

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ФОРСУНОК И ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТОВ

© 2002 А. Ю. Васильев, А. А. Свириденков, В. В. Третьяков,  
В. И. Фурлетов, В. И. Ягодкин

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

Приведен обзор результатов экспериментальных и расчетных исследований струйных эмульсионных и пневматических форсунок для распыливания авиационных топлив. На основе полученных данных спроектированы и испытаны форсунки, использующие различные источники распыливающего воздуха высокого и низкого давления. Предложен новый оптический экспресс-метод исследования факела топливовоздушной смеси. Проведены сравнения с расчетами.

### 1. Введение

Согласно принятой концепции многоструйной подачи топлива корневой угол выхода воздуха и угол подачи струй топлива должны примерно совпадать. Сложение потоков импульса газа и жидкости обеспечивает лучшую стабильность топливовоздушного факела, а более продолжительное пребывание топлива в высокоскоростном слое воздуха на выходе из форсунки - лучшее его распыливание. Механизм дробления жидкости в данном случае более эффективен, чем при подаче струй в закрученный поток воздуха перед выходом из форсунки, и из-за отсутствия сепарации капель, в результате которой они оказываются в слое более медленно движущегося воздуха или осаждаются на стенке форсунки. Исследования таких систем распыливания показали их эффективность в смысле малого времени распада струй, снижения размеров капель, а также более слабого влияния вязкости жидкости [1]. В этой работе утверждается, что имеет место так называемый «взрывной» характер распыливания в отличие от известного «волнового». Можно предположить, что новый механизм дробления жидкой струи связан с ускорением потока воздуха в сопле и образованием коротких быстрорастущих солитоноподобных (одиноких, а не синусоидальных) волн на поверхности раздела топлива и воздуха.

Идея использования многоструйной инъекции топлива вместо центробежной обладает рядом преимуществ. Среди них – простота управления корневым углом факела

распыливания и его меньшая зависимость от плотности среды, в которую происходит подача топлива. При оптимальном выборе числа топливных струй достигается лучшее смешение топлива с воздухом и уменьшение масштаба неоднородности концентрации горючей смеси. В результате горение становится более устойчивым и уменьшается содержание вредных веществ в продуктах сгорания.

Авторы рассмотрели несколько вариантов форсунок – от простейшей, типа Нукиямы-Танасавы [2], до комбинированных, включающих шнеки как для подачи топлива, так и воздуха. Особенно привлекательной оказалась комбинированная эмульсионно-пневматическая форсунка [3÷4], в которой используются малое количество воздуха высокого давления и воздух набегающего потока. Результатам исследования этой форсунки посвящена отдельная статья.

Преимущества форсунки: широкий диапазон регулирования расхода при одинаковой подаче топлива; малый расход эмульгирующего воздуха; улучшенное распыливание при малых расходах топлива. Недостатки: возможные пульсации расхода топливовоздушной смеси; одновременное регулирование топлива и воздуха; возможное попадание топлива в канал подачи воздуха. Особенности конструкции: необходимость правильного выбора дросселей на каналах ввода топлива и воздуха; наличие камеры эмульгирования; правильный выбор площади сопел; оптимизация положения топливных жиклеров.

Для оценки газодинамических параметров форсунок необходимы расчеты течений внутри каналов форсунки: эмульсионном, пневматическом с круткой потока и в смесительном с использованием одномерных, двумерных и трехмерных моделей с учетом двухфазности и межфазного взаимодействия.

Важной проблемой при создании новых форсунок является определение характеристик распыливания с помощью экспресс-методов, дающих средние размеры капель по всему сечению факела. Такими методами являются малоугловой метод рассеяния света с использованием прибора ЛИД и метод флуоресцентно-поляризационного рассеяния на прямой угол.

## 2. Стендовое оборудование и измерительные приборы

Стенд У-373 ЦИАМ позволяет исследовать течения в элементах и моделях камер сгорания с помощью лазерных методов (рис. 1). На нем можно проводить испытания форсунок и отсеков камер малоразмерных двигателей при холодных продувках и горении газообразных и жидких топлив. Наличие эжектора, водоохлаждаемых труб и горячего дросселя, а также электроподогревателя воздуха в настоящее время обеспечивают в рабочей части стенда параметры потока:  $P_k = 50 \div 200$  кПа,  $T_k = 280 \div 400$  К, расход топлива  $G_m = 10$  г/с, расход воздуха  $G_e = 0,5$  кг/с.

Большинство результатов экспериментальных исследований пневматических форсунок получено для условий атмосферного давления и температуры в среде, что объясняется трудностями измерений характеристик распыливания топлив в полузамкнутом объеме и в потоке воздуха. Основной проблемой при этом является не только уплотнение барокамеры, но и защита окон от попадания капель спутным потоком газа без искажения факела распыливания.

При повышенных давлениях среды, а также в случае плотных аэрозольных сред наиболее эффективны так называемые «ансамблевые» или «планарные» методы измерений размеров и концентрации частиц одновременно по всей световой плоскости [5]. Такие методы применялись в работах на основе исследований упругого рассеяния поляризованного света на каплях. Известны также примеры использования его неупругого рассеяния, например, флуоресценции жидкостей для измерений среднего размера капель.

В нашей работе сделана попытка объединения ряда идей указанных работ с теорией малоуглового рассеяния света на каплях для создания экспресс-метода исследования топливных аэрозолей в факелах распыливания вблизи форсунок. Для получения характеристик дисперсности стационарного факела используется всего лишь один кадр цветного изображения аэрозоля. Фотографирова-

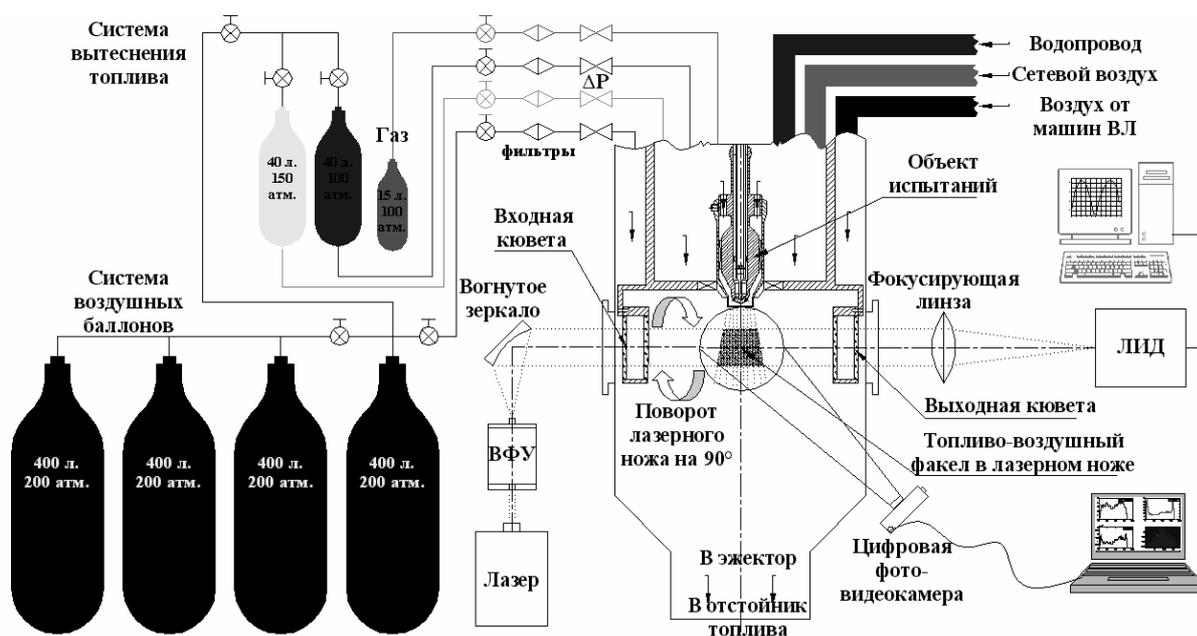


Рис. 1. Схема стенда У-373

ние открытого топливоздушного факела осуществлялось цифровой камерой Olympus C-830L. В некоторых экспериментах в керосин добавлялся флуоресцирующий краситель (оксихинолин), который возбуждался при облучении светом с длиной волны  $\lambda = 447$  нм. Компьютерная обработка снимков дает возможность построить поля концентрации капель топлива в факеле форсунки в плоскости лазерного «ножа».

Моноимпульсный метод флуоресцентно-поляризационного отношения излучений применяется для измерений среднего зауровского диаметра  $D_{32}$  капель, поверхностной  $C_S$  и объемной  $C_V$  концентраций капель, а также среднего диаметра Проберта  $D_{31}$ . Этот перспективный метод количественной визуализации факела распыливания в световой плоскости в настоящее время продолжает совершенствоваться. Создается установка для испытаний форсунок при давлениях среды до 20 атм с целью разработки более точной методики расчета топливораспыливающих устройств.

### 3. Объект и результаты испытаний

Для испытаний была спроектирована шестиструйная форсунка для камеры сгорания МГТД с подводом вспомогательного воздуха повышенного давления в камеру эмульгирования форсунки и обдувочного воздуха под экран от набегающего потока (рис. 2).

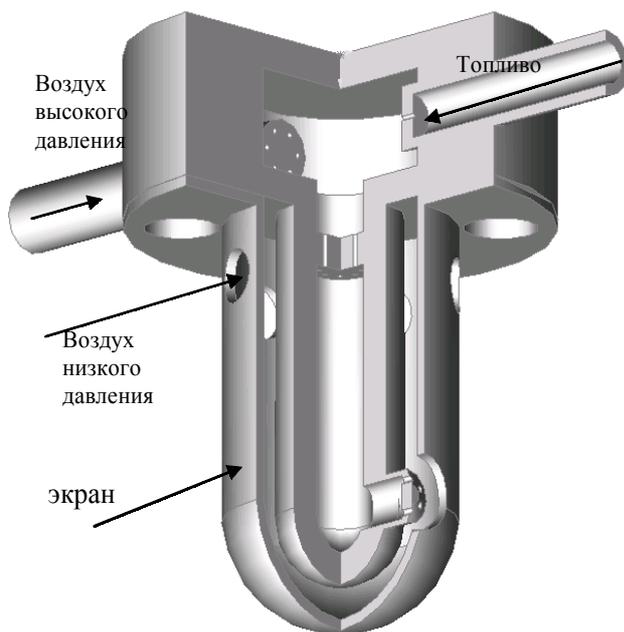


Рис. 2. Схема форсунки

Испытания форсунки проводились автономно как без экрана, так и с экраном. Давление в экране соответствовало давлению перед жаровой трубой. Расход топлива составлял  $(1 \div 2)$  г/с. Распылитель представлял собой конус с углом  $120^\circ$ , на котором равномерно размещены 6 отверстий. На входе в форсунку располагалась камера эмульгирования, топливоздушный смеситель с жиклерами на выходе из каналов подачи топлива и сжатого воздуха.

Угол между диаметрально противоположными струями эмульсии равнялся  $60^\circ$ .

В результате испытаний форсунки получена зависимость (1) расхода топлива в г/с от полных давлений (в барах):

$$G_T = K_T (P_T - \sigma \cdot P_0)^{1/2}. \quad (1)$$

где  $\sigma$  – коэффициент потерь полного давления эмульгирующего воздуха,  $K_T = 1,7$  в диапазоне расхода топлива от запуска до малого газа, когда выходные отверстия форсунки более чем на 90% заняты воздухом. Для увеличения расхода топлива давление воздуха  $P_0$  нужно уменьшать, а  $P_T$  увеличивать так, чтобы на максимальном режиме  $K_T$  было равно 4,0, а выходные отверстия были полностью заняты топливом. При таком аэродинамическом регулировании может быть обеспечен весь требуемый рабочий диапазон изменения расхода топлива без использования двухканальных форсунок, частичного отключения форсунок и т. п.

На рис. 3 показана визуальная картина факела распыливания без обдува в поперечных сечениях факела на различных расстояниях от форсунки. Кроме режимов запуска, угол факела в основном определяется направлением струй топлива, когда осевая струя воздуха примерно вдвое уменьшает его.

Пример обработки снимков показан на рис. 4.

Измерения размеров капель, создаваемых эмульсионно-пневматической форсункой, показали весьма хорошие результаты: на режиме запуска они не превышали 10 мкм.

Фотографии пламени при воспламенении и перед срывом пламени показаны на рис. 5. Мелкораспыленное топливо из форсунки впрыскивалось в карбюратор и уже

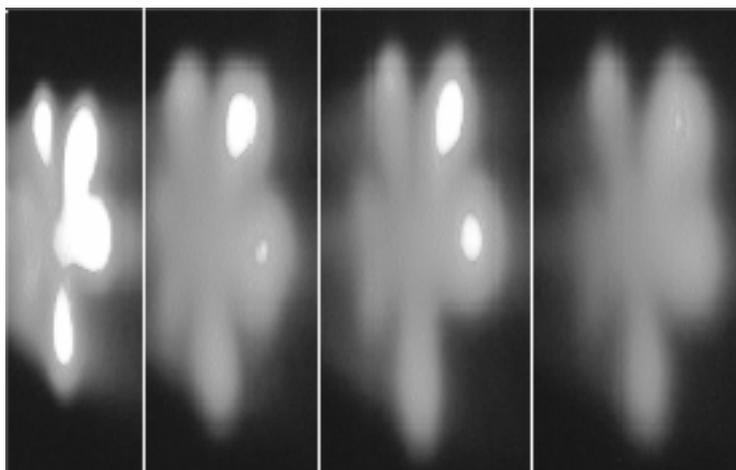


Рис. 3. Фотографии поперечных сечений факела распыливания на различных расстояниях от форсунки

затем попадало в камеру сгорания. Форма пламени, состоящего из трех «язычков», объясняется наличием трех рядов отверстий в карбюраторной трубке.

В случае  $P_0 = 500$  кПа и  $P_T = 400$  кПа наблюдалось «мягкое» зажигание в отсеке кольцевой камеры: на рис. 6 видно, что область воспламенения располагается вблизи границы «бедного» срыва пламени.

На рис. 6 приведены точки зажигания и срыва пламени, полученные при атмосферных условиях и изменении расхода воздуха через камеру при неизменном давлении эмульгирующего воздуха. Изменения режимов подачи топлива происходило путем пе-

рекрытия топливного клапана, что приводило к постепенному понижению расхода топлива. Фотографии пламени вблизи «бедного» срыва приведены на рис. 5 снизу.

#### 4. Результаты расчетных исследований

Одним из этапов при проведении расчетных исследований, сопровождающих эксперименты, были расчеты течений топливо-воздушных струй из форсунки типа Нукиямы-Танасавы в сносящем потоке воздуха в плоском и кольцевом каналах [6].

На рис. 7 (а) представлены изолинии концентрации капель топлива в продольном сечении плоского канала по центру струи с

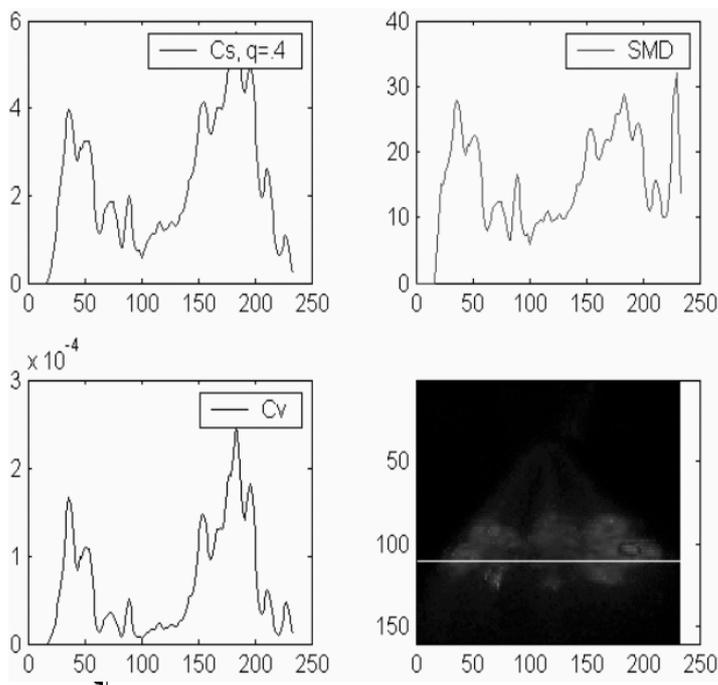


Рис. 4. Пример компьютерной обработки снимка вдоль строки изображения. Деления по оси X соответствуют числу пикселей ( $1 \text{ пс} \approx 0,5 \text{ мм}$ )



Рис. 5. Фотографии пламени при воспламенении и перед срывом пламени

учетом влияния капель на газовый поток. В расчетах принималось, что скорость вязкого жидкого топлива Т-6  $V_f = 6$  м/с, средний зауретовский диаметр каплей  $\overline{D}_{32} = 50$  мкм и распределение каплей по размерам в факеле описывается законом Розина-Раммлера с показателем  $n = 3,0$ .

Результаты расчетов при скорости распыливающего воздуха  $V_o = 6$  м/с оказываются близкими к экспериментальным данным, показанным на рис. 7 (б). Экспериментальные данные относились к  $V_o = 90$  м/с. Срав-

нение с расчетом показало, что в действительности скорость истечения распыливающего воздуха из форсунки была значительно меньше величины, рассчитанной по расходу воздуха и площади канала, из-за передачи части импульса потока воздуха каплям. Аналогичные расчеты выполнены для кольцевого закрученного потока. Расчетами выявлено сильное влияние закрутки потока на распределение топлива. Оказалось, что для рассматриваемых параметров воздушного потока и режимов распыливания топливные капли распределены на 60 % площади поперечного сечения канала на расстоянии 30 мм от места подачи.

#### 4. Выводы

Испытанная эмульсионно-пневматическая форсунка со струйной подачей эмульсии обеспечивает качественное распыливание топлива ( $\overline{D}_{32}$  до 10 мкм).

Методом флуоресцентно-поляризационного отношения получены распределения средних размеров каплей и концентраций топлива в поперечных сечениях факела распыливания. Данные характеристики факела определяются по одной цветной фотографии сечения факела плоским импульсным лазерным лучом.

Применение эмульсионно-пневматической форсунки в камере сгорания с карбюратором обеспечило надежный запуск опыт-

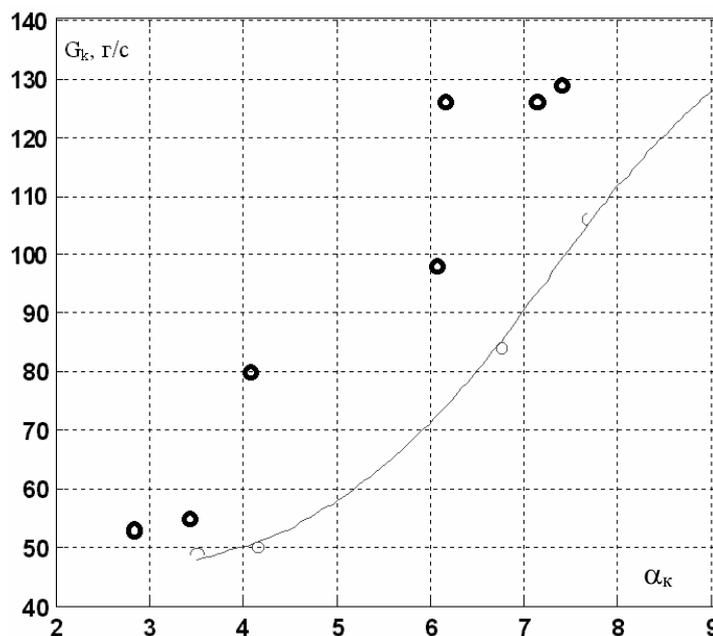


Рис. 6. Точки зажигания (о) и граница бедного срыва (o)

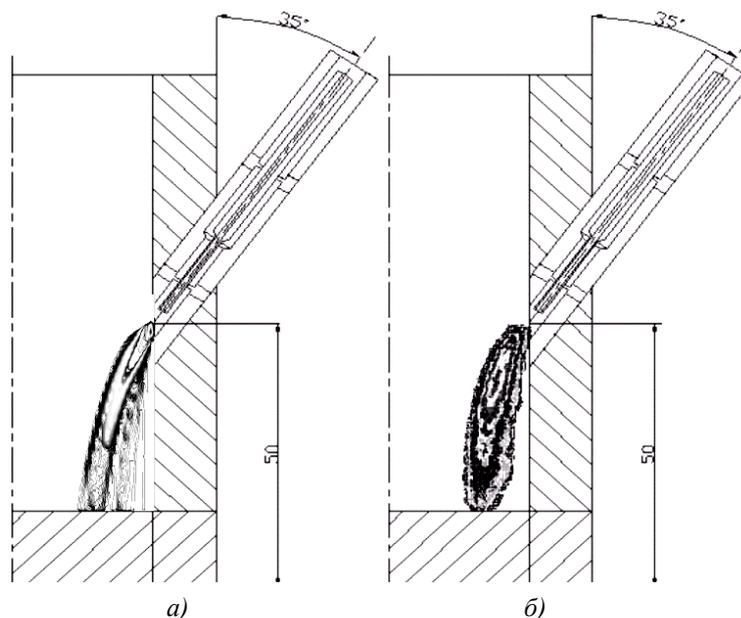


Рис. 7. Сравнение результатов расчета (а) и эксперимента (б)

ной камеры сгорания МГТД в широком диапазоне составов смеси.

Разработана методика 3D расчета смесителя фронтального устройства с пневматическими форсунками, расположенными на боковой стенке смесителя. Результаты расчета для прямоугольного смесителя подтверждаются фотографиями двухфазного потока.

#### Список литературы

1. Lefebvre, A. H., 1992, "Energy consideration in Twin-fluid Atomization", *Journal of Engineering Gas Turbine and Power*, Vol. 114, pp. 89-96.
2. Nukiyama S. and Tanasawa Y., 1939, "Experiments on the Atomisation of Liquids in an Air Stream", *Transaction of Society of Mechanical Engineering of Japan*, Vol. 5, pp. 68-75.
3. Безменов В. Я., Ягодкин В. И. Техническая справка. Разработка фронтального уст-

ройства и форсунок для камеры сгорания краткоресурсного ГТД. ЦИАМ, № 005-2873, 2000 г.

4. Фурлетов В. И., Ягодкин В. И. и др. Создание аэродинамической форсунки для распыливания вязкой жидкости. ЦИАМ, № 005-2668, 1998 г.

5. Hofeldt, D. L., 1993a. Full-field Measurements of Particle Size Distribution. I: Theoretical Limitations of the Polarization Method, *Appl. Opt.* 32, 7532-7559. II: Experimental Comparison of the Polarization Ratio and Scattered Intensity Methods. *Appl. Opt.* 32, 7559-7567.

6. Третьяков В. В., Ягодкин В. И. Математическое моделирование обмена импульсами между газовым потоком и каплями применительно к процессам распыливания топлива в камерах сгорания. Технический отчет № 005-3202. ЦИАМ, 2001, 33 с.

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF PNEUMATIC ATOMIZERS AND THEIR CORRELATION WITH CALCULATION RESULTS

© 2002 A. V. Vassiliev, A. A. Sviridenkov, V. V. Tretyakov, V. I. Furletov, V. I. Yagodkin

Central Institute of Aircraft Engine Construction named after Baranov, Moscow

Results of experimental investigations and calculations of jet emulsion and pneumatic atomizers for spraying aviation fuels are surveyed. On the basis of the data obtained atomizers using various sources of spraying high- and low-pressure air were designed and tested. A new optical express-method to investigate fuel-air mixture spray is proposed. The results are compared with those of calculations.