

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ  
СТРУЙНЫХ ФОРСУНОК ДВИГАТЕЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**САМАРА 2005**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ  
СТРУЙНЫХ ФОРСУНОК ДВИГАТЕЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Методические указания  
к лабораторной работе*

САМАРА 2005

Составитель В. С. Егорычев

УДК 629.7.036

**Исследование жидкостных струйных форсунок двигателей летательных аппаратов:** Метод. указания к лаб. работе / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. В.С. Егорычев.- Самара, 2005.- 26 с.

Приведены краткие теоретические сведения о форсунках жидкого топлива. Рассмотрены устройство, принцип действия и физическая картина течения жидкости в струйных форсунках ракетных двигателей. Описаны режимы работы струйных жидкостных форсунок с острой входной кромкой и методики определения коэффициента расхода на этих режимах. Даны методики проведения эксперимента, анализа полученных результатов и сопоставления их с теорией.

Предназначены для студентов факультета двигателей летательных аппаратов всех специальностей и аспирантов. Разработаны на кафедре теории двигателей летательных аппаратов.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета.

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

## 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 жидкости в струйной форсунке и режимы её работы.....	7
3. Объект испытаний.....	16
4. Проливочный стенд.....	16
5. Методика проведения эксперимента.....	18
6. Обработка результатов эксперимента.....	19
7. Задание и отчет по работе.....	21
8. Контрольные вопросы.....	23
Список использованных источников.....	24
Приложения.....	25

## 1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы заключается в практическом ознакомлении с устройством, принципом действия и режимами работы струйных форсунок жидкого топлива ДЛА, проведении на учебном проливочном стенде гидравлических испытаний струйных форсунок с острой входной кромкой и анализе полученных экспериментальных характеристик.

Для достижения указанной цели необходимо:

- изучить теорию струйных форсунок по данным методическим указаниям к лабораторной работе и указанной в них литературе;
- ознакомиться с назначением, устройством и принципом действия струйных форсунок, применяемых в ДЛА, с устройством и конструкцией учебного стенда для исследования форсунок;
- изучить на прозрачной модели струйной форсунки различные режимы работы, особенности течения и распыления рабочей жидкости;
- провести по предложенной методике гидравлические испытания струйных форсунок с острой входной кромкой;
- обработать результаты эксперимента;
- провести анализ полученных экспериментальных характеристик форсунок с учётом режима течения рабочей жидкости.

## 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О ФОРСУНКАХ И РЕЖИМАХ ИСТЕЧЕНИЯ

Форсунка - это устройство, предназначенное для впрыска и распыления компонентов топлива в камерах 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. диапазоном изменения размеров капель в факеле распыленного топлива. Чем меньше этот диапазон диаметров образовавшихся капель, тем однороднее распыл топлива.

3. Дальностью распыла - глубиной проникновения распыленного топлива в газовую среду.

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

5. Средним углом конуса распыла  $2\alpha$ , 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.  $m = f(\Delta p)$ .

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, так как в исходных уравнениях невозможно правильно учесть все особенности реального течения.

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

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

где  $\rho$  - плотность жидкости,  $F$  - площадь среза сопла форсунки,

$$\left( F = \frac{\pi d_c^2}{4} \right), W_{ид} - \text{идеальная скорость истечения.}$$

Величина идеальной скорости истечения может быть найдена по формуле Торричелли

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

Тогда

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

где  $\Delta p = p_{ex} - p_k$  - 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 как

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

Коэффициент расхода  $\mu$  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  $\varepsilon = \frac{F_{эс}}{F} < 1$ , где  $F_{эс}$  -

площадь струи жидкости 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  $\mu$  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 форсунки.

## 2.2. Течение жидкости в струйной форсунке и режимы её работы

Струйная форсунка выполняется либо в виде отверстия в днище смесительной головки или в стенке камеры сгорания, либо в виде трубки или цилиндрического насадка (рис. 1).

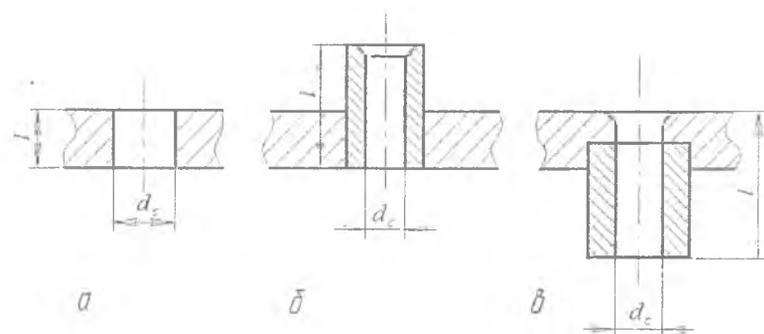


Рис. 1. Струйные форсунки: а - отверстие в стенке; б - трубка; в - цилиндрический насадок

Основными геометрическими параметрами струйной форсунки являются диаметр выходного отверстия или сопла  $d_c$ , длина канала  $l$  и форма кромки канала со стороны входа рабочей жидкости. Последняя может быть острой, закруглённой или с фаской.

Физическую картину течения жидкости в струйной форсунке с острой входной кромкой можно представить таким образом. Пространство перед форсункой обычно значительно превосходит её размеры, поэтому жидкость втекает в канал форсунки не только в осевом направлении, но и в перпендикулярном, т. е. вдоль стенки. Чтобы вся жидкость получила в конечном итоге направление движения, близкое к осевому, втекающие вдоль стенки частицы жидкости должны развернуться примерно на  $90^\circ$  (рис. 2, а).

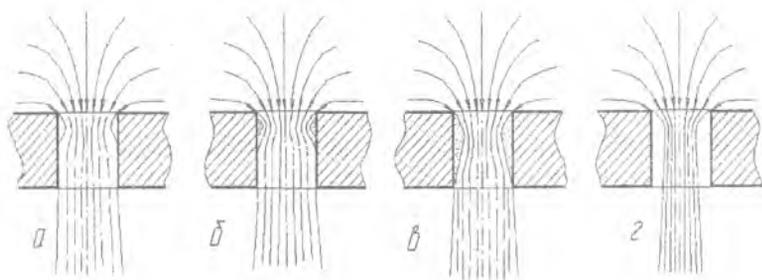


Рис. 2. Физическая картина течения жидкости через струйную форсунку с острой входной кромкой

Для этого к ним в соответствии с законом механики нужно приложить центростремительную силу. Рассмотрим механизм её возникновения.

Пусть элементарная частица жидкости массой  $dm$  движется по окружности радиусом  $r$  со скоростью  $W$  (рис. 3).

Центростремительное ускорение частицы в этом случае определится выражением

$$a = \frac{W^2}{r} \quad (6)$$

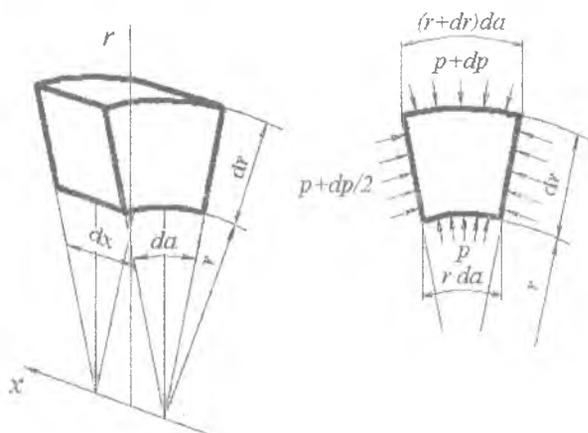


Рис. 3. Элементарная частица жидкости во вращательном движении

Центростремительная сила, необходимая для приобретения этого ускорения, образуется за счёт разности давлений, действующих на поверхности выделенного элемента жидкости. Чтобы сила была направлена в сторону ускорения, т.е. к оси вращения, необходимо иметь на цилиндрической поверхности большого радиуса  $r + dr$  более высокое давление, чем на поверхности меньшего радиуса  $r$ . Это приращение давления обозначим через  $dp$ .

Применительно к выделенной элементарной частице жидкости второй закон Ньютона запишется:

$$\overline{dP} = \bar{a} \cdot dm, \quad (7)$$

где  $\overline{dP}$  - сила, действующая на частицу,  $\bar{a}$  - ускорение частицы. Составляющие сил, действующих на поверхностях, ограничивающих частицу, в направлении оси  $r$ , запишутся:

на наружную поверхность частицы

$$- (p + dp) (r + dr) d\alpha \cdot dx, \quad (8)$$

на внутреннюю поверхность

$$p r d\alpha \cdot dx, \quad (9)$$

на боковые поверхности в предположении линейного закона изменения давления по радиусу

$$2 \left( p + \frac{dp}{2} \right) dr \cdot dx \frac{d\alpha}{2}. \quad (10)$$

Учитывая, что масса элементарной частицы жидкости

$$dm = \rho r d\alpha \cdot dr \cdot dx, \quad (11)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости, получим из второго закона Ньютона после необходимых преобразований выражение

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{W^2}{r}. \quad (12)$$

Оно устанавливает зависимость градиента давления по радиусу от скорости и радиуса вращения частицы жидкости.

Так как величина  $\rho \frac{W^2}{r}$  всегда положительна, то  $\frac{dp}{dr}$  всегда больше нуля, а это означает, что при криволинейных течениях

давление рабочего тела всегда уменьшается в направлении к центру кривизны траектории.

Выражение (12) показывает, что безотрывное обтекание жидкостью острой входной кромки даже при движении с небольшой скоростью невозможно, так как требует наличия больших

градиентов давления по радиусу  $\left( r \rightarrow 0, \frac{dp}{dr} \rightarrow \infty \right)$ . Скорость же

движения жидкости в идеальном случае согласно выражению (2) зависит от величины перепада давления на форсунке. Пограничные линии тока отклоняются от стенки форсунки. У стенки создаётся застойная область жидкости с пониженным давлением, где устанавливается вихревое течение. Струя жидкости сжимается к оси, образуя минимальное сечение на расстоянии  $(0,25 \dots 0,50)d_c$  от входной кромки (см. рис. 2, а).

Отклонение линии тока от стенки у форсунок с острой входной кромкой происходит уже при числах Рейнольдса более 5 ( $Re > 5$ ). С увеличением числа  $Re$  застойная область заметно удлиняется, а давление в ней понижается.

У струйных форсунок с острой входной кромкой возможна в зависимости от отношения  $\frac{l}{d_c}$  реализация различных режимов работы.

В форсунках, имеющих  $\frac{l}{d_c} > 1,5$ , при малых перепадах давления, а значит небольших скоростях движения жидкости, вихревая область полностью и надёжно замыкается на стенке и реализуется устойчивый *безотрывный режим истечения* (см. рис. 2, а). Струя жидкости при этом заполняет всё выходное сечение форсунки. Коэффициент расхода форсунки на этом режиме достаточно высок ( $\mu = 0,8 \dots 0,9$ ). Его численное значение зависит от отношения

$\frac{l}{d_c}$  и числа  $Re$ . Такая зависимость  $\mu = f\left( Re, \frac{l}{d_c} \right)$ , хорошо

совпадающая с экспериментальными данными, представлена на рис. 4. В области ламинарного режима течения она является теоретически обоснованной, а в области турбулентного - эмпирической.

При дальнейшем увеличении перепада давления на форсунке, а значит и скорости течения жидкости в форсунке, вихревая пристеночная область расширяется, распространяясь по длине канала, и наступает такой момент, когда она достигает среза форсунки (см. рис. 2, в). Если истечение происходит в газовую среду, что имеет место в камерах ДЛА, то газ легко проникает в вихревую область, вызывая отрыв струи от стенок форсунки. Устанавливается *отрывной режим истечения* (см. рис. 2, г). Жидкость истекает как из отверстия в тонкой стенке с коэффициентом расхода, равным 0,60...0,62. Смена режимов истечения происходит скачком при достижении на форсунке необходимого перепада давления  $\Delta p_{отр}$ .

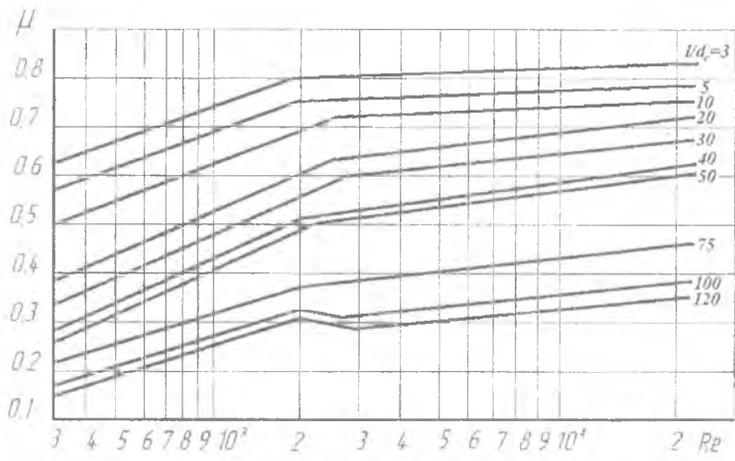


Рис. 4. Зависимость коэффициента расхода цилиндрических насадков с острой кромкой на входе от числа Рейнольдса и относительной длины

Величина  $\Delta p_{отр}$  зависит от относительной длины форсунки.

Очевидно, что  $\Delta p_{отр}$  возрастает с повышением  $\frac{l}{d_c}$ . Увеличить

$\Delta p_{отр}$  при  $p_k = const$  и  $\frac{l}{d_c} = const$  можно также скруглением

входной кромки. Чем больше радиус скругления входной кромки и чем длиннее канал при постоянном диаметре сопла, тем больше  $\Delta p_{отр}$ . При большом радиусе скругления входной кромки отрыв потока не произойдёт даже при очень больших величинах перепада давления на форсунке, однако конструктивно такой канал удаётся выполнить далеко не всегда.

В форсунках с острой входной кромкой увеличение  $\frac{l}{d_c}$

приводит к росту перепада давления на форсунке, при котором происходит переход на отрывный режим течения, а значит к увеличению скорости движения жидкости. Это, в свою очередь, ведёт к снижению давления в вихревой области. Наступает момент, когда до перехода на отрывный режим течения давление в вихревой области у стенки понижается до давления насыщенного пара рабочей жидкости. Возникает кавитационная каверна, заполненная парами жидкости. Она располагается у стенок насадка вблизи узкого сечения струи жидкости. В ядре потока в это время видимой кавитации не наблюдается (см. рис. 2, б). Наступает так называемый *кавитационный режим истечения*. Он имеет место у относительно длинных форсунок и является переходным от безотрывного к отрывному. По мере увеличения скорости истечения при постоянном противодавлении  $p_k$ , либо уменьшении противодействия при постоянной скорости истечения происходит расширение кавитационной зоны и её распространение по длине форсунки к срезу. Длина зоны кавитации определяет степень развития кавитации в потоке.

Критерием динамического подобия условий кавитационного течения является число кавитации  $\alpha$ , которое применительно к струйным форсункам в случае идеальной жидкости запишется:

$$\alpha = \frac{p_k - p_n}{p_{вх} - p_k} = \frac{p_k - p_n}{\Delta p}, \quad (13)$$

где  $p_n$  - давление насыщенного пара рабочей жидкости.

Условие существования кавитационного режима истечения жидкости из струйной форсунки имеет вид неравенства

$$\alpha \leq \alpha_{кр}, \quad (14)$$

где  $\alpha_{кр}$  - критическое число кавитации, величина которого зависит от относительной длины канала форсунки и числа Рейнольдса, т. е.

$$\alpha_{кр} = f \left( \frac{l}{d_c}, Re \right).$$

Появление кавитации приводит к снижению коэффициента расхода форсунки. Он уменьшается постепенно по мере развития кавитации и насыщения газом струи жидкости. Коэффициент расхода струйной форсунки с острой входной кромкой на кавитационном режиме может быть определён по уравнению

$$\mu = \varepsilon \sqrt{1 + \frac{p_k - p_n}{p_{ax} - p_k}} = \varepsilon \sqrt{1 + \alpha}, \quad (15)$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент сжатия струи в области за входным сечением.

Течение жидкости в форсунке с острой входной кромкой на участке от входа до максимально сжатого сечения струи можно рассматривать как истечение из отверстия в тонкой стенке. Тогда величина коэффициента сжатия струи  $\varepsilon$  в самом узком её сечении в области автомодельности по числу Рейнольдса как в устойчивом безотрывном, так и в кавитационном режимах истечения сохраняется постоянной и равной 0,61...0,62.

На любом режиме работы струйной форсунки с острой входной кромкой и известным значением  $\frac{l}{d_c}$  можно определить величину

$\alpha_{кр}$ . Для этого по графику, изображённому на рис. 4, с помощью

заданных величин  $\frac{l}{d_c}$  и  $Re$  находят коэффициент расхода  $\mu$  на

устойчивом безотрывном режиме. Подставив это значение  $\mu$  в уравнение (15), подсчитывают критическое число кавитации  $\alpha_{кр}$ .

У коротких форсунок с  $\frac{l}{d_c} < 1,5$  длина канала не обеспе-

чивает полного замыкания вихревой области на стенке. Для них характерна неустойчивость безотрывного режима истечения в широком диапазоне чисел Рейнольдса ( $Re=10^3 \dots 10^5$ ). Неустойчивость течения объясняется различной степенью замыкания вихревой области на стенке, которая обусловлена рядом случайных причин. Данный режим называют *неустойчивым режимом истечения*. Различие значений коэффициента расхода на этом режиме работы при одном и том же перепаде давления может достигать 10%.

Неустойчивый режим работы струйных форсунок является неблагоприятным для ДЛА.

При истечении жидкости из форсунок с  $\frac{l}{d_c} < 1,5$  в газ он

легко проникает в вихревую пристеночную область, вызывая отрыв струи от стенок. Реализуется отрывной режим истечения. Форсунка работает при этом как отверстие в тонкой стенке, и коэффициент расхода её становится равным 0,62...0,65.

Струйные форсунки подают жидкость в виде компактной струи, обладающей большой дальностью. Угол конуса распыла  $2\alpha$  струйных форсунок небольшой и составляет 5...15°. Распад струи на капли происходит на значительном удалении от среза форсунки. Он обусловлен воздействием на струю рядом внешних и внутренних сил. Дробление струи на капли при впрыске в вакуум происходит лишь под действием внутренних сил, к которым относятся инерционные молекулярные силы и силы, обусловленные испарением и кипением жидкости.

Чтобы обеспечить струйным форсункам необходимую тонкость распыления и улучшить качество смесобразования, применяют соударение струй компонентов. Струйные форсунки без соударения струй чаще используются для низкокиспящих компонентов (жидкие кислород, водород и т. д.), когда требование к распылу значительно

ниже. Для схем смесеобразования с соударяющимися струями, пересечение которых в одной точке является необходимым условием нормальной работы, очень важно обеспечение форсункам требуемого направления струи. Заданное направление лучше всего сохраняют струи, вытекающие из длинных отверстий, имеющих

$\frac{l}{d_c} \geq 3$ , при безотрывном режиме истечения. Струи, вытекающие

из форсунки на отрывном режиме, сохраняют направление геометрической оси только при безусловно выполненной острой кромке.

При использовании струйных форсунок в ДЛА прежде всего следует учитывать их режим работы. Неустойчивый режим течения

у форсунок с  $\frac{l}{d_c} < 1,5$  является неблагоприятным для двигателя

из-за значительного колебания коэффициента расхода. Кавита-

ционный режим истечения у форсунок с  $\frac{l}{d_c} < 1,5$  является тоже

нежелательным, так как вызывает неустойчивость рабочего процесса двигателя. Поэтому и от кавитационных режимов следует отказаться.

Как было показано выше, у струйных форсунок на всех режимах истечения, кроме неустойчивого режима, который реализуется у

форсунок с  $\frac{l}{d_c} < 1,5$  и острой входной кромкой, коэффициент

расхода может быть определён расчётным путём с точностью, достаточной для проведения проектных работ. Коэффициент расхода на различных режимах работы может меняться у этих форсунок от 0,60 до 0,82. Для других типов струйных форсунок наиболее надёжным является пока лишь экспериментальный метод определения коэффициента расхода. Необходимо делать проливки каждой вновь проектируемой форсунки.

### 3. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Для проведения экспериментальных исследований имеется набор из пяти струйных форсунок с острой входной кромкой, отличающихся друг от друга длиной канала. Геометрические размеры струйных форсунок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры форсунки	Ед. изм.	Номер форсунки				
		1	2	3	4	5
$d_c$	мм	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
$l$	мм	1,0	1,5	3,0	4,5	6,0

Имеется также прозрачная демонстрационная струйная форсунка, на которой удобно наблюдать зарождение пристеночной вихревой области, её распространение вдоль канала, явление отрыва потока от стенок и переход на отрывный режим истечения.

### 4. ПРОЛИВОЧНЫЙ СТЕНД

Пневмогидравлическая схема учебного проливочного стенда представлена на рис. 5. 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 струйных форсунок.

Исследуемая форсунка  $I3$  устанавливается в специальный зажим  $II$ . Рабочая жидкость (вода) подаётся к форсунке из трёх запараллеленных ёмкостей  $б$ . Ёмкости предварительно наддуваются воздухом до давления большего, чем требуемое максимальное на входе в форсунку  $p_{вх\max}$ , с помощью вентиля  $I$

и 4 и редуктора 2. Величина давления наддува в ёмкостях контролируется по манометру 3. Для устранения возможности засорения форсунок и исключения из воды механических включений она проходит фильтр 7.

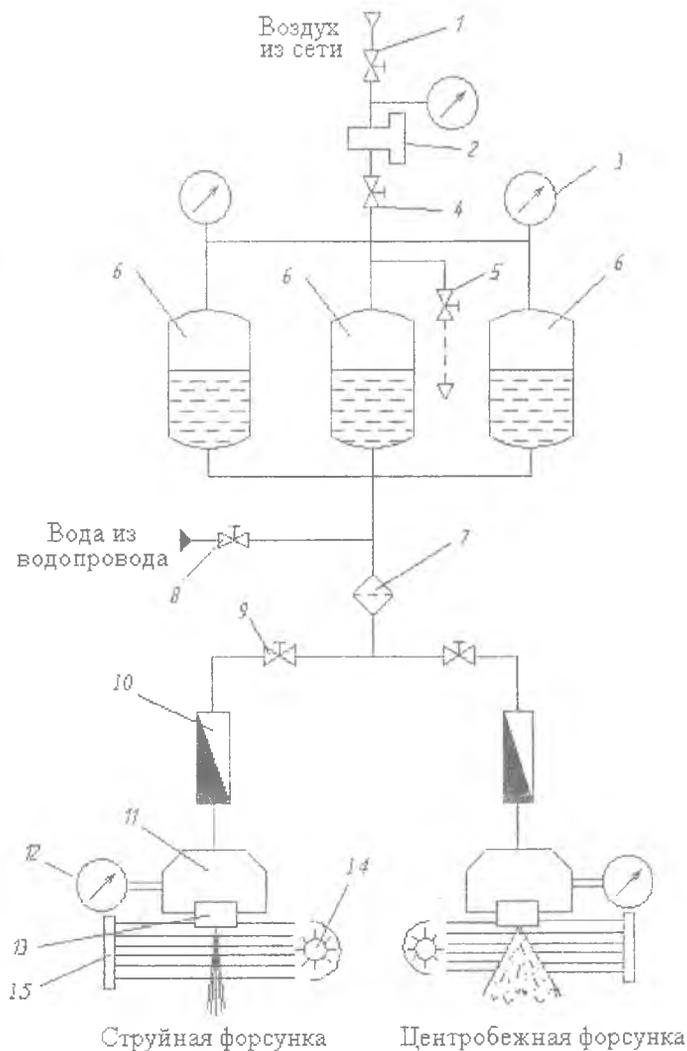


Рис. 5. Пневмогидравлическая схема проливочного стенда

Требуемый режим работы форсунки устанавливается тонким вентилем 9. После установления режима производится измерение необходимых параметров.

Измерительная система стенда позволяет измерять следующие параметры:

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

Давление жидкости перед форсункой измеряется образцовым манометром 12 класса точности 0,4 с диапазоном шкалы 0...6 кг/см<sup>2</sup>.

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

Давление окружающей среды - барометром анероидом с погрешностью  $\pm 0,1\%$  .

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

Измерение угла распыла воды производится теневым методом с помощью транспортира. Погрешность измерения составляет 1%.

Заправка ёмкостей 6 водой при их опорожнении осуществляется из магистрали городского водопровода через открытый вентиль 8. Перед заправкой сжатый воздух из ёмкостей стравливается 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 струйной форсунки и наблюдать на различных режимах её работы особенности течения и распыла воды. Режим работы форсунки устанавливается изменением давления перед форсункой с помощью вентиля 9 (см. рис. 5).

2. Установить в специальный зажим каждую из пяти струйных форсунок с острой входной кромкой и геометрическими размерами, приведёнными в табл. 1, и определить для каждой из них величину перепада давления  $\Delta p_{отр}$ , при которой происходит переход на отрывный режим истечения. Момент перехода фиксировать визуально по характеру струи и по скачку давления на входе в форсунку.

3. Снять расходную характеристику струйной форсунки № 3. Для этого, устанавливая на форсунке последовательно перепады давления  $\Delta=1, 2, 3, 4, 5$  кг/см<sup>2</sup> с помощью вентиля 9 (см. рис. 5), измерить ротаметром на каждом режиме расход воды. После перехода на отрывный режим истечения установить вновь на форсунке перепад давления  $\Delta p_{отр}$  при отрывном режиме работы и измерить 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

$$p_n = \frac{p'_n}{735,6} \cdot 98,1 \quad [\text{кПа}], \quad (16)$$

где  $p'_n$  подставляется в мм рт. ст.

2. Перепад давления на форсунке

$$\Delta p = \Delta p'K \cdot 98,1 \quad [\text{кПа}], \quad (17)$$

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

3. Действительный массовый расход воды через струйную форсунку определяется по аппроксимирующей зависимости градуировочного графика ротаметра:

$$\dot{m} = 0,96\dot{m}_p + 16 \text{ [г/с]}, \quad (18)$$

где  $\dot{m}_p$  - показания в делениях по шкале ратометра.

4. Идеальный массовый расход воды через форсунку

$$\dot{m}_{ид} = F_c \sqrt{2\rho\Delta p}, \quad (19)$$

где  $F_c = \frac{\pi d_c^2}{4}$  - площадь сопла форсунки,  $\rho$  - плотность воды. Зависимость  $\rho = f(t)$  приведена в приложении 1. Приблизительно можно принять  $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

5. Коэффициент расхода форсунки

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ид}}. \quad (20)$$

6. Осреднённая скорость воды на выходе из форсунки

$$W = \frac{\dot{m}}{\rho F_c}. \quad (21)$$

7. Число Рейнольдса для струйной форсунки

$$Re = \frac{Wd_c}{\nu}, \quad (22)$$

где  $\nu$  - кинематическая вязкость воды. Зависимость  $\nu = f(t)$  приведена в приложении 1.

8. Расчетное значение коэффициента расхода  $\mu$  для струйной форсунки с острой входной кромкой на устойчивом безкавитационном режиме истечения определяется с

использованием графика рис. 4 по значениям  $\frac{l}{d_c}$  и  $Re$  на данном режиме истечения.

9. Критическое число кавитации для данного режима истечения

$$\alpha_{кр} = \left(\frac{\mu}{\varepsilon}\right)^2 - 1, \quad \varepsilon = 0,61, \quad (23)$$

$$\alpha_{кр} = \frac{\mu^2}{0,61^2} - 1. \quad (24)$$

10. Число кавитации

$$\alpha = \frac{P_k - P_n}{\Delta p}, \quad (25)$$

где  $P_n$  - давление насыщенного пара воды при данной температуре, которое берётся из справочной литературы. Зависимость  $P_n = f(t)$  приведена в приложении 2.

11. Коэффициент расхода струйной форсунки на кавитационном режиме истечения

$$\mu = \varepsilon \sqrt{1 + \alpha} = 0,61 \sqrt{1 + \alpha}. \quad (26)$$

## 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	$l$	$d_c$	$\Delta p_{отр}$	$\frac{l}{d_c}$	$\Delta p_{отр}$
–	мм	мм	дел.	–	кПа
1	2	3	4	5	6

Номер режима	$\Delta p$	$\dot{m}_p$	$\Delta p$	$\dot{m}$	$\dot{m}_{ид}$	$\mu$	$\Delta p_{отр}$
–	дел.	дел.	кПа	г/с	г/с	–	кПа
1	2	3	4	5	6	7	8

3. График зависимости  $\Delta p_{отр} = f\left(\frac{l}{d_c}\right)$  для струйных форсунок с острой кромкой на входе.

4. Расходную характеристику струйной форсунки № 3 с острой входной кромкой  $\dot{m} = f(\Delta p)$  с нанесённым на график экспериментальным значением  $\Delta p_{отр}$ .

5. Результаты выполненного задания к лабораторной работе, которое приводится ниже.

### З а д а н и е

1. Подсчитать коэффициенты расхода струйной форсунки № 3 для устойчивого безотрывного и отрывного режимов истечения при значении перепада давления  $\Delta p_{отр}$  и сопоставить расчётные значения коэффициентов с экспериментальными значениями.

2. Указать на расходной характеристике струйной форсунки области существующих режимов истечения.

3. Сопоставить величины коэффициентов расхода струйных форсунок с коэффициентами расхода центробежных форсунок.

4. Сформулировать выводы по результатам работы. Они должны содержать оценку исследованных режимов работы струйных форсунок с точки зрения 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. Укажите возможные режимы течения в струйной форсунке

с острой входной кромкой, имеющей  $\frac{l}{d_c} > 1,5$ .

5. Каковы причины возникновения вихревой пристеночной области пониженного давления у струйных форсунок с острой входной кромкой?
6. Обоснуйте характер распределения статического давления в вихревой области.
7. Каковы особенности протекания расходной характеристики струйной форсунки с острой входной кромкой при наличии кавитационного режима истечения?
8. В чём причины неустойчивого режима истечения у струйных

форсунок с  $\frac{l}{d_c} < 1,5$  и острой входной кромкой на входе?

9. Каким образом можно увеличить  $\Delta p_{отр}$  у струйной форсунки?

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

Приложение 1

Значение плотности и кинематической вязкости  
воды при разных температурах

№ п/п	Параметры		
	t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
1	0	999,8	1,80
2	10	999,7	1,30
3	20	998,3	1,01
4	30	995,7	0,800
5	40	992,3	0,661

Приложение 2

Значения давления насыщенного пара воды при разных  
температурах

№ п/п	Параметры	
	t, °C	P <sub>н</sub> , Па.
1	0	610,8
2	2	705,4
3	4	812,9
4	6	934,6
5	8	1072,1
6	10	1227,1
7	12	1401,5
8	14	1597,4
9	16	1817,0
10	18	2062,6
11	20	2336,8
12	22	2642,4
13	24	2982,4
14	26	3360,0
15	28	3778,5
16	30	4241,7

*Учебное издание*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ СТРУЙНЫХ  
ФОРСУНОК ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ  
АППАРАТОВ**

*Методические указания  
к лабораторной работе*

*Составитель Егорычев Виталий Сергеевич*

Редактор Т. К. К р е т и н и н а  
Компьютерная верстка О. А. Л н а н ь е в

Подписано в печать 10.09.2005 г. Формат 60x84 1/16  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 1,62. Усл.кр.- огт. 1,65. Уч. – изд.л. 1,75.  
Тираж 200 экз. Заказ № 6. Арт.С-8(Д1)/2005.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет. 443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

РЙО Самарского государственного аэрокосмического  
университета. 443086 Самара, Московское шоссе, 34.