, наличием шнека и др. Эти отличия учитывает полученное обобщённое выражение для геометрической характеристики центробежной форсунки

$$A = \frac{\pi R_{ex} r_c}{n F_{ex}} \sin \beta, \quad (12)$$

где F_{ex} – площадь проходного сечения одного входного канала, n – число входных каналов или заходов резьбы шнека. При использовании шнека β – угол наклона винтовой линии.

2. Величина геометрической характеристики A однозначно определяет степень закрутки рабочей жидкости в центробежной форсунке. Чем больше A , тем сильнее закрутка жидкости на выходе из форсунки и выше отношение окружной и осевой скоростей W_u/W_x . Это означает при постоянном перепаде давления на форсунке перераспределение энергии потока жидкости между поступательным и вращательным движениями.

3. Геометрическая характеристика A однозначно определяет величины коэффициента расхода μ_ϕ и угла конуса распыла 2α центробежной форсунки при течении через неё невязкой несжимаемой жидкости (см. рис. 2).

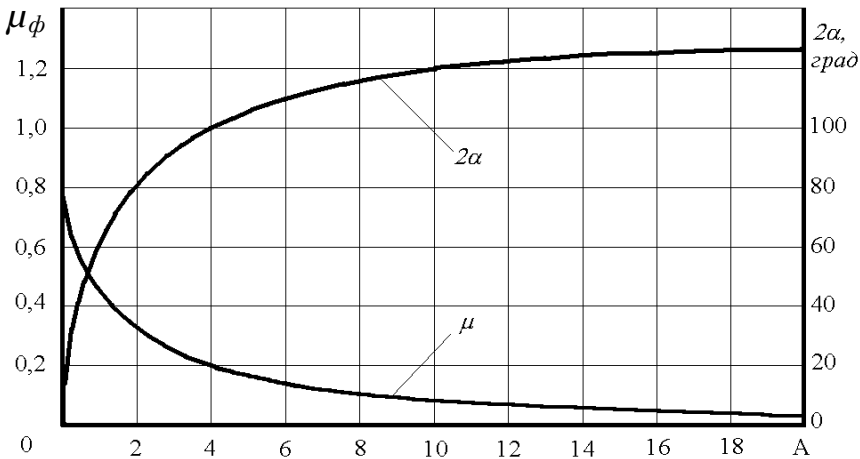


Рис. 2. Зависимость коэффициента расхода μ_ϕ и угла конуса распыла 2α от геометрической характеристики A центробежной форсунки

Теория простейшей центробежной форсунки правильно описывает особенности движения жидкости в центробежной форсунке, о чём говорит её многочисленная опытная проверка. Однако в отдельных случаях она даёт значительную погрешность определения μ_ϕ и 2α , так как не учитывает влияние вязкости жидкости и ряда конструктивных факторов, не нашедших своего отражения в обобщённом выражении для геометрической характеристики форсунки A .

Из-за наличия вязкости реальной жидкости на стенке возникают силы трения. Они снижают момент количества движения жидкости на выходе из форсунки по сравнению с входом. Это приводит к уменьшению радиуса газового вихря, а значит, и к увеличению коэффициента расхода жидкости и к уменьшению угла распыла.

Используя известные из механики и газовой динамики соотношения, можно получить выражение для коэффициента расхода и угла распыла вязкой жидкости

$$\mu_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{\frac{A_3^2}{1-\phi} + \frac{1}{\phi^2}}}, \quad (13)$$

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha} = \frac{2 \mu_{\phi} A_3}{\sqrt{\left(1 + \sqrt{1-\phi}\right)^2 - 4 \mu_{\phi}^2 A_3^2}} = \frac{2 \mu_{\phi} A_3}{\sqrt{\left(1 + \frac{r_e^2}{r_c^2}\right) - 4 \mu_{\phi}^2 A_3^2}}, \quad (14)$$

где ϕ – коэффициент живого сечения, A_3 – эквивалентная геометрическая характеристика форсунки.

Эквивалентная геометрическая характеристика форсунки, учитывающая вязкость реальной рабочей жидкости, запишется

$$A_3 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{B^2}{n} - A \right)}, \quad (15)$$

где λ – коэффициент трения, B – параметр центробежной форсунки. Для вычисления параметра B имеется выражение

$$B = \frac{R_{ex}}{r_{ex} n}. \quad (16)$$

Эквивалентная геометрическая характеристика форсунки A_3 и коэффициент живого сечения форсунки ϕ связаны между собой функционально так же, как A и ϕ для идеальной форсунки. Эта зависимость имеет вид

$$A_3 = (1-\phi) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\phi^3}}. \quad (17)$$

Итак, уравнения для расчёта μ_{ϕ} и $2\bar{\alpha}$ с учётом вязкости жидкости отличаются от аналогичных выражений для идеальной жидкости только заменённой A на A_3 . Определить μ_{ϕ} и $2\bar{\alpha}$ можно с помощью ранее построенных зависимостей $\mu_{\phi} = f(A)$ и $2\bar{\alpha} = f(A)$ для идеальной форсунки (рис. 2), используя вместо геометрической характеристики форсунки A эквивалентную геометрическую характеристику A_3 .

Влияние других всевозможных факторов на коэффициент расхода и угол распыла основывается на экспериментальных данных, полученных при исследовании вновь спроектированной или аналогичной по конструкции фор-

сунки. Проектирование центробежных форсунок ведётся обычно по A_3 с использованием зависимостей (13) и (14). Уточнение величин μ_ϕ и $2\bar{\alpha}$ производится на основе экспериментальных данных.

3 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Для проведения необходимых исследований имеется набор из шести шнековых центробежных форсунок, геометрические размеры которых приведены в табл. 1.

В таблице указаны следующие параметры центробежных форсунок: n – число заходов шнека, b и h – ширина и высота винтового канала шнека, β – угол наклона винтовой линии шнека.

Имеется также прозрачная демонстрационная центробежная форсунка, на которой удобно наблюдать образование газового вихря вдоль оси центробежной форсунки, а также возникновение усечённого однополосного гиперболоида вращения, переходящего с увеличением перепада давления на форсунке в конус распыла.

Таблица 1. Геометрические параметры центробежных форсунок

Геометрические параметры форсунок	Единица измерения	Номер форсунки					
		1	2	3	4	5	6
r_c	мм	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
$R_{вх}$	мм	3,25	3,60	3,75	3,60	3,70	3,80
n		6	6	6	3	3	3
b	мм	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
h	мм	1,5	0,8	0,5	0,8	0,6	0,4
β	град.	48,500	51,500	52,667	68,334	69,167	69,334
$\sin \beta$		0,7490	0,7826	0,7951	0,9293	0,9346	0,9356

4 СТЕНД ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ФОРСУНОК

Учебно-исследовательский стенд гидравлических испытаний форсунок ДЛА имеет насосную замкнутую систему подачи рабочего тела. В качестве рабочего тела используется вода. Гидравлическая схема стенда представлена на рис. 3.

Высоконапорный плунжерный насос 3 забирает воду из накопительного бака 1 через фильтр 2. За насосом 3 рабочая жидкость течёт по двум магистралям.

По первой кольцевой магистрали вода через ручной вентиль регулировки перепуска 4 и ручной вентиль тонкой регулировки 5, служащий для плавной регулировки давления перед испытываемой форсункой 13, поступает обратно в бак 1. Перепуск воды необходим для обеспечения надёжной и бесперебойной работы плунжерного насоса 3.

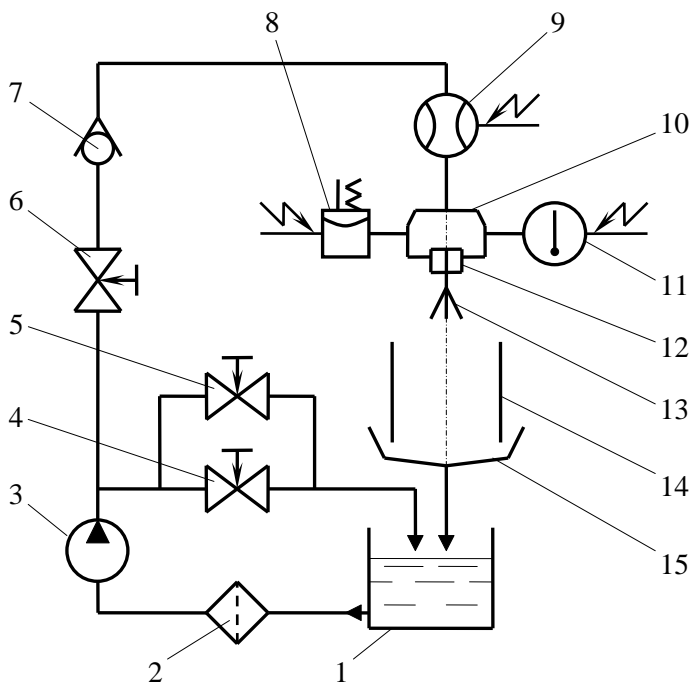


Рис. 3. Гидравлическая схема учебно-исследовательского стенда испытаний форсунок:

- 1 – накопительный бак воды; 2 – фильтр; 3 – высоконапорный плунжерный насос; 4 – ручной вентиль регулировки перепуска; 5 – ручной вентиль тонкой регулировки давления перед форсункой; 6 – ручной вентиль; 7 – обратный клапан; 8 – датчик давления; 9 – турбинный расходомер; 10 – устройство крепления форсунки; 11 – датчик температуры воды; 12 – механизм крепления форсунки; 13 – форсунка; 14 – уловитель водяных брызг; 15 – поддон сбора воды

По второй рабочей магистрали через ручной вентиль 6, обратный клапан 7, турбинный расходомер 9 вода направляется к устройству крепления исследуемой форсунки 10. К гидравлической полости этого устройства перед исследуемой форсункой присоединены датчики давления 8 и температуры 11.

Факел распыла воды, вытекающей из форсунки 13, попадает в уловитель брызг 14, по нему вода стекает в поддон 15 и далее самотёком сливается в накопительный бак 1.

Особого изучения в новом учебно-исследовательском стенде гидравлических испытаний форсунок ДЛА заслуживает автоматизированная система измерения, сбора, обработки и представления результатов эксперимента. Структурная схема этой системы приведена на рис. 4.

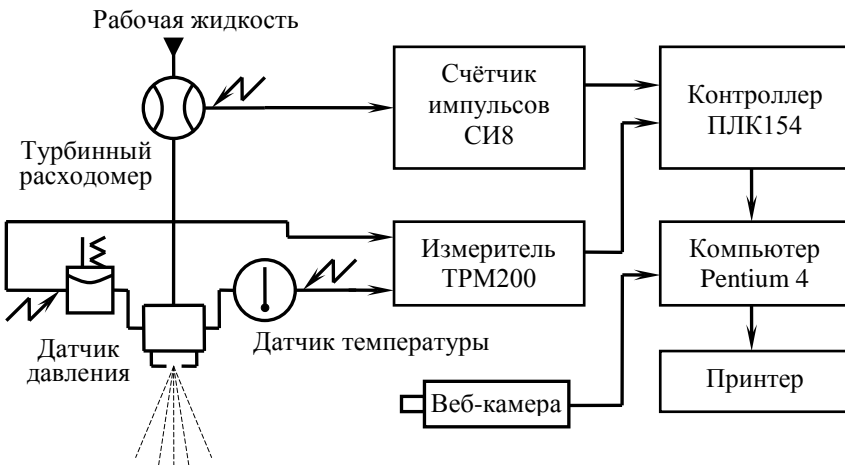


Рис. 4. Схема автоматизированной системы измерения, сбора, обработки и представления результатов эксперимента

Измерительная система стенда позволяет измерять следующие параметры:

- ✓ давление жидкости перед форсункой p_{ex} ;
- ✓ объёмный расход воды через форсунку \dot{V} ;
- ✓ температуру воды перед форсункой t_{ex} ;
- ✓ давление окружающей среды p_n ;
- ✓ температуру окружающей среды t_n ;
- ✓ средний угол распыла воды $2\bar{\alpha}$.

Давление жидкости перед форсункой измеряется преобразователем избыточного давления фирмы «Овен» (Россия) типа ПД100-ДИ-1,6 с диапазоном измерения 0...1,6 МПа и приведенной относительной погрешностью $\pm 0,5$ %. Преобразование аналогового сигнала по напряжению в физическое значение давления осуществляется измерителем ТРМ 200 той же фирмы с максимальной относительной погрешностью $\pm 0,5$ % (см. рис. 4).

Объёмный расход воды через форсунку измеряется турбинным расходомером типа 508-2704 фирмы RS (Великобритания) с приведенной относительной погрешностью измерения $\pm 0,25$ %. Преобразование частотного сигнала в физическое значение расхода осуществляется счётчиком импульсов СИ8 (фирма «Овен», Россия) с максимальной относительной погрешностью $\pm 0,15$ % (см. рис. 4).

Температура жидкости перед форсункой измеряется термометром сопротивления типа ДТС105-РТ100.В3.60 с платиновым чувствительным элементом фирмы «Овен» (Россия). Максимальная относительная погрешностью измерения составляет $\pm 2,5$ %. Преобразование аналогового сигнала по току в физическое значение давления осуществляется измерителем ТРМ 200 той же фирмы с максимальной относительной погрешностью $\pm 0,25$ %.

Давление окружающей среды измеряется метеостанцией AL808 фирмы Ea2 (КНР) с максимальной относительной погрешностью $\pm 0,1$ %.

Измерение угла распыла воды производится по фотографии изображения факела распыла на дисплее компьютера, передаваемого веб-камерой G-LENS фирмы Defender, установленной в плоскости среза сопла форсунки, компьютером Pentium 4 по специально разработанной программе. Максимальная приведённая относительная погрешность измерения составляет $\pm 1,0$ %.

Измеренные датчиками параметры со счётчика СИ8 и измерителя ТРМ200 (см. рис. 4) по линиям связи передаются в контроллер ПЛК154, обеспечивающий опрос каналов измерения перечисленных выше параметров с требуемой частотой и сопряжение измерительных каналов с компьютером. В компьютере формируются массивы результатов измерения заданных параметров и осуществляется их обработка. На монитор компьютера выводится в процессе проведения испытания изображение исследуемой форсунки и протоколы результатов её испытаний на каждом режиме и итоговый.

5 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент следует проводить в следующей последовательности:

1. Установить на стенд демонстрационную прозрачную центробежную шнековую форсунку и наблюдать на различных режимах её работы особенности течения и распыла воды. Режим работы форсунки устанавливается

изменением давления перед форсункой с помощью ручных вентиля 4 и вентиля тонкой регулировки 5 (см. рис. 3).

2. Установить в устройство крепления форсунок каждую из шести центробежных форсунок с геометрическими размерами, приведёнными в табл.1. Измерить для каждой из них объёмный расход воды \dot{V} и средний угол распыла $2\bar{\alpha}$, при одном значении перепада давления на форсунке $\Delta p_\phi = 400$ кПа.

3. Снять расходную характеристику центробежной форсунки № 5. Для этого, устанавливая на ней последовательно перепады давления $\Delta p_\phi = 50, 100, 200, 300, 350, 400$ кПа с помощью вентиля 4 и вентиля тонкой регулировки 5 (см. рис. 3), измерить на каждом режиме объёмный расход воды \dot{V} и температуру воды на входе в форсунку t_{ex} .

6 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента представляются в Международной системе единиц СИ.

Обработка результатов эксперимента проводится следующим образом:

1. Давление на выходе из форсунки или давление окружающей среды

$$p_n = \frac{p'_n}{735,6} 98,1 \text{ [кПа]}, \quad (18)$$

где p'_n – давление окружающей среды, измеренное метеостанцией AL808, в мм. рт. ст.

2. Площадь сопла центробежной форсунки на выходе

$$F_\phi = \frac{\pi d_c^2}{4}, \quad (19)$$

где d_c – диаметр сопла форсунки в выходном сечении.

3. Плотность воды на входе в форсунку

$$\rho = f(t_{ex}),$$

где t_{ex} – температура воды перед форсункой.

Зависимость $\rho = f(t)$ в форме таблицы приведена в приложении.

4. Действительный массовый расход воды через центробежную форсунку

$$\dot{m} = \dot{V} \rho, \quad (20)$$

где \dot{V} – объёмный расход воды через форсунку, измеренный турбинным расходомером; ρ – плотность воды на входе в форсунку.

5. Идеальный массовый расход воды через форсунку

$$\dot{m}_{ид} = F_{\phi} \sqrt{2 \rho \Delta p_{\phi}}, \quad (21)$$

где Δp_{ϕ} – перепад давления на центробежной форсунке.

На данном стенде гидравлических испытаний $\Delta p_{\phi} = p_{ex}$, т.к. измеряется датчиком избыточное давление воды перед форсункой по отношению к окружающей среде, а истечение воды из форсунки производится в окружающую среду.

6. Коэффициент расхода форсунки

$$\mu_{\phi} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ид}}. \quad (22)$$

7. Геометрическая характеристика центробежной форсунки

$$A = \frac{\pi R_{ex} r_c}{n F_{ex}} \sin \beta$$

или

$$A = \frac{\pi R_{ex} r_c}{n b h} \sin \beta, \quad (23)$$

где b и h – ширина и высота канала шнека соответственно, а β – угол наклона винтовой линии шнека. Эти величины для форсунок берутся из табл. 1.

8. Число Рейнольдса из условий на входе в камеру закручивания центробежной форсунки

$$Re = \frac{W_{ex} d}{\nu} = \frac{2\dot{m}}{\nu \rho \sqrt{\pi n b h}}, \quad (24)$$

где ν – кинематическая вязкость воды при температуре на входе в форсунку t_{ex} . Зависимость $\nu = f(t)$ в форме таблицы приведена в приложении.

9. Коэффициент трения

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{(\lg Re)^{2,58}} - 2. \quad (25)$$

10. Эквивалентная геометрическая характеристика центробежной форсунки

$$A_3 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{R_{ex}^2 \pi}{n b h} - A \right)}. \quad (26)$$

11. Коэффициент живого сечения сопла форсунки

$$\varphi = 1 - \frac{r_{жс}^2}{r_c^2} = \frac{1}{\left(\sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_3}{2\sqrt{2}} - \sqrt{\frac{A_3^2}{8} - \frac{1}{27}}} \right)^2}. \quad (27)$$

12. Расчётное значение коэффициента расхода форсунки

$$\mu = \varphi \sqrt{\frac{\varphi}{2 - \varphi}}. \quad (28)$$

13. Расчётное значение среднего угла факела распыла

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha} = \frac{2\mu A_3}{\sqrt{(1 + \sqrt{1 - \varphi})^2 - 4\mu^2 A_3^2}}. \quad (29)$$

7 ЗАДАНИЕ И ОТЧЁТ ПО РАБОТЕ

Задание по лабораторной работе

1. Рассчитать значения коэффициента расхода центробежной форсунки № 5 с учётом и без учёта вязкости воды.

2. Сопоставить расчётные значения коэффициентов расхода центробежной форсунки № 5 с экспериментальными значениями.

3. Оценить влияние вязкости воды на характеристики центробежных форсунок, сопоставив экспериментальные зависимости $\mu_\phi, 2\bar{\alpha} = f(A)$ с расчётными, полученными по методике Г.Н. Абрамовича для идеальной жидкости.

4. Сопоставить величины коэффициентов расхода струйных и центробежных форсунок.

5. Сформулировать выводы по результатам работы. Они должны содержать оценку центробежных форсунок с точки зрения возможности их использования в ДЛА.

Отчёт по лабораторной работе выполняется на специальном бланке. Он должен содержать:

1. Гидравлическую схему учебно-исследовательского стенда испытаний форсунок.

2. Таблицы результатов эксперимента и их обработки по изложенной выше методике в следующей форме:

Таблица 2. Результаты эксперимента

Но- мер форс.	r_c	R_{ex}	n	b	h	β	$\sin \beta$	Δp_ϕ	\dot{V}	t_{ex}
	мм	мм		мм	мм	град.		кПа	см ³ /с	°С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2,0	3,25	6	1,5	1,5	48,50	0,7490	400,0	103,6	27,9

Таблица 2 (продолжение). Обработка результатов эксперимента

ρ	\dot{m}	F_ϕ	$\dot{m}_{уд}$	μ_ϕ	A	Re	λ	A_3	φ	$\mu_{\phi,p}$
кг/м ³	г/с	мм ²	г/с							
12	13	14	15	17	18	19	20	21	22	23
996,3	103,2	12,6	112,8	0,92	1,13	34694	0,0331	1,11	0,619	0,4144

Таблица 3. Результаты эксперимента и их обработка

Номер режима	Δp_ϕ	\dot{V}	t_{ex}	ρ	\dot{m}	$\dot{m}_{уд}$	μ_ϕ
	кПа	см ³ /с	°С	кг/м ³	г/с	г/с	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	50	7,70	22,0	997,86	7,68	125,5	0,0612

3. Графики экспериментальных зависимостей $\mu_\phi = f(A_3)$ и $2\bar{\alpha} = f(A_3)$, полученных проливкой шести центробежных шнековых форсунок.

4. Расходную характеристику центробежной форсунки № 5 $\dot{m} = f(\Delta p_\phi)$.

5. Результаты выполненного задания к лабораторной работе, приведённого ниже.

Зачёт по лабораторной работе ставится преподавателем по результатам устного собеседования со студентом, выполнившим самостоятельно лабораторную работу, задание к ней и представившем качественно оформленный отчёт.

8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется форсункой?
2. Принципиальное отличие рабочего процесса центробежной форсунки от струйной?
3. Каково назначение форсунок в ДЛА?
4. Дайте понятие коэффициента расхода форсунки?
5. Чем вызвано образование газового вихря у оси центробежной форсунки?
6. Какое влияние оказывает вязкость рабочей жидкости на характеристики центробежной форсунки?
7. Какое давление в газовом вихре центробежной форсунки?
8. От чего зависит коэффициент расхода центробежной форсунки?
9. Почему коэффициент расхода центробежной форсунки ниже, чем струйной?
10. У каких форсунок, центробежных или струйных, дальность факела распыла больше и почему?
11. Преимущества и недостатки центробежных форсунок по сравнению со струйными форсунками при их использовании в смесительных головках ДЛА?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сточек, Н.П. Гидравлика жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Н.П. Сточек, А.С. Шапиро. – М.: Машиностроение, 1978. – 128 с.: ил.
2. Основы теории и расчёта жидкостных ракетных двигателей [Текст]: учебник для авиац. спец. вузов. В 2 кн. / А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др.; под ред. В.М. Кудрявцева. – 4-е изд., перераб. и доп.– М.: Высш. шк., 1993. – 675с.: ил.
3. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей [Текст]: учебник для студентов втузов / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под ред. В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.: ил.
4. Назаров, Г.С. К расчёту параметров кавитационного течения в гидравлических системах [Текст] / Г.С. Назаров // Инженерно-физический журнал. – 1969. – Т. ХУП, № 3, сент.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица. Значения плотности, кинематической вязкости
и давления насыщенного пара воды при разных температурах

№ п/п	Параметры			
	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$p_n, \text{Па}$
1	0	999,82	1,792	610,8
2	2	999,94	1,674	705,4
3	4	1000,00	1,569	812,9
4	6	999,99	1,473	934,6
5	8	999,91	1,386	1072,1
6	10	999,77	1,308	1227,1
7	12	999,58	1,237	1401,5
8	14	999,33	1,171	1597,4
9	16	999,03	1,110	1817,0
10	18	998,68	1,055	2062,6
11	20	998,29	1,005	2336,8
12	22	997,86	0,9570	2642,4
13	24	997,38	0,9134	2982,4
14	26	996,86	0,8737	3360,0
15	28	996,31	0,8361	3778,5
16	30	995,71	0,8014	4241,7
17	32	995,09	0,7688	4753,6
18	34	994,43	0,7381	5318,2
19	36	993,73	0,7094	5940,1
20	38	993,00	0,6828	6624,0
21	40	992,25	0,6581	7374,9
22	42	991,46	0,6344	8198,3
23	44	990,64	0,6127	9099,8
24	46	989,80	0,5920	10085
25	48	988,92	0,5666	11161
26	50	988,02	0,5536	12335

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК ДЛЯ**

Методические указания

Составители: *Егорычев Виталий Сергеевич,
Лапшин Владимир Викторович*

Редактор Ю.Н. Литвинова
Доверстка Т.С. Зинкина

Подписано в печать 18.04.2016. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ . Арт. - 48 /2016.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.