

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

# **ФОРСУНКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Методические указания*

САМАРА 2004

Составители: *В. С. Егорычев, А. Н. Первышин*

УДК 629.7.036

Форсунки двигателей летательных аппаратов: Метод. указания к лабор. работе / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. В.С. Егорычев, А.Н. Первышин.– Самара, 2004.– 34 с.

Приведены краткие теоретические сведения о форсунках жидкого топлива. Рассмотрены устройство, принцип действия и физическая картина течения жидкости в основных типах форсунок ДЛА. 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.

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 жидкости в струйных форсунках и режимы их работы.....	7
2.3. Течение рабочего тела в центробежных форсунках.....	17
3. Объект испытаний.....	22
4. Проливочный стенд.....	23
5. Методика проведения эксперимента.....	26
6. Обработка результатов эксперимента.....	27
7. Задание и отчет по работе.....	29
8. Контрольные вопросы.....	31
Список использованных источников.....	33
Приложения.....	34

## 1. Цель и содержание работы

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

Для достижения указанной цели необходимо:

- изучить теорию струйных и центробежных форсунок по данным методическим указаниям к лабораторной работе и указанной в них литературе;
- ознакомиться с назначением, устройством и принципом действия основных типов форсунок, применяемых в ДЛА, с устройством и конструкцией учебного проливочного стенда для исследования форсунок;
- изучить на прозрачных моделях струйной и центробежной форсунок различные режимы работы, особенности течения и распыления рабочей жидкости;
- провести по предложенной методике гидравлические испытания струйных и центробежных форсунок;
- 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. Дальнобойностью 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, 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

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

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

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

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, то есть коэффициент сжатия струи  $\varepsilon = \frac{F_{жс}}{F} < 1$ , где  $F_{жс}$  – 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 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 струйных форсунках и режимы их 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).

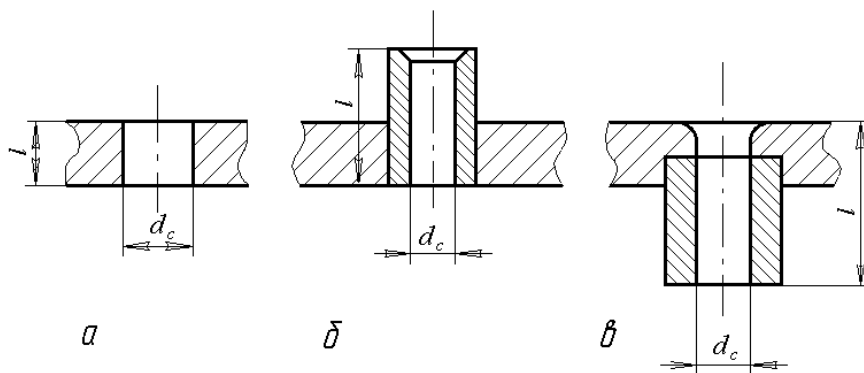


Рис. 1. Струйные форсунки: а – отверстие в стенке; б – трубка; в – цилиндрический насадок

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 острая, закруглённая 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).

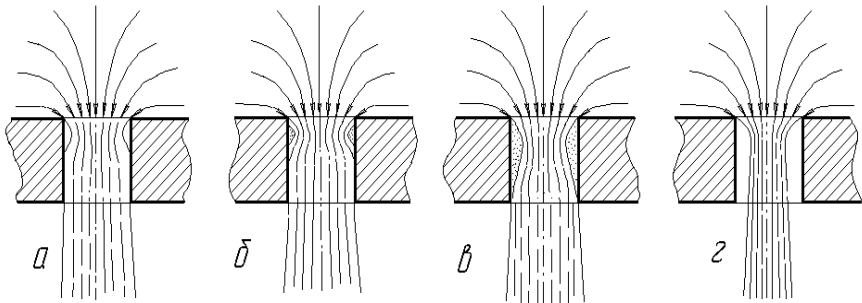


Рис. 2. Физическая картина течения жидкости через струйную форсунку с острой входной кромкой

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

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



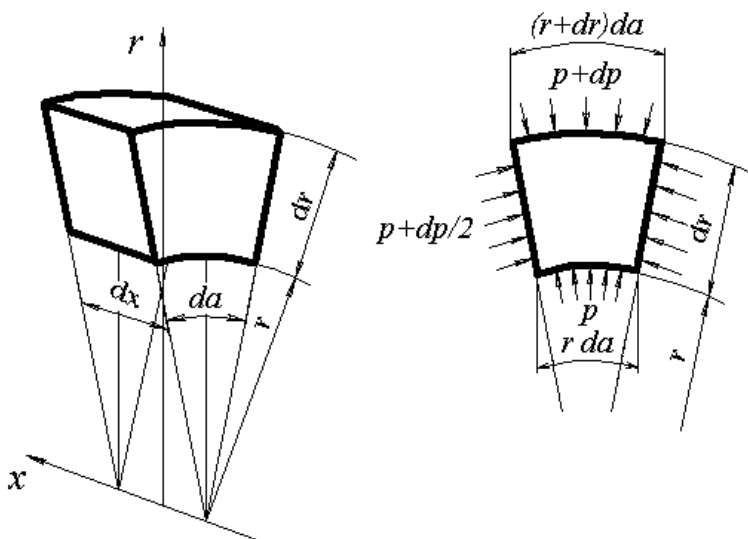


Рис. 3. Элементарная частица жидкости во вращательном движении

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 большего 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

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

на внутреннюю поверхность

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

на боковые поверхности в предположении линейного закона изменения давления по радиусу

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

Учитывая, что масса элементарной частицы жидкости

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

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

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

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

Так как величина  $\frac{\rho \cdot W^2}{r}$  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 зависи-

мость  $\mu = f\left(Re, \frac{l}{d_c}\right)$ , 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, вихревая пристеночная область расширяется, распространяясь по длине канала, и наступает такой момент, когда она достигает среза форсунки (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* (рис. 2, г). Жидкость истекает как из отверстия в тонкой стенке с коэффициентом

том расхода, равным 0,60...0,62. Смена режима истечения происходит скачком при достижении на форсунке необходимого перепада давления  $\Delta p_{omr}$ .

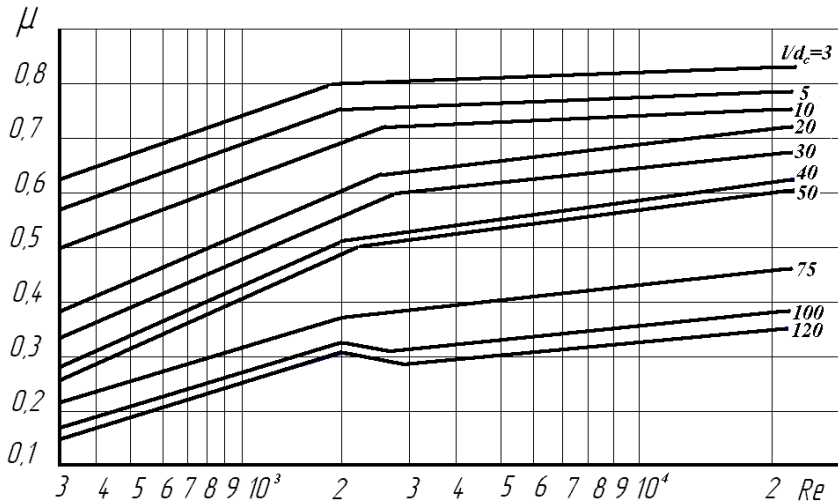


Рис. 4. Зависимость коэффициента расхода цилиндрических насадков с острой кромкой на входе от числа Рейнольдса и относительной длины

Величина  $\Delta p_{omr}$  зависит от относительной длины форсунки. Очевидно, что  $\Delta p_{omr}$  возрастает с повышением  $\frac{l}{d_c}$ .

Увеличить  $\Delta p_{omr}$  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  $\Delta p_{omr}$ . При большом радиусе скругления входной кромки отрыв потока не произойдет даже при очень больших величинах перепада давления на форсунке, од-

нако 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 отрывной 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 отрывной 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 (рис. 2, б). Наступает так называемый *кавитационный режим истечения*. Он имеет место у относительно длинных форсунок и является переходным режимом от безотрывного к отрывному. По мере увеличения скорости истечения при постоянном противодавлении  $p_k$ , либо уменьшении противодавления 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

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

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  $ж_{кр}$  – критическое число кавитации, величина которого зависит от относительной длины канала форсунки и числа Рей-

нольдса, т. е.  $ж_{кр} = f\left(\frac{l}{d_c}, Re\right)$ .

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

$$\mu = \varepsilon \cdot \sqrt{1 + \frac{P_k - P_n}{P_{вх} - P_k}} = \varepsilon \cdot \sqrt{1 + ж}, \quad (15)$$

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

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

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

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

печивает 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 отрывный режим истечения. Форсунка работает при этом как отверстие в тонкой стенке, и коэффициент расхода её становится равным  $0,62 \dots 0,65$ .

Струйные форсунки подают жидкость в виде компактной струи, обладающей большой дальностью. Угол конуса распыла  $2\alpha$  струйных форсунок небольшой и составляет  $5 \dots 15^\circ$ . Распад струи на капли происходит на значительном удалении от среза форсунки. Он обусловлен воздействием на струю ряда 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 смесеобразования, применяют соударение струй компонентов. Струйные форсунки без соударения струй чаще используются для низкоккипящих 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 форсунками 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, вытекаю-

щие 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 неблагоприят-

ным для двигателя из-за значительного колебания коэффициента расхода. Кавитационный режим истечения у форсунок с  $\frac{l}{d_c} > 1,5$  является тоже нежелательным, так как вызывает не-

устойчивость рабочего процесса двигателя.

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 кром-

кой, коэффициент расхода может быть определён расчётным путём с точностью, достаточной для проведения проектных работ. Коэффициент расхода на различных режимах работы может изменяться 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.



### 2.3. Течение рабочего тела в центробежных форсунках

Принцип действия центробежной форсунки отличается от струйной. Все центробежные форсунки имеют камеру закручивания. Рабочая жидкость подаётся в камеру закручивания форсунки ( см. рис. 5) по тангенциальным входным каналам.

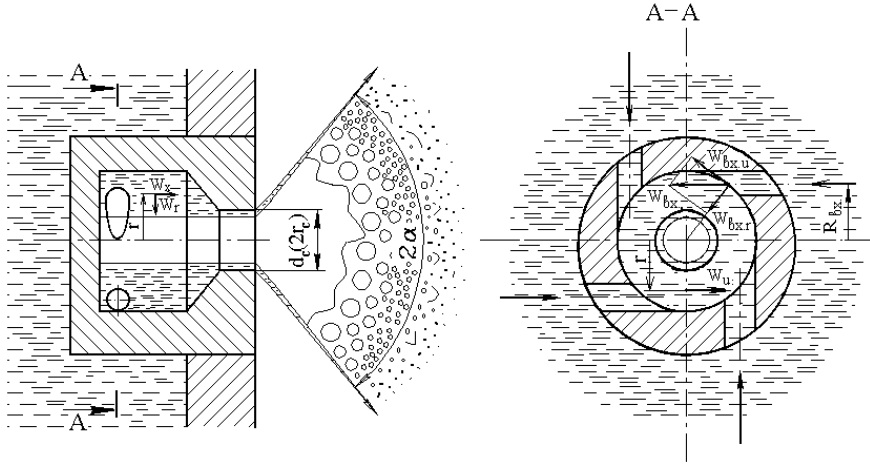


Рис. 5. Схема течения жидкости в центробежной форсунке

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

$$W_{ex} \cdot R_{ex} = W_u \cdot r, \quad (16)$$

$$p_{ex} + \frac{\rho \cdot W_{ex}^2}{2} = p + \frac{\rho}{2} \cdot (W_u^2 + W_x^2 + W_r^2), \quad (17)$$

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

Из уравнений (16) и (17) 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 выше отношение  $\frac{W_u}{W_x}$ , тем больше радиус  $r_g$ . Радиальной составляющей 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 гиперboloида вращения. Так как диаметр  $d_c$  невелик, то этот гиперboloид считается конусом с углом  $2\alpha$  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

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{W_u}{W_x}. \quad (18)$$

Обычно оперируют средним углом распыла  $\overline{2\alpha}$ , вычисляя его по некоторому среднему значению  $\overline{W_u}$ .

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

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

где  $n$  – число входных каналов,  $F_{\text{вх}}$  – площадь проходного сечения одного из этих каналов,  $\beta$  – угол наклона оси входных

каналов к оси сопла форсунки. Для шнековой форсунки  $n$  – число заходов резьбы шнека с углом наклона винтовой линии  $\beta$ .

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

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

3. Геометрическая характеристика  $A$  однозначно определяет величины коэффициента расхода  $\mu$  и угла конуса распыла  $2\alpha$  центробежной форсунки при течении через неё невязкой несжимаемой жидкости ( см. рис. 6).

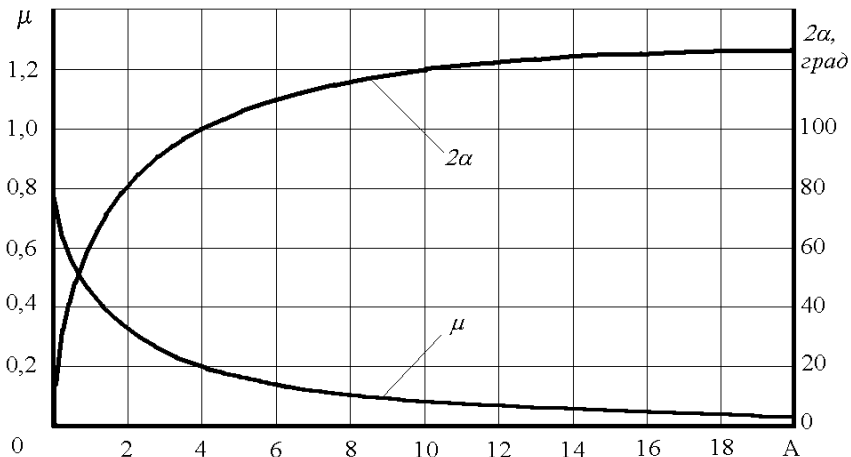


Рис. 6. Зависимость коэффициента  $\mu$  и угла конуса распыла  $2\alpha$  от геометрической характеристики  $A$  центробежной форсунки

Данная теория правильно описывает особенности движения жидкости в центробежной форсунке, о чём говорит её мно-

гочисленная опытная проверка. Однако в отдельных случаях она даёт значительную погрешность определения  $\mu$  и  $2\alpha$ , 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 сопла 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 уменьшению угла распыла.

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

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{A_9^2}{1-\varphi} + \frac{1}{\varphi^2}}}, \quad (20)$$

$$\overline{\text{tg}\alpha} = \frac{2 \cdot \mu \cdot A_9}{\sqrt{(1 + \sqrt{1-\varphi})^2 - 4 \cdot \mu^2 \cdot A_9^2}} = \frac{2 \cdot \mu \cdot A_9}{\sqrt{\left(1 + \frac{r_6^2}{r_c^2}\right) - 4 \cdot \mu^2 \cdot A_9^2}}, \quad (21)$$

где  $\varphi = 1 - \frac{r_6^2}{r_c^2}$  – коэффициент заполнения жидкостью выходного сечения сопла форсунки или коэффициент живого сечения,  $A_9$  – эквивалентная геометрическая характеристика форсунки

$$A_9 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} \left( \frac{B^2}{n} - A \right)}, \quad (22)$$

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

$A_3$  и  $\varphi$  связаны между собой функционально так же, как  $A$  и  $\varphi$  для идеальной форсунки. Эта зависимость имеет вид

$$A_3 = (1 - \varphi) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\varphi^3}}. \quad (23)$$

Итак, уравнения для расчёта  $\mu$  и  $2\bar{\alpha}$  с учётом вязкости жидкости отличаются от аналогичных выражений для идеальной жидкости только заменённой  $A$  на  $A_3$ . Определить  $\mu$  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  $A_3$ .

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  $A_3$  с использованием зависимостей (20) и (21). Уточнение величин  $\mu$  и  $2\bar{\alpha}$  производится на основе экспериментальных данных.

### 3. Объект испытаний

Для проведения экспериментальных исследований имеется набор из пяти струйных форсунок с острой входной кромкой, отличающихся друг от друга длиной канала, и набор из шести шнековых центробежных форсунок. Геометрические размеры струйных форсунок приведены в таблице 1, а центробежных форсунок – в таблице 2.,

В таблице 2 указаны следующие параметры центробежных форсунок:  $n$  – число заходов шнека,  $b$  и  $h$  – ширина и высота винтового канала шнека,  $\beta$  – угол наклона винтовой линии шнека.

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

Таблица 2

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
$\beta$	°	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 прозрачные демонстрационные струйная и центробежная форсунки. На них удобно наблюдать зарождение пристеночной вихревой области, её распространение вдоль канала, явление отрыва потока от стенок и переход на отрывной режим истечения, образование газового вихря вдоль оси центробежной форсунки, а также возникновение усечённого однополосного гиперboloида вращения, переходящего с увеличением перепада давления в конус распыла форсунки.

#### 4. Пролливочный стенд

Пневмогидравлическая схема учебного проливочного стенда представлена на рис. 7. Стенд оборудован двумя рабочими местами для испытания струйных и центробежных фор-

сунок, поэтому его гидравлическая магистраль имеет две совершенно аналогичные ветви.

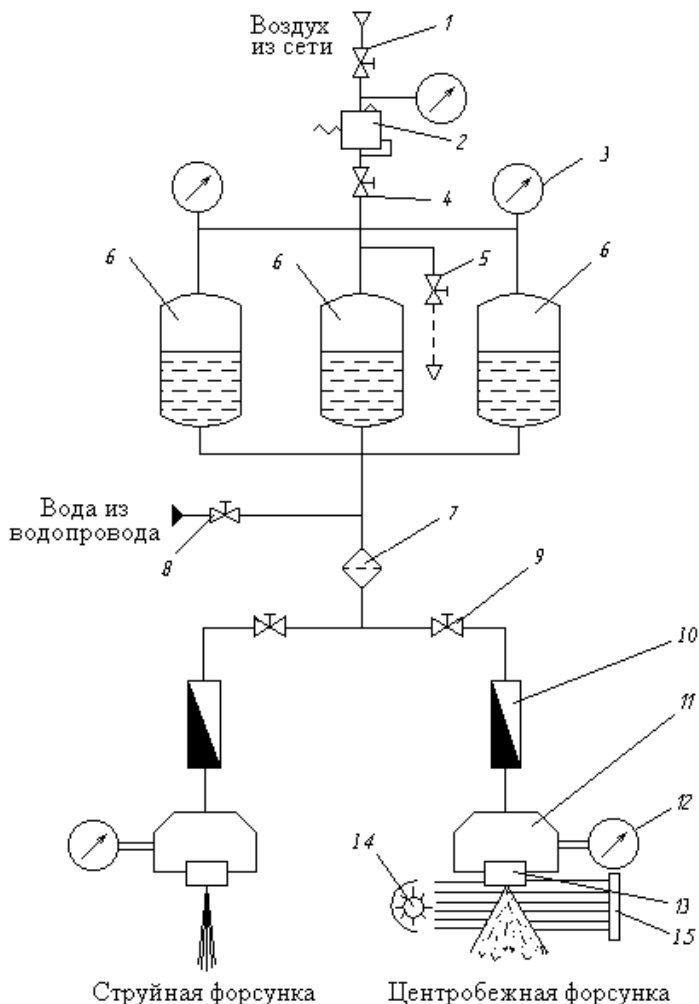


Рис. 7. Пневмогидравлическая схема проливочного стенда

Рассмотрим работу одной ветви, служащей для проливки центробежных форсунок.



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  $p_{ex.max}$ , 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 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  $\dot{m}$ ;
- 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/см<sup>2</sup>.

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 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 демонстрационные, прозрачные модели струйной и центробежной форсунок и наблюдать на различных режимах работы особенности течения и распыления воды. Режим работы форсунок устанавливается изменением давления перед форсункой с помощью вентиля 9 (см. рис. 7).

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

3. Снять расходную характеристику струйной форсунки № 3. Для этого, устанавливая на ней последовательно перепады давления  $\Delta p = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ кг/см}^2$  ( $\Delta p = 17, 34, 50, 67, 83$  дел.) с помощью вентиля 9 (см. рис. 7), измерить на каждом режиме расход воды. После перехода на отрывной режим истечения, установить вновь на форсунке перепад давления  $\Delta p_{отр}$  при отрывном режиме и измерить расход воды.

4. Измерить расход воды и угол распыла для каждой из шести центробежных форсунок, геометрические параметры которых представлены в табл. 2, при одном значении перепада давления  $\Delta p = 4 \text{ кг/см}^2$  ( $\Delta p = 67$  дел.).

## 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

$$p_n = \frac{p'_n}{735,6} \cdot 98,1 \text{ [кПа]}, \quad (24)$$

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

2. Перепад давления на форсунке

$$\Delta p = \Delta p' \cdot K \cdot 98,1 \text{ [кПа]}, \quad (25)$$

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

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

для струйной форсунки

$$\dot{m} = 0,96 \dot{m}_p + 16 \text{ [г/с]}, \quad (26)$$

для центробежной форсунки

$$\dot{m} = 1,11 \dot{m}_p + 23 \text{ [г/с]}, \quad (27)$$

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

4. Идеальный массовый расход воды через форсунку

$$\dot{m}_{ид} = F_c \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}, \quad (28)$$

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

Зависимость  $\rho = f(t)$  приведена в приложении 1. Прибли-

зительно можно принять  $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

5. Коэффициент расхода форсунки

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ud}}. \quad (29)$$

6. Осреднённая скорость воды на выходе из форсунки

$$W = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot F_c}. \quad (30)$$

7. Число Рейнольдса для струйной форсунки

$$\text{Re} = \frac{W \cdot d_c}{\nu}, \quad (31)$$

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  $\text{Re}$  на данном режиме истечения.

9. Критическое число кавитации для данного режима истечения

$$\text{ж}_{кр} = \left( \frac{\mu}{\varepsilon} \right)^2 - 1, \quad \varepsilon = 0,61, \quad (32)$$

$$\text{ж}_{кр} = \frac{\mu^2}{0,61^2} - 1. \quad (33)$$

10. Число кавитации

$$\text{ж} = \frac{p_k - p_n}{\Delta p}, \quad (34)$$

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

$$\mu = \varepsilon \cdot \sqrt{1 + \text{ж}} = 0,61 \cdot \sqrt{1 + \text{ж}}. \quad (35)$$

12. Геометрическая характеристика центробежной форсунки

$$A = \frac{\pi \cdot R \cdot r_c}{n \cdot F_{\text{ex}}} \sin \beta \quad \text{или} \quad A = \frac{\pi \cdot R \cdot r_c}{n \cdot b \cdot h} \sin \beta, \quad (36)$$

где  $b$  и  $h$  – ширина и высота канала шнека соответственно, а  $\beta$  – угол наклона винтовой линии шнека. Эти величины для форсунок берутся из таблицы 2.

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

$$\text{Re} = \frac{W_{\text{ex}} \cdot d}{\nu} = \frac{2\dot{m}}{\sqrt{\pi \cdot n \cdot b \cdot h} \cdot \rho \cdot \nu}, \quad (37)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость воды.

14. Коэффициент трения

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{(\lg \text{Re})^{2,58}} - 2. \quad (38)$$

15. Эквивалентная геометрическая характеристика центробежной форсунки

$$A_9 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} \left( \frac{R^2 \cdot \pi}{n \cdot b \cdot h} - A \right)}. \quad (39)$$

## 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 3

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

Таблица 4

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

Таблица 5

Номер форсунки	$r_c$	$R$	$n$	$b$	$h$	$\beta$	$\Delta p$	$\dot{m}_p$
–	мм	мм	–	мм	мм	о	кПа	дел.
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Таблица 5 (продолжение)

$2\alpha$	$\dot{m}$	$\dot{m}_{уд}$	$\mu$	$A$	Re	$\lambda$	$A_9$
о	г/с	г/с	–	–	–	–	–
10	11	12	13	14	15	16	17

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  $\Delta p_{отр}$ .

3. Графики зависимостей  $\mu = f(A_9)$  и  $2\alpha = f(A_9)$ .

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

## З а д а н и е

1. Определить 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. Оценить влияние вязкости воды на характеристики центробежных форсунок, сопоставив экспериментальные зависимости  $\mu$ ,  $2\alpha = f(A)$  с расчётными, полученными по методике Г. Н. Абрамовича для идеальной жидкости.

4. Сопоставить величины коэффициентов расхода струйных форсунок с коэффициентами расхода центробежных форсунок в случаях, когда геометрическая характеристика центробежной форсунки стремится к нулю и к бесконечности.

5. 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 самостоятельную работу и представившим качественно оформленный отчёт.

## 8. Контрольные вопросы

1. Что называется форсункой?
2. 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?
10. Чем вызвано образование газового вихря у оси центробежной форсунки?
11. Какое влияние оказывает вязкость на характеристики центробежной форсунки?
12. Преимущества и недостатки центробежных форсунок по сравнению со струйными форсунками при их использовании 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 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.

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
$\rho$	$кг/м^3$	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

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*

**ФОРСУНОКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ  
АППАРАТОВ**

*Методические указания*

Составители: Егорычев Виталий Сергеевич  
Первышин Александр Николаевич

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

