

УДК 621.45.022

В.І. Рубльов, В.В. Логінов

Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

ВИБІР ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ КРАПЕЛЬ ЗА РОЗМІРАМИ

Визначаються характеристики середнього розміру крапель і функції розподілу їх за розмірами.

крапля, число Рейнольда, критерій Вебера, розподіл крапель, заутерівський діаметр, медіанний діаметр, функція Розіна-Рамлера

Вступ

Постановка проблеми. Одним з найскладніших елементів авіаційного двигуна є камера згоряння. Аналіз фізичних уявлень про процес утворення суміші у форсажних камерах згоряння ГТД показує, що розробка ефективних методів розрахункової оцінки процесу утворення суміші і розпилування палива можлива лише на основі знання характеристик аерозолі. Забезпечення високої повноти згоряння з якнайменшими втратами в камері згоряння є складною задачею.

Аналіз досліджень і публікацій. Запропонована чисельна методика [1] припускає розрахунок течії двофазної суміші палива і газу.

При рішенні рівнянь газової фази визначають параметри, які необхідні для розрахунку рідкої фази. За результатами цього розрахунку обчислюються траєкторії крапель, зміна їх розміру і температури уздовж траєкторії польоту. Потім проводиться розрахунок початкових членів в рівнянні газової фази, що враховує внесок

крапель, які випаровуються та зміна концентрації пари палива. З урахуванням цього внеску проводиться розрахунок поля концентрацій пари шляхом чисельного рішення рівнянь дифузії пари.

Розпилювання палива прямоструменевими форсунками найпоширеніший спосіб подачі палива у форсажну камеру згоряння [2 – 5]. Розміри крапель, що утворюються залежать від дії на струмінь палива зовнішніх сил опору середовища, в яке вприскується паливо і внутрішніх сил, обумовлених турбулентністю самого струменя при його витіканні з форсунки [6 – 8].

Мета даної статті – визначити характеристики середнього розміру крапель і функції розподілу їх за розмірами.

Існує ряд критеріїв подібності, які визначають процес розпилу палива [7]. Частіше за інші використовується критерій Вебера [3, 4]:

$$\frac{\rho_v u_v^2 d_0}{\sigma_k}, \quad (1)$$

де ρ_v – густина повітря,

u_v – швидкість потоку повітря,

σ_k – коефіцієнт поверхневого натягнення краплі,

d_0 – початковий діаметр струменя або діаметр сопла форсунки.

Інший критерій, який визнає процес розпилу – критерій подібності Рейнольдса, який характеризує гідродинамічний режим течії палива і повітря:

$$\frac{\rho_v u_v d_0}{\mu_k}, \quad (2)$$

де μ_k – коефіцієнт динамічної в'язкості краплі.

Існує критерій Онезорге, який визначає відношення квадрату числа Рейнольдса до критерію Вебера:

$$\frac{\rho_v \sigma_k d_0}{\mu_k^2} = \frac{\left(\frac{\rho_v u_k d_0}{\mu_k} \right)^2}{\frac{\rho_v u_v^2 d_0}{\sigma_k}}. \quad (3)$$

Характеристиками аерозолі, які важливі для процесу горіння, є середній розмір крапель, розподіл їх за розмірами, розподіл потоків маси, кут факела розпилювання і його далекодійність. Середній розмір вводиться для полегшення розрахунків швидкості випаровування і оцінки якості розпилювання різних аерозолів. Використовують оцінку дисперсності за допомогою однієї характерної краплі, яка є результатом деякого усереднювання всього спектру розмірів крапель у факелі. Найпростіше усереднювання – це середній арифметичний діаметр крапель в аерозолі, при якому підсумовуються діаметри всіх крапель і ділиться на їх кількість. При розрахунках використовується середньоповерхневий діаметр, при якому площа поверхні краплі дорівнює середній площі поверхні для всіх крапель в аерозолі [4, 9].

Частіше за інші використовується середній заутерівський діаметр і середній медіанний діаметр [4].

Першим є діаметр краплі, у якої відношення об'єму до площі поверхні дорівнює цьому відношенню для всього аерозолі:

$$d_{32} = \frac{\sum n d^3}{\sum n d^2}, \quad (4)$$

де n – кількість крапель,

d – їх діаметр.

Медіанний діаметр розділяє пополам всю масу аерозолі:

$$d_m = \left(\frac{\sum n d^3}{\sum n} \right)^{0,33}. \quad (5)$$

Медіанний і максимальний діаметри крапель, а також характеристики спектру розпилювання для струменевої форсунки ТРДДФ визначаються по формулах [3]:

$$d_m = (135 + 3,67 \cdot 10^{-3} \Pi_2) \Pi_1^{-0,9} \bar{\delta}_{cp}, \quad (6)$$

$$d_{max} = (67 + 3,44 \cdot 10^{-3} \Pi_2) \Pi_1^{-0,7} \bar{\delta}_{cp}, \quad (7)$$

де $\bar{\delta}_{cp}$ – середня товщина рідкої пелени,

Π_1, Π_2 – безрозмірні критерії:

$$\Pi_1 = \frac{\bar{u} \bar{\delta}_{cp} \rho_g}{\mu_g}, \quad \Pi_2 = \frac{\bar{\delta}_{cp} \rho_g \sigma}{\mu_g^2}$$

$\bar{\delta}_{cp}$ – середня товщина струменя,

ρ_g – густина газу,

μ_g – динамічна в'язкість газу.

Від середньої товщини струменя і середньої товщини рідкої пелени залежить розмір крапель, що утворюються при розпаді. Величина відношення $\frac{d_{max}}{d_m} = 1,5 \dots 4$ є характерною для більшості типів форсунок [3, 9].

Окрім середнього розміру крапель необхідно знати розподіл крапель за розмірами. Існує сімейство функцій розподілу розмірів крапель запропоновані різними авторами [3, 4, 10]. Найповніший розподіл розмірів крапель описується узагальненою функцією:

$$\frac{dN}{d(d_k)} = a d_k^p e^{-b d_k^n} \quad (8)$$

де N – число крапель, діаметр яких більший ніж d_k ;

a, p, b, n – константи, величини яких підбираються з умови кращої відповідності цієї функції розподілу розмірів крапель.

Для визначення величин a, p, b, n пропонується логарифмічний метод найменших квадратів. Спочатку вважається, що функція відхилень F визначається співвідношенням:

$$F = \sum_{i=1}^m \left[\ln \left(\frac{\Delta N}{\Delta d_k} \right)_i - \ln \frac{dN}{d(d_k)}(d_{ki}) \right]^2, \quad (9)$$

де m – число елементарних інтервалів розбиття діапазону вимірювання розмірів крапель відібраної проби за вирахуванням одного інтервалу;

i – ціле число;

$\frac{\Delta N}{\Delta d_k}$ – кінцево-різницева апроксимація розра-

хункового розподілу, заснованого на експериментальних даних.

Підставляючи (8) в (9), отримаємо:

$$F = \sum_{i=1}^m \left[\ln \left(\frac{\Delta N}{\Delta d_k} \right)_i - \ln a - p \ln d_{ki} + b d_{ki}^n \right]^2. \quad (10)$$

Величини повинні підбиратися так, щоб величина функції F була мінімальною, тобто:

$$\frac{\partial F}{\partial a} = \frac{\partial F}{\partial p} = \frac{\partial F}{\partial b} = \frac{\partial F}{\partial n} = 0. \quad (11)$$

Функція (8) записана в загальному вигляді і містить чотири невідомі параметри. Нукіяма – Танасава [10] спрощують її, приймаючи $p=2$, але все одно доводиться вирішувати нелінійне рівняння алгебри для n . Функція має меншу точність в порівнянні з (8) при однаковій складності розрахунку. Грифіт [10] вводить спрощення приймаючи $p=-1$. Функція більш точна і менш складна в порівнянні з функцією Нукіяма – Танасава, оскільки вимагає рішення лінійних рівнянь алгебри. В даний час найширше застосування знайшла функція Розіна – Рамлера, для зображення кривої об'ємного або масового розподілу [3, 4]:

$$v = 1 - e^{-bd^q} \quad (12)$$

де v – частка загального об'єму, що містить краплі діаметром менш d_k ;

b, q – константи, по яких описується розподіл крапель за розмірами.

Величина q дає міру дисперсності крапель за розмірами, чим більше q , тим однорідніша аерозоль. Для більшості паливних аерозолів $q=2,4$. Цей параметр можна обчислити по формулі:

$$q = \frac{\lg \left(\frac{\ln \frac{1}{1 - v_{s_{\max}}}}{\ln 2} \right)}{\lg \frac{d_{\max}}{d_m}}, \quad (13)$$

де $v_{s_{\max}}$ – сумарний відносний об'єм всіх крапель.

При $d = \infty$ $v_s = 1$. Застосування їх для кінцевого інтервалу не приводить до істотних помилок. Часто встановлюють $v_{s_{\max}} = 0,95 \approx 1$ при $d = d_{\max}$.

Параметр $\frac{1}{b}$, означаючий деякий середній діаметр, дорівнює величині d_k , відповідній рівності $1 - v = e^{-1}$.

На рис. 1 показані спектри розпилу палива відцентровою форсункою з використанням функцій Грифіта і Розіна – Рамлера, а також дані експерименту при $d_m = 10$ мкм. На рисунку видно, що функція Грифіта більш точно описує експериментальні дані.

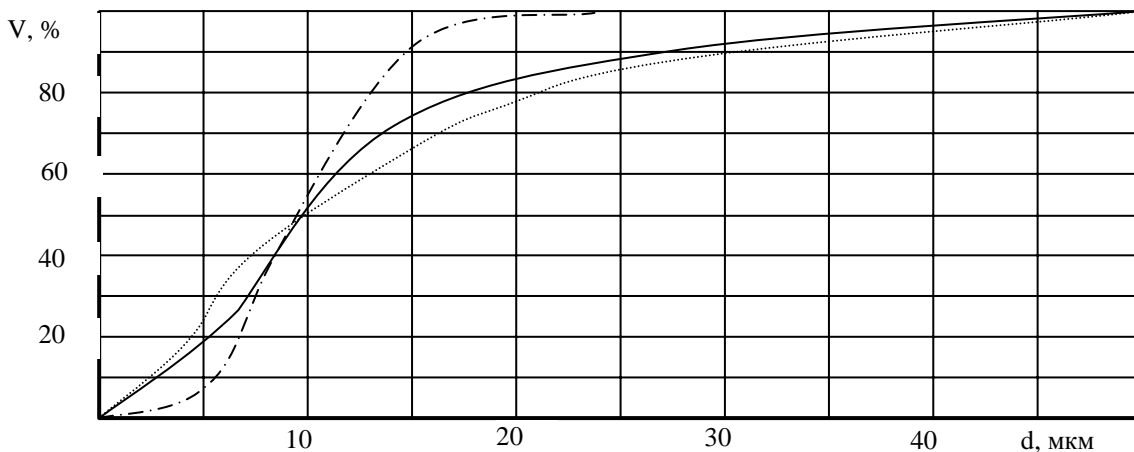


Рис. 1. Форма кривої інтегрального розподілу крапель за розмірами:

- — — — — експеримент;
- функція Грифіта;
- - - - - функція Розіна – Рамлера (для $\frac{d_{\max}}{d_m} = 2,5$)

Таким чином, використання функцій Грифіта або Нукіяма – Танасава доцільно, коли відомий експериментальний розподіл крапель за розмірами, оскільки, маючи чотири перемінних можна більш

точно розрахувати цей розподіл.

Не маючи таких даних, на стадії проектування форсажно-вихідного пристрою, пропонується функція Розіна – Рамлера, перевагою якої є її простота,

оскільки вона використовує тільки дві перемінні.

Функція дозволяє екстраполювати експериментальні дані в діапазоні дуже малих крапель, для яких провести вимірювання найбільш важко. Це характерно для форсажно–вихідних пристроїв, де проводиться вприскування палива у високошвидкісний потік газу. В результаті цього відбувається дроблення палива на велику кількість дрібних крапель. А для визначення середнього розміру крапель пропонується використовувати середній заутерівський діаметр, який досить широко застосовується при технічних розрахунках, і добре погоджується з експериментальними даними.

Висновки

Таким чином, для попередніх розрахунків розпилу палива у форсажно–вихідному пристрої доцільно використовувати функцію Розіна – Рамлера.

Список літератури

1. Кислов О.В., Рублёв В.И. Методика оценки эффективности форсажно – выходных устройств ТРДДФ // Вопросы проектор. и производства констр. летат. аппаратов. – Вып. 36(1). – НАКУ. – 2004.
2. Прудников А.Г., Волынский М.С., Сагалович В.Н. Процессы смесеобразования и горения в воздушно-

реактивных двигателях. – М.: Машиностроение, 1971. – 356 с.

3. Раушенбах Б.В. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1964. – 530 с.

4. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир. – 1986. – 566 с.

5. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. Д.В. Хроница. – М.: Машиностроение, 1989.

6. Нечаев Ю.Н. Теория авиационных двигателей. – М.: изд. ВВИА им. Жуковского, 1990. – 703 с.

7. Дятлов И.Н. Распыливание топлива в камерах сгорания газотурбинных двигателей. – Казань, 1980.

8. Терещенко Ю.М., Капітанчук К.І. Теорія авіаційних газотурбінних двигунів. – К.: КІ ВПС, 1997. – 461 с.

9. Павлов В. А. Расчёт характеристик дисперсности распыливания // Теплоэнергетика. – 1990. – № 4. – С.13-17.

10. Тишков Д.М., Лоу С.К. Применение функций одного класса для описания распределения размеров капель с использованием логарифмического метода наименьших квадратов // Энергетические машины и установки. – 1977. – Т. 99. – С. 196-201.

Надійшла до редколегії 15.01.2007

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. О.Б. Леонтъев, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.