

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика С.П. КОРОЛЕВА»  
(национальный исследовательский университет)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК ТЕПЛОВЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ

УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ  
СГАУ РЕГИСТ. № 44-012

САМАРА 2012

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»  
(национальный исследовательский университет)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК ТЕПЛОВЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ

*Методические указания к лабораторной работе*

САМАРА 2012

## Лабораторная работа №1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

#### Цель работы:

1. Знакомство с теоретическими основами описания расходно-геометрических характеристик струйных и центробежных форсунок тепловых двигателей.
2. Изучение методики испытания форсунок и определения их характеристик по расходу топлива и по углу факела распыла.
3. Закрепление полученных теоретических знаний на примере испытания струйной или одноступенчатой центробежной форсунок.

#### 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

##### *1.1. Конструкция и принцип работы форсунок.*

В тепловых двигателях (ПД, ГТД, ЖРД) жидкое топливо или сжиженные топливные компоненты забираются из баков и подаются к камере сгорания двигателя по системе магистралей. В конце своего пути топливо проходит через специальные устройства - форсунки, подаётся с помощью них на вход или внутрь камеры сгорания и одновременно распыливается на множество мелких капель. Форсунки должны создавать капли определенного мелкого размера и нужным образом их распределять по пространству зоны горения с

учетом конструкции камеры сгорания и структуры газо-воздушного течения в ней.

В зависимости от давления подачи топлива, его физических свойств и принципа работы системы топливоподачи тип и внутреннее устройство форсунок может быть различным. Но, в общем, они представляют собой внутреннюю систему каналов, коллекторов, пространство вокруг клапанов, пружин, наличие камеры закручивания, поверхностей для течения топливной пленки и т.п. На последнем участке течения через форсунку, в наиболее распространенных конструкциях, топливо с большой скоростью протекает через цилиндрическое калиброванное отверстие - сопло (их может быть несколько) и в момент вылета в форме узкой струи в пространство камеры сгорания распадается на множество мелких капель, создавая факел распыленного топлива (рисунок 1). Такие форсунки называются *струйными*. В *центробежных форсунках* (рисунок 2) топливо попадает в цилиндрическую камеру закручивания, далее - в узкое цилиндрическое сопло; располагаемый перепад давления превращается в кинетическую энергию вращательного и поступательного движения струи, в момент вылета из сопла струя приобретает форму полого конуса и одновременно, также, распадается на множество мелких капель. В случае любого из названных типов форсунок диаметры образовавшихся капель находятся в некотором диапазоне значений, как правило, это 20... 150 мкм.

### 1.2 Характеристики качества работы форсунок.

Основными параметрами режима работы форсунок являются: перепад давления топлива на форсунке  $\Delta p_{T,0}^*$ , Н/м<sup>2</sup> и расход топлива массовый  $G_T$ , кг/с или объемный  $Q_T$ , м<sup>3</sup>/с. Если в распыливании топлива принимает участие воздух или другой какой-то газ, то аналогичные параметры используются также и

для них. В данной работе будет рассмотрена работа струйных и центробежных форсунок применительно к ПД или ГТД, работающих без участия в распыливании воздуха.

Перепад давления по топливу определяется формулой:

$$\Delta p_{T.0}^* = p_{T.0}^* - p_K^*, \quad (1)$$

где:  $p_{T.0}^*$ ,  $\Delta p_K^*$  - абсолютные полные давления топлива перед форсункой и, соответственно, газообразной среды в камере сгорания, Н/м<sup>2</sup>.

Дисперсные характеристики - это зависимость величины среднего диаметра капель (в микрометрах, 1 мкм = 10<sup>-6</sup> м) от перепада давления топлива  $\Delta p_{T.0}^*$  на форсунке.

Геометрические характеристики факела распыла - это зависимость формы струи или факела от перепада давления топлива  $\Delta p_{T.0}^*$ . Как правило, их форма описывается одним или двумя параметрами - углом раскрытия факела  $\gamma$ , град и дальностью струи  $L$ , м.

Расходные характеристики форсунки - это зависимость общего расхода топлива — массового  $G_T$ , кг/с или объемного  $Q_T$ , м<sup>3</sup>/с от величины  $\Delta p_{T.0}^*$ .

Расходно-геометрические характеристики струй или факелов распыла. Эти характеристики представляются либо одной эпюрой распределения массы жидкого топлива, измеренной в некотором поперечном сечении факела вдоль его диаметра, либо несколькими подобными эпюрами. В последнем случае получается набор эпюр, они измеряются также в одном поперечном сечении факела, вдоль диаметра и вдоль нескольких (6-10) хорд, параллельных этому диаметру. По набору эпюр далее методами сплайн-аппроксимации строится все поле распределения топлива в поперечном сечении факела. Как правило, затем оно пред-

ставляется в виде некоторой топографической карты с набором изолиний постоянного локального расхода топлива (кг/с) или плотности орошения (кг/(с·см<sup>2</sup>)). Поле наглядно характеризует неравномерность распределения массы жидкого топлива в поперечном сечении факела распыла на рассматриваемом режиме работы форсунки.

Данная работа, на примере простой одноступенчатой центробежной форсунки, знакомит студента с порядком экспериментального определения расходной характеристики форсунки  $G_T(\Delta p_{T.0}^*)$ , угла факела распыла топлива  $\gamma(\Delta p_{T.0}^*)$  и эпюры распределения топлива в поперечном сечении факела.

## 2. ТЕОРИЯ РАБОТЫ ФОРСУНКИ

### 2.1 Струйные форсунки

На рисунке 1 показан фрагмент автомобильной струйной форсунки.

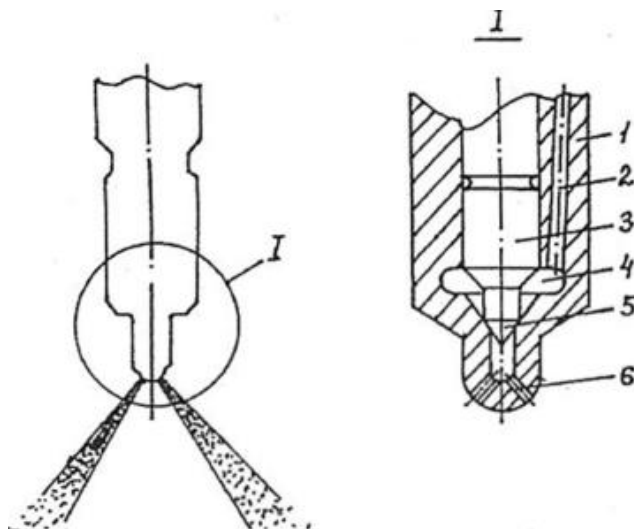


Рисунок 1 - Распылитель струйной форсунки: 1 - корпус форсунки, 2 - топливный канал, 3 - подвижный шток, 4 - топливный коллектор, 5 - игла запорная, 6 - сопла распылительное.

Теоретическое описание движения жидкости через струйные форсунки базируется на двух следующих уравнениях.

а) Уравнение неразрывности (сохранения или неизменности по длине проточной части форсунки) расхода топлива:

$$G_{T.t} = \rho_T \cdot w_t \cdot F_c, \quad (2)$$

где:  $\rho_T$  - плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;  $w_t$  - теоретическая скорость истечения топлива из сопла форсунки, м/с (это скорость в плоскости выходного сечения сопла);  $F_c$  - площадь выходного поперечного сечения канала сопла, м<sup>2</sup>. Если сопло с поперечным сечением в форме круга радиусом  $r_c$ , то  $F_c = \pi \cdot r_c^2$ ;  $G_{T.t}$  - теоретическое значение расхода топлива, кг/с.

б) Уравнение сохранения энергии в форме Бернулли для идеальной несжимаемой жидкости — уравнение связи давлений — полного, в потоке и динамического:

$$p_{T.0}^* = p_{T.0} + \rho \cdot \frac{w_t^2}{2}, \quad (3)$$

где:  $p_{T.0}$  - давление топлива в потоке перед форсункой, Н/м<sup>2</sup>.

Из уравнения (3) в предположении равенства давлений в потоке на срезе сопла  $p_{T.0}$  давлению газа в камере сгорания  $p_k^*$  легко выразить теоретическую скорость истечения топлива  $w_t$ :

$$w_t = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T}}, \quad (4)$$

После подстановки выражения (4) для  $w_t$  в формулу для расхода топлива (2) получим:

$$G_{T.t} = \rho_T \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T}} \cdot F_c = \pi \cdot r_c^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_T \cdot \Delta p_{T.0}^*}. \quad (5)$$

В действительности, в силу наличия при течении реальной жидкости через форсунку различных завихрений, пограничных слоев, вязкого гидравлического и поверхностного трения, создающих гидравлические сопротивления, из-за чего действительная скорость истечения  $w < w_t$ , фактический расход топлива  $G_T$  представляют следующей формулой:

$$G_T = \mu \cdot G_{T.t} = \pi \cdot r_c^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_T \cdot \Delta p_{T.0}^*}, \quad (6)$$

где:  $\mu$  - коэффициент расхода форсунки, с помощью которого учитывают все выше перечисленные гидравлические потери;  $\mu < 1$ . Величина  $\mu$ , как правило, не рассчитывается, а определяется экспериментально при, так называемых, «проливках» форсунок - в экспериментах по измерению их расходной характеристики.

## 2.2 Центробежные форсунки

В авиационных газотурбинных (ГТД) и в жидкостных ракетных (ЖРД) двигателях широко применяются другой тип форсунок - центробежные топливные форсунки (ЦБТФ). По внутреннему устройству они существенно проще автомобильных струйных форсунок. Принцип их работы существенно отличается и состоит в следующем (рисунок 2).

Топливо по тангенциальным каналам (1) (рис.2) подается внутрь цилиндрической камеры закручивания (2), приобретает в ней вращательное движение и продвигается одновременно к узкому цилиндрическому соплу (4). Таким образом, в камере закручивания каждая частица жидкости совершает винтовое движение, ускоряясь в окружном направлении при приближении к оси форсунки. При входе в сопло и при движении по нему часть энергии вращательного движения преобразуется в поступательное осевое движение. За счет центробежных сил жид-



кость одновременно прижимается к цилиндрической внутренней боковой поверхности камеры закручивания и сопла так, что приосевая зона форсунки освобождается от топлива и заполняется газообразной средой, здесь формируется газообразный вихревой шнур (3). При покидании сопла полая цилиндрическая топливная струя жидкости, вращающаяся с большой скоростью, превращается за счет больших центробежных сил в полый тонкостенный конус (5), который плавно утоньшается и на некотором расстоянии от сопла форсунки разрушается на множество мелких капель.

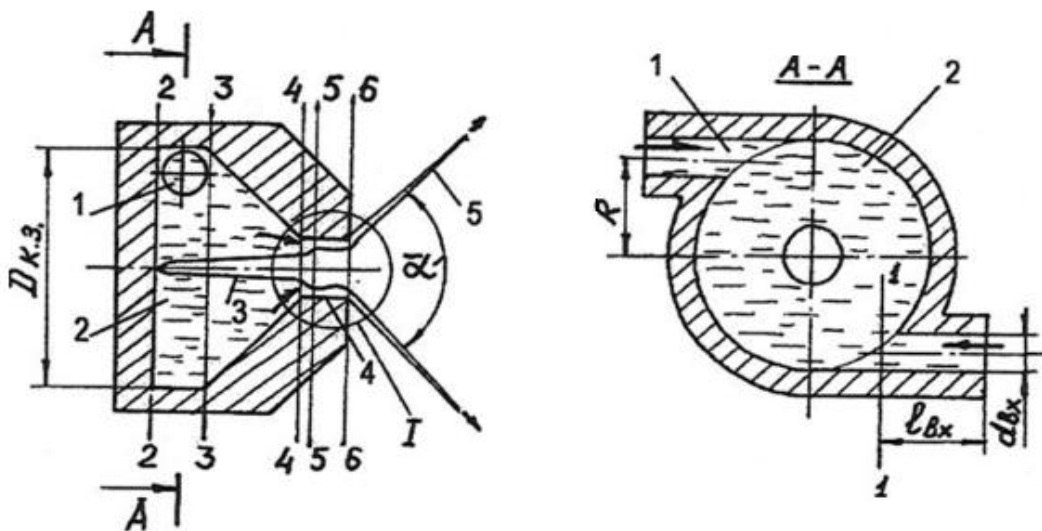


Рисунок 2 - Центробежная форсунка

Расход топлива через центробежную форсунку  $G_T$ , также как и для струйной форсунки, может быть представлен формулой, аналогичной (6), однако коэффициент расхода  $\mu_l$  будет иметь другое значение. Разработанная к настоящему времени теория идеальной ЦБТФ позволяет получить аналитическое выражение для  $\mu_l$ . Сделаем это для простой одноступенчатой ЦБТФ, изображенной на рисунке 2.

Для описания течения жидкости через ЦБТФ дополнительно, по сравнению со струйной форсункой, используется уравне-

ние сохранения момента количества движения жидкости  $M$  относительно оси форсунки:

$$M = w_0 \cdot R = w_u(r) \cdot r = const, \quad (7)$$

где :  $w_0$  - скорость жидкости на входе в камеру закручивания (рис.2), м/с;  $w_u(r)$  - скорость жидкости в окружном направлении на произвольном радиусе  $r$  от оси форсунки в любом сечении тракта, м/с. Если входные тангенциальные каналы цилиндрические с радиусом  $r_k$  и их  $n_k$  штук, то

$$w_0 = \frac{G_T}{\rho_T \cdot \pi r_k^* \cdot n_k}, \quad (8)$$

Для винтового движения, какое совершает частица жидкости при течении через центробежную форсунку, уравнение Бернулли будет иметь вид:

$$p_{T.o}^* = p_T + \rho_T \cdot \frac{w_u^2 + w_a^2}{2}$$

или, переходя от абсолютных к избыточным давлениям (перепадам):

$$\Delta p_{T.o}^* = \Delta p_T + \rho_T \cdot \frac{w_u^2 + w_a^2}{2}, \quad (9)$$

где:  $w_u, w_a$  - соответственно окружная и осевая составляющие полной скорости  $w = \sqrt{w_u^2 + w_a^2}$ ;  $\Delta p_{T.o}^*, \Delta p_T$  - по формуле (1).

Рассматривая равновесие в радиальном направлении любой частицы жидкости на участке между сечениями 5-5 и 6-6 (рисунок 2) и принимая, что избыточное давление в потоке на границе с газовым шнуром  $\Delta p_T = (\Delta p_T)_{ш} = 0$ , из уравнения (9) для  $w_a(r)$  можно получить:

$$w_a(r) = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T} - w_{и.ш.}^2} = const. \quad (10)$$

То есть, осевая скорость  $w_a$  по высоте поперечного сечения на указанном участке цилиндрического выходного сопла форсунки остается неизменной. Это справедливо, так как из уравнения сохранения момента количества движения  $M$  (7) следует, что:

$$w_{и.ш.} = \frac{w_0 \cdot R}{r_{ш}} = const, \quad (11)$$

где  $r_{ш}$  - радиус газового шнура, м.

Заметим также, что в сопле площадь поперечного сечения полой кольцевой струи топлива

$$F_{стр} = \pi r_c^2 - \pi r_{ш}^2 = \pi r_c^2 \cdot \left(1 - \frac{r_{ш}^2}{r_c^2}\right) = \pi r_{ш}^2 \cdot \varphi, \quad (12)$$

где  $\varphi$  - коэффициент заполнения сопла топливом.

Теперь вернемся в уравнение (10), выразив  $w_a$  и  $w_u$  в (11) через объемный расход топлива  $Q_T = G_T / \rho_T$  :

$$\frac{Q_T}{\pi r_c^2 \cdot \varphi} = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T} - \left(\frac{Q_T}{n_k \cdot \pi r_k^2} \cdot \frac{R}{r_{ш}}\right)^2}. \quad (13)$$

Возведя левую и правую части уравнения (13) в квадрат и группируя слева слагаемые, содержащие  $Q_T$ , получим:

$$\frac{Q_T^2}{(\pi r_c^2)^2} \cdot \left[ \frac{1}{\varphi^2} - \frac{R^2 r_c^2}{n_k^2 r_k^4} \cdot \frac{r_c^2}{r_{ш}^2} \right] = 2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T}. \quad (14)$$

Обозначив в (14) стоящий множителем в квадратных скобках комплекс соотношений геометрических параметров форсунки  $R^2 r_c^2 / n_k^2 r_k^4 = A^2$  и учтя, что  $r_c^2 / r_{ш}^2 = 1 / (1 - \varphi)$ , получим

окончательно следующую формулу для объемного расхода топлива через форсунку  $Q_T$ :

$$Q_T = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\varphi^2} + \frac{A^2}{1-\varphi}}} \cdot \pi r_c^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T}}. \quad (15)$$

Комплекс геометрических соотношений  $A$  называется «геометрической характеристикой форсунки», так как представляет собой соотношение, в котором участвуют только геометрические параметры форсунки. С другой стороны, выражение для  $A$  можно получить из преобразованной выражения величины относительного расхода топлива в окружном направлении, которое показывает, какая доля топлива течет в окружном направлении. По сути, относительная величина доли топлива, текущего в окружном направлении, представляет собой, так называемый параметр закрутки струи. В итоге получается, что если величина геометрической характеристики  $A$  увеличивается, то это означает, что увеличивается степень закрутки потока.

Если, как и в случае струйной форсунки, последний множитель правой части в (15) рассматривать как некоторую теоретическую скорость истечения, а второй множитель - это площадь поперечного сечения сопла, то первый множитель можно принять за коэффициент расхода форсунки  $\mu$ :

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\varphi^2} + \frac{A^2}{1-\varphi}}}. \quad (16)$$

Только в случае идеальной ЦБТФ ее коэффициент расхода  $\mu$  учитывает специфику форм профилей скоростей и автоматически то, что цилиндрическая струя в сопле полая, т.е. это некоторый *эффективный* коэффициент расхода.

Умножая обе части (15) на плотность топлива и учтя (16), получим формулу для массового расхода топлива через идеальную центробежную форсунку:

$$G_T = \pi \cdot r_c^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_T \cdot \Delta p_{T,0}^*} . \quad (17)$$

В соответствии с (16) коэффициент расхода является функцией двух величин  $\mu = f(\varphi, A)$ , то есть зависит от коэффициента заполнения сопла  $\varphi$ , который определяется режимом течения, и от геометрической характеристики  $A$ , которая, очевидно, должна определять и величину  $\varphi$ . Для исключения этой неоднозначности Г.Н. Абрамовичем был предложен прием преобразования выражения (16) для  $\mu$ , названный им «принципом максимального расхода топлива». В соответствии с этим принципом через форсунку автоматически устанавливается такой расход топлива, который при её геометрических параметрах является максимально возможным, то есть производная  $d\mu/d\varphi=0$ . После взятия этой производной от выражения (16) и решения получившегося уравнения относительно величины  $A$ , можно получить следующую для нее формулу:

$$A = \sqrt{2} \cdot \frac{1-\varphi}{\varphi\sqrt{\varphi}} . \quad (18)$$

Подставляя  $A$  по формуле (18) обратно в выражение (16), получим:

$$\mu = \frac{\varphi\sqrt{\varphi}}{\sqrt{2-\varphi}} . \quad (19)$$

Таким образом, геометрическая характеристика форсунки является важнейшим геометрическим параметром ЦБТФ, так как ее величина определяет согласно (18) коэффициент заполне-

ния сопла  $\varphi$  (т.е. толщину топливной струи) и через его значение согласно (19) - величину коэффициента расхода  $\mu$ .

Нетрудно показать, что геометрическая характеристика определяет и угол раскрытия топливного факела  $\gamma$ . Получим для него расчетное выражение. Для этого выполним следующее.

Из уравнения Бернулли, записанного для выходного сечения б-б, для произвольного радиуса  $r$  по толщине топливной струи:

$$w_{a6}(r)^2 + w_{u6}(r)^2 = 2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T}$$

выразим осевую составляющую скорости:

$$w_{a6}(r) = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T} - w_{u6}(r)^2}$$

и подставим в эту формулу выражение для  $w_{u6}(r)$  из (11):

$$w_{a6}(r) = \frac{R}{r} \cdot w_0 = \frac{R}{r} \cdot \frac{Q_T}{n_k \cdot \pi r_k^2} = \frac{R}{r} \cdot \frac{\mu \cdot \pi r_c^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T}}}{n_k \cdot \pi r_k^2}.$$

Окончательно получим для значений составляющих скорости  $w_{u6}(r)$  и  $w_{a6}(r)$  следующие выражения:

$$w_{u6}(r) = \frac{R \cdot r_c}{n_k \cdot \pi r_k^2} \cdot \frac{r_c \cdot \mu}{r} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T}}, \quad (20)$$

$$w_{a6}(r) = \sqrt{1 - \left(\frac{R \cdot r_c}{n_k \cdot \pi r_k^2}\right)^2 \cdot \frac{r_c^2 \cdot \mu^2}{r^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T}}, \quad (21)$$

где комплекс  $R \cdot \frac{r_c}{n_k} \cdot \pi r_k^2 = A$ . Из (20) и (21) видно, что с увеличением радиуса  $r$ , т.е. с приближением к стенке сопла, окружная составляющая скорости уменьшается, а осевая несколько увеличивается. Непостоянство осевой составляющей скорости в сечении б-б объясняется преобразованием части ко-

личества движения в окружном направлении в количество движения в осевом направлении.

Для радиуса посередине толщины топливной струи

$$r_{\text{cp}} = \frac{r_{\text{ш}} + r_{\text{с}}}{2} = \frac{(1 + \varepsilon) \cdot r_{\text{с}}}{2},$$

где  $\varepsilon = r_{\text{ш}}/r_{\text{с}}$ , получим для угла раскрытия топливного факела  $\gamma$  (корневого угла конусности факела) выражение:

$$\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) = \left(\frac{w_{u6}}{w_{a6}}\right) = \frac{\frac{2\mu A}{1 + \varepsilon} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T}}}{\sqrt{1 - \frac{4\mu^2 A^2}{(1 - \varepsilon)^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{T.0}^*}{\rho_T}}}$$

и, соответственно:

$$\gamma = 2 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{w_{u6}}{w_{a6}}\right) = 2 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{2\mu A}{\sqrt{(1 + \varepsilon)^2 - 4\mu^2 A^2}}\right). \quad (22)$$

На рисунке 3 представлены графики, иллюстрирующие зависимость  $\mu$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$  и других параметров от величины геометрической характеристики форсунки  $A$ . Из рисунка 3 видно, что с увеличением степени закрутки потока, то есть величины  $A$ , коэффициенты заполнения и расхода сопла уменьшаются, что связано с тем, что струя топлива сильнее прижимается к стенкам сопла. При этом радиус воздушного вихря увеличивается и, соответственно, толщины жидкой пленки - цилиндрической -  $t_6$  и конической -  $t_m$  уменьшаются. В связи с увеличением окружной составляющей движения увеличивается также и угол раскрытия топливного факела  $\gamma$ . (На рисунке 3 показаны относительные величины жидких пленок  $t_6/d_c$  и  $t_m/d_c$ .)

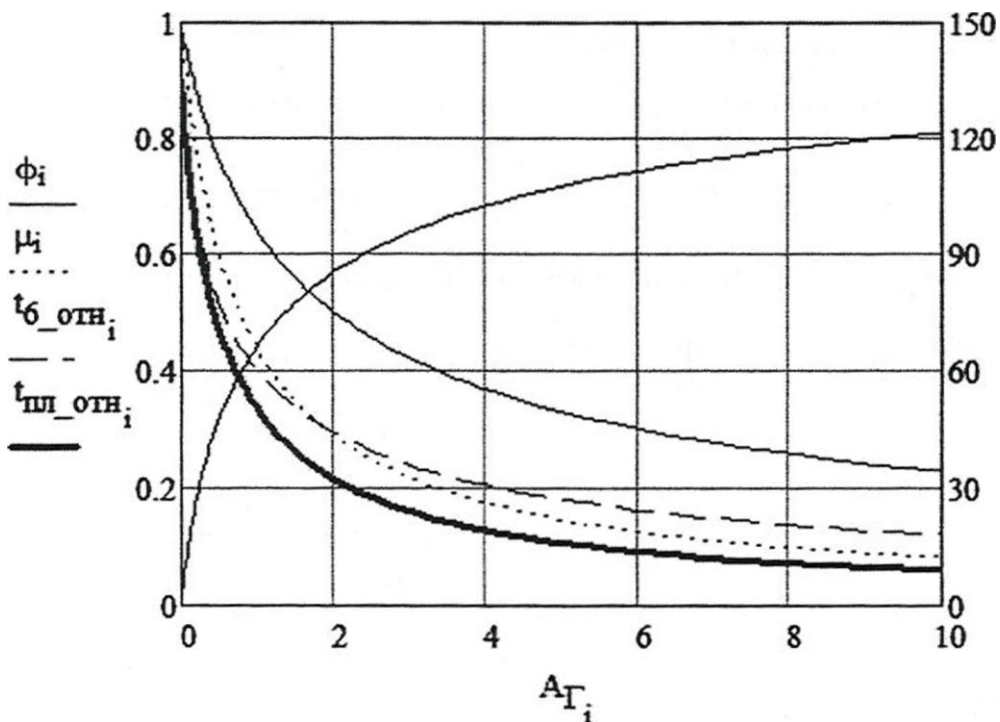


Рисунок 3 - Изменение параметров струи, топливной пленки и факела распыла с увеличением геометрической характеристики форсунки  $A$

Приведенные исходные уравнения и полученные на их основе формулы являются кратким изложением теории идеальной центробежной форсунки. Можно показать, что, следуя аналогичным рассуждениям и построениям, можно получить схожие с (18), (19) и (22) выражения для случая течения реальной жидкости через реальную ЦБТФ, то есть выражения, учитывающие вязкость жидкости, гидравлические потери, шероховатость стенок каналов и т.п. [3, 6]. Это означает, что формулы для идеальной форсунки (18), (19) и (22) правильно в целом отражают влияние режимных и геометрических параметров форсунки, в частности, влияние  $\Delta p_{T,0}^*$  и  $A$ . Следовательно, выполняя проливки форсунок и получая из эксперимента величины  $\mu$  и  $\gamma$ , можно проводить анализ влияния на них указанных выше режимных и геометрических параметров форсунки.



### 3 ЭКСПЕРИМЕНТ АЛЬНАЯ У СТ АНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ФОРСУНОК

Для испытания форсунок тепловых двигателей с целью определения параметров факелов распыла используется специальная проливочная установка (рисунок 4) УПФ-372 [6].

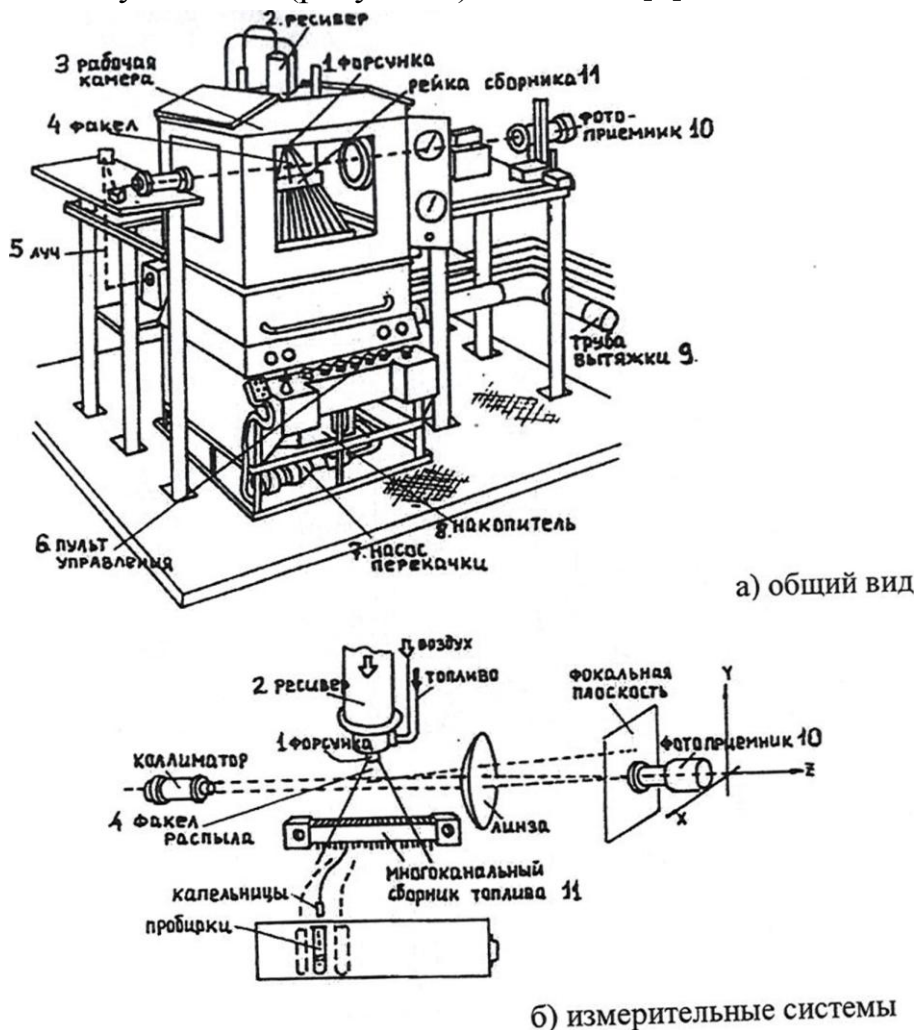


Рисунок 4 - Проливочная установка УПФ-372

Проливочная установка УПФ-372 размещается на площади  $2,5 \times 3 \text{ м}^2$ , представляет собой разборную конструкцию в виде

шкафа с вытяжкой, высотой примерно 2,25 м, состоящего из нескольких блоков. Установка оснащена перемещаемым 35-канальным сборником жидкого топлива (рисунок 4, б), с помощью которого определяются расходно-геометрические характеристики факела распыла. На оптических столах (рисунок 4, а) размещены детали лазерно-оптической измерительной системы (рисунок 4, б), позволяющей измерять средний диаметр капель.

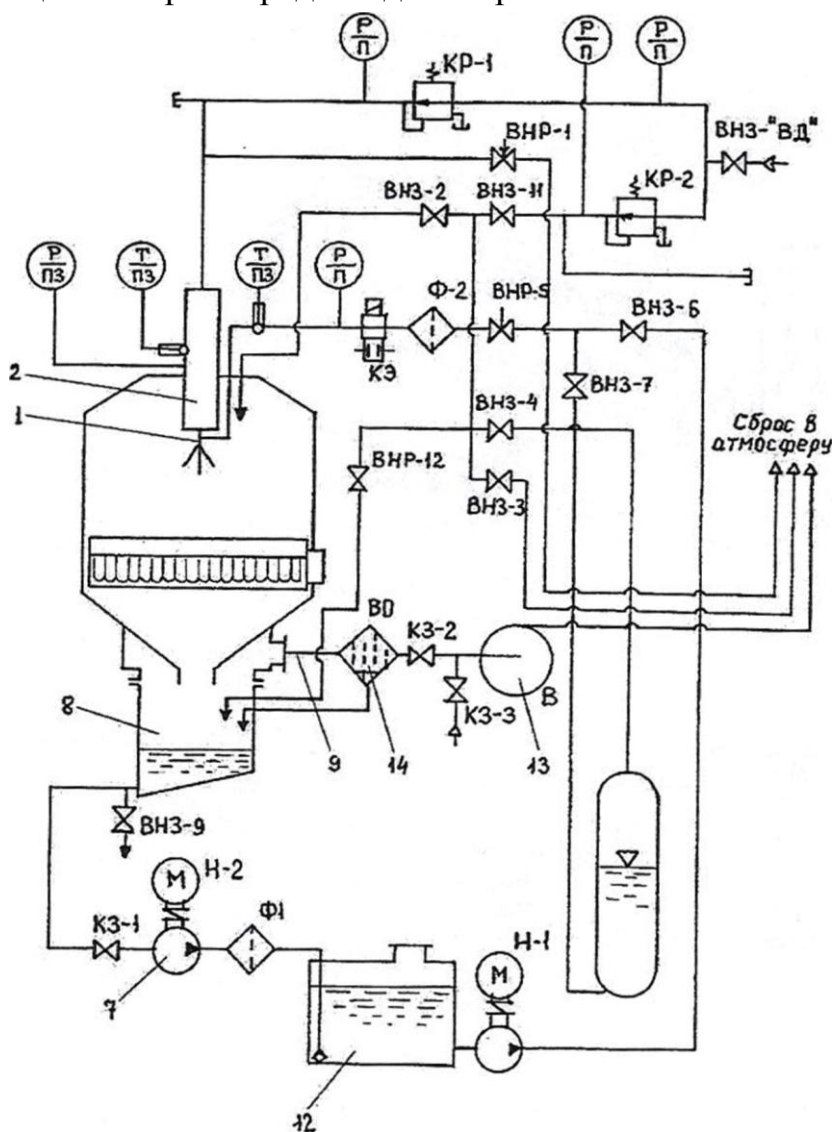


Рисунок 5 - Схема ПГС проливочной установки УПФ-372

Проливочная установка УПФ-372 имеет две системы подачи топлива - насосную и вытеснительную. Схема пневмогидравлической системы (ПГС) показана на рисунке 5.

Распыливание топлива производится внутри рабочей камеры с объемом  $\sim 1\text{ м}^3$  при стендовых атмосферных условиях. Испытываемая форсунка (1) закрепляется на нижнем фланце воздушного ресивера (2). Топливо распыливается вниз. В процессе испытания отработанное жидкое топливо собирается в накопителе и, по мере его заполнения, перекачивается насосом (7) в общее хранилище (12, рисунок 5).

Внутри рабочей камеры давление несколько ниже атмосферного из-за небольшого разрежения, создаваемого воздушным центробежным вентилятором (13, рисунок 5) общепромышленного типа взрывобезопасного исполнения. С помощью вентилятора воздух из рабочей камеры непрерывно удаляется по трубе, далее в многосекционном импакторе (14) он очищается от мелкой аэрозоли и выбрасывается в атмосферу.

#### 4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

*Измерение расходной характеристики форсунки по общему расходу топлива*

1. Установить форсунку (1) на фланец ресивера (2). Подсоединить к форсунки магистраль подвода топлива.

2. Проверить положение всех вентилях на пульте управления установки. Все вентиля должны быть закрыты.

3. Подготовить таблицу протокола для записи измеряемых параметров; подготовить мерные стаканы для забора топлива, пронумеровать стаканы и измерить с помощью весов их сухую массу. Подготовить фотоаппарат для фотографирования факела распыла.

4. Подать воздух высокого давления для наддува расходного топливного баллона (рисунок 6). Для этого открыть вентиль запорный ВНЗ-«ВД», нагрузить клапан редукционный КР-2 до нужного давления в баллоне. Последовательно плавно открыть вентили запорные ВНЗ-11, ВНЗ-4. По шуму в магистрали определить момент окончания наддува топливного баллона.

5. Открыть и отрегулировать положение воздушных заслонок КЗ-2 и КЗ-3. Включить центробежный воздушный вентилятор 13 системы вытяжки воздуха, убедиться в нормальной работе системы.

6. Осуществить пробную подачу топлива через форсунку. Для этого открыть отсечной клапан электромагнитный КЭ, открыть вентиль запорный ВНЗ-7. Контролируя по большому топливному манометру давление топлива перед форсункой, плавно открыть вентиль регулировочный ВНР-5, убедиться в нормальной работе форсунки и в отсутствии подтекания керосина в местах присоединения форсунки. Закрыть вентиль ВНР-5.

7. Произвести измерение расходов топлива на нескольких перепадах давления топлива перед форсункой. Для этого

7.1. Плавно открыть вентиль ВНР-5 и установить нужный перепад давления топлива по большому манометру.

7.2. Произвести фотографирование факела распыла с помощью фотоаппарата.

7.3 Открыть переднюю дверцу для доступа внутрь камеры распыливания. Взять осторожно мерный стакан и подставить его под факел распыла, одновременно включить секундомер. При наполнении на 35...75 % объема мерного стакана вывести его из под форсунки и выключить одновременно секундомер. Переднюю дверцу оставить открытой. Записать время наполнения стакана  $\Delta t$  в таблицу протокола.

7.4 Определить путем взвешивания на весах количество собранной жидкости вместе со стаканом  $\Delta m_{\text{СТ+Ж}}$  и записать это значение в таблицу протокола.

7.5 Повторить проделанные операции, начиная с п.7.3 для всех намеченных режимов распыливания.

8. После окончания замеров массы распыливаемого топлива привести ПГС и вытяжную систему проливочной установки в исходное состояние. Для этого:

8.1. Произвести отключение вентилей подачи топлива ВНР-5, ВНЗ-7, закрыть клапан электромагнитный КЭ.

8.2 Выпустить воздух наддува из топливного баллона, для этого: закрыть вентиль воздуха высокого давления ВНЗ-«ВД», разгрузить клапан редукционный КР-2. Закрыть вентиль ВНЗ-11. Плавно открыть вентиль запорный ВНЗ-2 и осуществить выпуск воздуха из топливного баллона в распылительную камеру установки. После окончания выпуска воздуха из баллона закрыть запорные вентили ВНЗ-2 и ВНЗ-4.

8.2. Убедиться, что все вентили на пульте установки УПФ-372 находятся в положении «закрыто».

8.3. Выключить центробежный воздушный вентилятор 13 системы вытяжки воздуха. Закрыть воздушные заслонки КЗ-2, КЗ-3.

9. По результатам измерений рассчитать массовый расход жидкого топлива  $G_r$  и коэффициент расхода форсунки  $\mu^3$  по формуле (17). Их значения занести в таблицу протокола.

10. Определить по фотографиям угол факела распыла  $\gamma^3$ . Его значения занести в таблицу протокола.

11. Рассчитать геометрическую характеристику форсунки  $A$  по формуле на странице 11. Рассчитать значения  $\mu$  и  $\varphi$ , используя формулы (18), (19). Вычислить относительный радиус

воздушного шнура  $\varepsilon$ . Рассчитать угол факела распыл  $\gamma$  по формуле (22). Занести значения рассчитанных  $\mu$ ,  $\varphi$  и  $\gamma$  в таблицу протокола. Проверить по графику рисунка 3 соответствие полученных значений  $\mu$ ,  $\gamma$  теоретическим значениям.

12. Построить графики зависимостей массового расхода  $G_T$ , угла факела распыла  $\gamma$  и  $\gamma^3$ , коэффициент расхода форсунки  $\mu$  и  $\mu^3$  от перепада давления  $\Delta p_{T,0}^*$ . Вычислить процентное расхождение рассчитанных и измеренных значений.

13. Подготовиться к ответу на контрольные вопросы.

Примерный вид таблицы протокола

№ реж.	$\Delta p_{T,0}^*$ по ман.		$\Delta \tau$ , с	Масса, кг			$G_T$ , кг/с
	дел.	кПа		$\Delta m_{СТ}$	$\Delta m_{СТ+Ж}$	$\Delta m_{СТ}$	

## 5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

5.1 Поясните принцип работы струйных форсунок.

5.2 Поясните принцип работы центробежных форсунок.

5.3 По каким характеристикам оценивается качество работы центробежных форсунок ?

5.4 Какие характеристики называются дисперсными ?; геометрическим ?; расходными?; расходно-геометрическими ?

7. Установка для определения характеристик двухфазных потоков.  
Ю.А.Кныш, А.М.Ланский, А.А.Диденко и др.//Информационный  
листок о науч.-техн. достижении № 91-67.-Куйбышев:  
Куйбышевский МТЦ НТИ и П, 1991.-4с.

Учебное издание

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК ТЕПЛОВЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Методические указания*

Составитель: *Диденко Алексеи Александрович*

Технический редактор  
Редакторская обработка Т.К.Кретииниа  
Корректорская обработка ИХ .Куприянова  
Верстка А.А.Диденко  
Доверстка В.С.Телепова, Т.К.Кретииниа

Подписано в печать      Формат  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л.      Усл. кр.-отт.      Печ. л.  
Тираж              экз. Заказ              ИП- /20

Самарский государственный аэрокосмический университет.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34  
Изд-во Самарского государственного аэрокосмического  
университета. 443086, Самара, Московское шоссе, 34