

А. МУЛЬГИ

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ В ДВУХФАЗНОЙ СТРУЕ

В работе рассчитываются относительные скорости движения одиночных твердых частиц диаметрами 32, 72 и 80 мкм, совпадающими с характерными размерами используемых в эксперименте электрокорундовых порошков, вдоль оси свободной турбулентной двухфазной струи типа газ—твердые частицы. Скорости затухания воздушной фазы вдоль оси струи брались из экспериментальных данных М. Лаатса и Ф. Фришмана [1], учитывавших влияние твердых частиц на аэродинамику струи. На основе полученных данных проводится оценка влияния начальной концентрации и характерной гидравлической крупности примеси на относительные скорости частиц.

Среди технических задач часто встречаются задачи механики двухфазных струй газа с примесью твердых частиц, для решения которых большое значение имеет правильное понимание характера движения частиц, учет их относительных скоростей, что во многом определяет рассеивание твердой примеси, а также влияние ее на динамику струи.

Первые экспериментальные и теоретические исследования по выяснению закономерностей движения частиц в турбулентной струе связаны с работами А. Чернова, С. Бухмана [2,3] и Г. Скворцова [4]. Общим в этих работах является то, что по существу рассматривалось движение единичных частиц в воздушной струе, поэтому полученные ими результаты неприменяемы для истинно двухфазных струй, где твердая примесь оказывает существенное влияние на развитие струи даже при очень малых весовых концентрациях ее. Экспериментальные исследования М. Лаатса [5] показали, что введение небольшого количества инерционной примеси в воздушную струю приводит к некоторому замедлению затухания струи, иначе говоря, затухание двухфазной струи заметно отличается от воздушной. Поскольку относительные скорости зависят от скорости затухания несущей фазы, то следует ожидать, что скорости движения частиц в двухфазной струе будут значительно отличаться от таковых в воздушной.

Из физических соображений следует, что в свободных струях должна существовать относительная скорость движения твердых частиц и газа: вследствие инертности частицы не могут приобретать столь больших значений отрицательного ускорения, которые получает газ в результате турбулентного смешения.

Заметим, что в вопросах группового движения твердых частиц в неподвижной среде еще многое не выяснено, поэтому задача о движении совокупности частиц сводится в первом приближении к задаче о движении одиночной твердой частицы, решение которой является пока единственным исходным материалом при качественном анализе движения всей совокупности частиц в двухфазной струе.

Рассмотрим те силы, которые действуют на частицу в двухфазной струе. Они следующие: динамические силы, вызванные движением частицы в свободной двухфазной струе; внешние силы (гравитационная сила, сила Архимеда, сила взаимодействия с другими частицами и другие) и силы сопротивления, обусловленные вязкостью и вихреобразованием.

Введем следующие обозначения: v , $w = v - u$ — абсолютная и относительная скорости частицы; u — скорость воздушной компоненты в двухфазной струе; v^* — скорость витания частицы; d , ρ_c , m — диаметр, плотность и масса частицы; ρ , μ — плотность и динамическая вязкость воздуха; β — коэффициент присоединенных масс; ξ_ϕ — коэффициент формы частицы.

Тогда уравнение поступательного движения отдельной частицы может быть записано в следующем виде [6]:

$$m \frac{dV}{dt} = F_p + F_\mu + F_g. \quad (1)$$

Здесь F_p — инерционная сила, которая при неустановившемся поступательном движении твердых тел в ускоренных потоках определяется как

$$F_p = \frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\rho}{\rho_c} m \frac{dU}{dt}, \quad (2)$$

где K — главный вектор присоединенного количества движения газа; для данного случая его компонента будет

$$K = -\beta w. \quad (3)$$

F_g — результирующая внешних сил, действующих на частицу.

F_μ — сила сопротивления, которая обычно определяется при помощи дополнительных допущений, в зависимости от величины числа Рейнольдса.

Удобную форму для определения силы сопротивления свободному движению сферы в интересующем нас диапазоне изменений чисел Рейнольдса $Re < 10^4$ предложил М. Кравцв [7]. Анализируя теоретическое решение Осена, он установил приближенную связь между тремя законами сопротивления движению сферы Стокса, Прандтля—Аллена и Ньютона—Риттингера соответственно в ламинарном, переходном и турбулентном режимах. Все три вида сопротивления имеют место во всем диапазоне чисел Рейнольдса, поэтому изолированное рассмотрение каждого из них всегда приводило к неточному результату.

Формулу можно записать в следующем виде:

$$F_\mu = - \left(2,85 \mu d \cdot w + K \pi d \cdot \frac{\rho \cdot w w}{2} + 0,333 \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho w w}{2} \right). \quad (4)$$

Здесь $K = 1,67 \sqrt{\frac{338 \cdot \rho}{\mu}} = 0,35 \cdot 10^{-3}$ (с учетом данных расчета при $\rho = 760$ мм рт. ст.; $T = 10^\circ \text{C}$).

При расчете скорости движения твердой частицы в несжимаемой воздушной среде воспользуемся следующими допущениями:

1. Движение частицы считается чисто аксиальным, так как изменение кинетической энергии частицы определяется в нашем случае главным образом приростом горизонтальной составляющей скорости.

2. Движение частицы — квазистационарное. Это дает возможность использовать приведенный выше закон сопротивления свободному установившемуся движению сферы в вязкой среде.

3. Частица не подвержена воздействию турбулентных пульсаций.

4. Исследуется диапазон тонких фракций электрокорунда ($20 \text{ мкм} < d < 80 \text{ мкм}$). Учитывается коэффициент ξ_ϕ , зависящий от формы частиц и характеризующий изменение удельного миделева сечения по отношению к шару ($\xi_\phi = 1,2 \div 1,25$).

5. В системе газ-твердые частицы, где $\rho_n \gg \rho$, $d \leq 80 \text{ мкм}$, а $v^* \leq 0,8 \text{ м/сек}$, сила сопротивления F_μ значительно преобладает над инерционной F_p и внешней F_g силами, поэтому последними можно пренебречь. В этом нетрудно убедиться, сопоставив члены уравнения (1).

6. Сила взаимодействия при столкновении и сила гидродинамического взаимодействия частиц на близких расстояниях при расчете не учитываются. Следует отметить, что эффекты подобного взаимодействия в двухфазных струях еще не изучены, но наши наблюдения дают основание предположить, что они не оказывают значительного влияния на поведение отдельной частицы.

7. Так как вращательная инерция частиц с $d \leq 80 \text{ мкм}$ очень мала, вращением частиц также пренебрегаем.

Используя очевидное равенство $\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial x} v$, запишем уравнение (1) в следующем виде:

$$m \frac{\partial v}{\partial x} \cdot v = \xi_\phi F_\mu. \quad (5)$$

Алгоритмом решения этого дифференциального уравнения является схема Рунге—Кутты. Траектория рассчитывалась при следующем начальном условии: $v = v_0 = u_0$ при $x = 0$. Величина интервала интегрирования $\Delta x = 0,0125 \text{ м}$, дающая минимальную погрешность, выбиралась с учетом кривизны линии затухания осевой скорости воздушной фазы. Относительная скорость на длине этого интервала принималась постоянной, равной разности значений скоростей частиц и воздуха соответственно в начале и середине рассматриваемого интервала интегрирования.

Используя (5), запишем уравнение для первого приближения

$$v_{n+1} = v_n - \left(A \frac{w_n}{v_n} + B \frac{w_n^2}{v_n} + C \frac{w_n^3}{v_n} \right). \quad (6)$$

Здесь

$$A = \xi_\phi \frac{2,85\pi\mu d}{m} \Delta x = \frac{90,59 \cdot 10^{-9}}{d^2} \Delta x,$$

$$B = \xi_\phi \frac{0,333\pi d^2 \rho}{8m} \Delta x = \frac{8,99 \cdot 10^{-5}}{d} \Delta x,$$

$$C = \xi_\phi \frac{0,35\pi d \rho}{2m} \Delta x = \frac{3,78 \cdot 10^{-7}}{d^2} \Delta x.$$

Полученные из расчета скорости движения отдельной частицы данные позволяют провести качественный анализ для выявления степени влияния начального весового содержания и характерного размера примеси на относительные скорости в двухфазной струе.

Установлено [1, 2], что затухание осевой скорости воздушной фазы в двухфазной струе зависит как от размера частиц, так и от начальной весовой концентрации примеси, значит и относительная скорость будет также зависеть от этих параметров. Влияние примеси на дина-

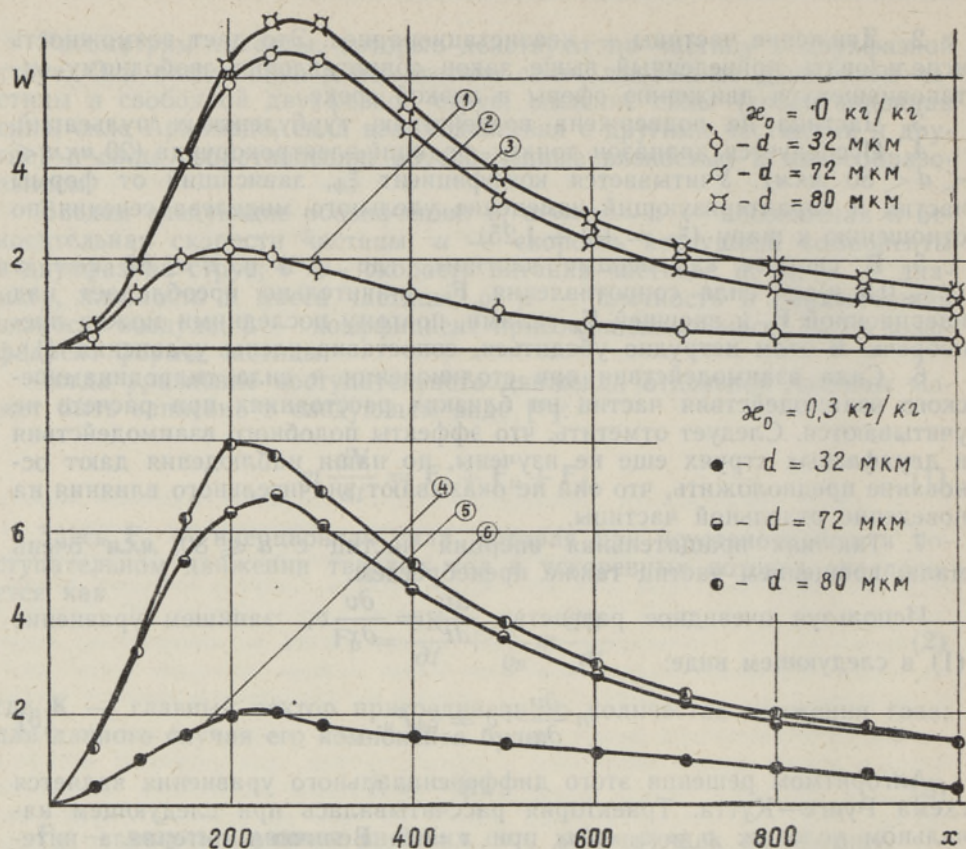


Рис. 1. Зависимость относительных скоростей от характерных размеров примеси в двухфазной струе.

мику струи связано с закономерностями межфазового обмена импульсом, а также с изменением структуры турбулентности несущей фазы.

Действительно, из рис. 1 видно, как размеры частиц влияют на их относительные скорости при определенной начальной концентрации. Чем тоньше примесь, тем большее влияние она оказывает на развитие струи; заметим, что относительная скорость у мелкой примеси меньше, чем у более крупной.

Зависимость относительной скорости от начального весового содержания примеси несколько сложнее. Здесь имеет смысл говорить о влиянии примеси на отдельных участках развития струи. Примесь с характерным размером частиц до 60 мкм (рис. 2) на начальном участке развития струи имеет относительную скорость частиц (кривые 3—6) тем меньше, чем больше концентрация примеси. Для частиц размерами более 60 мкм (кривые 1, 2) на начальном и основном участках, как и для частиц до 60 мкм на основном участке, увеличение концентрации примеси влечет за собой увеличение относительной скорости.

Таким образом, предложенный расчет относительных скоростей в турбулентной двухфазной свободной струе на основе решения уравнения (5) движения частицы при учете наиболее общего выражения силы сопротивления (4) для всех режимов обтекания частицы и при $Re < 10^4$ позволяет судить вообще о порядке относительных скоростей ча-

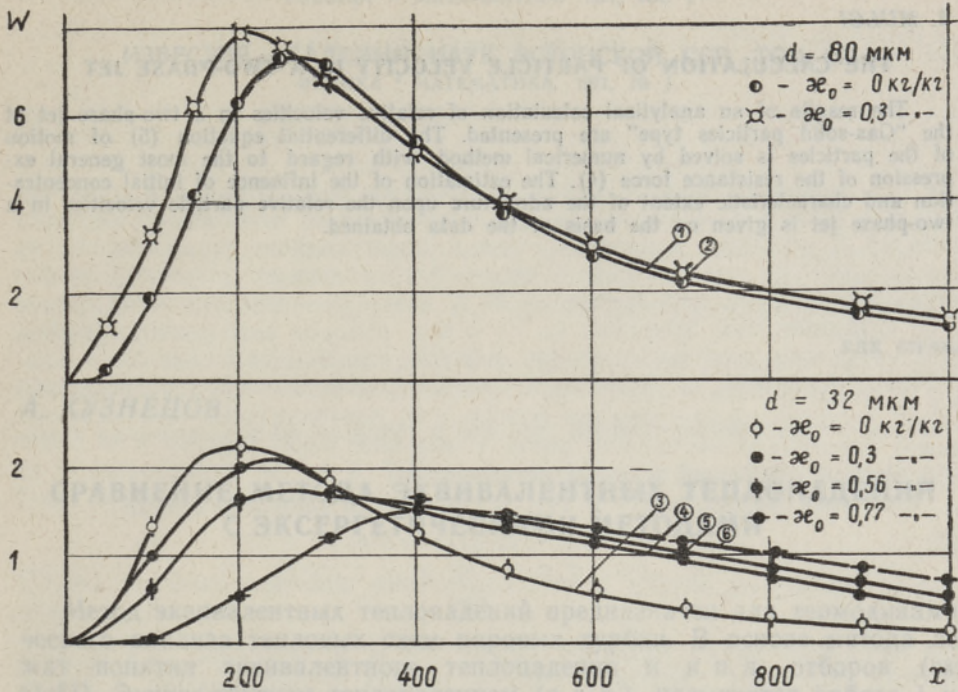


Рис. 2. Зависимость относительных скоростей от начальных концентраций примеси в двухфазной струе.

стиц и воздуха в зависимости от изменения различных режимных параметров струи, а также о возможном влиянии относительных скоростей на особенности развития двухфазной струи и рассеивания в этой струе твердой примеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаатс М. К., Фришман Ф. А., Изв. АН СССР, МЖГ, № 1 (1970).
2. Чернов А. П., Изв. АН КазССР, Сер. энерг., № 3 (1955).
3. Бухман С. В., Чернов А. П., Изв. АН КазССР, Сер. энерг., № 10 (1956).
4. Скворцов Г. Е., ИФЖ, 7, № 5 (1964).
5. Лаатс М. К., ИФЖ, 10, № 1 (1966).
6. Хаскинд М. Д., Изв. АН СССР, ОТН, № 11 (1956).
7. Кравцов М. В., ИФЖ, 15, № 3 (1968).

Институт термодинамики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
2/III 1970

A. MULGI

KAHEFAASILISES JOAS SISALDUVATE OSAKESTE LIIKUMISKIIRUSE ARVUTLUS

Esitatakse kahefaasilises joas (gaas — tahked osakesed) sisalduvate osakeste suhteliste kiiruste analüütilise arvutluse tulemused. Arvulise meetodi abil lahendatakse osakeste liikumise diferentsiaalvõrrand (5), arvestatakse kõige üldisemat avaldist takistusjõu jaoks (4). Saadud andmete põhjal hinnatakse algkontsentratsiooni ja osakeste karakterse suuruse mõju osakeste suhtelistele kiirustele kahefaasilises joas.

4. MULGI

THE CALCULATION OF PARTICLE VELOCITY IN A TWO-PHASE JET

The results of an analytical calculation of relative velocities in a two-phase jet of the "Gas-solid particles type" are presented. The differential equation (5) of motion of the particles is solved by numerical method with regard to the most general expression of the resistance force (4). The estimation of the influence of initial concentration and characteristic extent of the admixture upon the relative particle velocities in a two-phase jet is given on the basis of the data obtained.

