

*А.Ю. Вараксин<sup>1</sup>, М.А. Пахомов<sup>2</sup>, М.В. Протасов<sup>1</sup>, В.И. Терехов<sup>2</sup>*

Институт высоких температур РАН, Москва, Россия (1)

Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе, г. Новосибирск, Россия (2)

## ВЛИЯНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА В ТРУБЕ

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты измерений и численных расчетов нисходящего двухфазного турбулентного течения газа с твердыми частицами. Экспериментальные измерения скоростей фаз и их пульсаций проводились с помощью двухкомпонентного лазерного доплеровского анемометра. Математическая постановка использует систему уравнений в эйлеровых переменных для описания процессов переноса в газовой и дисперсной фазах. При определении компонент скорости дисперсной фазы и их среднеквадратичных величин пульсаций скорости была использована модель И.В. Деревича. Добавление частиц в поток газа приводит к снижению уровня турбулентности газовой фазы за счет вовлечения частиц в пульсационное движение. Установлена существенная неизотропность пульсаций скорости частиц. Амплитуда турбулентных пульсаций скорости частиц в аксиальном направлении значительно выше, чем в радиальном.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Турбулентные двухфазные течения с твердыми частицами широко распространены в природе и во многих практических приложениях. К техническим устройствам, в которых используются газодисперсные потоки, относятся системы газоочистки и пневмотранспорта, различные энергетические установки и т.д.

Течение смеси воздуха с твердыми частицами представляет собой сложную систему, поведение которой определяется взаимодействием большого количества факторов. Присутствие дисперсной примеси даже в малых концентрациях может кардинально менять структуру потока. Прежде всего, это связано с разнообразием свойств вводимых частиц, что может приводить к реализации большого числа режимов течения газодисперсного потока. Изменение концентрации и размера частиц может вызвать как количественную, так и качественную перестройку течения (например, более быстрому началу ламинарно-турбулентного перехода или, наоборот, к ламинаризации течения).

Создание методов расчета двухфазных газодисперсных потоков представляет собой одну из наиболее сложных проблем современной аэромеханики. Тем не менее, широкое использование в практических приложениях газодисперсных потоков побудило проведение многочисленных исследований гидромеханики течений с твердыми частицами. Здесь можно отметить большое число обобщающих работ российских и зарубежных исследователей, некоторые из которых представлены в списке литературы [1—10]. Вместе с тем, многие важные аспекты двухфазных потоков исследованы недоста-

точно полно, а экспериментальные данные и построенные физические модели в ряде случаев открыточны и зачастую противоречивы.

Вследствие этого комплексное экспериментальное изучение таких течений и построение математических моделей для их описания имеет большую актуальность.

Целью настоящей работы было экспериментально-расчетное исследование структуры нисходящих гетерогенных потоков монодисперсного состава при относительно небольших массовых концентрациях твердых фазы ( $M_p \leq 35\%$ ).

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Для исследования структуры нисходящих турбулентных гетерогенных потоков в Институте высоких температур РАН был создан экспериментальный стенд, подробно описанный в [5]. Установка работает по разомкнутой (по газу и дисперсной фазе) схеме. Такая схема позволяет путем непосредственных, отдельных измерений расходов газа и твердых частиц с необходимой степенью точности определять среднюю концентрацию дисперсной фазы. Использование разомкнутой схемы также позволяет достаточно просто регулировать расходы обеих фаз гетерогенного потока.

Рабочий участок представлял собой вертикальную трубу из нержавеющей стали с внутренним диаметром  $2R = 46$  мм и толщиной стенки 2 мм. Длина трубы составляла 2500 мм. На расстоянии 1380 мм ( $x/(2R) = 30$ ) от верхнего торца в стенке трубы профрезерована щель шириной 12 мм для ввода и вывода зондирующих лучей двухкомпонентного лазерного доплеровского анемометра (модель LDA 10, фирма «Dantec» (Дания)). Воздух поступал в рабочий участок через ресивер из баллонов, куда он предварительно закачивается компрессором. Для создания гетерогенного потока частицы загружались в питатель емкостью 2 литра и сыпались вниз через отверстие в крышке питателя и центрирующую трубку, вваренную в переходник. Расход частиц варьировался посредством установки крышек питателя с отверстиями различных диаметров. Подхватываемые потоком воздуха частицы проходили рабочий участок и осаждались в гравитационной камере. Для проведения измерений скоростей несущей фазы в поток вводились частицетрассеры микрометровых размеров, для чего использовался генератор фирмы «Dantec». Сканирование поперечного сечения трубы осуществлялось также при помощи траверсной системы 57H00 фирмы Dantec.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА

В основном математическая постановка задачи и ее численная реализация соответствует модели, разработанной в работе [10]. Основное отличие заключается в том, что в данной работе выполнен расчет турбулентного изотермического потока газа и твердых частиц в трубе с учетом эффектов соударения с ограждающей поверхностью трубы. Моделирование движения дисперсной фазы осуществляется в рамках эйлерова подхода в приближении пограничного слоя и в основном соответствует численной модели [10].

Объемная концентрация дисперсной фазы мала ( $\Phi < 10^{-4}$ ), а частицы достаточно мелкие (диаметр  $d < 200$  мкм). При течении двухфазного потока столкновениями частиц можно пренебречь при объемной концентрации дисперсной фазы  $\Phi < 10^{-3}$  (согласно данным [3]). В работе принято допущение о том, что частицы взаимодействуют с ограждающей поверхностью без учета эффекта проскальзывания и вращения после столкновения частицы со стенкой.

Уравнение движения газовой фазы имеет дополнительный член, учитывающий межфазное динамическое взаимодействие. Модифицированные на случай присутствия дисперсной фазы уравнения для кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$  имеют вид [11]. Аксиальный и радиальный перенос частиц обусловлен действием следующих силовых факторов: конвекцией импульса, силой турбофореза, аэродинамическим сопротивлением и диффузионным перемещением частиц, за счет градиента их концентрации.

### 4. ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Численное решение системы дифференциальных уравнений было получено с использованием метода Кранка—Николсона. Описание метода представлено в работе [12].

Так как шаг сетки в поперечном направлении неравномерный, то удобно преобразовать координату  $r$  так, чтобы систему уравнений можно было решать на равномерной сетке в вычислительной области. Подходящим для такой двумерной погранслоевой задачи является преобразование координат, приведенное в работе [12]. Предпоследняя расчетная точка находилась от стенки на расстоянии  $y_+ = 1$ . В продольном направлении сетка была равномерной.

В работе было выполнено тестирование расчетов с данными DNS и результатами измерений, полученными с помощью PIV и LDA методов для изотермического течения однофазного потока воздуха течения в трубе [13], и с данными измерений [14]. Получено неплохое согласие результатов численных расчетов с данными [13, 14] по осредненной продольной скорости газа и распределениям среднеквадратичных пульсаций скорости.

### 5. СОПОСТАВЛЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Исходные данные сопоставительного анализа для нисходящего потока  $Re = 15\,300$ ; осредненная скорость несущего потока  $U_0 = 5.2$  м/с;  $M_p = 5 \div 35$  %; частицы стекла  $\rho_p = 2550$  кг/м<sup>3</sup>.

Профили аксиальных пульсаций скорости газа  $\langle u^2 \rangle / U_0$  по сечению канала показаны на рис. 1. По данным рис. 1 можно сделать следующие выводы. С ростом концентрации твердой фазы интенсивность пульсаций скорости газа снижается за счет вовлечения частиц в пульсационное движение и соответственно при этом отбирается часть турбулентной энергии газа. Данный эффект возрастает с увеличением количества частиц. Снижение интенсивности пульсаций скорости газа приводит к уменьшению пульсаций скорости дисперсной примеси.

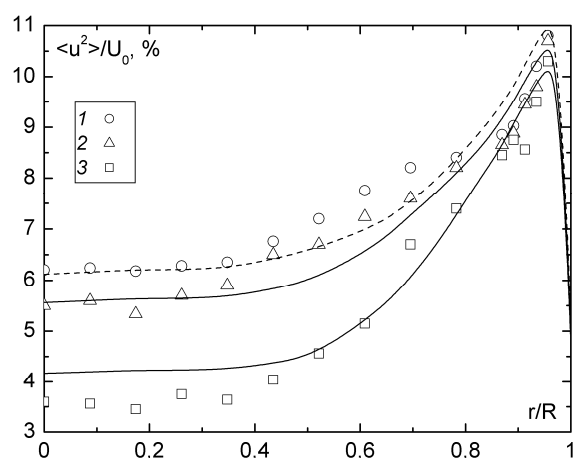


Рис. 1. Профили аксиальных среднееквадратичных пульсаций скорости газовой фазы по сечению трубы: точки — эксперимент; линии — расчет; пунктир — однофазный поток воздуха; 1 —  $M_p = 0$ ; 2 — 0.05; 3 — 0.35

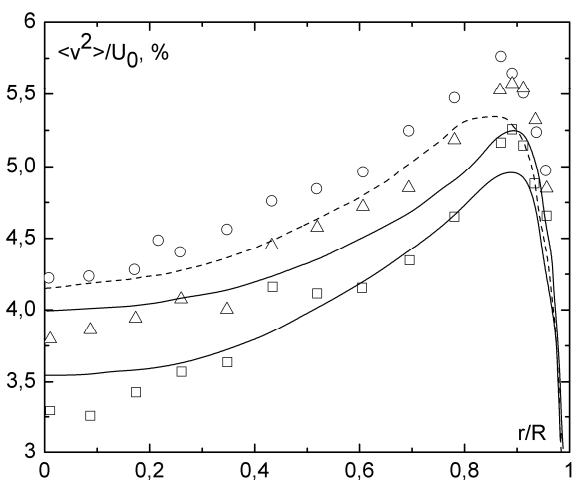


Рис. 2. Распределение радиальных среднееквадратичных пульсаций скорости газовой фазы по сечению трубы. Обозначения см. на рис. 1

Из приведенных на рис. 2 распределений радиальных пульсаций газа в присутствии частиц  $\langle v^2 \rangle / U_0$  видно, что интенсивность поперечных пульсаций скорости газа двухфазного потока в поперечном направлении меньше соответствующего

значения для однофазного потока воздуха. Так, при концентрации дисперсной примеси в  $M_p = 35\%$  радиальные пульсации понижаются примерно в 2 раза. Для однофазного потока  $\langle v^2 \rangle / U_0 \approx 4.2\%$  ( $M_p = 0$ ) и для наибольшей концентрации частиц  $\langle v^2 \rangle / U_0 \approx 3.5\%$ . В пристенной зоне интенсивность пульсаций газа резко снижается за счет того, что поверхность канала «препятствует» пульсациям скорости в этом направлении. Об этом свидетельствуют экспериментальные и расчетные данные.

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В целях получения более полной информации по влиянию частиц на турбуленность газа были выполнены расчеты в более широком диапазоне изменения инерционности дисперсной фазы для частиц пластика ( $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ), стекла ( $\rho = 2550 \text{ кг/м}^3$ ), оксида алюминия ( $\rho = 3950 \text{ кг/м}^3$ ) и железа ( $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ ). Расчеты проведены для случая вертикального нисходящего течения в трубе. Число Рейнольдса потока  $Re = U_0 2R / \nu = 2 \cdot 10^4$ ; массовая концентрация дисперсной фазы  $M_p = 5 \dots 20\%$ ; размер частиц  $d = 1 \dots 200 \text{ мкм}$ . Сечение, где выполнялись расчеты —  $x/(2R) = 60$ , что соответствует гидродинамически развитому течению. Большая часть расчетов выполнена для стеклянных частиц.

Данные по влиянию инерционности дисперсной фазы на турбуленность двухфазного потока представлены на рис. 3. Параметр  $Z$ , характеризующий среднюю по сечению трубы энергию турбуленности, рассчитывался по следующей зависимости:

$$Z = \frac{2}{R^2} \int_0^R \frac{k}{k_A} r dr,$$

где  $k_A$  — энергия турбуленности однофазного потока воздуха. Безразмерное время релаксации дисперсной фазы определялось по соотношению:

$$\tau_+ = \frac{\rho_p d^2 U_*^2}{18 \rho \nu^2}.$$

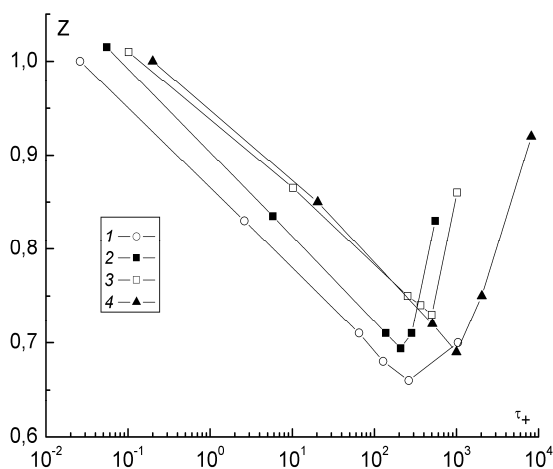


Рис. 3. Изменение энергии турбуленности газа в зависимости от инерционности частиц,  $M_p = 0.2$ : 1 — пластик; 2 — стекло; 3 —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 4 — Fe

Самые мелкие частицы ( $d = 1 \text{ мкм}$ ) практически не оказывают воздействия на турбулентную энергию несущей фазы. Они вовлекаются в микропульсационные вихри газовой фазы, которые являются малознергетическими. Далее увеличение размера частиц приводит к понижению уровня турбуленности газа. Снижение уровня турбулентной энергии достигает примерно 40%. Максимальная величина подавления энергии турбуленности приходится на диапазон размеров частиц  $d \approx 30 \dots 70 \text{ мкм}$  (для более тяжелых частиц величина меньше). Далее, по мере возрастания инерционности частиц, наблюдается повышение уровня турбуленности газа. Это объясняется тем, что с ростом инерционности частиц, они хуже вовлекаются в крупномасштабное пульсационное движение газа и соответственно могут отобрать меньшее количество энергии от газовой фазы.

Однако, не смотря на ламинаризацию течения мелкодисперсными частицами, коэффициент трения на стенке в газодисперсном потоке возрастает. Эти данные представлены на рис. 4. Увеличение размера частиц и их концентрации вызывает практически линейное увеличение коэффициента трения по сравнению с однофазным потоком воздуха при прочих идентичных условиях.

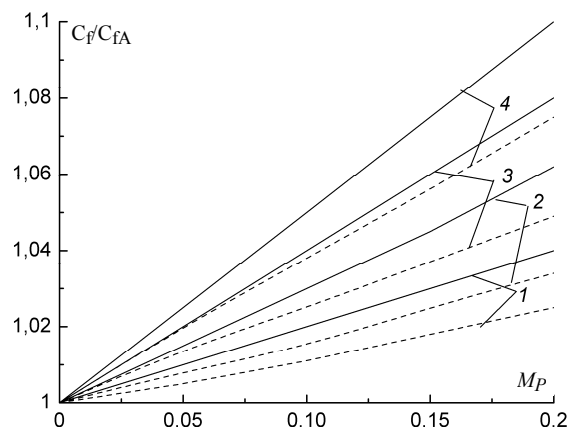


Рис. 4. Трение на стенке при течении двухфазного газодисперсного потока: сплошные линии —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; пунктир — стекло; 1 —  $d = 1 \text{ мкм}$ ; 2 —  $10 \text{ мкм}$ ; 3 —  $50 \text{ мкм}$ ; 4 —  $100 \text{ мкм}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены экспериментальное и численное исследование нисходящего турбулентного течения смеси воздуха с твердыми частицами стекла.

Анализ результатов расчетов при течении двухфазной смеси с небольшой концентрацией дисперсной фазы ( $M_p \leq 0.35$ ) показывает хорошее согласие расчетных и опытных данных по скоростям и величинам среднеквадратичных пульсаций фаз по сечению трубы.

Установлена существенная неизотропность пульсаций скорости частиц. Амплитуда турбулентных пульсаций скорости частиц в аксиальном направлении значительно выше, чем в радиальном.

Это явление связано не только с собственной неизотропностью турбулентности газовой фазы, но и обусловлено дополнительной генерацией турбулентности при движении частиц в поле градиента осредненной аксиальной скорости дисперсной фазы. Интенсивность пульсаций скорости частиц в аксиальном направлении может быть выше, чем у газовой фазы. Обнаружена сильная зависимость аксиальных и радиальных пульсаций скоростей частиц от их концентрации.

Добавление частиц в поток газа приводит к снижению уровня турбулентности газовой фазы за счет вовлечения частиц в пульсационное движение. Об этом свидетельствуют опытные и расчетные данные.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта РФФИ 05-02-08063, 05-02-16281, 05-08-33586) и Фонда Президента РФ поддержки молодых кандидатов наук (код проекта МК-1184.2005.8).

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $C_f$  — коэффициент трения на стенке;  
 $k$  — кинетическая энергия турбулентности,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  
 $M_p$  — массовая концентрация дисперсной фазы;  
 $r, x$  — текущие радиальная и продольная координаты, м;  
 $R$  — радиус трубы, м;  
 $U$  — аксиальная скорость, м/с;  
 $\langle u^2 \rangle / U_0, \langle v^2 \rangle / U_0$  — продольные и поперечные пульсации скоростей;  
 $\Phi$  — объемная концентрация дисперсной фазы;  
 $\tau_+$  — безразмерное время релаксации дисперсной фазы.

Индексы:

- 0 — величина параметра на оси трубы;  
 $A$  — газовая фаза;  
 $P$  — твердая фаза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теория** турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенинников, А.Н. Секундов, И.П. Смирнова. М.: Наук, 1984. 717 с.
2. **Турбулентные** течения газозвесей / А.А. Шрайбер, Л.Б. Гавин, В.А. Наумов, В.П. Яценко. Киев: Наук. думка, 1987. 239 с.
3. **Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А.** Моделирование горения твердого топлива. М.: Наука. 1994, 320 с.
4. **Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y.** Multiphase flow with droplets and particles // CRC Press. Boca Raton. 1998.
5. **Вараксин А.Ю.** Турбулентные течения газа с твердыми частицами. М.: Физматлит. 2003. 192 с.
6. **Gore R.A., Crowe C.T.** Effect of particle size on modulating turbulent intensity // Intern. J. Multiphase Flow. 1989. Vol. 15. P. 279—285.
7. **Rogers C.B., Eaton J.K.** The effect of small particles on fluid turbulence in a flat-plate, turbulent boundary layer in air // Physics of Fluids A. 1991. Vol. 3. P. 928—937.
8. **Uijtterwaal W.S.J., Oliemans R.V.A.** Particle dispersion and deposition in direct numerical and large eddy simulations of vertical pipe flow // Physics of Fluids A. 1996. Vol. 8. P. 2590—2604.
9. **Деревич И.В.** Гидродинамика и тепломассоперенос частиц при турбулентном течении газозвеси в трубе // Теплофизика высоких температур. 2002. Т. 40. № 1. С. 86—99.
10. **Terekhov V.I., Pakhomov M.A.** The thermal efficiency of near-wall gas-droplets screens. I. Numerical modeling // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2005. Vol. 48. P. 1747—1759.
11. **Nagano Y., Tagawa M.** An improved (k- $\epsilon$ ) model for boundary layer flow // ASME J. Fluids Eng. 1990. Vol. 109. P. 33—39.
12. **Anderson D.A., Tannehill J.C., Pletcher R.H.** Computational fluid mechanics and heat transfer. New York. Hemisphere, 1984.
13. **Laufer J.** The structure of turbulence in fully developed pipe flow // NACA Technical Report TR-1174. 1954. Washington, DC, USA. P. 1—18.
14. **Eggels J.G.M., Unger F., Weiss M.H., Westerweel J., Adrian R.J., Friedrich R., Nieuwstadt F.T.M.** Fully developed pipe flow: a comparison between direct numerical simulation and experiment // J. Fluid Mech. 1994. Vol. 268. P. 175—209.