

УДК 621.45.022

В.И. Рублев, В.В. Логинов

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ КАПЛИ ЖИДКОСТИ В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ С УЧЕТОМ ЕЕ ДЕФОРМАЦИИ

Объясняется причина не совпадения траектории движения капли жидкости в газовом потоке при экспериментальных и численных исследованиях.

капля, число Рейнольдса, число Вебера, число Онезорге, коэффициент сопротивления капли

Введение

Постановка проблемы. Одним из наиболее сложных элементов авиационного двигателя является камера сгорания. Повышенные требования к выбросам вредных веществ из двигателя заставляют конструкторов проводить многочисленные экспериментальные исследования на стенде, что существенно повышает общие проектные затраты и время проектирования. Создание моделей рабочего процесса в камере сгорания является актуальной проблемой, как на этапе проектирования, так и на этапе доводки изделия. Организация рабочего процесса с наименьшими потерями в камере сгорания представляет собой сложную задачу.

Анализ исследований и публикаций. При расчете траекторий движения капель жидкости обычно используется допущение об их сферичности [1 – 5]. Это существенно упрощает расчет, так как имеется обширный материал, позволяющий вычислить объем сферы. Известно, что для сферы коэффициент аэродинамического сопротивления $C_R = f(Re)$ зависит от числа Рейнольдса

$$Re = \frac{d_k u_B \rho_B}{\mu_k},$$

где ρ_B – плотность воздуха; u_B – скорость потока; d_k – диаметр капли; μ_k – коэффициент динамической вязкости капли. Обычно эта зависимость представляется в виде $C_R = A Re^n$ [4 – 7].

Наличие большого числа формул для коэффициента аэродинамического сопротивления жидких капель в газовом потоке косвенно свидетельствует о существовании расхождений с экспериментальными данными. Известны работы [4, 5], в которых оценена точность различных формул для коэффициента аэродинамического сопротивления и даны рекомендации по их использованию в различных диапазонах чисел Рейнольдса. Однако даже в этом случае имеются расхождения с экспериментальными данными, для капель с большими диаметрами.

Для примера (рис. 1), показаны данные численного расчета траекторий полета капель рассчитанных по формулам:

$$C_R = Re^{-1} \text{ при } Re = 0...2;$$

$$C_R = 18,5 Re^{-0,6} \text{ при } Re = 2...500 \quad (1)$$

и экспериментальные данные, полученные с помощью фазо-доплеровского анализатора частиц [6, 8].

Цель данной статьи – показать и объяснить имеющиеся расхождения и получить расчетные формулы для определения коэффициента аэродинамического сопротивления C_R , обеспечивающие соответствие расчетных траекторий движения капель с экспериментальными.

Результаты исследований

По мнению авторов, отличие результатов расчета от экспериментальных данных объясняется отклонением формы капель от сферических, приводящих к изменению коэффициента C_R .

Деформация капель зависит от соотношения аэродинамических сил и сил поверхностного натяжения, представляющего собой критерий Вебера:

$$We = \frac{\rho_k u_{отн}^2 d_k}{\sigma_k}, \quad (2)$$

где ρ_k – плотность капли; $u_{отн}$ – относительная скорость потока; σ_k – коэффициент поверхностного натяжения капли.

Чем больше число Вебера, тем сильнее деформируется капля, и больше отличие коэффициента C_R капли от C_R сферы. Поэтому коэффициент аэродинамического сопротивления капли должен зависеть не только от числа Re , но и от числа We , т.е. $C_R = f(Re, We)$. Поскольку число Вебера изменяется вдоль траектории полета капли, то вместо него целесообразно использовать число Онезорге, представляющее собой комбинацию чисел Re и We :

$$Op = \frac{Re^2}{We} = \frac{\rho_B \sigma_k d_k}{\mu_k^2},$$

где μ_k – динамическая вязкость жидкости.

Достоинством числа Онезорге является его независимость от относительной скорости обтекания капли. Это обеспечивает неизменность числа Онезорге при расчете движения капли в потоке, когда испарением капли можно пренебречь. Неизменность числа Op упрощает выявление его влияния на коэффициент аэродинамического сопротивления капли.

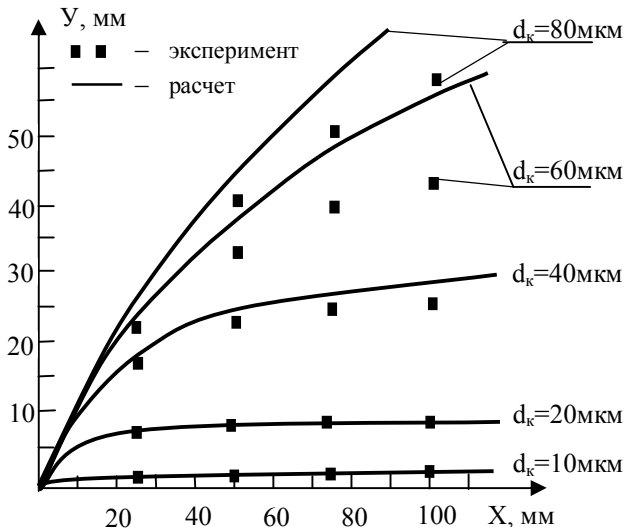


Рис. 1. Сравнение рассчитанных траекторий с экспериментальными данными

При заданных параметрах газового потока и свойствах жидкости число Онезорге пропорционально диаметру капли. Очевидно, что большей деформации подвергаются капли с большим диаметром, а значит и с большим числом Онезорге. Поэтому отличия коэффициента сопротивления капли от коэффициента сопротивления сферы должны возрастать при увеличении числа Онезорге.

При малых числах $On < On_0$ влиянием деформации капель можно пренебречь и вычислять C_R по формуле для сферы. При $On > On_0$ целесообразно представить коэффициент сопротивления капли в виде:

$$C_R = A Re^n On^m.$$

Для получения рабочей формулы исходную формулу для C_R сферы нужно помножить на коэффициент, представляющий собой некоторую степень m отношения $\frac{On}{On_0}$, где число On_0 такой капли, которая не испытывает деформации и остается сферической.

$$C_R = A Re^n \left(\frac{On}{On_0} \right)^m$$

Результаты расчетов показывают, что $On_0 \approx 1800$, а совпадение с экспериментальными данными при $On = 1800 \dots 7000$ обеспечивается при $m = 0,23$ (рис. 2).

Тогда окончательное выражение для коэффициента сопротивления в этом диапазоне чисел On имеет вид:

$$C_R = 33193 Re^{-0,6} On_1^{0,23}.$$

Таким образом, для определения траекторий полета капель жидкости при численных исследованиях

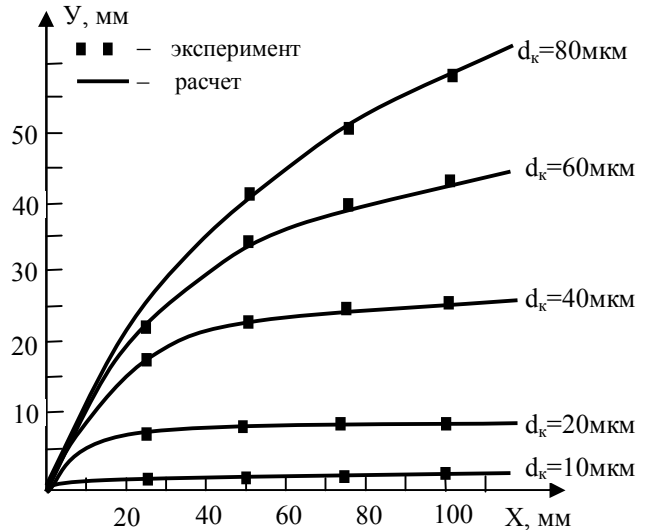


Рис. 2. Сравнение рассчитанных траекторий при учете числа On с координатами характерных диаметров

необходимо учитывать изменение сферичности капли и для этого целесообразно применять число On . В дальнейших исследованиях необходимо учитывать закрутку потока, вылетающего из форсунки.

Список литературы

1. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно - реактивных двигателей / Б.В. Раушенбах и др. – М.: Машиностроение, 1964. – 530 с.
2. Полуэмпирический анализ характеристики распыла жидкого топлива форсункой с отверстием в поперечном потоке воздуха / Цао Мин – Хуа и др. // Энергетические машины и установки. – 1982. – Т. 104, № 4. – С. 71-78.
3. Кроу, Шарма, Сток. Численное исследование газокпельных потоков с помощью модели “капля – внутренний источник” // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1977. – № 2. – С. 150-159.
4. Экспериментальное и расчетное исследование процессов в камерах сгорания перспективных схем // Отчет № 237 по научно-исследовательской работе. – Х.: ХВВАИУ, 1987. – 124 с.
5. Расчет траекторий капель в закрученных потоках с зонами обратных токов // Новости зарубежной науки и техники. Серия: авиационное двигателестроение. – 1990. – № 9. – С. 31-36.
6. Лева М. Псевдоожигение. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 164 с.
7. Бабуха Г.Л., Шрайбер А.А. Течения жидкостей и газов. – К.: Наукова думка, 1965. – 321 с.
8. Додж Л.Г., Швалб Дж.А. Структура факела распыленного топлива: сравнение экспериментальных данных с результатами математического моделирования гидродинамики испаряющегося факела // Современное машиностроение. – 1989. – № 8. – С. 21-31.

Поступила в редколлегию 13.12.2006

Рецензент: д-р техн. наук, ст. научн. сотр. О.Б. Леонтьев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

