

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. академика С. П. КОРОЛЁВА»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК ДВИГАТЕЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Методические указания

САМАРА 2004

Составитель: *В. С. Егорычев*

УДК 629.7.036

Исследование жидкостных центробежных форсунок двигателей летательных аппаратов: Метод. указания к лабор. работе / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. В.С. Егорычев.– Самара, 2004.– 22 с.

Приведены краткие теоретические сведения о форсунках жидкого топлива. Рассмотрены устройство, принцип действия и физическая картина течения жидкости в центробежных форсунках ракетных двигателей. Проанализированы выводы, следующие из теории простейшей центробежной форсунки. Рассмотрены объект испытаний и проливочный стенд. Даны методики проведения эксперимента, обработки его результатов, анализа полученных результатов и сопоставления экспериментальных данных с теорией.

Предназначены для студентов факультета двигателей летательных аппаратов всех специальностей и аспирантов.

Разработаны на кафедре теории двигателей летательных аппаратов.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева.

Рецензент: *профессор, д.т.н. А. Г. Гимадиев*

Содержание

1. Цель и содержание работы.....	4
2. Краткие теоретические сведения о форсунках и режимах истечения.....	4
2.1. Расходная характеристика и коэффициент расхода.....	5
2.2. Течение рабочего тела в центробежных форсунках.....	7
3. Объект испытаний.....	13
4. Пролиточный стенд.....	13
5. Методика проведения эксперимента.....	16
6. Обработка результатов эксперимента.....	16
7. Задание и отчет по работе.....	18
8. Контрольные вопросы.....	19
Список использованных источников.....	21
Приложения.....	22

1. Цель и содержание работы

Цель заключается в практическом ознакомлении с устройством, принципом действия и режимами работы центробежных форсунок жидкого топлива ДЛА, проведении на учебном проливочном стенде гидравлических испытаний центробежных форсунок и анализе полученных экспериментальных 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 учебного проливочного стенда для исследования форсунок;
- изучить 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 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 распыления компонентов топлива в камерах сгорания ДЛА или газогенераторов, а также первоначального распределения их в объёме камеры.

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. диапазоном изменения размеров капель в факеле распыленного топлива. Чем меньше этот диапазон диаметров образовавшихся капель, тем однороднее распыл топлива.

3. Дальностью факела – глубиной проникновения распыленного топлива в газовую среду.

4. Равномерностью расходонапряжённости, т. е. равномерностью распределения жидкости в факеле распыла.

5. Средним углом конуса 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. $\dot{m} = f(\Delta p)$.

Чтобы получить действительный 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 жидкости через форсунку, т. е. расход, соответствующий одномерному невязкому течению, запишется

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

где ρ – плотность жидкости, F – площадь среза сопла форсунки $\left(F = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \right)$, $W_{ид.}$ – идеальная скорость истечения.

Величина идеальной скорости истечения может быть найдена по формуле Торричелли

$$W_{ид} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}. \quad (2)$$

Тогда

$$\dot{m}_{ид} = F \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}, \quad (3)$$

где $\Delta p = p_{вх} - p_{к}$ – перепад давления на форсунке.

Коэффициентом расхода форсунки называют отношение действительного расхода через форсунку к идеальному расходу, т. е.

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ид}}. \quad (4)$$

Тогда уравнение для определения действительного массового расхода жидкости можно представить

$$\dot{m} = \mu \cdot F \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}. \quad (5)$$

Коэффициент расхода μ всегда меньше единицы. Он учитывает следующие основные причины снижения действительного расхода по сравнению с идеальным:

- струя жидкости может заполнять не всё сечение сопла форсунки, т. е. коэффициент сжатия струи $\varepsilon = \frac{F_{жс}}{F} < 1$, где $F_{жс}$ – площадь струи в выходном сечении форсунки;
- действительная эпюра вектора скорости в выходном сечении форсунки отличается в основном из-за трения от прямоугольной эпюры, соответствующей идеальному случаю одномерного течения.

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, но и его стабильность. Изменение μ 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 оценить теоретически. Для этого необходимо изучить механизм течения рабочей жидкости в проточной части форсунки.

2.2. Течение рабочего тела в центробежных форсунках

Рассмотрим принцип действия центробежной форсунки. Любая центробежная форсунка имеет камеру закручивания. Рабочая жидкость подаётся в эту камеру закручивания (см. рис. 1) по тангенциальным входным каналам.

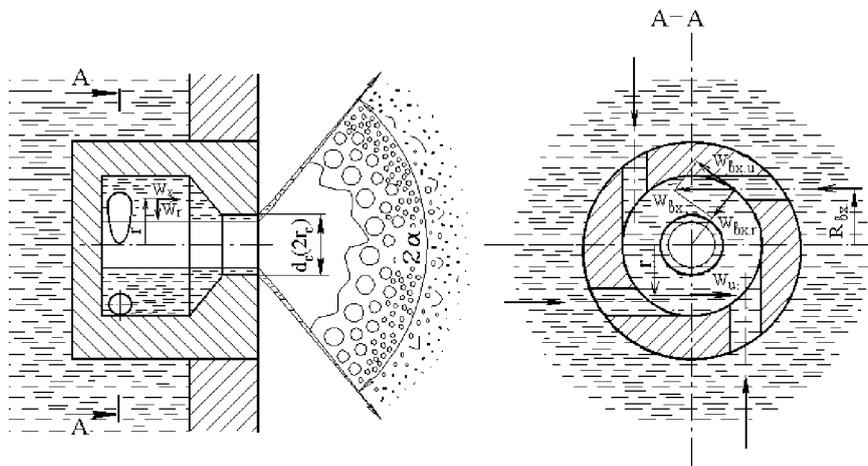


Рис. 1. Схема течения жидкости в центробежной форсунке

Поэтому входная скорость $W_{вх}$, с которой жидкость поступает в камеру, имеет окружную составляющую $W_{вх,л}$. 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 входящей в камеру закручивания жидкости сосредоточена на оси входного канала, а трение и местные сопротивления отсутствуют. Если жидкость идеальна, то для некоторой её частицы постоянной массы уравнения сохранения момента количества движения и энергии пишутся соответственно

$$W_{\text{ex}} \cdot R_{\text{ex}} = W_u \cdot r, \quad (6)$$

$$p_{\text{ex}} + \frac{\rho \cdot W_{\text{ex}}^2}{2} = p + \frac{\rho}{2} \cdot (W_u^2 + W_x^2 + W_r^2), \quad (7)$$

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

Из уравнений (6) и (7) следует, что при постоянном расходе жидкости через форсунку с уменьшением радиуса r окружная составляющая скорости 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, и она заполняется веществом среды с тем же давлением p_k . Этот газ вращается, образуя вихрь с радиусом r_g . По высоте этот вихрь распространяется на всю камеру закручивания форсунки. Величина радиуса приосевого вихря r_g определяется отношением $\frac{W_u}{W_x}$. Чем вы-

ше отношение $\frac{W_u}{W_x}$, тем больше радиус r_g . Радиальной состав-

ляющей скорости W_r , из-за её малости пренебрегают.

Итак, жидкость покидает срез сопла форсунки 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 гиперболоида вращения. Так как диаметр d_c невелик, то этот гиперболоид считается конусом с углом 2α при вершине. Толщина конусной пелены жидкости по мере удаления от среза сопла форсунки быстро уменьшается и под действием внешних и внутренних сил распадается на капли.

Тангенс угла прямолинейных траекторий частиц с осью форсунки составит

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{W_u}{W_x}. \quad (8)$$

Обычно оперируют средним углом распыла $2\bar{\alpha}$, вычисляя его по некоторому среднему значению \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. Отрицательное же качество их – низкое значение коэффициента расхода, так как жидкость заполняет только кольцевую периферическую часть сопла.

Из теории простейшей центробежной форсунки, когда впрыскиваемая жидкость является невязкой и несжимаемой, следуют выводы:

1. У центробежных форсунок есть определённое сочетание их основных геометрических параметров, которое является критерием подобия процессов течения жидкости в таких форсунках. Эта величина, названная Г. Н. Абрамовичем геометрической характеристикой центробежной форсунки, определяется выражением

$$A = \frac{\pi \cdot R \cdot r_c}{n \cdot F_{ex}} \sin \beta, \quad (9)$$

где n – число входных каналов, F_{ex} – площадь проходного сечения одного из этих каналов, β – угол наклона оси входных каналов к оси сопла форсунки. Для шнековой форсунки n – число заходов резьбы шнека с углом наклона винтовой линии β .

2. Величина геометрической характеристики A однозначно определяет степень закрутки потока в центробежной форсунке. Чем больше A , тем сильнее закрутка, а значит выше отношение $\frac{W_u}{W_x}$. При постоянном перепаде давления на фор-

сунке это означает перераспределение энергии потока жидкости между поступательным и вращательным движениями.

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

Данная теория 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 и 2α , так как не учитывает влияние вязкости жидкости и ряда конструктивных факторов, не нашедших своего отражения в выражении для геометрической характеристики.

Из-за наличия вязкости реальной жидкости на стенке возникают силы трения. Момент этих сил трения приводит к уменьшению момента количества движения на выходе из со-

пла форсунки по сравнению с входом в камеру закручивания. Это приводит к уменьшению радиуса газового вихря, а значит и к увеличению коэффициента расхода жидкости, и к снижению угла распыла.

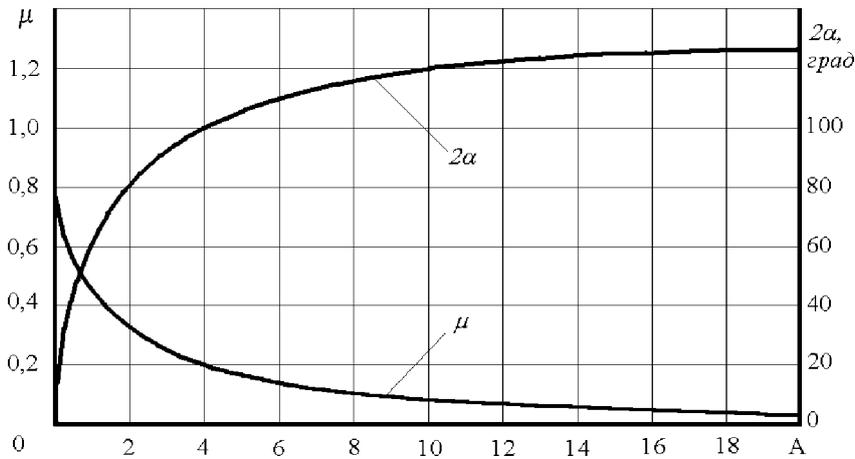


Рис. 2. Зависимость коэффициента расхода μ и угла конуса распыла 2α от геометрической характеристики A центробежной форсунки

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

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{A_3^2}{1-\varphi} + \frac{1}{\varphi^2}}}, \quad (10)$$

$$\overline{\text{tg}\alpha} = \frac{2 \cdot \mu \cdot A_3}{\sqrt{(1 + \sqrt{1-\varphi})^2 - 4 \cdot \mu^2 \cdot A_3^2}} = \frac{2 \cdot \mu \cdot A_3}{\sqrt{\left(1 + \frac{r_6^2}{r_c^2}\right) - 4 \cdot \mu^2 \cdot A_3^2}}, \quad (11)$$

где $\varphi = 1 - \frac{r_e^2}{r_c^2}$ – коэффициент заполнения жидкостью выходного сечения сопла форсунки или коэффициент живого сечения, $A_э$ – эквивалентная геометрическая характеристика форсунки

$$A_э = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{B^2}{n} - A \right)}, \quad (12)$$

где λ – коэффициент трения, $B = \frac{R_{ex}}{r_{ex} \cdot n}$.

$A_э$ и φ связаны между собой функционально так же, как A и φ для идеальной форсунки. Эта зависимость имеет вид

$$A_э = (1 - \varphi) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\varphi^3}}. \quad (13)$$

Итак, уравнения для расчёта μ и $2\bar{\alpha}$ с учётом вязкости жидкости отличаются от аналогичных выражений для идеальной жидкости только заменённой A на $A_э$. Определить μ и $2\bar{\alpha}$ можно с помощью ранее построенных зависимостей $\mu = f(A)$ и $2\bar{\alpha} = f(A)$ для идеальной форсунки, используя вместо A эквивалентную геометрическую характеристику $A_э$.

Влияние других всевозможных факторов на коэффициент расхода и угол распыла основывается на экспериментальных данных, полученных при исследовании вновь спроектированной или аналогичных форсунок. Проектирование центробежных форсунок ведётся обычно по $A_э$ с использованием зависимостей (10) и (11). Уточнение величин μ 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 этих форсунок приведены в таблице 1, где n – число заходов шнека, b и h – ширина и высота винтового канала шнека, β – угол наклона винтовой линии шнека.

Таблица 1

Геом. параметры форсунки	Ед. изм.	Номер форсунки					
		1	2	3	4	5	6
r_c	мм	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
R	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	о	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

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

4. Проливочный стенд

Пневмогидравлическая схема учебного проливочного стенда представлена на рис. 3. Стенд оборудован двумя рабочими местами для исследования струйных и центробежных форсунок, поэтому его гидравлическая магистраль имеет две совершенно аналогичные ветви.

Рассмотрим работу одной ветви, служащей для проливки центробежных форсунок.

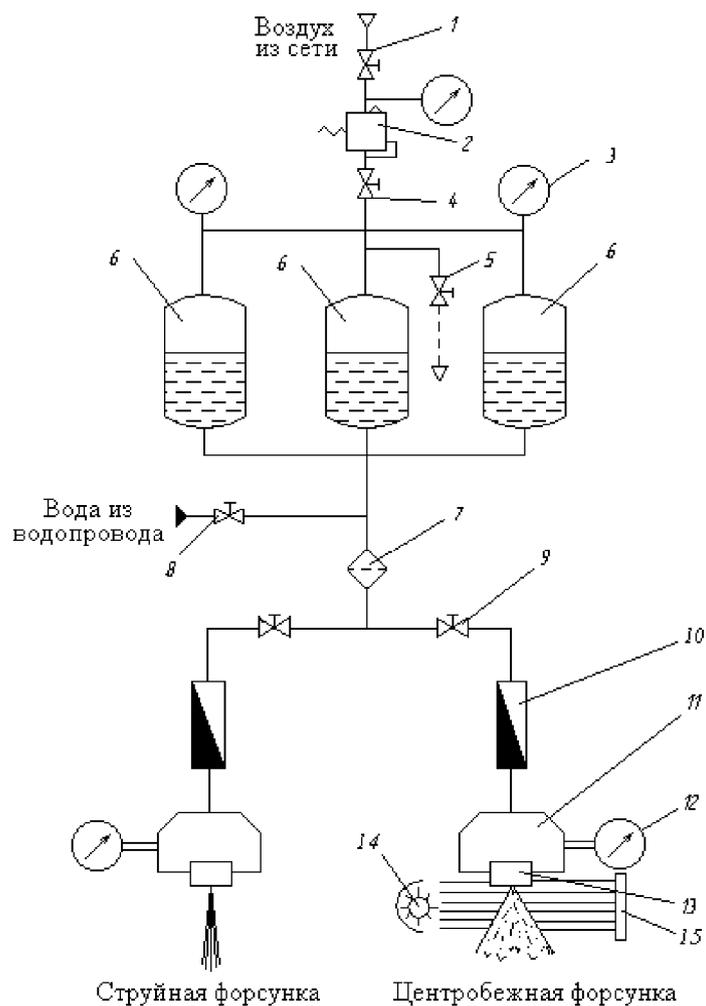


Рис. 3. Пневмогидравлическая схема проливочного стенда

Исследуемая форсунка 13 устанавливается в специальный зажим 11. Рабочая жидкость (вода) подаётся к форсунке из

трёх запараллеленных ёмкостей 6. Ёмкости предварительно надуваются воздухом до давления большего, чем требуемое максимальное на входе в форсунку $p_{вх. max}$, с помощью вентиля 1 и 4 и редуктора 2. Величина давления наддува в ёмкостях контролируется по манометру 3. Для устранения возможности засорения форсунок и исключения из воды механических примесей она проходит через фильтр 7.

Требуемый режим работы форсунки устанавливается тонким вентилям 9. После установки режима, производится измерение необходимых параметров.

Измерительная система стенда позволяет измерять следующие параметры:

- давление жидкости перед форсункой $p_{вх}$;
- массовый расход воды через форсунку \dot{m} ;
- давление окружающей среды p_n ;
- температура окружающей среды t_n ;
- угол распыла воды $2\bar{\alpha}$.

Давление жидкости перед форсункой измеряется образцовым манометром 12 класса точности 0,4 с диапазоном шкалы 0...6 кг/см².

Массовый расход воды измеряется ротаметром 10. Погрешность измерения составляет $\pm 5\%$.

Давление окружающей среды – барометром anerоидом с погрешностью $\pm 0,1\%$.

Температура измеряется ртутным термометром с погрешностью $\pm 0,25\%$.

Измерение угла распыла воды производится теневым методом с помощью транспортира. Для этого параллельным лучом света от лампы 14 осуществляется проецирование конуса распыла форсунки на прозрачный экран 15. После переноса границ конуса распыла на бумагу, угол распыла измеряется транспортиром. Погрешность измерения составляет $\pm 1\%$.

Заправка ёмкостей 6 водой при их опорожнении осуществляется из магистрали городского водопровода через открытый вентиль 8. Перед заправкой сжатый воздух из ёмкостей

сравливаются полностью через дренажный вентиль 5. В процессе заправки вентиль остаётся открытым. Вытекающая из форсунки вода сливается в ливневую канализацию.

5. Методика проведения эксперимента

Эксперимент необходимо проводить в следующей последовательности:

1. Установить на стенд демонстрационную, прозрачную модель центробежной форсунки и наблюдать на различных режимах работы особенности течения и распыла воды. Режим работы форсунок устанавливается изменением давления перед форсункой с помощью вентиля 9 (см. рис. 3).

2. Измерить расход воды и угол распыла для каждой из шести центробежных форсунок, геометрические параметры которых представлены в табл.1, при одном значении перепада давления $\Delta p = 4 \text{ кг/см}^2$.

3. Снять расходную характеристику центробежной форсунки № 1. Для этого, устанавливая на ней последовательно перепады давления $\Delta p_{отр} = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ кг/см}^2$ с помощью вентиля 9 (см. рис. 3), измерить ротаметром 10 на каждом режиме расход воды.

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

$$p_n = \frac{p'_n}{735,6} \cdot 98,1 \text{ [кПа]}, \quad (14)$$

где p'_n – давление окружающей среды в мм рт. ст.

2. Перепад давления на форсунке

$$\Delta p = \Delta p' \cdot K \cdot 98,1 \text{ [кПа]}, \quad (15)$$

где $\Delta p'$ – перепад давления в делениях по шкале манометра, K – цена деления шкалы манометра, определяемая градуировкой.

3. Действительный массовый расход топлива через центробежную форсунку определяется по аппроксимирующей зависимости градуировочного графика ротаметра

$$\dot{m} = 1,11 \dot{m}_p + 23 \text{ [г/с]}, \quad (16)$$

где \dot{m}_p – показания в делениях по шкале ротаметра.

4. Идеальный массовый расход воды через форсунку

$$\dot{m}_{ид} = F_c \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}, \quad (17)$$

где $F_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}$ – площадь сопла форсунки, ρ – плотность воды.

Зависимость $\rho = f(t)$ приведена в приложении 1. Приближенно можно принять $\rho = 1000 \text{ кг/см}^3$.

5. Коэффициент расхода форсунки

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ид}} \quad (18)$$

6. Геометрическая характеристика центробежной форсунки

$$A = \frac{\pi \cdot R \cdot r_c}{n \cdot F_{ex}} \sin \beta \quad \text{или} \quad A = \frac{\pi \cdot R \cdot r_c}{n \cdot b \cdot h} \sin \beta, \quad (19)$$

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

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

$$Re = \frac{W_{ex} \cdot d}{\nu} = \frac{2 \dot{m}}{\sqrt{\pi \cdot n \cdot b \cdot h} \cdot \rho \cdot \nu}, \quad (20)$$

где ν – кинематическая вязкости воды. Зависимость вязкости воды от температуры $\nu = f(t)$ приведена в приложении 1.

8. Коэффициент трения

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{(\lg \text{Re})^{2,58}} - 2. \quad (21)$$

9. Эквивалентная геометрическая характеристика центробежной форсунки

$$A_9 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{R^2 \cdot \pi}{n \cdot b \cdot h} - A \right)}. \quad (22)$$

7. Задание и отчет по работе

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

1. Пневмогидравлическую схему проливочного стенда.
2. Таблицы результатов эксперимента и их обработки по изложенной выше методике в следующей форме:

Таблица 2

Номер форсунки	r_c	R	n	b	h	β	Δp	\dot{m}_p
-	мм	мм	-	мм	мм	о	кПа	дел.
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Таблица 2 (продолжение)

2α	\dot{m}	$\dot{m}_{уд}$	μ	A	Re	λ	A_9
о	г/с	г/с	-	-	-	-	-
10	11	12	13	14	15	16	17

Таблица 3

Номер режима	Δp	\dot{m}_p	Δp	\dot{m}	$\dot{m}_{уд}$	μ
-	дел.	дел.	кПа	г/с	г/с	-
1	2	3	4	5	6	7

3. Графики зависимостей $\mu = f(A_9)$ и $2\alpha = f(A_9)$.
4. Расходную характеристику центробежной форсунки № 1 ($\dot{m} = f(\Delta p)$).
5. Результаты выполненного задания к лабораторной работе, которое приводится ниже.

З а д а н и е

1. Рассчитать значения коэффициента расхода центробежной форсунки № 1 с учетом и без учета вязкости воды.
 2. Сопоставить расчётные значения коэффициентов расхода центробежной форсунки № 1 с экспериментальными значениями.
 3. Оценить влияние вязкости воды на характеристики центробежных форсунок, сопоставив экспериментальные зависимости μ , $2\alpha = f(A)$ с расчётными, полученными по методике Г.Н. Абрамовича для идеальной жидкости.
 4. Сопоставить величины коэффициентов расхода струйных форсунок с коэффициентами расхода центробежных форсунок.
 5. Сформулировать выводы по результатам работы. Они должны содержать оценку центробежных форсунок с точки зрения возможности их использования в ДЛА.
- Зачёт по лабораторной работе ставится преподавателем по результатам устного собеседования со студентом, выполнившим самостоятельно работу и представившим качественно оформленный отчёт.

8. Контрольные вопросы

1. Что называется форсункой?
2. Каково назначение форсунок в ДЛА?
3. Дайте понятие коэффициента расхода форсунки?
4. Чем вызвано образование газового вихря у оси центробежной форсунки?

5. Какое влияние оказывает вязкость на характеристики центробежной форсунки?
6. Какое давление в газовом вихре центробежной форсунки?
7. От чего зависит коэффициент расхода центробежной форсунки?
8. Преимущества и недостатки центробежных форсунок по сравнению со струйными форсунками при их использования в ДЛА?

Список использованных источников

1. Сточек Н.П. Шапиро А.С. Гидравлика жидкостных ракетных двигателей.–М.: Машиностроение, 1978.
2. Основы теории и расчёта жидкостных ракетных двигателей: Учебник для вузов / Под ред. В.М. Кудрявцева, 2-е изд., перераб. и доп.–М.: Высш. шк., 1975.
3. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов.–М.: Машиностроение, 1980.
4. Назаров Г.С. К расчёту параметров кавитационного течения в гидравлических системах // Инженерно-физический журнал.–Т.ХУП, №3, сент., 1969.

Значение плотности и кинематической вязкости воды при разных температурах

Параметры	Ед. изм.	Номер п/п				
		1	2	3	4	5
t	$^{\circ}C$	0	10	20	30	40
ρ	$кг/м^3$	999,8	999,7	998,3	995,7	992,3
$\nu \cdot 10^6$	$м^2/с$	1,80	1,30	1,01	0,800	0,661

Приложение 2

Значения давления насыщенного пара воды при разных температурах

Параметры	Ед. изм.	Номер п/п				
		1	2	3	4	5
t	$^{\circ}C$	0	2	4	6	8
p_n	$Па$	610,8	705,4	812,9	934,6	1072,1

(продолжение)

6	7	8	9	10	11
10	12	14	16	18	20
1227,1	1401,5	1597,4	1817,0	2062,6	2336,8

(продолжение)

12	13	14	15	16
22	24	26	28	30
2642,4	2982,4	3360,0	3778,5	4241,7

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ
ФОРСУНОК ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Методические указания

Составитель: Егорычев Виталий Сергеевич

Самарский государственный аэрокосмический
университет им. академика С.П. Королева.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

