

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический
университет»

Кафедра «Ракетные двигатели»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теория и
расчет жидкостных ракетных двигателей» для студентов
специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование
авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения

Воронеж 2015

Составители: д-р техн. наук В.Д. Горохов,
д-р техн. наук И.Г. Дроздов,
д-р техн. наук А.В. Кретинин

УДК 621.455

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей» специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"; сост. В.Д. Горохов, И.Г. Дроздов, А.В. Кретинин. Воронеж, 2015. 46 с.

Разработанные методические указания предназначены для студентов, выполняющих лабораторный практикум по дисциплине «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей».

Библиогр: 4 назв. Ил. 17.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Ф. Ефимочкин.

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук проф. В.С. Рачук

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета.

© ФГБОУ ВПО "Воронежский
государственный технический
университет", 2015

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

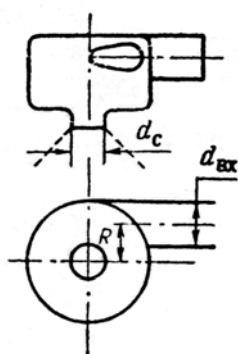
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ НА ЕЕ РАБОТУ

Целью настоящей работы является ознакомление студентов с устройством и работой центробежных форсунок.

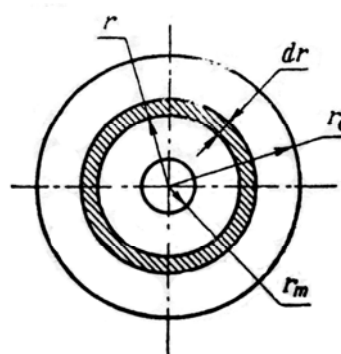
КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Теория центробежной форсунки впервые разработана Г. Н. Абрамовичем.

Центробежная форсунка (фиг. 1.1) обычно состоит из камеры закручивания, сопла диаметром d_c и подводящих каналов диаметром $d_{вх}$.



Фиг. 1.1. Центробежная форсунка



Фиг. 1.2. Разрез сопла центробежной форсунки.

Сопло располагается в центре одной из торцовых стенок, а подводящие каналы расположены тангенциально, причем расстояние R между осью канала и осью камеры является плечом закручивания.

Подаваемая в камеру жидкость закручивается в камере и вытекает через сопло. Интенсивная закрутка жидкости в камере является следствием тангенциального подвода

жидкости. Закрутку жидкости в форсунке можно осуществлять и другими путями (шнековые форсунки).

Если жидкость считать идеальной, т.е. рассматривать как невязкую и несжимаемую, то момент количества движения и механическую энергию жидкости можно считать постоянными вдоль всего тракта форсунки. В этом случае движение жидкости в камере подчиняется закону площадей, т.е. момент количества движения любой частицы в камере остается постоянным и равным начальному моменту на входе:

$$u r = v_{\text{вх}} R, \quad (1.1)$$

где u - тангенциальная составляющая скорости;

r - расстояние от оси сопла до частицы;

$v_{\text{вх}}$ - скорость на входе;

R - смещение оси подводящего канала относительно оси сопла.

Этот закон изменения скоростей соответствует безвихревому движению частиц жидкости: вращаясь вокруг оси камеры, частицы не вращаются вокруг собственной оси.

Пренебрегая разностью горизонтальных уровней на входе и выходе из форсунки напишем уравнение Бернулли:

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} + \frac{\omega^2}{2g} = \frac{p_{\text{вх}}}{\gamma} + \frac{v_{\text{вх}}^2}{2g} = \frac{p_{\tau}}{\gamma} \quad (1.2)$$

где ω - осевая составляющая скорости;

$p_{\text{вх}}$ - статическое давление на входе;

p_{τ} - полное давление (давление в резервуаре).

Из уравнений (1.1) и (1.2) следует, что по мере приближения к оси сопла тангенциальная составляющая скорости потока жидкости возрастает, а давление в нем падает, причем теоретически в центре сопла жидкость должна иметь бесконечно большую скорость и бесконечно большое отрицательное давление. Однако такой режим существовать не может и практически давление жидкости падает лишь до атмосферного, а в сопле форсунки устанавливается воздушный вихрь, на границе которого избыточное давление

будет равно нулю. Живое сечение потока жидкости, протекающей через сопло, при этом будет иметь величину

$$F = (r_c^2 - r_m^2) = r_c^2, \quad (1.3)$$

Где r_c - радиус сопла форсунки;

r_m - радиус воздушного вихря;

φ - коэффициент живого сечения или коэффициент заполнения сопла;

$$\varphi = 1 - \frac{r_m^2}{r_c^2} \quad (1.4)$$

Рассмотрим условия равновесия жидкости в камере закручивания. Выделим в струе, движущейся по соплу, кольцевой элемент радиусом r и толщиной dr (фиг. 1.2). Для уравнивания центробежных сил выделенного элемента жидкости необходима разность давлений на его боковых поверхностях. В этом случае для элемента с поверхностью, равной единице, условие равновесия можно записать следующим образом:

$$d_p = \frac{u^2}{r} dm,$$

где $dm = \frac{\gamma}{g} dr$ - масса рассматриваемого элемента.

Выражение для dr получим из закона площадей

$$ur = u_m r_m.$$

Дифференцируя, получим

$$dr = - \frac{u_m r_m}{u^2} du.$$

Используя полученные выражения, найдем

$$dp = -\frac{\gamma}{g} u du$$

и после интегрирования будем иметь

$$\frac{p}{\gamma} = -\frac{u^2}{2g} + const.$$

Постоянную интегрирования определим из условия равенства нулю избыточного давления на границе воздушного вихря ($r=r_m$)

$$const = \frac{u_m^2}{2g} + \frac{p_k}{\gamma},$$

где p_k – давление в камере двигателя.

Следовательно, избыточное давление от центробежных сил

$$p - p_k = \frac{\gamma}{2g} (u_m^2 - u^2). \quad (1.5)$$

Из уравнений (1.2) и (1.5) находим значение поступательной скорости:

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p_\phi - u_m^2}, \quad (1.6)$$

где $\Delta p_\phi = p_\tau - p_k$.

При постоянном перепаде давлений на форсунке поступательная скорость, как видно из формулы, остается постоянной: $\omega = const$.

Определим коэффициент расхода. Зная осевую составляющую скорости, найдем расход через сопло:

$$Q = \pi r_c^2 \varphi \omega,$$

отсюда

$$\omega = \frac{Q}{\pi r_c^2 \varphi}. \quad (1.7)$$

В формуле (1.6) преобразуем выражение для u_m . По закону площадей имеем

$$u_m = \frac{v_{ex} R}{r_m}.$$

Скорость на входе выразим через расход, полагая для упрощения задачи, что все частицы на входе имеют одинаковую скорость v_{ex} и одинаковое плечо закручивания R :

$$v_{ex} = \frac{Q}{\pi r_{ex}^2 n},$$

где n -число входных каналов в камеру закручивания. Окончательно из (1.6) получим

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p_\phi - \frac{R^2 Q^2}{n^2 \pi^2 r_{ex}^4 r_m^2}}. \quad (1.7a)$$

Из уравнений (1.7) и (1.7a) находим

$$\sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p_\phi - \frac{R^2 Q^2}{n^2 \pi^2 r_{ex}^4 r_m^2}} = \frac{Q}{\pi r_c^2 \varphi};$$

$$Q^2 \left(\frac{1}{\pi^2 r_c^4 \varphi^2} + \frac{1}{n^2 \pi^2 r_{ex}^4 r_m^2} \right) = \frac{2g}{\gamma} \Delta p_\phi.$$

Преобразуем левую часть. Учитывая, что на основании

$$(1.4) \frac{r_m^2}{r_c^2} = 1 - \varphi, \text{ и, обозначив через } A = \frac{R r_c}{n r_{ex}^2}, \text{ получим}$$

$$\frac{Q^2}{\pi^2 r_c^4} \left(\frac{1}{\varphi^2} + \frac{R^2 r_c^4}{n^2 r_{ex}^4 r_m^2} \right) = \frac{Q^2}{\pi^2 r_c^4} \left[\frac{1}{\varphi^2} + \left(\frac{R r_c}{n r_{ex}^2} \right)^2 \frac{r_c^2}{r_m^2} \right] = \frac{Q^2}{\pi^2 r_c^4} \left(\frac{1}{\varphi^2} + \frac{A^2}{1-\varphi} \right)$$

Геометрической характеристикой форсунки называется величина

$$A = \frac{R r_c}{n r_{ex}^2}. \quad (1.8)$$

Таким образом, формула для определения расхода через сопло будет иметь вид

$$Q = \frac{\pi r_c^2}{\sqrt{\frac{1}{\varphi^2} + \frac{A^2}{1-\varphi}}} - \sqrt{2g \frac{\Delta p_\phi}{\gamma}} \quad (1.9)$$

Отсюда коэффициент расхода, являющийся отношением действительного расхода жидкости Q к теоретическому $Q_{теор}$, будет

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\varphi^2} + \frac{A^2}{1-\varphi}}} \quad (1.10)$$

Из формулы (1.10) видно, что коэффициент расхода представляет собой функцию двух параметров: геометрической характеристики форсунки A и коэффициента заполнения сопла φ .

Анализ формулы (1.10) показывает, что при $\varphi=0$ и $\varphi=1$ коэффициент расхода $\mu=0$. Это же следует и из физических соображений. В самом деле, при малых φ площадь живого сечения потока мала, так как воздушный вихрь занимает почти всю площадь сопла. В этом случае соответственно будет малым и расход жидкости. Наоборот, при больших φ радиус воздушного вихря должен быть

небольшим, вследствие чего большая часть энергии будет тратиться на закрутку жидкости, а осевая составляющая скорости в сопле – падать. Ясно, что и в этом случае расход через форсунку уменьшится. Следовательно, имеется такой оптимальный режим истечения, на котором при данном давлении через форсунку проходит максимальный расход. Это и есть принцип максимального расхода, предложенный Г.Н.Абрамовичем.

Определим размер вихря или, что то же самое, величину коэффициента заполнения, который соответствует оптимальному режиму. Для этого продифференцируем выражение (1.10) по φ и результата приравняем нулю:

$$\frac{\partial \mu}{\partial \varphi} = \frac{1}{-2 \sqrt{\left(\frac{1}{\varphi^2} + \frac{A^2}{1-\varphi}\right)^3}} \left(-\frac{2}{\varphi^3} + \frac{A^2}{(1-\varphi)^2} \right) = 0.$$

Поскольку $0 < \varphi < 1$, выражение $\frac{1}{-2 \sqrt{\left(\frac{1}{\varphi^2} + \frac{A^2}{1-\varphi}\right)^3}}$ не

может быть равно нулю, кроме случаев $\varphi=0$ и $\varphi=1$, которые здесь не рассматриваются.

Следовательно,

$$\frac{A^2}{(1-\varphi)^2} - \frac{2}{\varphi^3} = 0 \text{ и } \frac{A^2 \varphi^3 - 2(1-\varphi)^2}{\varphi^3 (1-\varphi)^2} = 0.$$

В последнем выражении при условии $0 < \varphi < 1$ знаменатель не может быть равен нулю. Поэтому

$$A^2 \varphi^3 - 2(1-\varphi)^2 = 0.$$

Отсюда легко получить зависимость между A и φ :

$$A = \frac{(1-\varphi)\sqrt{2}}{\varphi\sqrt{\varphi}}. \quad (1.11)$$

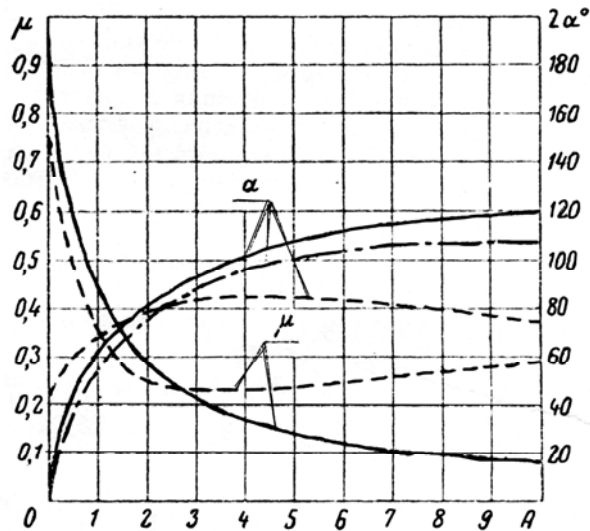
Подставив выражение (1.11) в формулу (1.10), найдем зависимость коэффициента расхода от коэффициента заполнения:

$$\mu = \sqrt{\frac{\varphi^3}{2-\varphi}}. \quad (1.12)$$

Таким образом, мы нашли выражение для A и для μ в виде функции одного аргумента φ .

Задаваясь различными значениями параметра φ в пределах от 0 до 1, легко получить зависимость коэффициента расхода μ от геометрической характеристики форсунки A (фиг.1.3).

Заметим, что такой путь нахождения $\mu=f(A)$ с помощью двух уравнений в параметрической форме оказывается менее трудоемким, чем нахождение непосредственной связи $\mu=f(A)$, так как при отыскании функции $\varphi=f(A)$ из выражения (1.11) получается кубическое уравнение, решение которого в общем виде представляет значительные трудности.



Фиг. 1.3. Зависимость коэффициента расхода и угла конуса распыла от геометрической характеристики форсунки.
 ————— для идеальной жидкости, - - - - - для реальной жидкости, - · - · - · для реальной жидкости с учетом нагрева.

Геометрическая характеристика форсунки может изменяться в пределах от нуля до бесконечности, при этом коэффициент расхода уменьшается от единицы до нуля.

В случае шнековой форсунки выражение для геометрической характеристики принимает вид:

$$A = \frac{Rr_c \pi}{nF_{вх}} \sin \beta, \quad (1.13)$$

где $F_{вх}$ – площадь поперечного сечения входного канала;

β – угол между направлением входного канала и осью сопла.

Таким образом, зная геометрические размеры форсунки, можно определить коэффициент расхода и найти

секундный весовой расход через форсунку, пользуясь следующей зависимостью:

$$G_{сек} = \pi r_c^2 \mu \sqrt{2g\gamma(p_\tau - p_k)}. \quad (1.14)$$

Остается только определить угол распыла факела. Если не учитывать силу веса и вязкость воздуха, частичке жидкости, вылетая из сопла, будут иметь прямолинейные траектории, так как на капли не действуют внешние силы и они движутся по инерции. Направление их движения совпадает с направлением результирующей скорости в выходном сечении сопла и определяется сложением тангенциальной и осевой составляющих скорости.

В действительности факел распыла представляет собой усеченный гиперболоид, основанием которого является окружность сопла. Учитывая, что сопла современных форсунок имеют незначительные размеры, величиной радиуса этой окружности можно пренебречь и практически считать, что она стягивается в точку. При этом допущении факел распыла можно рассматривать как конус с углом 2α при вершине, который приближенно определяется отношением среднего значения тангенциальной и осевой скоростей (последнюю можно в первом приближении принять постоянной по сечению)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{u_{cp}}{\omega},$$

где α – половина угла при вершине конуса распыла.
По закону площадей

$$u_{cp} = \frac{u_c r_c}{r_{cp}}.$$

Для упрощения за средний радиус примем величину

$$r_{cp} = \frac{r_c + r_m}{2}.$$

Из закона площадей и закона неразрывностей можно получить

$$u_c = \frac{v_{ex} K}{\kappa_c} \quad \text{и} \quad v_{ex} = \omega \varphi \frac{r_c^2}{r_{ex}^2}$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega \varphi r_c^2 R r_c}{r_{ex}^2 r_c (r_c + r_m) \omega} = \frac{2 \varphi A}{1 + \frac{r_m}{r_c}}.$$

Из (1.4) имеем $\frac{r_m}{r_c} = \sqrt{1 - \varphi}$, а из (1.11) $A = \frac{(1 - \varphi) \sqrt{2}}{\varphi \sqrt{\varphi}}$.

Находим окончательно

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(1 - \varphi) \sqrt{8}}{(1 + \sqrt{1 - \varphi}) \sqrt{\varphi}}. \quad (1.15)$$

Мы получили формулу, связывающую угол конуса распыла с коэффициентом заполнения сопла φ . Используя тот же прием, что и при определении $\mu = f(A)$, найдем $\operatorname{tg} \alpha = f(A)$. Зависимость $2\alpha = f(A)$ представлена на фиг. 1.3.

Итак, зная основные геометрические размеры форсунки ($R, r_c, r_{вх}$), можно определить геометрическую характеристику A , коэффициент расхода μ и угол распыла 2α или, задавшись одним из последних трех параметров (обычно углом распыла 2α), определить геометрические размеры форсунки.

Рассмотрим кратко важнейшие особенности работы центробежной форсунки.

Принцип максимального расхода

Случай оптимального режима истечения, соответствующий максимальному расходу через сопло форсунки, связан с интересным физическим явлением, которое было отмечено и изучено Н.И.Новиковым, Г.Н.Абрамовичем и В.И.Скобелкиным. Оно заключается в следующем. Течение жидкости в кольцевом канале между стенкой сопла и воздушным вихрем аналогично течению жидкости в открытых каналах. Как показал Н.Е.Жуковский, в случае установившегося течения в таком канале скорость потока не может превосходить определенной величины $c = \sqrt{gh}$, где c – скорость распространения длинных волн на свободной поверхности жидкости, находящейся в поле земного тяготения (гравитационной волны), h – глубина канала. В сопле форсунки жидкость находится в поле центробежных сил (гравитационными силами можно пренебречь). В этом случае также существует максимальная скорость течения жидкости, равная скорости распространения волн на ее свободной поверхности под действием центробежных сил. Этой скорости и соответствует максимальный расход через форсунку.

Размеры воздушного вихря.

Мы считали, что диаметр воздушного вихря постоянен по всей длине камеры и сопла форсунки. Однако, это не так. В действительности диаметр вихря у среза сопла больше, чем у задней стенки. Диаметр вихря зависит от величины тангенциальной скорости жидкости, а величина последней определяется уравнением

$$\omega^2 + u^2 = \frac{2g\Delta p_\phi}{\gamma}, \quad (1.16)$$

из которого видно, что чем больше осевая скорость ω , тем меньше тангенциальная скорость u , так как полное давление постоянно во всем объеме жидкости.

Осевая скорость не одинакова по длине камеры. Так, у днища камеры осевая скорость жидкости равна нулю и вся энергия идет на создание тангенциальной скорости, поэтому и диаметр вихря здесь будет минимальным. У среза сопла давление жидкости должно быть равно атмосферному, в то время как в сопле избыточное давление в слое жидкости возрастает при приближении к стенке, что следует из ранее полученной формулы (1.5):

$$p = \frac{\gamma}{2g}(u_m^2 - u^2).$$

Поэтому у среза сопла происходит преобразование избыточного давления, обусловленного центробежными силами, в осевую скорость, которая возрастает от центра к периферии. Вследствие увеличения осевой скорости у среза сопла толщина жидкой пленки уменьшается, т.е. диаметр воздушного вихря увеличивается.

Это увеличение осевой скорости не сказывается на величине коэффициента расхода, так как условие неразрывности не нарушается, но зато ведет к уменьшению угла распыла, так как величина тангенциальной скорости при этом падает вследствие увеличения диаметра вихря, а осевая скорость увеличивается.

Сравнение теории форсунки для идеальной жидкости с результатами эксперимента

Рассмотрим течение вязкой жидкости через центробежную форсунку с учетом трения жидкости о стенки камеры закручивания. Можно показать, что момент количества движения в этом случае будет постепенно уменьшаться на пути жидкости к соплу по сравнению с начальным (на входе в форсунку). Изменение момента

количества движения в результате трения о стенки камеры описывается следующей приближенной формулой:

$$M = \frac{M_0}{1 - \xi \sqrt{16 \frac{B^2}{n} + 1}}, \quad (1.17)$$

где $\xi = \frac{\lambda}{8} \frac{R - r_c}{r_{ex}}$ - коэффициент гидравлических

потерь;

$B = \frac{R}{r_{ex}}$ - безразмерный геометрический критерий;

λ - коэффициент трения;

M_0 - момент количества движения жидкости на входе в форсунку.

Полагая течение жидкости турбулентным, принимаем $\lambda \leq 0,2$ и из конструктивных соображений выбираем $B \leq 16$; тогда приближенно получим

$$M = \frac{M_0}{1 + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{B^2}{n} - A \right)}. \quad (1.18)$$

Если $\frac{B}{n} \geq 1$, то ошибка при этом не превышает 1%,

если $\frac{B}{n} < 1$, а $n \leq 6$, то ошибка не превышает 1-2%. Итак, из выражения (1.18) видно, что при учете трения жидкости о стенки камеры закручивания момент количества движения падает с ростом коэффициента трения λ и комплекса $\left(\frac{B^2}{n} - A \right)$, характеризующего геометрию проточной части форсунки.

Преобразуем комплекс $\left(\frac{B^2}{n} - A\right)$ следующим

образом:

$$\frac{B^2}{n} - A = \frac{R^2}{r_{\text{ex}}^2} - \frac{Rr_c}{nr_{\text{ex}}^2} = \frac{Rr_c}{nr_{\text{ex}}^2} \left(\frac{R}{r_c} - 1\right) = A \left(\frac{R}{r_c} - 1\right) = A(C - 1)$$

Отсюда ясно, что момент количества движения жидкости (согласно выражению (1.18)) падает с ростом геометрической характеристики A и коэффициента закрытия сопла $C = \frac{R}{r_c}$. При наличии трения также наблюдается

уменьшение общего запаса энергии, которым, однако можно пренебречь ввиду его незначительной величины.

Проследим влияние уменьшения момента количества движения на изменение коэффициента расхода и угла распыла.

Коэффициент расхода

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{A_3^2}{1-\varphi} + \frac{1}{\varphi^2}}}, \quad (1.19)$$

где A_3 – эквивалентная геометрическая характеристика центробежной форсунки

$$A_3 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{B^2}{n} - A\right)}. \quad (1.20)$$

В случае шнековой форсунки

$$A_3 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{B^2}{n} \sin \beta - A\right)}. \quad (1.20a)$$

Так как принцип максимального расхода справедлив и для вязкой жидкости (скорость распространения длинных волн одинакова для вязкой и идеальной жидкостей), то зависимость остается прежней (1.11):

$$A_3 = \frac{(1 - \varphi\sqrt{2})}{\varphi\sqrt{\kappa}}.$$

Следовательно, чтобы определить коэффициент расхода в случае вязкой жидкости, достаточно воспользоваться тем же графиком (см. фиг 1.3), заменив лишь геометрическую характеристику A эквивалентной характеристикой A_3 .

Уменьшение момента количества движения пропорционально уменьшению величины геометрической характеристики

$$\frac{A_2}{A} = \frac{M}{M_0}.$$

Так как коэффициент расхода μ возрастает, а угол распыла α убывает с уменьшением A , то легко заметить, что в результате учета трения коэффициент расхода увеличивается, а угол распыла уменьшается.

Выражение эквивалентной характеристики можно записать в следующем виде:

$$A_3 = \frac{Rr_c}{nr_{\text{вх}}^2 + \frac{\lambda}{2}R(R - r_c)}.$$

(1.21)

Увеличить значение A_3 , можно двумя путями: увеличивая плечо закручивания R или уменьшая размеры входных каналов $r_{\text{вх}}$. В случае вязкой жидкости эти пути ограничены. Так, при увеличении R существует максимальное значения A_{3R}

$$A_{эR} = \frac{D\sqrt{\frac{2}{\lambda n}}}{2 - D\sqrt{\frac{\lambda}{2n}}},$$

где $D = \frac{r_c}{r_{ex}}$, а при уменьшении $r_{вх}$

$$A_{эmax} = \frac{2}{\lambda(C-1)}$$

Приведенные значения $A_{эR}$ и $A_{эГВХ}$ в случае вязкой жидкости являются предельными и ограничивают значения μ и α (вследствие так называемого вязкого барьера).

Если необходимо получить больший угол распыла, нужно сокращать «путь трения» в форсунке. Например, при $R=r_c$ «путь трения» равен нулю (1.21) и в этом случае

$$A_э = \frac{r_c^2}{nr_{ex}^2}.$$

Таким образом, увеличить $A_э$ можно путем уменьшения $r_{вх}$

Итак, в случае вязкой жидкости необходимо, кроме геометрической характеристики A , учитывать другой критерий $B = \frac{R}{r_{ex}}$, который оказывает сильное влияние на

величину отношения $\frac{\mu_э}{\mu_{ид}}$. При $B=10\dots15$ это отношение может возрасти в 3-4 раза. С увеличением расхода через форсунку отношение $\frac{\mu_э}{\mu_{ид}}$ падает, что указывает на зависимость коэффициента трения от расхода.

Экспериментальная связь коэффициента трения с числом

$\text{Re} \left(\text{Re} = \frac{v_{\text{ex}} d_{\text{ex}}}{\nu} \right)$ может быть представлена формулой

$$\lg \lambda = \frac{25,8}{(\lg \text{Re})^{2,58}} - 2. \quad (1.22)$$

Учет поправки трения следует производить в том случае, когда μ , превышает $\mu_{\text{ид}}$ на 10-15%.

На гидравлические характеристики центробежной форсунки оказывает влияние также ряд конструктивных факторов.

Увеличению коэффициента расхода и уменьшению угла распыла способствуют:

1. Трение жидкости о стенки камеры закручивания;
2. Увеличение высоты камеры;
3. Отклонение потока во входных каналах к оси камеры.

Уменьшению коэффициента расхода и увеличению угла распыла способствуют:

1. Сужение потока во входных каналах;
2. Раскрытие сопла;
3. Сжатие потока при входе в камеру закручивания.

Описание установки

На фиг.1.4. приведена схема установки. Испытуемая форсунка 1 установлена в прозрачной камере 2. Жидкость, пройдя через форсунку, собирается в нижней части камеры и в зависимости от положения заслонки 3 попадает в сливной бачок 4 или в сборную емкость 5. Из сборной емкости жидкость через кран 6 сливается в мерный сосуд 7 для последующего взвешивания.

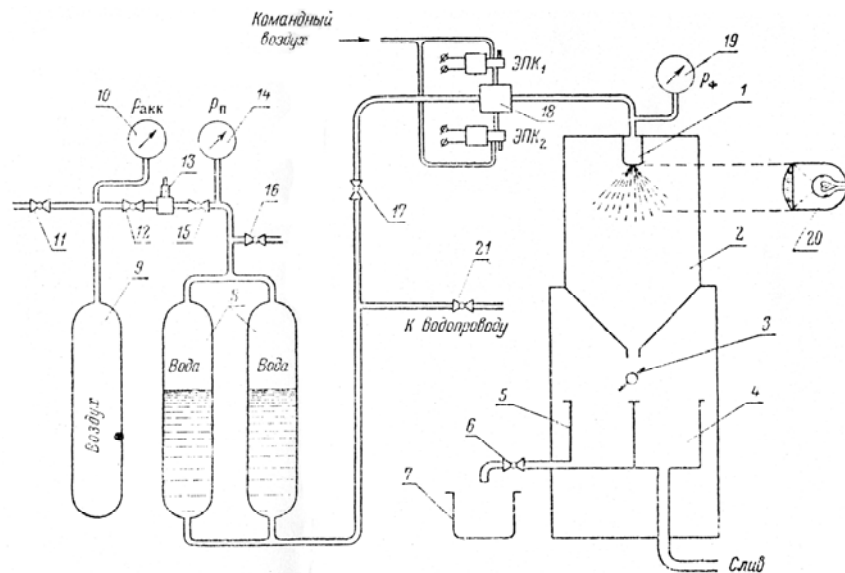
Питание форсунки компонентом (в данном случае водой) обеспечивается вытеснительной системой подачи. Вода из баков 8 вытесняется сжатым воздухом, находящимся в баллоне 9 под давлением 100-150 ат. Это давление измеряется манометром 10. Зарядка баллона производится через кран 11. Из баллона сжатый воздух через кран 12 поступает к редуктору 13, который настраивается на давление подачи, измеряемое манометром 14.

Пройдя через редуктор, воздух при открытом кране 15 попадает в баки с водой. Выпуск воздуха из баков может быть произведен через кран 16. Из баков вода через дроссельный кран 17 поступает к гидропневмоклапану 18 и дальше к форсунке 1. Манометр 19 измеряет перепад давления жидкости на форсунке, так как камера негерметична и сообщена с атмосферой.

Подача и отсечка жидкости осуществляется гидропневмоклапаном 18, управляемым двумя электропневмоклапанами: ЭПК₁ и ЭПК₂. Конус распыла форсунки фиксируется путем зарисовки его тени, отбрасываемой на кальку, приложенную к стенке прозрачной камеры. При этом камера освещается специальным источником света 20, имеющим конденсаторное устройство, дающее параллельный пучок света.

Баки 8 заполняются водой из водопровода через кран 21 при открытом в атмосферу кране 16.

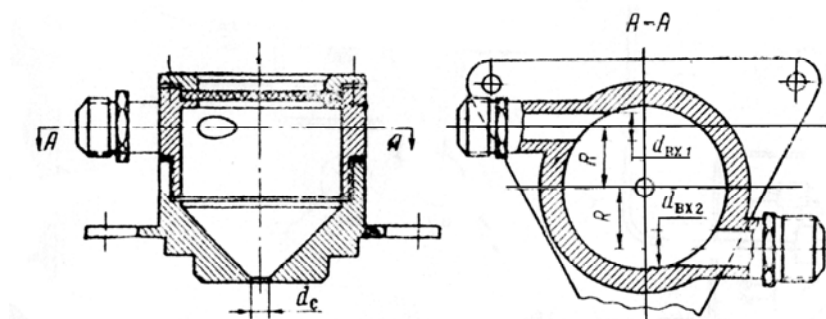
Крепление форсунок в камере выполнено легкоъемным.



Фиг. 1.4. Схема установки для испытания форсунок.
 1 – испытуемая форсунка; 2 – камера с прозрачными стенками; 3 – перекидная заслонка; 4 – бачок для слива жидкости; 5 – сборная емкость; 6 – кран слива;
 7 – мерный сосуд; 8 – баки высокого давления;
 9 – баллон со сжатым воздухом; 10 – манометр высокого давления воздуха; 11 – кран зарядки воздушного баллона; 12 – расходный кран воздушного баллона;
 13 – воздушный редуктор; 14 – манометр давления подачи; 15 – кран включения системы; 16 – дренажный кран рабочих емкостей; 17 – дроссельный кран;
 18 – гидropневмоклапан включения форсунки;
 19 – манометр давления жидкости перед форсункой;
 20 – источник света с параллельным пучком лучей;
 21 – кран заполнения рабочих емкостей.

Порядок проведения работы.

При проведении работы исследуется несколько форсунок различной конструкции. Основные характеристики снимаются на специальной форсунке с переменными параметрами.



Фиг. 1.5. Конструкция исследуемой форсунки со сменными соплами, различными диаметрами входных отверстий и прозрачным дном.

Из фиг.1.5 видно, что форсунка имеет прозрачное дно, сменные сопла и два входных тангенциальных патрубка с отверстиями различного диаметра.

Работу проводить в следующем порядке:

1. Продемонстрировать воздушный вихрь и три режима распыла («пузырь», «тюльпан» и «нормальный конус»). Опыт проводить на демонстрационной форсунке с прозрачным дном. Режим работы установить путем подбора перепада давлений на форсунке. Замеры при этом не производить.

2. Получить зависимости коэффициента расхода и угла распыла от геометрической характеристики форсунки $\mu = f(A)$, $2\alpha = f(A)$. При этом использовать ту же форсунку. Во время проведения опыта установить последовательно: $r_{вх1} = 6\text{мм}$, $r_{вх2} = 8\text{мм}$, $r_{с1} = 3\text{мм}$, $r_{с2} = 3,5\text{мм}$ при постоянном плече

закручивания $R=27\text{мм}$ и сделать четыре замера, соответствующих четырем значениям геометрической характеристики

$$A = \frac{Rr_c}{nr_{\text{вх}}^2}.$$

Давление на входе в форсунку выбирать в пределах 2-5 ат и поддерживать постоянным. Во время проведения опыта замерять следующие параметры:

1. давление на входе в форсунку $p_{\text{вх}}$ ат;
2. угол распыла $2\alpha^\circ$;
3. время заполнения мерного объема τ сек;
4. вес жидкости в мерном объеме G кг.

3. Снять характеристику для определения зависимости отношения экспериментального коэффициента расхода к теоретическому в функции перепада давлений на форсунке:

$$\frac{\mu_{\text{э}}}{\mu_{\text{ид}}} = f(\Delta p_{\phi})$$
 (на той же форсунке для одного

постоянного значения геометрической характеристики $A=\text{const}$).

Давление на входе в форсунку в этом случае изменять в пределах 5-0,5 ат. Произвести три-четыре замера следующих параметров:

1. давление на входе в форсунку $p_{\text{вх}}$ ат;
2. время заполнения мерного объема τ сек;
3. вес жидкости в мерном объеме G .

(По усмотрению преподавателя можно измерять также

угол распыла для выявления зависимости $\frac{\mu_{\text{э}}}{\mu_{\text{ид}}} = f(\Delta p_{\phi})$).

4. Снять расходные характеристики двух форсунок одного из существующих двигателей. При этом замерить:

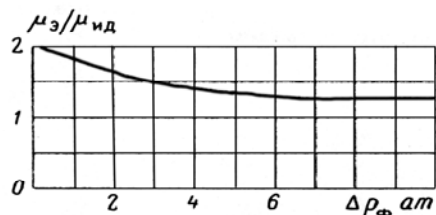
1. давление на входе в форсунку $p_{\text{вх}}$ ат;
2. время заполнения мерного объема τ сек;
3. вес жидкости в мерном объеме G .

Для каждой форсунки произвести не менее четырех замеров. Давления на входе в форсунку изменять в пределах 2-10 ат. Величины давлений при замерах для обеих форсунок желательно иметь одинаковыми (по усмотрению преподавателя можно измерять также угол распыла $2\alpha^\circ$ и его изменение нанести на график).

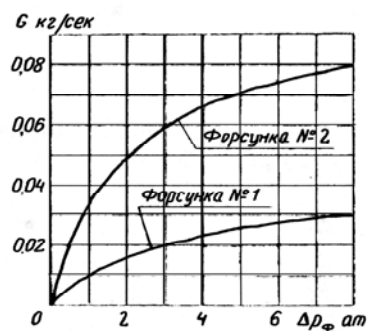
5. Продемонстрировать работу нескольких форсунок существующих двигателей (запирающиеся форсунки, форсунки с косым срезом и форсунки с острой и скругленной кромкой). По усмотрению преподавателя дополнительно можно снять также расходную характеристику запирающейся форсунки и сравнить ее с расходной характеристикой открытой форсунки при одном и том же значении A .

Обработка результатов опыта

После проведения испытаний следует обработать экспериментальные данные.



Фиг. 1.6. Зависимость отношения коэффициентов расхода экспериментального к идеальному от величины перепада давления на форсунке.



Фиг. 1.7. Расходные характеристики форсунок

1. Расчет производить по следующим формулам:

$$A = \frac{Rr_c}{nr_{ex}^2}; \quad F_c = \pi r_c^2 \text{ мм}^2; \quad Q = \frac{G}{\tau\gamma} \text{ см}^3/\text{сек};$$

$$F_{BX} = \frac{\pi d_{ex}^2}{4} \text{ мм}^2; \quad \Delta p_\phi = \Delta p_{ex} + \frac{v_{ex}^2 \gamma}{2g} \text{ кг/м}^2;$$

$$v_{ex} = \frac{Q}{10^4 F_{ex}} \text{ м/сек}; \quad \mu_\varepsilon = \frac{Q_\varepsilon}{F_c \sqrt{\frac{2g\Delta p_\phi}{\gamma}}}$$

где A – геометрическая характеристика форсунки;

G – количество жидкости в мерном сосуде в кг;

τ – время заполнения мерного сосуда в сек.;

F_{BX} – площадь подводящего трубопровода в мм²;

Δp_ϕ – перепад давления на форсунке в кг/м²;

Δp_{ex} – перепад давления на входе в форсунку;

v_{ex} – входная скорость в м/сек;

μ – коэффициент расхода.

Данные экспериментов и расчетов заносятся в протокол. Полученные данные значения μ – коэффициента расхода и $2\alpha^\circ$ – угла распыла наносятся в виде точек на соответствующие теоретические кривые (см. фиг.1.3.).

Зависимость $\frac{\mu_\varepsilon}{\mu_{ид}} = f(\Delta p_\phi)$ построить в виде графика,

показанного на фиг.1.6 причем $\mu_{ид}$ выбирается для заданного значения A из графика (фиг.1.3).

2. При снятии расходных характеристик расчет производить по формуле

$$Q = \frac{G}{\tau\gamma} \text{ л/сек.}$$

Кривые расходных характеристик строятся в координатах $Q = f(\Delta p_\phi)$ или $G = f(\Delta p_\phi)$, как это показано на фиг.1.7.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛА ЖИДКОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКОЙ

Целью настоящей работы является определение влияния плотности среды на мелкость распыла и на распределение распыленной жидкости по радиусу факела.

СПОСОБЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ФОРСУНОК

Большинство камер ЖРД снабжено центробежными форсунками различных типов. Широкое распространение центробежных форсунок в камерах сгорания двигателей объясняется простотой их распыления.

Работу форсунки характеризуют следующие параметры:

- 1) максимальный расход и максимальный перепад давлений жидкости на форсунке;
- 2) коэффициент расхода μ , входящий в уравнение секундного расхода

$$G_{сек} = \mu F_c \sqrt{2g\tau_{ж} \Delta P_{\phi}}, \quad (2.1)$$

где F_c – площадь выходного сечения сопла;

$\tau_{ж}$ – удельный вес жидкости;

ΔP_{ϕ} – перепад давлений на форсунке;

- 3) угол консула распыла, измеренный у среза сопла форсунки (корневой угол факела);

- 4) величина, характеризующая мелкость распыливания жидкости форсункой, полученная при определенном перепаде давлений;

- 5) равномерность распределения распыленной жидкости по окружности и по радиусу факела.

Обычно максимальный расход компонента через форсунку находится в пределах 20-200 г/сек. Максимальный

перепад передал давлений жидкости на форсунке находится в пределах $8-15 \text{ кг/см}^2$.

Коэффициент расхода форсунки μ и угол конуса распыла зависят от целого ряда факторов, определяющих геометрию проточной части форсунки и режим ее работы.

Величиной, характеризующей мелкость распыливания, является средний диаметр капель, который получается при распыливании жидкости при заданном перепаде давлений.

Распределение компонента в факеле наиболее полно характеризуется полем значений удельного потока жидкости (местная расходонапряженность) в различных точках факела.

Основной характеристикой форсунки является ее расходная характеристика, связывающая величину секундного расхода жидкости через форсунку с перепадом давлений, при котором происходит истечение.

Особый интерес представляет определение влияния перепада давления на расход через форсунки при изменении давления до и после форсунки.

Важное значение имеет изучение воздействия пульсаций давления на характеристики форсунки при различном расположении источников возмущений.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТА В ФАКЕЛЕ ФОРСУНКИ

Удельным потоком, или местной расходонапряженностью, называют отношение секундного расхода топлива через площадку, расположенную перпендикулярно к оси сопла форсунки, к величине этой площадки :

Различное значение величины удельного потока жидкости в отдельных точках пространства характеризует неравномерность распределения распыленного компонента в факеле форсунки.

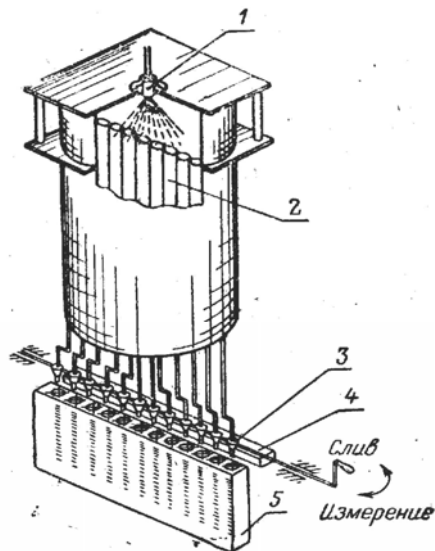
$$q = \frac{\Delta G_{сек}}{\Delta f} z / \text{см}^2 \text{сек}. \quad (2.2)$$

Неравномерность распределения компонента вокруг оси факела вызывается несимметричностью конструкции распылителя (конечное число входных каналов) и отклонениями технологического характера (эксцентричное расположение сопла по отношению к камере закручивания, различие в размерах отдельных входных каналов или в величине плеча закручивания, перекося соплового отверстия, шероховатости на смачиваемых поверхностях камеры закручивания и сопла). Наиболее сильное влияние на равномерность распределения оказывают число входных каналов, эксцентриситет сопла относительно камеры закручивания, чистота обработки соплового отверстия и входных каналов.

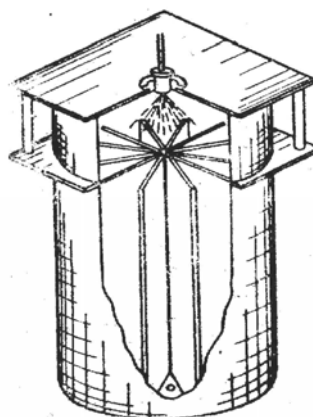
Поле удельных потоков жидкости в факеле определяется с помощью ловушек различной конструкции. На фиг. 2.1 показана ловушка, представляющая собой гребенку из трубок, отверстия которой располагаются в плоскости, перпендикулярной к оси сопла форсунки, и имеют заостренные края во избежание отражения капель от кромок трубок.

Жидкость, попавшая из форсунки 1 в отдельные трубки сборника 2, стекает по трубкам в качающиеся воронки 3, которые могут быть установлены в двух положениях: измерение и слив. При первом положении воронок жидкость стекает в мензурки 5, при втором – в сборник 4.

Для определения степени неравномерности распределения жидкости вокруг оси факела пользуются секторным сборником, схема которого показана на фиг. 2.2.



Фиг. 2.1. Прибор для определения радиального распределения распыленной жидкости.

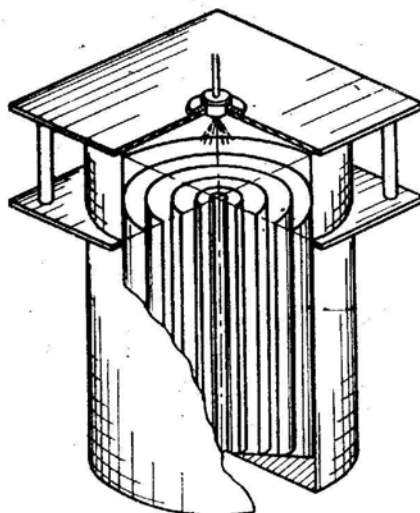


Фиг. 2.2. Прибор для определения степени неравномерности распределения жидкости вокруг оси факела.

Распределение жидкости по радиусу факела определяется с помощью кольцевого сборника, схема которого показана на фиг.2.3. Жидкость, попавшая в отдельные секторные или кольцевые ячейки, отводится в мензурки. Устройство для сбора жидкости аналогично приведенному на фиг 2.1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЛКОСТИ РАСПЫЛИВАНИЯ

На мелкость распыливания жидкости влияют геометрические и конструктивные параметры форсунки, режим работы форсунки, а также физические свойства жидкости. Кроме того, на качестве распыливания влияют плотность, температура и вязкость среды, в которую происходит истечение топлива.



Фиг. 2.3. Прибор для определения распределения жидкости по радиусу факела с кольцевым сборником.

Непосредственное измерение размеров капель чрезвычайно затруднительно. Поэтому для определения размеров капель пользуются различными косвенными методами.

Более или менее широко используются следующие способы определения мелкости распыливания.

- 1) улавливания капель распыленного компонента на пластинку, покрытую слоем сажи или какой-нибудь вязкой, не смешивающейся с компонентом, жидкости,
- 2) «радуги»,
- 3) микрофотографирования факела форсунки при освещении искровым разрядом,
- 4) «парафиновых капель».

Рассмотрим каждый из них в отдельности.

Способ улавливания капель на пластинку, покрытую слоем сажи. Этот способ является одним из простейших и поэтому одним из самых распространенных.

Идея этого способа заключается в том, что в поток капель жидкости, вылетающих из форсунки, вносится пластина, покрытая слоем сажи. На поверхность сажи обычно наносится тонкий слой белой окиси магния.

Летающие капли, ударяясь об улавливающий слой, пробивают его и образуют отпечатки (кратеры). Благодаря белой окраске наружной поверхности улавливающего слоя и черному цвету сажи отпечатки получаются достаточно четкими, что значительно облегчает их измерение.

Капли при ударе об улавливающий слой претерпевают деформации, поэтому отпечаток на слое характеризует не диаметр сферической капли, а диаметр деформированной капли. В связи с этим некоторыми исследователями были поставлены опыты по изучению соотношения между диаметром капли и диаметром ее отпечатка в условиях, когда капля ударяется о слой сажи.

Исследования показали, что это соотношение изменяется и зависит от толщины улавливающего слоя: при толщине слоя h меньшей, чем диаметр капли d , диаметры отпечатков превышают диаметр капли, причем они становятся тем более, чем больше скорость, которую успевает сохранить капля к моменту удара о слой. При относительной толщине слоя $\frac{h}{d} = 1,5$

без большой погрешности диаметр отпечатка можно принять равным диаметру капли.

Способ улавливания на сажу становится неприменимым при очень грубом или очень мелком распыливании. При грубом распыливании, когда в факеле имеются капли диаметром более 500 мк, необходимо, чтобы толщина слоя была более 0,7-0,75 мм. Если толщина превышает 07 мм, слой становится непрочным и при ударе капель легко разрушается.

При очень мелком распыливании максимальный диаметр капель достигает лишь 20-30 мк. В этом случае значительная часть капель, диаметр которых менее 10 мк, не

может быть учтена, так как они вследствие сопротивления воздуха теряют свою скорость вблизи сопла. Удара о слой не происходит. Капли оседают на слой с очень малой скоростью и не образуют отпечатков. В результате мелкие капли не учитываются и кривая распределения получается неполной.

На каждой пластинке с отпечатками капель подсчитывается число отпечатков, измеряются их диаметры и производится группировка по классам. По полученным данным строятся кривые распределения.

Способ «радуги». Не раз предпринимались попытки применить для исследования распыливания жидкостей оптические способы, основанные на законах отражения, преломления, дифракции, рассеивания света при прохождении светового пучка через дисперсные среды. Эти способы широкого распространения не получили, однако некоторые иногда применяются. Одним из них является оптический способ, основанный на явлении преломления света в капле распыленной жидкости, вызывающем появление радуги, структура которой связана с размерами капель (см. работу М. С. Волынского «Об оптическом методе измерения крупности капель распыленной жидкости»).

Способ микрофотографирования факела форсунки при освещении искровым разрядом. Считая, что наиболее правильное представление о мелкости распыливания можно получить лишь при наблюдении летящей капли, некоторые исследователи предложили способы, основанные на фотографировании факела распыленной жидкости.

Одним из таких способов является микрокиносъемка. Однако этот способ не доступен для практического применения из-за большой стоимости установки и значительных расходов на киноплёнки (для одного измерения мелкости распыливания требуется много десятков метров киноплёнки). Обработка такого количества первичного материала потребует очень много времени. Поэтому применяется другой менее трудоемкий и более доступный способ - искровое микрофотографирование факела

распыленной жидкости. Для удобства обработки фотографирование производится с десятикратным увеличением.

Обработка фотографий сводится к измерению диаметров капель, группировки их по размерам и построению кривых распределения. Число сфотографированных капель, по которым строится кривая распределения, весьма невелико, и в этом отношении искровое фотографирование не имеет каких-либо преимуществ перед способом улавливания на слой сажи.

Преимущества способа искрового фотографирования перед способом улавливания капель состоит лишь в том, что фотография дает более правильное представление о взаимном расположении капель в факеле и отчасти об их форме.

При оценке этого способа следует учитывать, что на фотографии фиксируются лишь капли, попавшие в фокус, и многие капли остаются вне фокуса. Поэтому необходимо производить измерения в нескольких плоскостях фокусировки.

Способ «парафиновых капель». Прочное место в исследовании мелкого распыливания в последнее время занял способ «парафиновых капель», разработанный применительно к форсункам ТРД. Этот способ впервые позволил достаточно точно исследовать влияние параметров работы и геометрических размеров распылителей центробежных форсунок на мелкость распыливания.

Способ «парафиновых капель», основан на принципе замены основного компонента (керосина) веществом (парафином), приобретающим при нагревании все физические свойства основного компонента и застывающем при нормальной температуре.

Если распыливать такой модельный компонент из той же форсунки и при тех же скоростях, при которых впрыскивают основной компонент, и если при этом среда, в которую производится впрыскивание, также не изменяется, то можно считать, что моделирование процесса распыливания осуществляется достаточно точно.

Капли распыленного модельного компонента (парафина), продвигаясь в воздухе, охлаждаются и затвердевают в полете. Для разделения капель по размерам используется метод просеивания застывших капель через серию сит с ячейками различных размеров. Уловленные капли разделяют на группы, причем размеры капель в каждой группе определяются размерами ячеек двух соседних сит. Количество капель одного класса определяется взвешиванием.

При использовании способа «парафиновых капель» число обрабатываемых капель достигает нескольких сотен миллионов.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЛКОСТИ РАСПЫЛИВАНИЯ

Для того чтобы количественно оценить степень распыливания (дисперсность), необходимо ввести соответствующие характеристики. Так как число капель, приходящихся на единицу объема факела, велико (около 10^6 на 1 см^3), то использование процесса распада струи целесообразно вести по статистическому методу

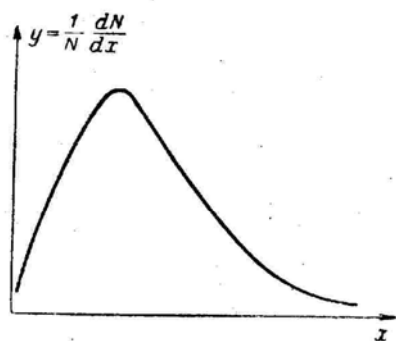
Объектами изучаемой совокупности являются отдельные капли.

Диаметр капли x есть аргумент и его значения образуют ряд совокупности. В статистике совокупность каких-либо объектов изучается путем разделения их на классы. В рассматриваемом случае это разделение соответствует разделению на классы мелкости распыливания.

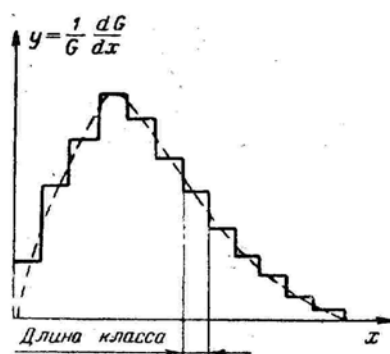
Для графического изображения характеристики мелкости распыливания служат кривые распределения капель по их диаметрам.

На фиг.2.4 изображена кривая распределения первого типа. По оси ординат отложены относительные частоты по числу капель, т.е. отношение числа капель, содержащихся в данном классе, к числу капель всей совокупности, деленное на длину класса $\frac{1}{N} \frac{dG}{dx}$, а по оси абсцисс— диаметры капель в

классов. Однако эти кривые не дают правильного представления о качестве распыливания. Например, вес капель, диаметры которых находятся в нижней части правой ветви кривой, больше, чем вес капель, диаметры которых соответствуют максимуму этой кривой. Поэтому оценка качества распыливания по этим кривым может привести к неправильным выводам.



Фиг. 2. 4. Характеристика распределения капель по диаметрам.



Фиг. 2. 5. Опытная характеристика распределения капель по диаметрам.

Целесообразно применять кривые распределения второго типа: по оси ординат откладывать вес всех капель данного класса, отнесенный к весу всех капель совокупности, деленному на длину класса.

$$y = \frac{1}{G} \frac{dG}{dx},$$

Так как кривые распределения капель по диаметру получаются в результате проведения опытов по определению размеров капель в классах конечной длины, то весовая кривая распределения приобретает ступенчатый вид (фиг. 2.5). Длины классов (ступеней) зависят от диапазона диаметров капель. Кроме того, выбор длины класса зависит от диапазона диаметров капель. Обычно выбирают для большого диапазона диаметра капель длину класса больше, а для малого диапазона меньше. Если длину класса делать все меньше и меньше и,

наконец, сделать ее бесконечно малой (при $\Delta \rightarrow 0$), то ступенчатый график превратится в гладкую кривую (как показано пунктиром на фиг. 2.5).

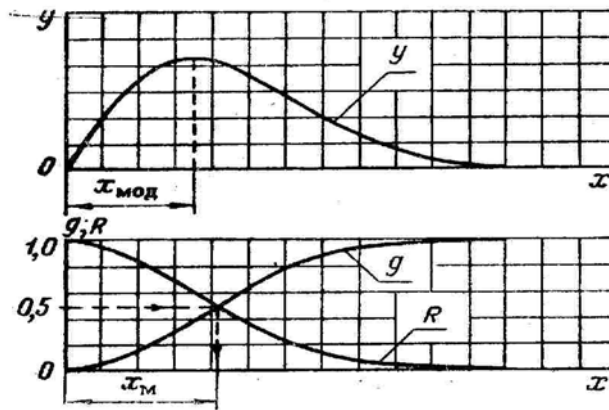
На фиг. 2.6 (на верхнем графике) по оси ординат отложено относительная весовая доля капель $\frac{dG}{G}$ в

процентах, отнесенная к длине класса $y = \frac{dG}{Gdx}$. Полученная кривая показывает распределение весовой доли компонента, вносимой каплями данного диаметра (частотная кривая).

В ряде случаев полученную совокупность капель можно характеризовать при помощи суммарных весовых кривых распределения. Суммарная весовая кривая распределения является интегральной кривой, выражающей

$$g = \int_0^x y dx$$

зависимость



Фиг. 2.6. Частотная и суммарные весовые характеристики распределения капель по диаметрам.

На фиг. 2.6 (внизу) приведен график, где по оси ординат отложены последовательно суммированные весовые количества жидкости, которую несут капли каждого класса.

Рассмотренные частотные и суммарные весовые кривые распределения капель по диаметрам представляют собой основную статистическую характеристику совокупности капель.

Иногда применяют и другой вид суммарной кривой распределения:

$$R = 1 - g, \quad (2.3)$$

где R – весовая доля капель, диаметр которой больше, чем x .

Максимум частотной кривой y соответствует точкам перегиба суммарных кривых распределения g и R (см. фиг. 2.6).

Абсцисса максимума частотной кривой y называется *модой* и представляет собой наиболее часто встречающийся диаметр капель.

Абсцисса, которая делит совокупность капель на две равные весовые части ($g=0,5$), находится на пересечении суммарных кривых g и R и называется *медианой*, или *медианным диаметром капель*.

Для наиболее правильной характеристики мелкости распыливания следует рассматривать кривую распределения в целом, а не ограничиваться только одним средним диаметром капель. В ряде случаев наряду с медианным диаметром капель $x_m = d_m$ можно использовать также величину диаметра капель $d_{0,9}$, получающуюся в результате пересечения прямой параллельной оси абсцисс, имеющую ординату $g=0,9$ с суммарной кривой распределения и характеризующую в известной мере размеры наиболее крупных капель в спектре распыливания.

Мелкость распыливания жидкости форсункой и равномерность распределения распыленного компонента в факеле зависят также от плотности среды, в которую происходит истечение. Поэтому для полного представления о работе форсунки необходимо получить опытные данные, характеризующие ее работу в условиях различной плотности газа, находящегося в камере.

Условия работы форсунки в камере двигателя отличаются от условий ее испытаний, так как плотность газов в камере сгорания значительно выше плотности атмосферного воздуха. Плотность среды может быть моделирована на специальной установке. В этом случае распыливание топлива осуществляется в камеру с повышенным давлением воздуха, которая может быть определено из следующих соображений.

Из уравнения состояния имеем

$$\gamma = \frac{p}{RT}.$$

Приравнивая удельный вес воздуха удельному весу газов в камере сгорания, получим

$$\frac{p_s}{(RT)_s} = \frac{p_\Gamma}{(RT)_\Gamma}$$

Отсюда

$$\frac{p_\Gamma}{p_s} = \frac{(RT)_\Gamma}{(RT)_s} \quad \text{и} \quad p_s = p_\Gamma \frac{(pT)_s}{(pT)_\Gamma}$$

Принимая $R_\Gamma = 33 \div 35$ кг м/кг г; $T_\Gamma = 2000^0$ абс.; $R_s = 29,3$ кг м/кг г; $T_s = 288^0$ абс., получим

$$p_s = p_\Gamma \frac{29,3 \cdot 288}{34 \cdot 2000} \approx \frac{1}{8} p_\Gamma.$$

Таким образом, давление воздуха в модельной камере должно быть приблизительно в 8 раз меньше давления в камере сгорания двигателя.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Рабочим телом на установке (фиг. 2.7) является вода, но замкнутая система циркуляции компонента позволяет применять и другие жидкости.

Вода из расходного бака 1 поступает к шестеренчатому насосу 2, который приводится в движение электродвигателем 3. Давление в напорной магистрали регулируется шунтовым краном 4. Вода от насоса поступает через фильтр 5 к отсечному

клапану 6, который управляется с помощью командного воздуха и позволяет практически мгновенно включать и отсекать расход воды. Сжатый воздух для управления отсечным краном 6 подается через постоянно настроенный редуктор 7 и трехходовый кран 9. Вода из отсечного крана поступает к форсунке. Давление на входе в форсунку контролируется манометром 10.

Форсунка помещена внутри камеры 11, давление в которой может изменяться от атмосферного до 5 ати. Сжатый воздух, необходимый для поддержания давления в камере, поступает из баллона 12 (давление в котором контролируется манометром 13) через редуктор 14 к экрану 16. Последний может быть установлен в два положения: подача давления в камеру и сброс давления из камеры. Давление в камере контролируется манометром 17.

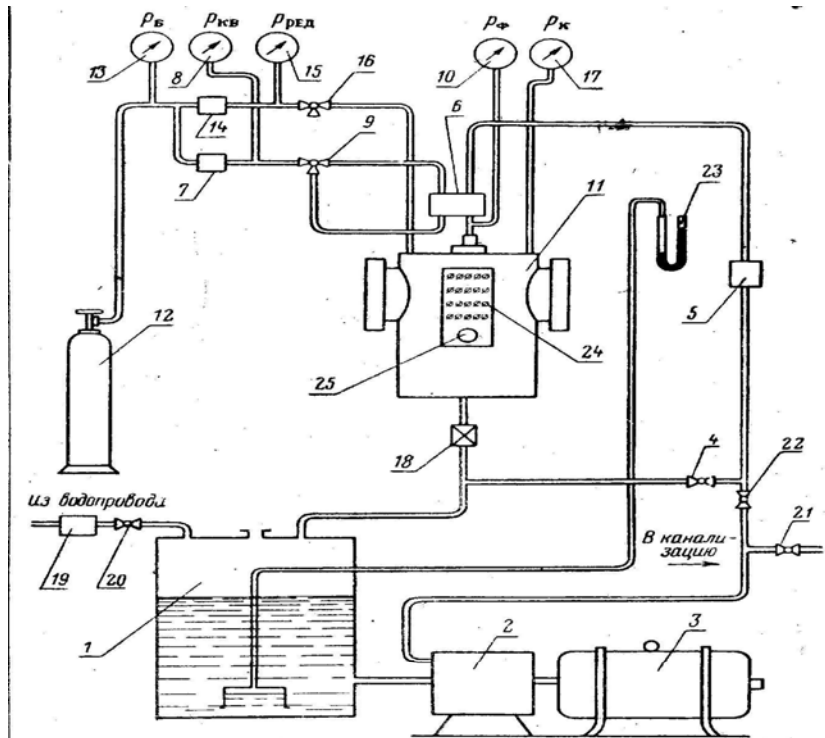
На входе из камеры установлен редукционный клапан 18. Вода из камеры сливается в расходный бак 1. Заливка воды в расходный бак производится из водопровода через фильтр 19 и заправочный кран 20.

ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПЫЛЕННОЙ ЖИДКОСТИ

Определение радиального распределения распыленной жидкости производится при помощи прибора, показанного на фиг. 2.1. Прибор представляет собой гребенку приемных трубок 2, располагаемую по диаметру факела. Внутренний диаметр трубок 8 мм, расстояние между осями трубок 10 мм. Приемное отверстие трубок во избежание отражения капель от кромок трубок имеют заостренные края.

Отобранная жидкость стекает в мензурки 5, установленные в кассете.

Для отсечки потока жидкости служат качающиеся воронки 3.

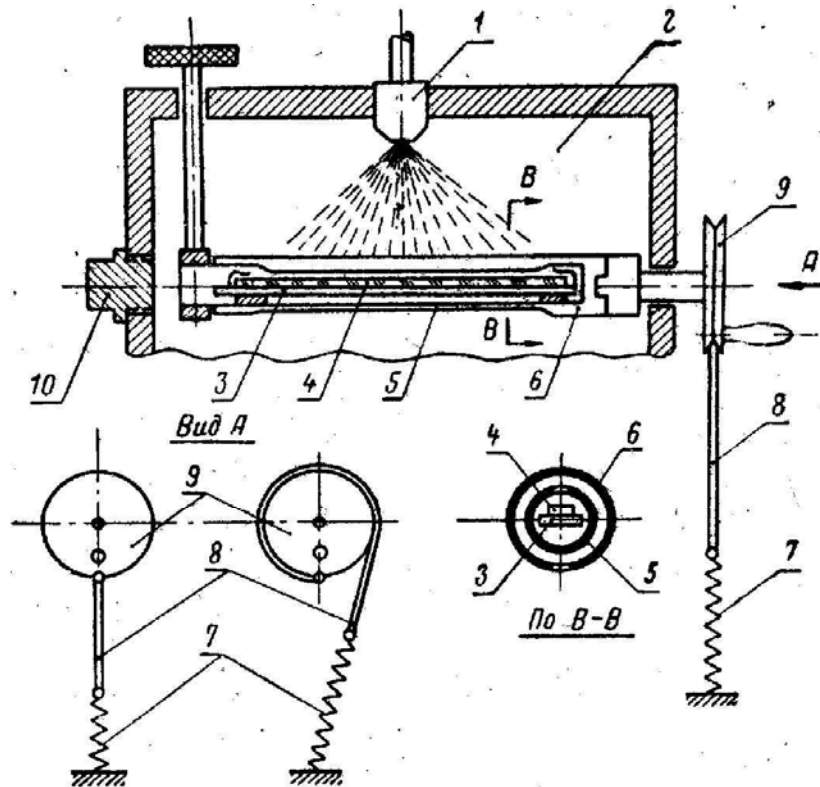


Фиг. 2. 7. Схема установки для исследования мелкости распыла центробежной форсункой.
 1 — расходный бак; 2 — шестеренчатый насос; 3 — электродвигатель; 4 — шунтовой кран; 5 — сетчатый фильтр; 6 — пневматический отсечный клапан; 7 — воздушный редуктор системы командного воздуха; 8 — манометр, измеряющий давление командного воздуха; 9 — трехходовой кран управления отсечным клапаном; 10 — манометр, измеряющий давление жидкости перед форсункой; 11 — камера; 12 — баллон для воздуха высокого давления; 13 — манометр, измеряющий давление в баллоне; 14 — воздушный редуктор камеры; 15 — манометр давления воздуха за редуктором; 16 — трехходовой кран подачи воздуха в камеру и ее дренаж; 17 — манометр давления воздуха в камере; 18 — редукционный клапан; 19 — сетчатый фильтр; 20 — заправочный кран; 21 — сливной кран; 22 — запорный кран; 23 — указатель уровня; 24 — краны отбора проб; 25 — ручка управления отсекателем.

ПРИБОР ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТПЕЧАТКОВ КАПЕЛЬ

Схема прибора представлена на фиг. 2.8. Жидкость под давлением подается в вертикально расположенную форсунку 1. перпендикулярно топливному факелу в камере 2 располагается каплеуловитель, выполненный в виде кассеты 3, на которой укреплена стеклянная пластина 4, покрытая

слоем сажи и окиси магния. Пластина помещается в неподвижной трубки 5, имеющей продольную прорезь.



Фиг. 2.8. Прибор для получения отпечатков капель.
 1 — испытуемая форсунка; 2 — камера; 3 — кассета стеклянной пластинки; 4 — стеклянная пластинка; 5 — неподвижная трубка с продольной прорезью; 6 — подвижная трубка с продольной прорезью; 7 — пружина механизма поворота; 8 — трос привода затвора; 9 — ролик затвора; 10 — заглушка.

Наружная подвижная трубка 6 также имеет продольную прорезь и может вращаться относительно внутренней трубки. Пластина 4 и прорезь неподвижной трубки всегда обращены вверх, навстречу факелу распыла.

Подвижная трубка до момента выхода на режим испытаний обращены своей прорезью вниз.

Поворот подвижной трубки осуществляется при помощи пружины 7. Перед открытием отсеченного крана тросик 8 наматывается на ролик 9 и механизм стопорится во взведенном положении. После установления режима испытаний механизм освобождается и пружина поворачивает ролик и подвижную трубку на один оборот. В момент совмещения прорезей трубок капли попадают на пластину с улавливающим слоем.

Необходимая скорость вращения трубки может быть подобрана предварительной затяжкой пружины поворотного механизма.

После отбора капель кассета с пластинкой извлекается из трубки через отверстие в стенке камеры, заглушенное при испытаниях пробкой 10. На пластине с отпечатками капель намечаются участки для исследования, которые рассматриваются при увеличении в 50-100 раз.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомится с основными способами испытания форсунок, с устройством установки (схемой, органами управления и приборами для измерения).

2. Провести опыты по определению мелкости распыливания при давлении в камере $p_k = 0 \text{ атм}$ и $p_k = 5 \text{ атм}$. Перепад давлений на форсунке поддерживать постоянным $\Delta p_\phi = 5 \text{ ат}$. Расстояние от среза сопла форсунки до закопченной пластинки $a = 130 \text{ мм}$.

Получить отпечатки капель на двух-трех режимах.

3. Определить распределение местной расходонапряженности распыленной жидкости по радиусу факела при давлении в камере $p_k = 0 \text{ атм}$ и $p_k = 5 \text{ атм}$. Перепад давления на форсунке поддерживать постоянным $\Delta p_\phi = 5 \text{ ат}$.

Расстояние от среза сопла форсунки до плоскости приемных отверстий гребенки трубок $a=130$ мм.

4. Обработать экспериментальный материал и построить графики.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

Определение влияния плотности среды на мелкость распыливания. Пластины с отпечатками капель устанавливают на стол микроскопа, снабженного измерительным окуляром, и определяют число и диаметр капель, попавших в поле зрения микроскопа. Полученную совокупность капель делят на 5-7 классов и для каждого класса подсчитывают величину g , т.е. весовую долю совокупности, составленную из капель, диаметр которых меньше d

Подсчет производится по формуле

$$g = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} G_{icce}}{\sum_{i=1}^{i=m} G_{icce}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} V_i \gamma_{ж} n_i}{\sum_{i=1}^{i=m} V_i \gamma_{ж} n_i},$$

где k - номер по порядку данного класса;

m - число всех классов в данной совокупности;

G_{icce} - вес всех капель i -того класса;

V_i - объем одной капли i -того класса;

n_i - число капель в классе;

$\gamma_{ж}$ - удельный вес жидкости.

С достаточной степенью точности можно принять, что капли имеют шарообразную форму. Тогда объем капли будет равен

$$V_i = \frac{\pi}{6} d_i^3,$$

где d_i - средний диаметр капель i -того класса.

В этом случае формула (2.4) примет вид

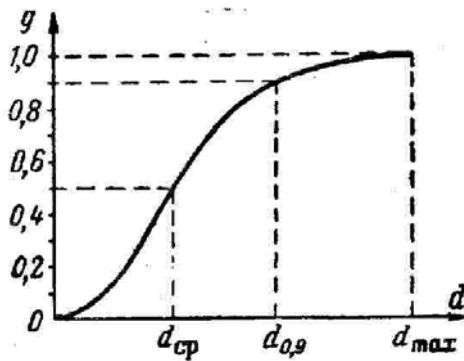
$$g = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} \frac{\pi}{6} \gamma_{жс} d_i^3 n_i}{\sum_{i=1}^{i=m} \frac{\pi}{6} \gamma_{жс} d_i^3 n_i}.$$

Сокращая численность и знаменатель на постоянный множитель, получим окончательную формулу

$$g = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} d_i n_i}{\sum_{i=1}^{i=m} d_i n_i}.$$

При построении графика $g=f(d)$ величина g откладывается в зависимости от средних диаметров капель d_i . Получение точки соединения плавной кривой, являющейся суммарной кривой распределения капель по диаметрам. (фиг. 2.9).

Определяется медианный диаметр капель $d_m=d_{ср}$ и диаметр капель $d_{0.9}$. Средний диаметр $d_{ср}$ получается в результате пересечения прямой, параллельной оси абсцисс с ординатой $g=0.5$, с суммарной кривой распределения, а $d_{0.9}$ – в результате пересечения с суммарной кривой распределения прямой с ординатой $g=0.9$.



Фиг. 2.9. Суммарная характеристика распределения капель по диаметрам.

Аналогично производится определение d_{cp} и $d_{0.9}$ при других значениях p_k .

Данные эксперимента и расчетов заносятся в протокол.

Определение влияния плотности среды на распределение распыленной жидкости по радиусу факела.

Суммированием определяется общий объем жидкости

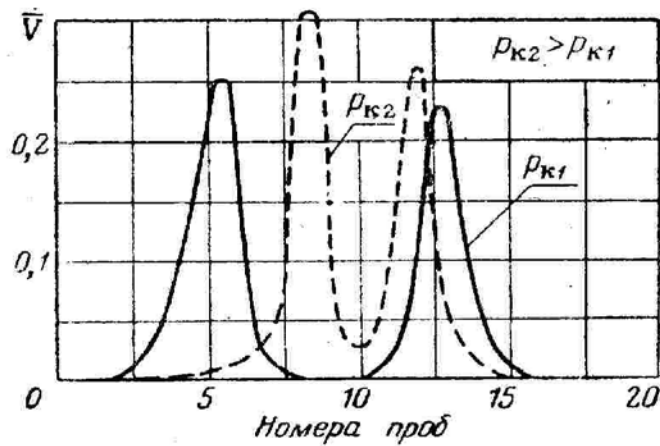
$$V_{\Sigma} = \Sigma V_i,$$

где V_i - объем жидкости в i -той мензурке.

Подсчитывается относительный расход жидкости через площадь поперечного сечения каждой заборной трубки, который при одинаковых площадях заборных трубок характеризует удельный поток жидкости:

$$\bar{V}_i = \frac{V_i}{V_{\Sigma}}.$$

Строится график распределения жидкости по радиусу факела при различных значениях p_k (фиг. 2.10).



Фиг. 2.10. Зависимость распределения распыленной жидкости по радиусу факела.

Для того чтобы результаты эксперимента сделать сравнимыми с результатами исследования форсунок других

типов, следует, кроме шкалы относительных объемов \bar{V}_i , нанести шкалу относительной объемной расходонапряженности \bar{u}_i и удельного потока q .

Определение относительной местной объемной расходонапряженности можно произвести следующим образом:

$$\bar{u}_i = \frac{\bar{V}_i}{f_i \tau} \text{ л/см}^2 \text{сек},$$

где f_i - площадь заборного отверстия трубочки сборника;

τ - время, за которое производился отбор проб.

Удельный поток, или местная расходонапряженность, может быть определена из следующего соотношения:

$$q = \frac{V_i \gamma_{ж}}{f_i \tau} \text{ г/см}^2 \text{сек},$$

где V_i - объем отобранной пробы;

$\gamma_{ж}$ - удельный вес жидкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорофеев А.А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. Общая теория ракетных двигателей/ А.А. Дорофеев. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. Электронный ресурс.

2. Методическая разработка к рубежному контролю по курсу «Общая теория двигателей летательных аппаратов» / под ред. В.Д. Курпатенкова. - М. : Изд-во МАИ, 1983. - 32 с.

3. Задачи термодинамического расчета горения топлив и истечения продуктов сгорания: учеб. пособ. для практич. занятий и семинаров / под ред. В.Д. Курпатенкова. - М. : Изд-во МАИ, 1993. - 49 с.

4. Сборник задач по основам теории и расчета ДЛА: учеб. пособие / А.А. Дорофеев, Н.И. Леонтьев, А.В. Сухов, В.А. Чернухин. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990. 67 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Лабораторная работа № 1. Влияние геометрических характеристик центробежной форсунки на ее работу	1
2. Лабораторная работа № 2. Исследование процесса распыла жидкости центробежной форсунки	25
Библиографический список	46

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теория и расчет ЖРД» по специальности 160700.65, 24.05.02
«Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения.

Составители: Горохов Виктор Дмитриевич
Дроздов Игорь Геннадьевич
Кренин Александр Валентинович

В авторской редакции

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский пр., 14