

УДК 532.517.4

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ, НЕСУЩЕЙ ТЯЖЕЛЫЕ ПРИМЕСИ**

**ГИРШОВИЧ Т. А., КАРТУШИНСКИЙ А. И., ЛААТС М. К.,  
ЛЕОНОВ В. А., МУЛЬГИ А. С.**

Приводятся результаты экспериментального исследования затопленной струи, несущей тяжелые сферические частицы при равномерных полях скорости частиц и газа и концентрации частиц на срезе сопла. Лазерно-оптическим методом проводились измерения полей скорости газа и частиц и концентрации примеси при изменении расходной концентрации примеси от 0 до 1,5 и крупности частиц от 35 до 67 мкм. Найдено, что течение в струе существенно неравновесно, а степень неравновесности и интенсивность перемешивания в струе зависят от концентрации примеси и размера частиц. При исследовании начального участка обнаружено несколько аномальное поведение струи при сравнительно небольшом значении расходной концентрации примеси ( $\alpha_0=0,5$ ), указывающее на необходимость учета предьстории течения при создании методики расчета начального участка двухфазной струи.

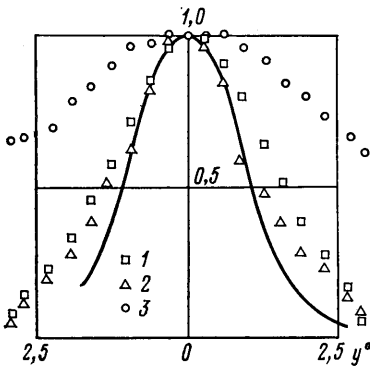
Создание методики расчета струй, несущих тяжелые примеси, должно опираться на результаты «модельных» опытов, в которых реализовались бы допущения, обычно принимаемые при схематизации течения в струе. Для струи, несущей тяжелые примеси, такими допущениями являются равномерность полей скорости частиц и газа и концентрации частиц на срезе сопла, монодисперсность и сферичность частиц и заданная разность скоростей фаз на срезе сопла.

Экспериментальному исследованию турбулентных струй с твердыми или капельно-жидкими примесями посвящен ряд работ. В некоторых из них, например в [1, 2], концентрация примеси была настолько малой, что примесь являлась пассивной, т. е. не влияла ни на осредненные, ни на пульсационные характеристики струи. В этом случае получены некоторые сведения о диффузии примеси в турбулентной струе при разной крупности частиц или капель. Эксперименты [3, 4] позволили исследовать влияние концентрации и крупности примеси на осредненные и пульсационные характеристики струи. Следует отметить, однако, что профили скорости частиц и газа и концентрации примеси на срезе сопла в этих опытах были существенно неравномерными, а частицы — несферическими.

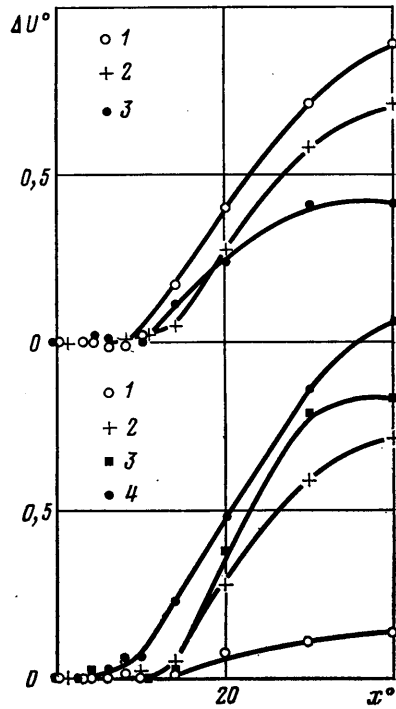
Ниже приводятся результаты экспериментального исследования осредненных характеристик турбулентной струи, несущей тяжелые сферические частицы (плотность материала примеси  $850 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ ). Сделана попытка приблизить условия опытов к «модельным». Эксперимент проводился на установке, аналогичной описанной в [3–5] и отличающейся от нее наличием специальной формирующего устройства, обеспечивающего получение равномерных профилей скорости частиц, газа и концентрации примеси,

а также заданную разность скоростей фаз на срезе сопла [6]. Опыты проводились с практически монодисперсными порошками, имеющими средний диаметр частиц 35; 45; 60; 67 мкм.

В эксперименте лазерно-оптическим методом [5, 7] измерялись профили скорости частиц и газа и профили относительной концентрации примеси (под концентрацией понимается отношение кг примеси к кг воздуха) в поперечных сечениях струи на расстояниях 3; 45; 60; 90; 120; 150; 210; 300; 450 и 600 мм от среза сопла радиусом  $r_0=15$  мм при начальных концентрациях примеси  $\kappa_0$ , равных 0; 0,5; 1,0 и 1,5. Скорость частиц и газа на срезе сопла была равной 35 м/с. В качестве частиц-меток, визуализирующих движение газовой фазы,



Фиг. 1



Фиг. 2

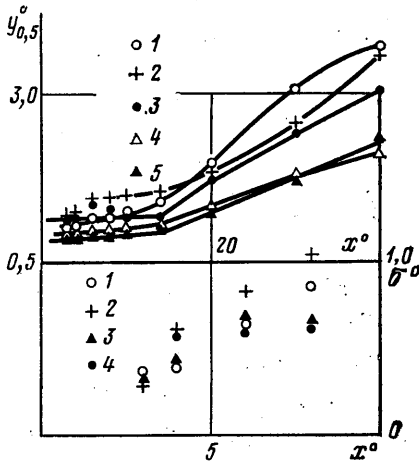
использовались в малых добавках частицы электрокорунда с размером меньше 5 мкм.

Исследование влияния концентрации примеси на характеристики струи проводилось для частиц со средним размером 45 мкм. Исследование влияния крупности частиц проводилось при начальной концентрации примеси, близкой к единице.

На фиг. 1 приведены профили скорости частиц и газа и концентрации частиц диаметром 45 мкм на относительном удалении от среза сопла  $x/r_0$ , равном 14, начальной концентрации  $\kappa_0=1$  и равных скоростях частиц и газа на срезе сопла. Сплошной линией показан профиль относительной концентрации примеси  $\kappa/\kappa_m$ , где  $\kappa_m$  — значение концентрации на оси струи. Точки 1, 2, 3 — профили скоростей газа в чисто газовой струе, газа в двухфазной струе и частиц, отнесенные к соответствующим параметрам на оси струи. Расстояние от оси струи  $y^\circ$  отнесено к радиусу сопла  $r_0$ . Из фиг. 1 видно, что профили скорости частиц твердой фазы и газа существенно различаются между собой. Таким образом, если плотность частиц велика и существенно выше плотности газа, как в данном случае, то инерционность частиц приводит к тому, что безразмерные профили осредненной скорости нельзя считать одинаковыми, как это принималось в [8, 9]. Из фиг. 1 видно также, что профиль концентрации частиц существенно уже профиля скорости газа. Это согласуется с результатами опытов [3] и под-

тверждает полученный в [10] теоретический результат, состоящий в том, что при движении смеси газа с твердыми частицами коэффициент турбулентного переноса количества движения больше, чем коэффициент турбулентного переноса дискретной примеси, тогда как при движении смеси газов имеет место обратный эффект.

На фиг. 2 показано изменение относительной разности скоростей фаз на оси струи при разных концентрациях примеси и крупности частиц.



Фиг. 3

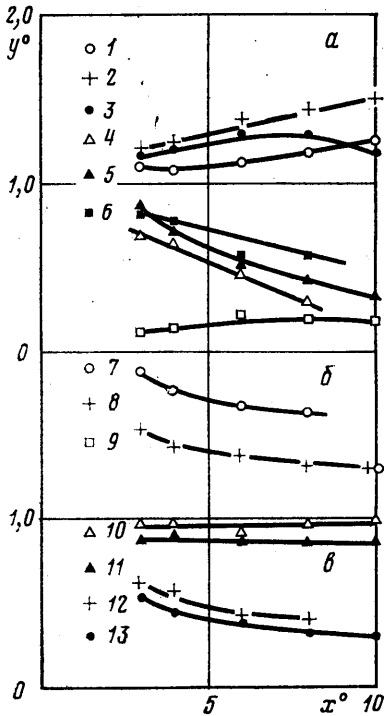
Здесь  $\Delta u^*$  — разность осевых скоростей частиц и газа, отнесенная к осевой скорости газа;  $x^*$  — расстояние от среза сопла, отнесенное к его радиусу. Для верхней группы точек диаметр частиц твердой примеси равнялся 45 мкм, точки 1, 2, 3 соответствуют начальной концентрации примеси 0,5; 1,0; 1,5. Для нижней группы точек начальная концентрация примеси равнялась 1,0, точки 1–4 соответствуют диаметрам частиц 35; 45; 60 и 67 мкм. Из графика видно, что, как и следовало ожидать, с ростом крупности частиц разность скоростей фаз (неравновесность течения) на одном и том же расстоянии от среза сопла растет. С увеличением концентрации примеси относительная неравновесность течения уменьшается. Это уменьшение объясняется тем, что с ростом концентрации примеси растет дальность струи, т. е. падение скорости газа вдоль оси становится меньше, что и приводит к уменьшению неравновесности течения. Из рассмотрения графика можно сделать вывод о том, что течение в струе, несущей тяжелые частицы, существенно неравновесно не только в пульсационном, как это принималось в [8, 9], но и в осредненном движении.

На фиг. 3 сопоставляются границы струи по скорости газа и концентрации твердой примеси, определенные как линии, на которых скорость и концентрация равны половине своих значений на оси струи, для частиц диаметром 45 мкм (верхняя группа точек). Здесь  $y_{0,5}^*$  — ординаты точек, в которых скорость газа или концентрация примеси равны соответственно половине осевой скорости газа или концентрации примеси, отнесенные к радиусу сопла. Точки 1, 2, 3 соответствуют границе струи по скорости газа при начальной концентрации примеси, равной 0; 0,5; 1,0; точки 4, 5 — границе струи по концентрации твердой примеси при начальной концентрации 0,5 и 1,0. Из графика видно, что, так же как в [3], границы струи, определенные по половинному значению концентрации примеси, уже соответствующих границ струи по скорости газа. С ростом начальной концентрации примеси границы струи по половинному значению скорости газа в основном участке струи сужаются. В начальном участке струи при  $x_0 = 0,5$  расширение границ струи происходит интенсивнее, чем границ струи чистого газа ( $x_0 = 0$ ). Дальнейший рост начальной концентрации примеси приводит к некоторому уменьшению этой интенсивности.

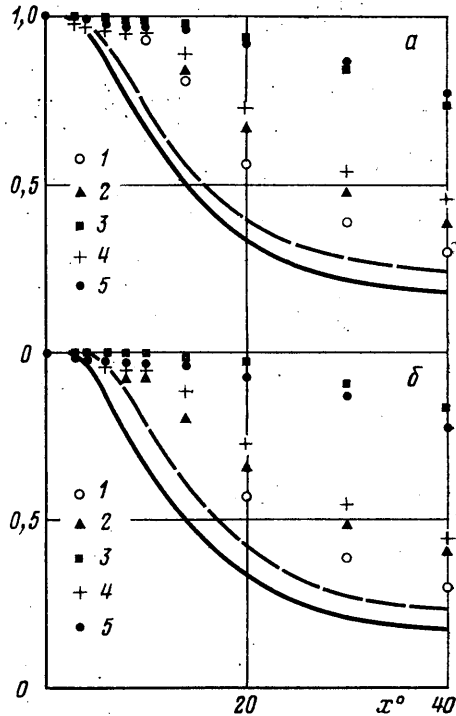
На той же фигуре для разных величин начальной концентрации примеси приведено изменение ширины зоны смешения струи по скорости газа с расстоянием от среза сопла, определяемой как разность ординат точек, в которых скорость равна 0,5 и 0,95 от скорости газа в ядре струи (нижняя группа точек). Здесь  $\delta^*$  — ширина зоны смешения, равная  $(y_{0,5}^* - y_{0,95}^*) /$

$/r_0$ ; точки 1–4 соответствуют начальным концентрациям примеси 0; 0,5; 1,0; 1,5.

Из графика видно, что интенсивность расширения зоны смешения при  $x_0=0,5$  выше, чем при других значениях концентрации и чем у струи чистого газа. С ростом начальной концентрации примеси интенсивность расширения зоны смешения уменьшается. Механизм взаимодействия частиц и газа в этом случае можно представить следующим образом. Поскольку



Фиг. 4



Фиг. 5

устройство, формирующее течение на срезе сопла, видимо, препятствует турбулизации пограничного слоя на стенках сопла, то течение чистого газа вблизи среза ламинарное. При небольшом добавлении к потоку частиц происходит турбулизация потока и, следовательно, увеличение интенсивности расширения зоны смешения. Рост начальной концентрации вследствие эффекта подавления турбулентности частицами, отмеченного в [4 и 8], приводит к некоторому уменьшению интенсивности расширения зоны смешения струи по скорости. С удалением от среза сопла второй эффект — уменьшение степени турбулентности струи под действием частиц — становится преобладающим.

Приведенные результаты опытов показывают, что при создании методики расчета характеристик начального участка следует учитывать предысторию течения и каким-то образом вводить в модель влияния частиц на пульсационные характеристики струи не только эффект подавления турбулентности, но и эффект возможной турбулизации течения частицами.

На фиг. 4, а для разных величин концентрации примеси с диаметром частиц 45 мкм приведено изменение границ зоны смешения по скорости газа, определенных как линии, на которых скорости равны 0,5 и 0,95 от

скорости газа в ядре струи, с расстоянием от среза сопла. Точки 1, 2, 3 соответствуют безразмерным ординатам точек, в которых скорость газа равна половине осевого значения при начальных концентрациях примеси, равных 0, 0,5 и 1,0. Точки 4, 5, 6 относятся к значениям скорости газа, равным 0,95 от скорости в ядре струи соответственно при  $x_0=0; 0,5; 1,0$ . Из этого графика видно, что с ростом начальной концентрации примеси длина начального участка струи по скорости газа несколько возрастает (даже при концентрации  $x_0=0,5$ , при которой наблюдается наиболее интенсивный рост ширины зоны смешения).

На фиг. 4, б приведено сравнение границ ядра струи по скорости газа, концентрации примеси и скорости твердой фазы — точки 7, 8, 9 — при начальной концентрации, равной 1. Видно, что ядро постоянной скорости газа и ядро постоянной концентрации примеси короче ядра постоянной скорости частиц и практически во всей области начального участка струи, в котором существует ядро постоянной скорости газа, скорость частиц при равновесном истечении из сопла можно считать постоянной и равной скорости на срезе сопла.

На фиг. 4, в показаны границы зоны смешения струи по концентрации примеси, определенные как линии, на которых концентрация равна 0,5 (точки 10, 11) и 0,95 (точки 12, 13) от концентрации на оси струи в начальном участке. Здесь точки 10 и 12 соответствуют начальной концентрации примеси 0,5, точки 11 и 13 — начальной концентрации 1,0. Из графика видно, что определяемые таким образом границы зон смешения практически не зависят от величины начальной концентрации примеси.

На фиг. 5 показано изменение скоростей газа и частиц и концентрации примеси на оси струи для различных величин начальной концентрации примеси и разной крупности частиц. На фиг. 5, а пунктирной и сплошной линиями показаны изменения осевой концентрации примеси при  $x_0=0,5$  и 1,0, точки 1 показывают распределение скорости газа вдоль оси для чисто газовой струи. Точки 2 и 4 соответствуют скоростям газа в двухфазной струе при начальных концентрациях примеси 0,5 и 1,0. Распределение скоростей частиц при  $x_0=0,5$  и 1,0 показано соответственно точками 3 и 5. Все указанные параметры приведены для частиц со средним диаметром 45 мкм. На фиг. 5, б изменения осевых параметров даны для начальной концентрации примеси, равной 1. Здесь пунктирная линия показывает распределение осевой концентрации примеси со средним диаметром частиц 67 мкм, сплошная линия — то же для частиц со средним диаметром 45 мкм. Точки 1 — скорость газа в чисто газовой струе. Точки 2 и 4 — скорость газа в струе с частицами размером 67 и 45 мкм. Точки 3 и 5 показывают изменение скорости частиц со средними диаметрами соответственно 67 и 45 мкм. Представленные данные показывают, что увеличение концентрации примеси ведет к менее интенсивному падению скорости вдоль оси и более интенсивному падению осевой концентрации примеси. Интенсивность падения скорости частиц слабо зависит от начальной концентрации примеси. Увеличение размеров частиц ведет к менее интенсивному падению осевой концентрации примеси. Изменение скорости газа вдоль оси в случае более крупных частиц приближается к изменению осевой скорости чисто газовой струи. Интенсивность падения осевой скорости частиц, как и следовало ожидать, с ростом размеров частиц уменьшается.

Таким образом, проведенные опыты позволили получить дополнительные сведения о поведении тяжелых сферических частиц в начальном и основном участках двухфазной струи и о влиянии частиц на осредненные характеристики течения, а также уточнить те допущения, которые можно принять при создании методики расчета таких струй. Основным результатом исследования является обнаруженная в опытах существенная нерав-

новесность течения, которая растет с ростом крупности частиц и при заданной крупности — с уменьшением концентрации частиц.

Следует отметить, что изложенная в [9] методика расчета двухфазной струи опирается на допущение о равенстве скоростей частиц и газа в осредненном движении. Очевидно, что при расчете струй, несущих частицы не слишком большой плотности и не слишком большой крупности, такое допущение может быть сделано, о чем свидетельствует вполне удовлетворительное согласование результатов расчетов с опытами [3]. Но при создании методики расчета двухфазной струи, охватывающей более широкий диапазон изменения отношения плотностей частиц и газа и крупностей частиц, следует отказаться от допущения о равновесности осредненного течения и о совпадении границ струи по скоростям частиц и газа. Более того, при расчете начального участка двухфазной струи скорость частиц, как отмечалось выше, можно принять неизменной в поперечном сечении струи и равной скорости частиц на срезе сопла. Обнаруженная в опытах существенная неравновесность течения даже при равенстве скоростей частиц и газа на срезе сопла должна учитываться также в модели влияния примеси на турбулентную структуру струи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Yui S., Yasukoushi N., Hiroswawa Y. Particle turbulent diffusion in a dust laden round jet.— A. I. Ch. E Journal, 1978, v. 24, No. 3.
2. Goldschmidt V. W., Householder M. K., Ahmadi G., Chuang S. C. Turbulent diffusion of small particles suspended in turbulent jets.— Progr. Heat and Mass Transfer., v. 6. Proc. Int. Symp. Two-Phase Syst., Haifa, 1971. Oxford e.a., 1972.
3. Лаатс М. К., Фришман Ф. А. О допущениях, применяемых при расчете двухфазной струи.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1970, № 2.
4. Лаатс М. К., Фришман Ф. А. Разработка методики и исследование интенсивности турбулентности на оси двухфазной турбулентной струи.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1973, № 2.
5. Розенштейн А. З., Самуэль К. Я. Применение лазерного доплеровского измерителя скорости для исследования двухфазных течений типа «газ — твердые частицы».— Изв. АН ЭССР, Сер. физ., матем., 1974, № 1.
6. Лаатс М. К., Фришман Ф. А. Движение и рассеивание мелкого дискретного материала на начальном участке двухфазной струи.— В кн.: Турбулентные двухфазные течения. Таллин, 1979.
7. Розенштейн А. З. Измерение параметров потоков «газ — твердые частицы» оптическими методами.— Изв. АН ЭССР. Сер. физ., матем., 1974, № 4.
8. Абрамович Г. Н. О влиянии примеси твердых частиц или капель на структуру турбулентной газовой струи.— Докл. АН СССР, 1970, т. 190, № 5.
9. Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А. Турбулентные струи, несущие твердые или капельно-жидкие примеси.— В кн.: Парожидкостные потоки. Минск, Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова АН БССР, 1977.
10. Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А. О диффузии тяжелых частиц в турбулентных газовых потоках.— Докл. АН СССР, 1973, т. 212, № 3.

Москва, Таллин

Поступила в редакцию  
3.I.1980