

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ В УПОРЯДОЧЕННЫХ ПОТОКАХ МОНОДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ

АННОТАЦИЯ

Разработана методика исследования коэффициента сопротивления в упорядоченных потоках монодисперсных капель. Получены экспериментальные данные по коэффициенту сопротивления и проведено сравнение с результатами других работ.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются технологии, основанные на физическом эффекте вынужденного капиллярного распада струи (ВКРС). Актуальной задачей является исследование коэффициента сопротивления для капель упорядоченного потока, образующегося при ВКРС (рис. 1). В частности, информация о коэффициенте сопротивления необходима для расчета таких характеристик генераторов монодисперсных гранул [1], как скорость движения капель и длина теплообменной камеры.

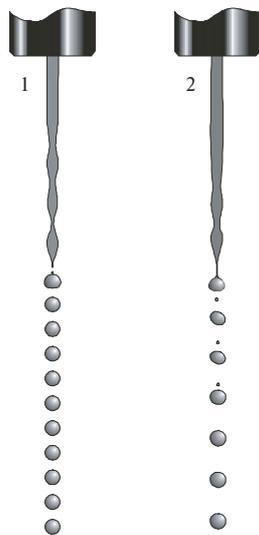


Рис. 1. Примеры вынужденного капиллярного распада струи: 1 – ВКРС; 2 – ВКРС с образованием капель-спутников

В литературе существует ряд зависимостей, описывающих сопротивление для случая одиночной сферической частицы как жидкой, так и твердой [2–6].

Сопротивление потока монодисперсных капель исследовалось в работах [7–10]. Результаты этих работ свидетельствуют о снижении коэффициента сопротивления по сравнению со случаем одиночной капли и о существенном влиянии на сопротивление межкапельного расстояния. Однако результаты этих работ не позволяют сделать однозначный вывод о

закономерности изменения коэффициента сопротивления для упорядоченного капельного потока.

В [8] исследование проведено только при двух значениях межкапельного расстояния ($l/d=2.7$ и $l/d=4.8$, здесь l – расстояние между центрами капель, d – диаметр капли). Основное внимание авторы уделили влиянию на коэффициент сопротивления значения отклонения капли δ от оси основного потока. Было получено, что при малых отклонениях (около 2-х диаметров капли) коэффициент сопротивления примерно в 5 раз меньше, чем для одиночной капли. При удалении капли от оси основного потока коэффициент сопротивления растет и при расстоянии, равном примерно 10 диаметрам капли, становится равен значению для случая одиночной капли. В работе [9] авторами проведены эксперименты при больших межкапельных расстояниях $l/d>8$. Полученные данные по коэффициенту сопротивления обобщены формулой, но расчет по ней не согласуется с результатами работы [8]. В соответствии с этим целью настоящей работы являются исследование коэффициента сопротивления в широком диапазоне межкапельных расстояний и разработка соответствующих расчетных рекомендаций.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения исследований была модифицирована установка, на которой ранее проводились исследования коэффициента теплоотдачи упорядоченных капельных потоков [11]. Схема модифицированной установки приведена на рис. 2.

В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Находящийся в баллоне 2 азот, поступающий через редуктор, создавал давление в емкости 1, и вода из нее поступала в генератор монодисперсного потока 10 с закрепленной в его нижней части плоской фильерой 11 с одним отверстием. При проведении опытов использовались фильеры с диаметром отверстия 0,1, 0,15 и 0,3 мм.

Возбуждение вынужденного капиллярного распада струи осуществлялось при помощи пьезоэлементов 9, на которые подавался синусоидальный сигнал от звукового генератора 7 или модулированный синусоидальный сигнал, полученный при помощи разработанного для этой цели блока модуляции 8. Частота синусоидального сигнала в опытах варьировалась в диапазоне 6–18 кГц. При использовании модулированного сигнала возбуждения удавалось пакетировать капли в потоке по 2, 4 или 6

штук. При этом частота следования каплей f соответственно уменьшалась, а межкапельное расстояние увеличивалось. Распад струи на монодисперсные капли происходил в воздухе при атмосферном давлении и температуре около 20 °С.

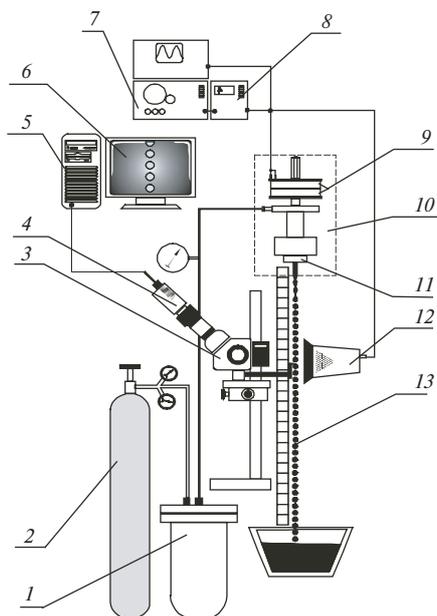


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – емкость с водой; 2 – баллон со сжатым азотом; 3 – микроскоп МБС-10; 4 – видеокамера; 5 – ЭВМ; 6 – монитор; 7 – звуковой генератор; 8 – блок модуляции; 9 – пьезоэлементы; 10 – генератор монодисперсного потока; 11 – фильера; 12 – стробоскоп; 13 – монодисперсный поток.

Для наблюдения за потоком 13 и измерения межкапельного расстояния использовались: видеокамера 4, смонтированная на окуляре микроскопа МБС-10 3; монитор для визуализации видеосигнала в ходе эксперимента 6; плата АЦП захвата видеобразований, установленная в ЭВМ 5 и источник стробоскопического освещения 12, синхронизированный с частотой следования каплей. Камера крепилась на штативе, позволяющем перемещать ее по вертикали и горизонтали для настройки изображения.

Участок потока, на котором проводились измерения, составлял для разных режимов от 150 до 300 мм.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Движение капли описывается уравнением:

$$ma = C_d \frac{\rho_{air} w^2}{2} F + mg, \quad (1)$$

где m – масса капли; a – ускорение капли; g – ускорение свободного падения; C_d – коэффициент сопротивления капли; ρ_{air} – плотность воздуха; $F = \pi d^2/4$ – площадь поперечного сечения капли; w – скорость капли.

Из (1) можно определить C_d :

$$C_d = \frac{m(a-g)}{\rho_{air} (w^2/2) F}. \quad (2)$$

Масса и диаметр каплей определялись следующим образом:

$$m = \frac{G}{f}; \quad (3)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{6G}{\rho_d f \pi}}, \quad (4)$$

где G – массовый расход жидкости (определялся весовым методом); f – частота следования каплей; ρ_d – плотность вещества капли (вода).

В случае распада струи под воздействием гармонических колебаний частота следования каплей равнялась частоте возбуждения струи.

Межкапельное расстояние и скорость капли определялись путем анализа изображения локального участка потока, количество каплей на котором в опытах варьировалось от 8 до 25 шт. Скорость определялась следующим образом. При помощи оптической системы измерялось расстояние между центрами крайних каплей на этом участке. Время прохождения каплей измеренного расстояния определялось по частоте следования каплей. После этого определялась средняя на локальном участке скорость каплей. Однако с учетом малой длины участка (менее 20 мм) эту скорость можно считать локальной по отношению ко всей исследуемой длине капельного потока. Путем перемещения оптической системы измерения скорости каплей производились в нескольких точках по длине потока (в разных опытах от 2 до 6 точек). Типичный вид распределения скорости по вертикальной координате показан на рис. 3.

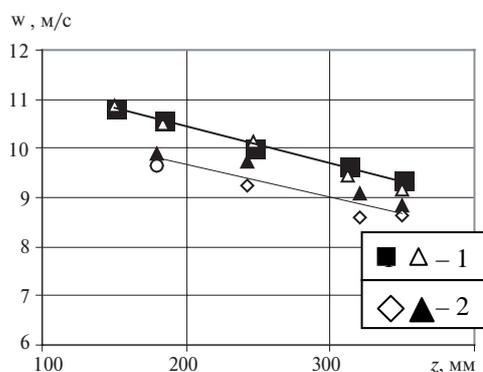


Рис. 3. Распределение скорости каплей по вертикальной координате z : 1 – режим без слияния каплей; диаметр капли $d=0.22$ мм, межкапельное расстояние $l/d=2.5$; 2 – режим со слиянием по 4 капли. $d=0.44$ мм, межкапельное расстояние $l/d=5.7$; темные точки – повторные реализации режимов

Видно, что на участке измерения скорость может быть аппроксимирована линейной зависимостью. Также видно, что для случая распада без слияния разброс значений скорости существенно меньше, чем для случая, когда капли сливаются. Это связано с тем, что в режимах со слиянием каплей наблюдалось ухудшение стабильности упорядоченного потока и нарастало угловое отклонение их от оси.

Поскольку скорость и ускорение капель на исследуемой длине потока изменялись слабо (не более чем на 20%), при обработке результатов измерений по соотношению (2) определялось лишь среднее на этой длине значение коэффициента сопротивления. При этом использовалось среднее по длине значение скорости капля w_{ev} . Среднее значение ускорения определялось следующим образом:

$$a = \frac{w_H - w_B}{\tau}, \quad (5)$$

где w_H – скорость капли в нижней точке участка измерений; w_B – скорость капли в верхней точке участка измерений; $\tau = L / w_{ev}$ – время, за которое капля проходит расстояние от верхней точки участка измерений до нижней; L – длина исследуемого потока каплей.

Проведенные оценки показали, что максимальная погрешность полученных данных не превышает 30%.

Было проведено несколько серий экспериментов по определению сопротивления капельного потока. Диаметр каплей варьировался в диапазоне $d = 0.2 - 0.6$ мм, межкапельное расстояние – $l/d = 2-8$, число Рейнольдса – $Re = 95-400$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Полученные результаты показаны на рис. 4 в виде зависимости относительного коэффициента сопротивления C_d/C_{d0} от межкапельного расстояния. Коэффициент сопротивления одиночной капли C_{d0} определялся по зависимости из работы [2]:

$$C_{d0} = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{2/3}).$$

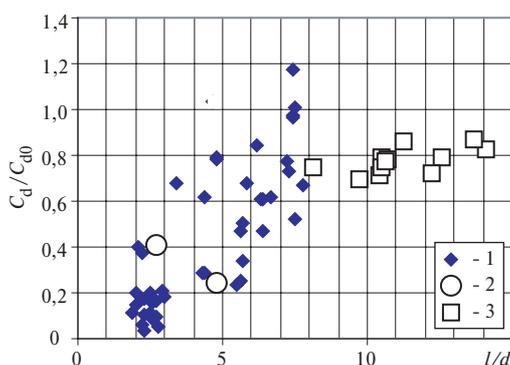


Рис. 4. Зависимость относительного коэффициента сопротивления каплей монодисперсного потока C_d/C_{d0} от межкапельного расстояния l/d : 1 – данные настоящей работы; 2 – данные [8]; 3 – данные [9]

На рис. 4 приведены также данные из работы [9], полученные для больших межкапельных расстояний $l/d > 8$, соответствующих предельному переходу к условиям одиночной капли. Кроме того, при значении $l/d = 2.7$ и $l/d = 4.8$ приведены две точки из работы [8], которые получены в условиях, максимально приближенных к условиям упорядоченного капельного потока (с минимальным отклонением ка-

пель от оси потока $\delta = 2.5d$ и $\delta = 2d$ соответственно). Видно, что приведенные на рисунке данные согласуются между собой и наблюдается сильная зависимость сопротивления C_d/C_{d0} от l/d . Эта зависимость подобна полученной авторами ранее зависимости коэффициента теплоотдачи [11], что свидетельствует об аналогии теплоотдачи и сопротивления в упорядоченных капельных потоках.

Сильное уменьшение сопротивления при уменьшении межкапельного расстояния по сравнению с одиночными каплями можно объяснить следующим образом. В отличие от случая одиночной капли при движении капельного потока вокруг него образуется спутный поток газа. Как показано в работе [8], скорость этого потока увеличивается при уменьшении l/d . В результате этого относительная скорость каплей (разность скорости капли и скорости окружающего газа) уменьшается (при $l/d = 2$ – примерно в 4 раза). Кроме того, при движении капли в потоке она находится в вихревом следе предыдущей капли. Воздействие отмеченных факторов зависит как от межкапельного расстояния, так и от числа Рейнольдса. Достаточно большой разброс C_d/C_{d0} при фиксированном значении l/d , возможно, обусловлен влиянием числа Re . Однако выявить закономерность этого влияния на данном этапе исследований не удалось.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- l – расстояние между центрами двух соседних каплей, мм;
- d – диаметр капли, мм;
- f – частота, Гц;
- m – масса, кг;
- a – ускорение, m/c^2 ;
- C_d – коэффициент сопротивления;
- ρ_{air} – плотность воздуха, kg/m^3 ;
- g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;
- w – скорость, м/с;
- w_{ev} – средняя скорость, м/с;
- G – массовый расход, кг/с;
- ρ_d – плотность вещества капли, kg/m^3 ;
- τ – время, с;
- z – вертикальная координата, мм;
- C_{d0} – коэффициент сопротивления одиночной капли;
- Re – критерий Рейнольдса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анкудинов В.Б., Кленов М.Г., Марухин Ю.А., Огородников В.П. Получение монодисперсных гранул методом вынужденного капиллярного распада струи расплава металла // *Материаловедение*, 1997. № 5. С. 9.
2. Clift R., Grace J., Weber M. *Bubbles, Drops and Particles*. New York: Academic Press, 1978.
3. Браунштейн Б.А., Фишбейн А.Н. *Тепломассообмен в дисперсных системах*. М.: Химия, 1979.
4. Райст П. *Аэрозоли*: Пер. с англ. М.: Мир, 1978.
5. Нигматулин Р.И. *Динамика многофазных сред*. М.: Наука, 1978. Т.1.
6. Экспериментальное и численное исследование характеристик конвективной теплоотдачи в завесе свободно падающих частиц / Дж. Хруби, Р. Стипер, Г.Эванс,

- С. Кроу // Современное машиностроение. 1989. Сер. А. №3. С. 47 – 58.
7. **Nguyen Q.V., Dunn-Runkin D.** Experiments examining drag in linear droplet packets // Experiments in Fluids. 1992. Vol.12. P. 157 – 162.
8. **Connon C.S., Dunn-Runkin D.** Flow behavior near an infinite droplet stream // Experiments in Fluids. 1996. Vol.21. P. 80 – 86.
9. **Tinaguchi I., Kuriyama T., Asano K.** Simultaneous measurement of drag coefficients and mass transfer of a chain of uniform volatile drops // J. Chem. Eng. of Japan. 1991. Vol. 24. N 2. P. 232–237.
10. **Mullholland J., Srivastava R., Wendt J.** Influence of droplet spacing on drag coefficient in nonevaporating monodisperse streams // AIAA J. 1988. Vol.26. P. 1231 – 1237.
11. **Анкудинов В.Б., Кленов М.Г.** Экспериментальное исследование конвективной теплоотдачи в упорядоченном потоке монодисперсных капель // ТВТ.2005. Т.43. №4. С.625–630.