

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПЫЛА КАПЕЛЬ ТОПЛИВА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ФОРСУНКЕЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

И. А. Холмянский

Сибирская автомобильно-дорожная академия, 644080 Омск, umu@sibadi.omsk.ru

Описан способ голографической регистрации факела, распыленного вращающейся форсункой топлива, используемый для анализа дисперсности капель. Приведены результаты исследования.

Ключевые слова: вращающаяся форсунка, дисперсность распыла, форма факела.

В камерах сгорания малоразмерных газотурбинных двигателей кроме центробежных форсунок применяют вращающиеся форсунки со скоростью вращения до 20000 об/мин и более, в которых дисперсность факела топлива зависит только от центробежных сил и параметров набегающего потока воздуха. Для исследования дисперсности движущегося факела жидкости была разработана голографическая методика. Предложенный способ позволяет определять число и диаметры взвешенных летящих капель жидкости (размером  $2,5 \div 50$  мкм) в объеме  $20 \times 20 \times 20$  см.

Фотографирование объема, заполненного движущимися частицами, размер которых много меньше занимаемого ими пространства, практически неосуществимо. Если частицы диаметром, например, 10 мкм фотографировать в объеме  $1 \text{ см}^3$ , то глубина фокуса изображающей системы, способной различать размер 10 мкм, будет намного меньше 1 см. Применение голограмм Фраунгофера позволяет последовательно восстанавливать с нее плоские срезы ансамбля частиц по глубине объема.

В качестве источника освещения использовался импульсный рубиновый лазер УИГ-1М, обеспечивающий время экспозиции  $4 \cdot 10^{-8}$  с и возможность регистрации объектов размерами  $20 \times 20 \times 20$  см. Луч лазера с модулированной добротностью проходил через фильтр низких пространственных частот, коллимировался и освещал исследуемый объект. Реальный объем, который может быть исследован, зависит от требуемого разрешения и равен нескольким кубическим сантиметрам.

Дисперсность распыла первоначально измерялась по однолучевой схеме. Полученные голограммы не давали достаточной четкости контура капли, поэтому применяли двухлучевую схему (рис. 1), описанную в рабо-

тах [1–3]. При этом голограмма записывалась по двухлучевой схеме с боковым опорным лучом, обеспечивающим пространственное разделение действительного и мнимого изображений, большую глубину резкости и более высокий контраст изображения, восстановленного с голограммы. Двухлучевая схема голографической регистрации микрочастиц с пространственной фильтрацией сигнальной волны заключается в следующем. Излучение импульсного лазера (см. рис. 1) делится светоделителем на сигнальный и опорный лучи, которые зеркалами через регистрирующие коллиматоры направляются на голографический регистратор (фотопластинку). При этом луч после коллиматора проходит через исследуемый участок топливного факела, фильтр низких пространственных частот, включающий в себя объектив и непрозрачную маску, которая расположена в фокальной плоскости объектива.

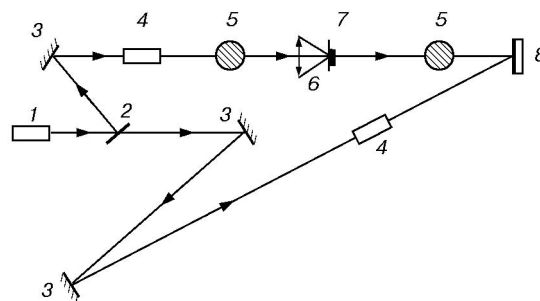


Рис. 1. Схема двухлучевой голографической регистрации микрочастиц с пространственной фильтрацией сигнальной волны:

1 — импульсный лазер УИГ-1М, 2 — светоотделитель, 3 — зеркала, 4 — коллиматоры, 5 — распыл топлива, 6 — объектив, 7 — маска фильтрации низких частот, 8 — голографический регистратор (фотопластинка)

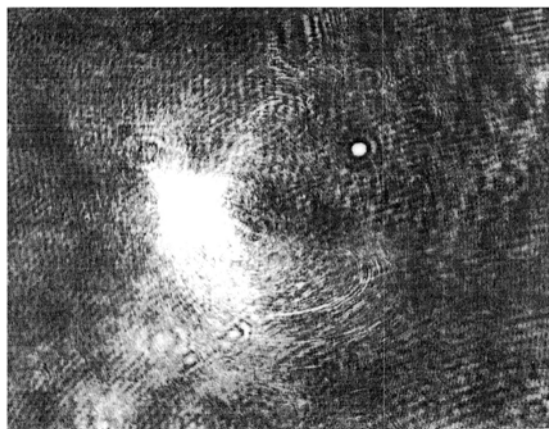


Рис. 2. Восстановленное голографическое изображение каплей топлива, совмещенное с голографическим изображением споры зерна ликоподия (яркое пятно в центре)

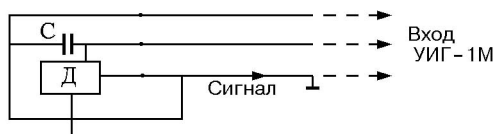


Рис. 3. Схема включения датчика синхронизации поджига УИГ-1М:

Д — датчик; С — емкость

Маска фильтрует низкие пространственные частоты спектра излучения, прошедшего через факел распыла топлива. В результате при восстановлении изображения на темном фоне видны светлые оконтуренные капли, их диаметр измеряется по первому оконтуренному кольцу окулярным микрометром микроскопа.

На рис. 2 приведено восстановленное голографическое изображение каплей топлива, совмещенное с голографическим изображением споры ликоподия (яркое пятно в центре). Для повышения точности диаметр частиц ликоподия перед использованием проверяли на универсальном микроскопе УИМ-23 с ценой деления 1 мкм, были отобраны споры диаметром 30 мкм. Оптические системы УИГ-1М и ЛГ-38 юстировались по этому пятну. Поскольку юстировка проводилась по одному образцу размером 30 мкм, то именно этим способом учитывались все возможные погрешности применяемого метода. Для исключения случайности юстировку выполняли на 10 голограммах ликоподия, снятых и восстановленных при одних и тех же условиях, далее пластинка ли-

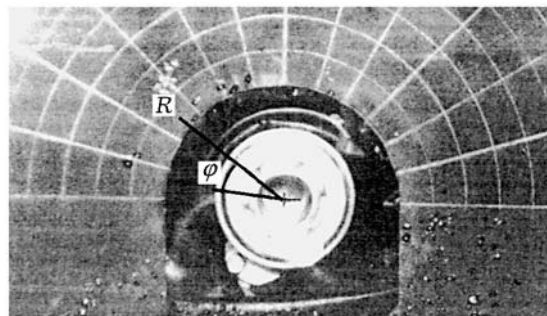


Рис. 4. Мгновенная фотография струй (длительность светового импульса  $15 \cdot 10^{-3}$  с)

коподия смещалась по глубине через 2,5 мм в шести положениях от среднего, соответствующего плоскости, проходящей через ось отверстия форсунки. Полученные голограммы ликоподия совмещали с голограммами распыленного топлива в этой же плоскости. Этот метод восстановления голограмм позволял учесть переменное по глубине увеличение и влияние отношения длин волн аппаратуры, обеспечивая однозначность масштабирования при использовании имеющихся в микроскопах сеток. Юстировка давала 100-кратное совместное увеличение оптических систем голографирования и воспроизведения.

Для регистрации применялись голографические пластинки МИКРАТ ЛОИ-2. В качестве модулятора добротности лазера использовался светофильтр КС-19.

С целью определения координат луча для голографирования дисперсности распыла исследовали форму струи, вытекающей из вращающейся форсунки, и положение начала ее распыла с образованием дисперсной фазы. Для этого струю фотографировали в ждущем режиме в темноте с автоматическим включением индукционным датчиком ксеноновой лампы ИФП-800 через блок питания импульсного демонстрационного лазера ИДТ-68 с длительностью импульса  $15 \cdot 10^{-3}$  с. Синхронизация автоматического включения лампы ИФП-800 и поджига лазера УИГ-1М выполнялась с помощью ферритового лепестка, прикрепленного к форсунке с некоторым угловым смещением относительно отверстия истечения топлива. При прохождении около индукционного датчика последний срабатывал. Положение лепестка корректировали по снятым фотографиям распыления топлива, затем определяли координа-

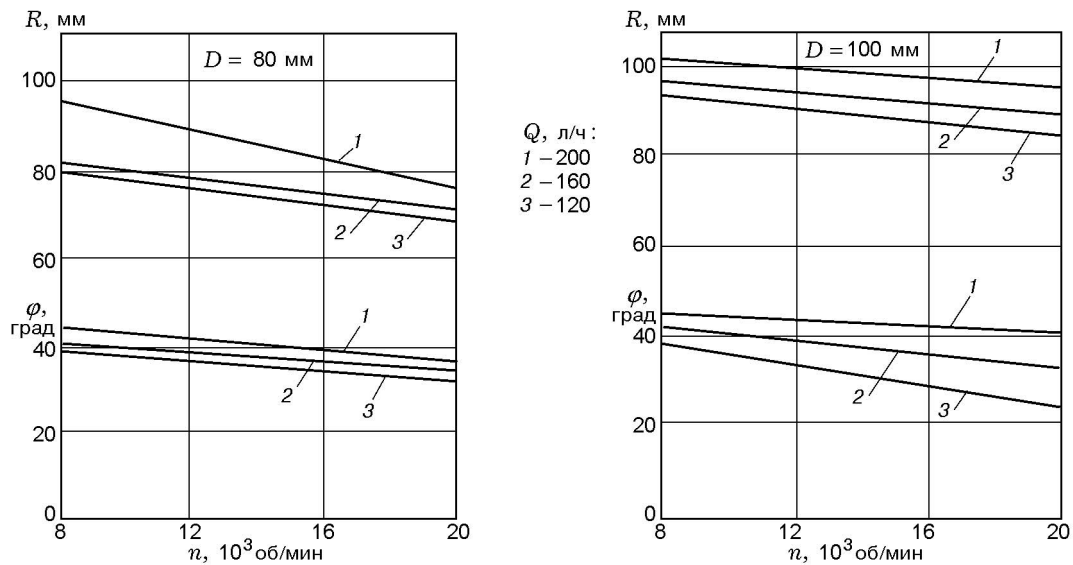


Рис. 5. Линейная аппроксимация результатов статистической обработки измерений параметров истекающих из форсунок струй

ты луча лазера для снятия голограмм расплывленного факела топлива. Схема подключения индукционного датчика приведена на рис. 3.

Для расшифровки фотографий использовали специальную панель, расположенную за форсункой и разграфленную концентрическими окружностями и радиальными лучами, представляющими совместно полярную систему координат: фотографирование проводилось на ее фоне. Исходными параметрами служили частота вращения форсунки ( $n$ ), расход топлива ( $Q$ ) и диаметр форсунки ( $D$ ). Определяли расстояние  $R$  от оси вращения форсунки до точки образования дисперсной фазы и угол  $\varphi$  между отверстием истечения струи и этой точкой.

На рис. 4 приведена фотография струй, на рис. 5 — результаты статистической обработки измерений, которые с точностью 10 % можно представить в виде зависимостей:

$$R = 1,452(Q^{0,171}/n^{0,11}D^{-0,946}),$$

$$\varphi = 12,789(Q^{0,261}/n^{0,186}D^{-0,343}).$$

Траектория струи, вытекающей из форсунки, аппроксимировалась следующими зависимостями:

$$R_i = D/2 + \alpha R_1 [1 - \exp(-\beta \varphi_i R_1)], \quad R_1 = R - D/2,$$

$$\alpha = (R)^2 C_1 + R C_2 + C_3, \quad \beta = (\varphi M_1)^2 + \varphi M_2 + M_3,$$

$$C_1 = 0,000086, \quad C_2 = -0,00125, \quad C_3 = 0,51407,$$

$$M_1 = -0,2699, \quad M_2 = 0,002904, \quad M_3 = -0,0034.$$

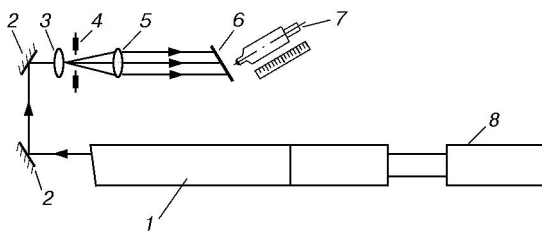


Рис. 6. Система обработки восстановленного голографического изображения:

1 — лазер ЛГ-38; 2 — зеркала; 3 — микрообъектив; 4 — микродиафрагма; 5 — объектив (4 и 5 образуют коллиматор); 6 — восстановленное изображение голограммы; 7 — горизонтальный микроскоп; 8 — блок питания

Система обработки восстановленного голографического изображения приведена на рис. 6. Луч лазера ЛГ-38 зеркалами направлялся в микрообъектив, микродиафрагму и объектив (два последних образуют коллиматор). Затем коллимированным лучом восстанавливалось голографическое изображение, которое плавно по глубине ансамбля частиц просматривалось горизонтальным микроскопом с

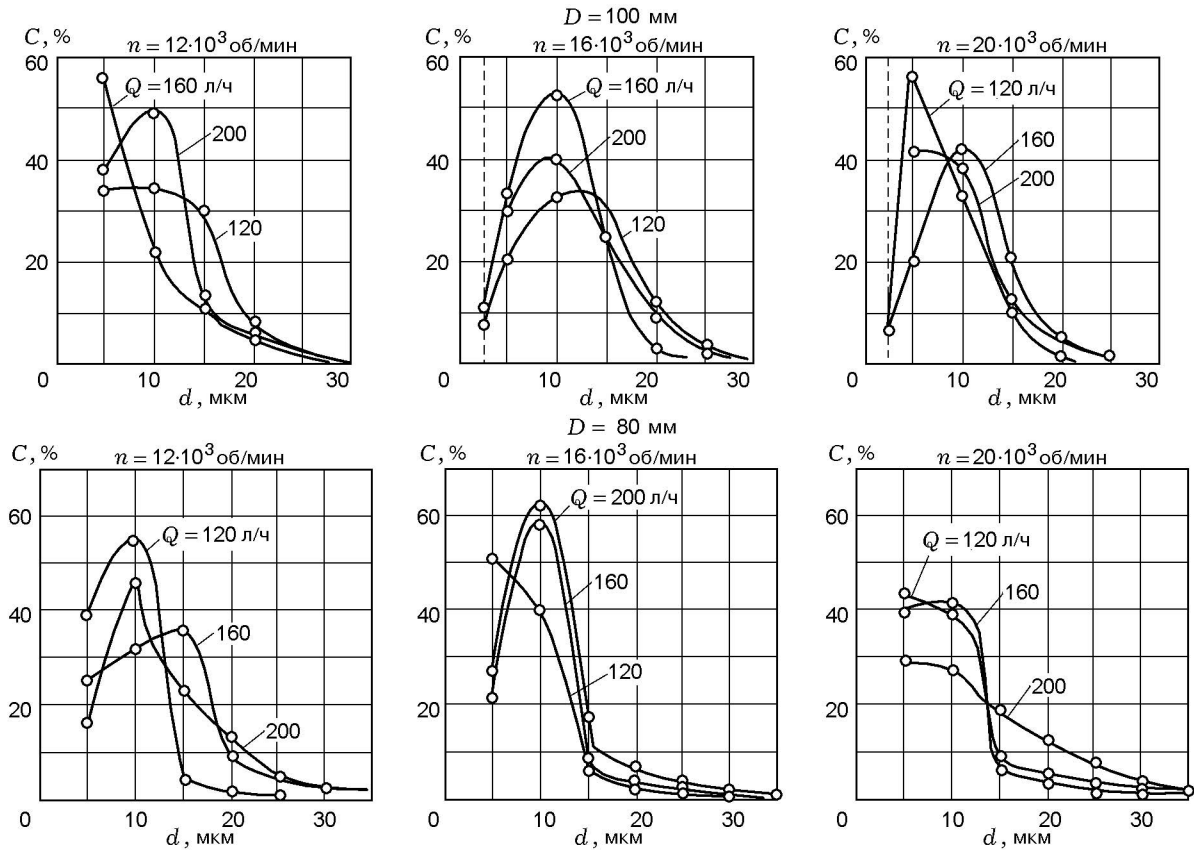


Рис. 7. Изменение дисперсности распыла в зависимости от расхода топлива, частоты вращения и диаметра вращающейся форсунки:

$C$  — общее количество капель, отнесенное к количеству капель диаметром не больше 15 мкм

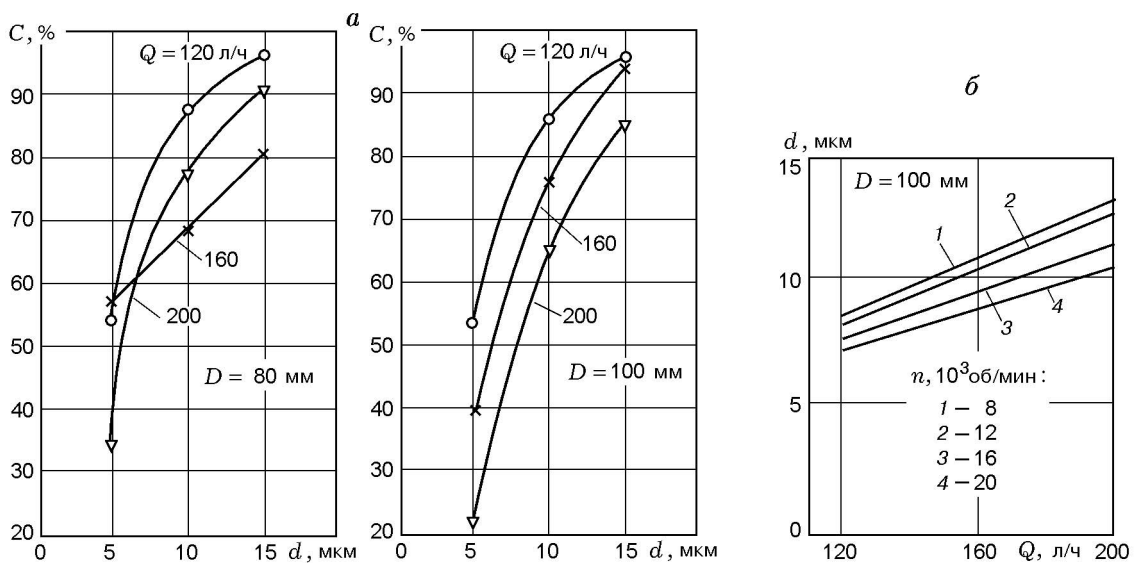


Рис. 8. Суммарное количество капель при диаметрах  $d \leq 5, 10$  и  $15$  мкм, отнесенное к количеству капель диаметром не больше 15 мкм (а). Зависимости диаметров капель от расхода жидкости при различной частоте вращения (б)

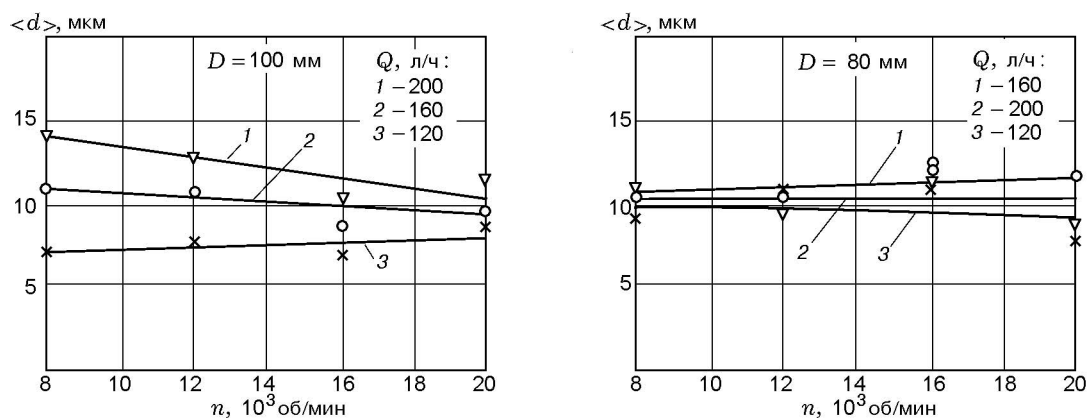


Рис. 9. Средний диаметр капель по всем выборкам

40- и 20-кратным увеличением. После этого ансамбль частиц фотографировался для повторной проверки результатов измерения диаметров капель топлива при 40-кратном увеличении микроскопа.

Голографирование проводили также в ждущем режиме с включением лазера от индукционного датчика (см. рис. 3), при этом оптическую ось луча лазера настраивали на радиус распыла для заданных частоты вращения и расхода топлива.

Диаметр капель и их количество определяли последовательным просмотром голограмм по плоскостям  $YOZ$  и  $XOZ$  с заданным шагом  $\approx 5$  мм. Ось  $Z$  совпадает с оптической осью микроскопа, а плоскость  $XOY$  перпендикулярна оси  $Z$  и лежит в плоскости голограммы. При этом в каждом положении оси микроскопа проводилось его перемещение вдоль оси  $Z$  и фиксировались все капли по глубине голограммы.

Было сделано 708 выборок голограмм, общее число зарегистрированных капель 3835. Среднее значение диаметра капли вычисляли по суммарной выборке. Дисперсию определяли на основе анализа данных рис. 7–9.

Результаты исследований показали, что средний диаметр зарегистрированных капель составляет 10 мкм при среднеквадратичном отклонении  $\pm 7$  мкм (рис. 7). Суммарное количество капель размером  $\leq 15$  мкм достигает 90 ÷ 95 % (рис. 8).

Для оценки погрешности измерения диаметра капель на стеклянную пластинку, смазанную вазелином, наносили напыление при частоте вращения 16000 об/мин в течение 1 с в зоне распыла. Затем проводилось голографирование осажденных на пластинке капель и

по изложенной методике определялись их размеры. Максимальный диаметр капель составил 96 мкм, минимальный — 44 мкм. Было выполнено несколько измерений диаметра капель на универсальном микроскопе УИМ-23; получены средние размеры пятна: максимального — 92,5 мкм и минимального — 42 мкм. Данная проверка позволяет предположить, что погрешность измерения по данной методике не превышает значений, указанных в работе [3] для аналогичных исследований.

Итак, проведенное исследование позволило установить расположение факела распыленного топлива и дисперсность капель, что определяет размеры ядра горения и эффективность сгорания топлива.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мороз Э. В. Изучение распада и дробления топливных струй методами голографии // Голографические методы и аппаратура, применяемая в физических исследованиях, и их метрологическое обеспечение. М.: ВНИИФТРИ, 1976. С. 35–39.
2. Оптическая голография, практические применения / Е. А. Антонов, В. М. Гинзбург, Е. Н. Лехцер и др. / Под ред. В. М. Гинзбург, Б. М. Степанова. М.: Сов. радио, 1978.
3. Гинзбург В. Н., Левин Г. Г., Мороз Э. В., Павлигин Г. Н. Автоматизация количественной обработки голографических изображений с помощью ЭВМ // Голографические методы и аппаратура, применяемые в физических исследованиях и их математическое обеспечение М.: ВНИИФТРИ, 1977.