

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРСУНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ

© 2006 А.Ю. Васильев, А.И. Майорова, А.А. Свириденков, В.И. Ягодкин

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва.

Представлены результаты экспериментальных исследований и методика расчета форсуночных модулей авиационного ГТД.

Форсуночный модуль (рис.1) состоит из центробежной форсунки, осевого завихрителя и внешней цилиндрической обечайки завихрителя. Для проектирования конструкции модуля необходимо выполнить обратную (проектировочную) и прямую (поверочную) задачи расчета его основных геометрических размеров.



Рис.1 Фотография форсуночного модуля

Условиями выбора геометрических параметров форсунки являются заданные величины расхода топлива и перепада давлений, угол топливного факела на заданных режимах. При расчете воздушного завихрителя задан расход воздуха, перепад давлений на фронтальном устройстве, угол установки лопаток и проектируемый угол выхода струи газа. В целом необходимо проектировать модуль таким образом, чтобы струя топлива, выходящая из топливной форсунки, в пределах длины модуля находилась внутри застойной зоны завихрителя. Обечайка завихрителя должна иметь такую длину, чтобы топливо не попадало на ее поверхность и струи топлива проходили по середине или у внутренней границы воздушного слоя в конце обечайки, если, угол наклона пленки немного больше угла наклона воздушного слоя. В этом случае происходит эффективное дробление пленки топлива в воздушном потоке.

Гидравлический расчет простой центробежной форсунки по программе *fnozzle*,

разработанной в ЦИАМ, состоит в определении размеров сопла, камеры закручивания и входных каналов. Исходными данными являются угол раскрытия топливного факела α , массовый расход топлива G_T , его плотность ρ_T , коэффициент кинематической вязкости ν_T и перепад давлений на форсунке Δp_T . В прямом расчете по заданным геометрическим параметрам определяются расходные характеристики форсунки. Программа основана на методике, изложенной в [1]. Зависимость коэффициента трения в камере закручивания от числа Рейнольдса уточнялась на основе тестирования программы по опытам [2].

Результаты расчета коэффициента расхода форсунки и угла факела распыла приведены на рис.2. Размеры форсунки соответствуют работе [2]. Критерий Рейнольдса на рис. 2 вычислен по скорости течения на входе в камеру закручивания и диаметру отверстия, площадь которого равна суммарной площади входных каналов. Как видим из рис. 2, а, отклонение расчетного коэффициента расхода форсунки C_d от экспериментальных данных по модифицированной методике находится в пределах 7 %.

Значение угла раскрытия топливного факела зависит от способа его определения. Сплошная линия на рис. 2, б соответствует расчетному корневому углу α_k определяемому из условия

$$\operatorname{tg}(\alpha_k / 2) = u_\theta / u_x, \quad (1)$$

где u_x и u_θ - осевая и тангенциальная скорости жидкости в центре жидкой пленки на выходе из сопла. Пунктирная линия соответствует эффективному углу α_e , то есть углу разлета капель, или углу конуса топливного факела. В опытах [2] измерялся максимальный по длине факела угол. Экспериментальные точки на рис. 2, б лежат между двумя расчетными кривыми.

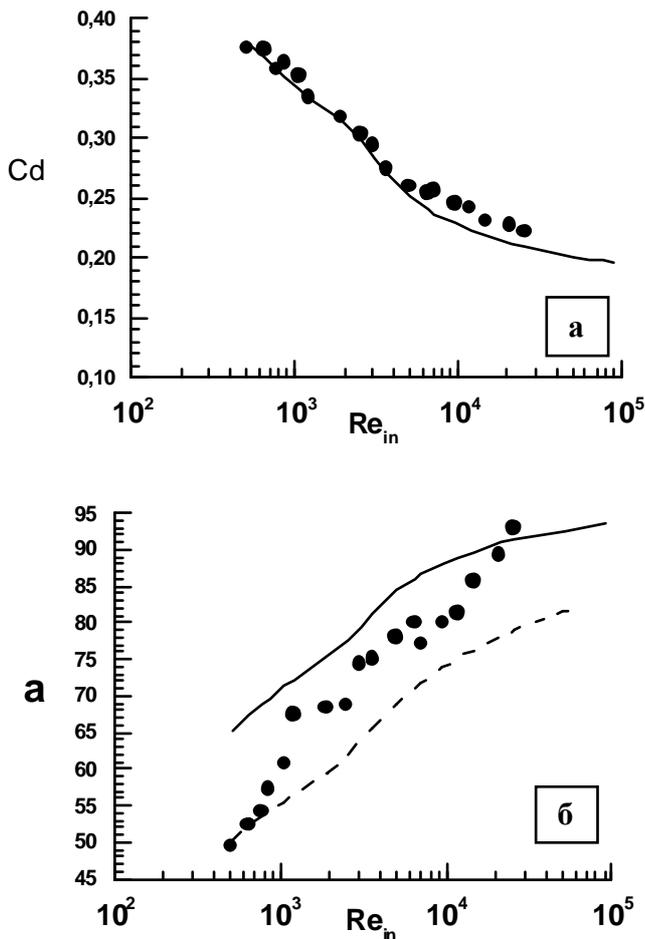


Рис.2. Зависимость коэффициента расхода форсунки (а) и угла факела (б) от числа Рейнольдса, линии – расчет; точки - эксперимент [2]

При малых расходах топлива измеренный угол ближе к эффективному; при больших расходах, когда место разрушения жидкой пленки приближается к соплу, измеренный угол ближе к корневому. Таким образом, расчет дает некоторый диапазон, в котором могут находиться измеряемые значения угла топливного факела.

Воздушный завихритель вместе с внешней обечайкой можно считать «раскрытой» газовой форсункой. Прямой и обратный расчеты газовой форсунки проводились по программе *gnozzle*, основанной на методике расчета центробежной форсунки при замене тангенциальных каналов на лопаточные.

Для согласования размеров форсунки и завихрителя и определения длины обечайки воспользуемся тем фактом, что при постоянном давлении в среде струя топлива, вытекающая из канала форсунки, лежит на по-

верхности гиперboloида вращения, описываемого уравнением [1]

$$R^2 = R_0^2 + X^2 \operatorname{tg}^2(\alpha_k / 2). \quad (2)$$

Здесь R_0 - средний радиус жидкой пленки в выходном сечении сопла форсунки.

Отсюда можно определить место пересечения пленки топлива с воздушным слоем завихрителя.

В качестве примера приведем расчет модуля, состоящего из центробежной форсунки типа ПС-90 (рис.3) с шестью тангенциальными каналами и завихрителя с цилиндрической обечайкой (рис.4).

Диаметр сопла форсунки составлял 3.8 мм, расчетный корневой угол факела для режимов $G_T = 6 \dots 149.5$ г/с изменялся в пределах $95.3-95.8^\circ$.

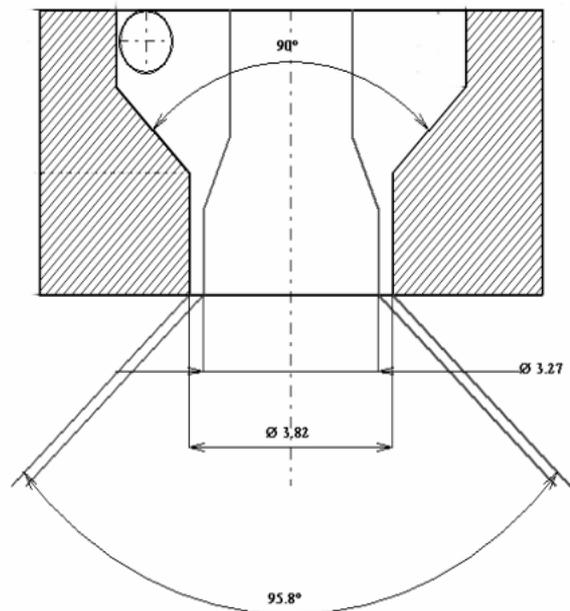


Рис.3. Схема центробежной форсунки

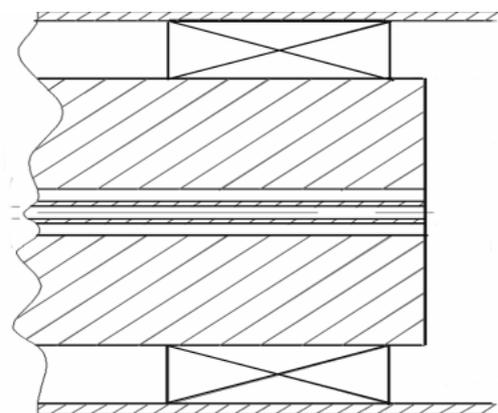


Рис.4. Схема воздушного завихрителя

Т. к для газовой форсунки числа Рейнольдса велики и влияние трения несущественно, то все расходные характеристики, кроме коэффициента расхода (и, соответственно, перепада давлений), практически не зависят от расхода газа и режимных параметров. Для всех режимов толщина слоя воздуха составляла 2.94 мм и, соответственно, радиус воздушного вихря около 14 мм.

Задав $R = 15.53$ (середина воздушного вихря завихрителя), $R_0 = 1.765$ (середина топливной пленки на выходе из сопла), получим из уравнения (2) $X = 13.94 \cong 14$ мм. Если продлить длину обечайки до 14 мм, то пленка топлива попадает в середину слоя воздуха и поэтому ее дробление будет наиболее эффективным.

Расходные характеристики форсунки, соответствующие автономным испытаниям (без завихрителя) при давлении окружающей среды 100 кПа и температуре 280 К представлены на рис.5. Среднезаутеровский диаметр капель SMD в расчете определялся по формуле Лефевра [3].

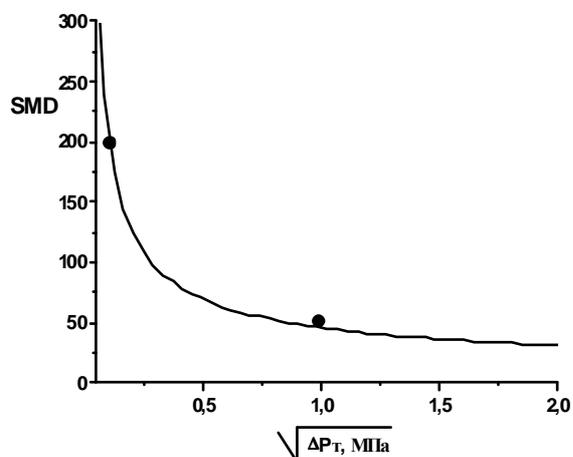
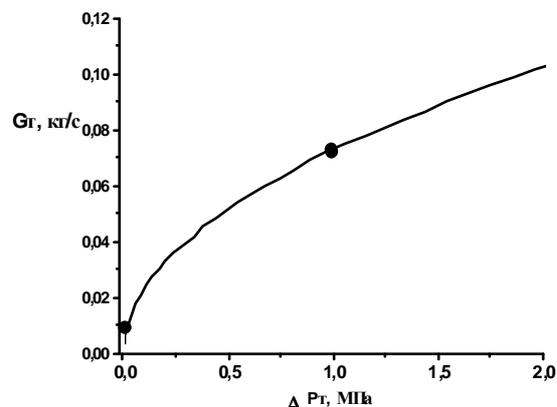


Рис. 5 Расходные характеристики форсунки; линии – расчет, точки – эксперимент авторов

$$SMD = 4.52 \left(\frac{\sigma_T \mu_T^2}{\rho_B \Delta p_T} \right)^{0.25} \left(w \cos \frac{\alpha_e}{2} \right)^{0.25} + 0.39 \left(\frac{\sigma_T \rho_T}{\rho_B \Delta p_T} \right)^{0.25} \left(w \cos \frac{\alpha_e}{2} \right)^{0.75}. \quad (3)$$

Здесь μ_T , σ_T – динамическая вязкость и коэффициент поверхностного натяжения топлива, ρ_B – плотность воздуха, w – толщина жидкой пленки в выходном сечении сопла форсунки.

Измерения размеров капель выполнялись методом рассеяния на малые углы и флуоресцентно-поляризационным методом [4]. Как видим из рис. 5, согласование расчета и эксперимента вполне удовлетворительное.

Толщина пленки в месте ее самопроизвольного распада согласно расчету, равна примерно 0.27 мм, среднезаутеровский диаметр капель при $G_T = 8.5$ г/с составляет 198 мкм в измерениях и 190 мкм в расчете. Для уменьшения размеров капель была предложена модификация форсуночного модуля. Модификация состоит в создании комбинированной форсунки с центральным отверстием для подачи воздуха по оси факела распыливания. Цели модификации состояли в создании устойчивой пленки топлива при небольших перепадах давлений топлива и воздуха и ее эффективного дробления. Следует отметить, что дополнительное подмешивание воздуха к факелу может только улучшить мелкость капель вследствие уменьшения их концентрации из-за ослабления эффекта коагуляции.

Таблица 1. Результаты измерений характеристик форсуночного модуля

№	ΔP_0 , кПа	ΔP_k , кПа	ΔP_T , кПа	G_T , г/с	SMD, мкм	$\bar{C}_V * 10^{-4}$
1	0÷18	0	13	8,5	198	23.1
2	0	4.6	12	8,5	75	16.2
3	34.5	4.6	12	8,5	54	8.3
4	5.3	5.7	12	8,5	27	9.3
5	0	5.7	11	8,3	27	9.5
6	0	9.2	10	8,3	14	5.9
7	8.8	9.0	10	8,3	13	4.9
8	3.6	8.8	12	8,3	19	8.6

Результаты измерений характеристик форсуночного модуля сведены в таблице 1.

Здесь ΔP_0 – перепад давлений воздуха в центральном канале форсунки, ΔP_k – перепад давлений воздуха на завихрителе, \bar{C}_v – осредненная объемная концентрация топлива в плоскости лазерного луча на расстоянии 40 мм от сопла форсунки.

Как видно из таблицы 1, без подачи воздуха в завихритель размеры капель порядка толщины пленки. Подача воздуха в завихритель с расходом 25 г/с уменьшает размеры капель со 198 до 75 мкм. При этом воздух, подаваемый в центральный канал форсунки, не принимает участия в распыливании, что видно из первой строчки таблицы 1. Роль центрального потока воздуха, главным образом, состоит в поддержании стабильной формы жидкой пленки, в результате чего она, утончаясь, попадает в слой закрученного воздуха и легко дробится (т.н. «эффект быстрого распыливания»).

При малых перепадах давления воздуха на завихрителе подача воздуха в центральный канал уменьшает размеры капель (с 75 мкм до 54 мкм). При дальнейшем увеличении расхода воздуха через завихритель подача воздуха через центральный канал форсунки не оказывает влияния на размер капель. Это связано с тем, что при этих режимах работы фронтального устройства происходит чисто пневматическое распыливание топлива в кольцевой струе воздуха. Размеры капель по измерениям: 27 мкм и 14 мкм, при расходах топлива – 8,3 г/с (перепад 10 кПа), а воздуха - 25 и 38 г/с.

Таким образом, эти результаты показывают, что даже простые устройства типа форсунка - завихритель с короткой цилиндрической обечайкой при их оптимизации дают существенное улучшение распыливания на режимах, близких к малому газу.

В данной работе окружная неравномерность распределения концентрации топлива в сечении факела определялась по измеренной величине интенсивности флуоресценции. Для этого использовалось изображение факела на расстоянии 40 мм от форсунки. На рис.6 показана величина неравномерности концентрации капель в виде обычной диаграммы, соответствующей методу механического определения окружной неравномерности с помощью 12 секторных отборников с углом осреднения 30°. Ис-

пользовалась так называемая относительная секторная величина неравномерности потоков массы топлива за форсунками.

В результате обработки получена важная для практики характеристика факела распыливания - окружная неравномерность концентрации, которая сильно влияет на все характеристики камеры сгорания.

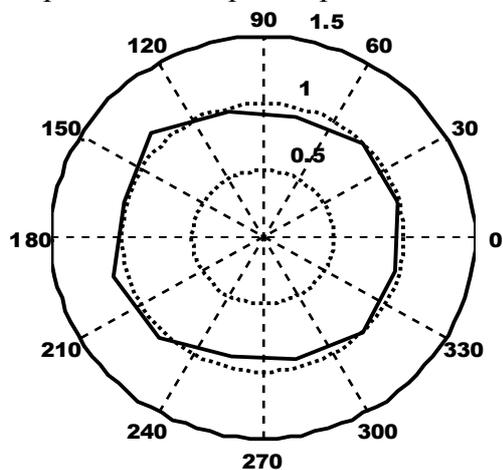


Рис.6. Окружная относительная секторная неравномерность концентрации топлива в факеле (по 12 секторам)

Видно, что неравномерность факела достаточно мала (менее 15 %), что свидетельствует о равномерности толщины пленки топлива и ее расположения внутри модуля (т.е. о хорошей симметрии течений топлива и воздуха).

Помимо представленных выше данных по измерениям в открытом пространстве авторами проводились измерения дисперсности факела распыла струйной форсунки в барокамере при повышенном давлении. Определялось распределение как средних, так и пульсационных составляющих концентрации распыленного топлива. Для определения пульсаций концентрации при постоянных параметрах режима (отклонение в расходах топлива и воздуха составляло менее 1%) проводилась многократная съемка (20 кадров) факела распыла за форсункой. По полученным фотографиям определялось среднее значение распределения концентрации и вычислялось среднеквадратичное отклонение от среднего значения. Результаты такой обработки приведены на рис.7.

Как видно из приведенного рисунка, максимальный уровень пульсаций на границе струи топлива равен 20%, что соответствует уровню пульсаций скорости в струях.

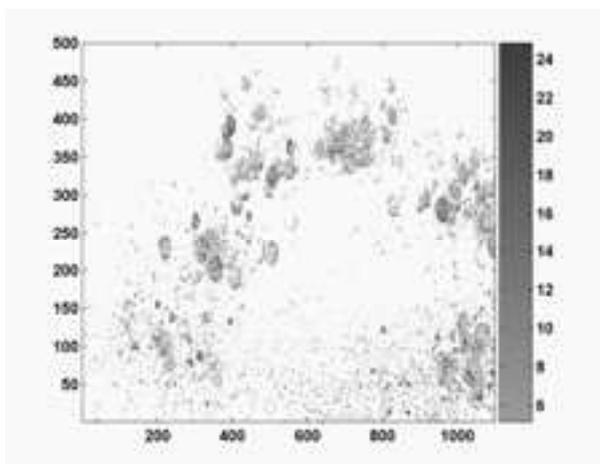


Рис. 7. Распределение пульсаций концентрации распыленного топлива C/C_{max} в барокамере. Пиксель соответствует 0.1мм. $P_k=200$ кПа. $G_m=8$ г/с, $P_m=500$ кПа

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 05-08-17942

Список литературы

1. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин В.И. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение. 1977. 208 с.
2. P. Broll and P. Walzel. Piv measurements in pressure swirl atomizers//ILASS - Europe 2001. Proceedings 17th annual conference on liquid atomization&spray system. P. 806-811.
3. Lefebvre A.H Atomization and Sprays. Combustion: An International Series. 1989.
4. В.И. Ягодкин, А.Г. Голубев, А.А. Свириденков, А.Ю. Васильев Способ и устройство для определения характеристик топливного факела Патент РФ на изобретение № 2240536 от 21.03.03

DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COMBUSTORS ATOMIZING DEVICE

© 2006 A.Y. Vasiliev, A.I. Maierova, A.A. Sviridenkov, V.I. Yagodkin

Design procedure of combustors atomization device including pressure swirl fuel nozzle + air axial swirler + its sidewall is proposed based on hydraulic calculations of simple pressure swirl fuel atomizer and air swirler. Geometrical parameters are chosen so that fuel jets are not collided with air swirler wall and propagated in air layer or near its inner boundary at the end of the sidewall. Example of atomizing device PS-90 type is given. By means of optical diagnostics methods for simultaneous fuel drop size and concentration determination in spray cross sections, modified atomization system were developed with low drop size (SMD lesser 20 μ m) and angular non-uniformity (lesser 15%).