

УДК 532.5+536.2

Д. А. Борозденко

Изучение спектральных характеристик потока и распределение давления внутри зернистого слоя

Работ, посвященных измерению турбулентных пульсаций скорости и распределения давления внутри пористой среды, сравнительно мало, что объясняется сложностью проведения подобных экспериментов. Кроме того, результаты отдельных авторов имеют значительные расхождения. Так, спектры пульсаций продольной скорости, полученной с помощью термоанемометров на воздушных потоках (рис. 1 в, г), проведенные рядом исследователей [1-2], при повышении числа Re переходили в степенную зависимость с показателем от -1 до -1/2. При этом измеряемые электрические величины пропорциональны корню квадратному из скорости потока. Спектры, полученные лазерно-доплеровской анемометрией [3-4], имели наклон кривой, близкий к степени -2 (рис. 1а, б). Скорость же потока в этих экспериментах линейно зависит от измеряемых величин.

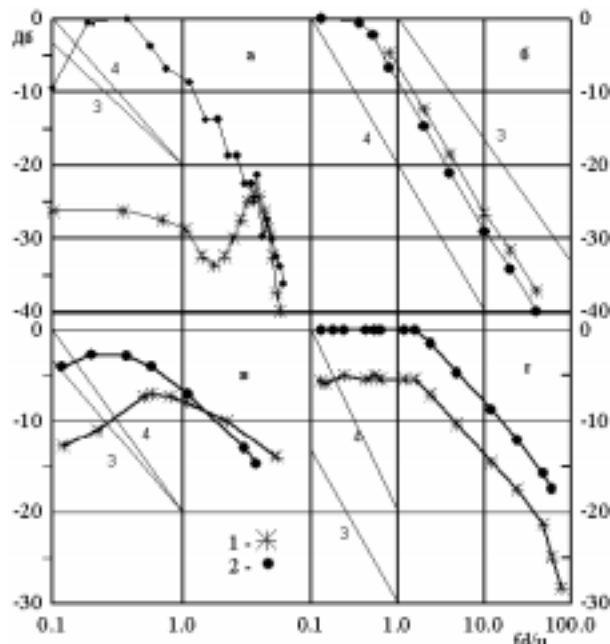


Рис. 1. Спектры продольной скорости для правильных упаковок: 1, 2 - а) измерения ЛДА в кубической упаковке Re 20 и 500 [5]; б) - измерения ЛДА в кубической упаковке Re 540 и 3000 [3]; в) - измерения термоанемометром в кубической упаковке Re 2500 и 2700 [1]; г) - измерения термоанемометром в ромбической упаковке Re 4780 и 7010 [2]; 3, 4 - зависимость спектра в степенях -5/3 и -2

Можно предположить, что измерения спектра пульсаций скорости, проведенные термоанемометром, вносят некоторую неточность в информацию

о характере поведения спектра, что, по всей видимости, связано с нелинейностью зависимых измеряемых электрических величин и скорости потока, а также с искажениями, вносимыми в поток самим термоанемометром. Так, например, извлечение квадратного корня из сигнала, наклон спектра которого спадает по «закону степени -2» (рис. 2, кривая 1), приводит к новому сигналу, поведение спектра которого уже близко к степени «-1» (рис. 2, кривая 2).

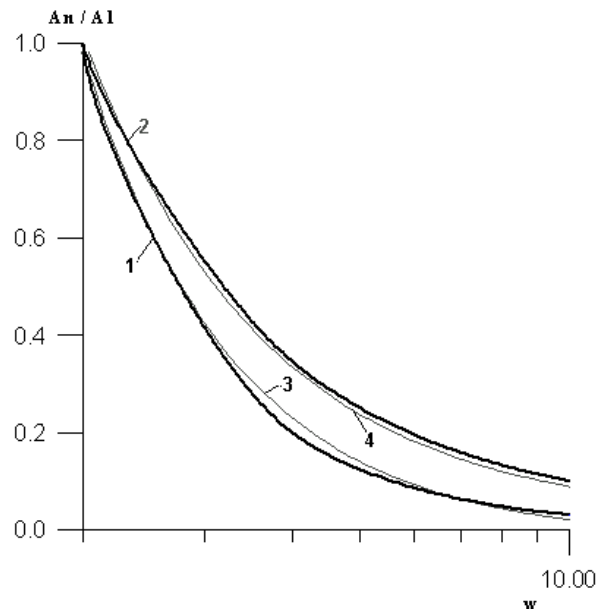


Рис. 2. Спектральные зависимости исследуемого сигнала

Наряду с измерениями скорости потока немаловажную информацию могут дать данные по исследованию распределения давления в упакованных слоях при переходном режиме течения. Для измерения распределения давления по длине и сечению упакованного слоя из шариков диаметром 3 мм использовался горизонтальный опытный участок длиной 20 см и диаметром 5 см [5]. В экспериментах по исследованию пристеночного перепада давления на опытный участок устанавливался специально изготовленный многоканальный жидкостный манометр, с помощью которого определялось давление на стенке упаковки одновременно в 36 точках, находившихся в 9 сечениях по длине зернистого слоя. Проведенные измерения показали нелинейность распределения давления по

длине зернистого слоя, на которое влияют акустические пульсации, уменьшающиеся при переходе к турбулентности. Было сделано предположение, что на подобное поведение зависимости перепада давления от числа Re влияют входные эффекты, связанные с диффузией давления внутри упакованного слоя, выравнивание которого по сечению происходит довольно медленно из-за вихревой структуры потока в зернистом слое.

Измерения давления внутри зернистого слоя вызывают те же трудности, что и измерения скорости: возможные внесения возмущений в поток, приводящие к изменению картины течения. Для уменьшения последнего фактора при измерении распределения статического давления по сечению зернистого слоя были использованы специальные датчики, изготовленные из элементов, подобных элементам засыпки.

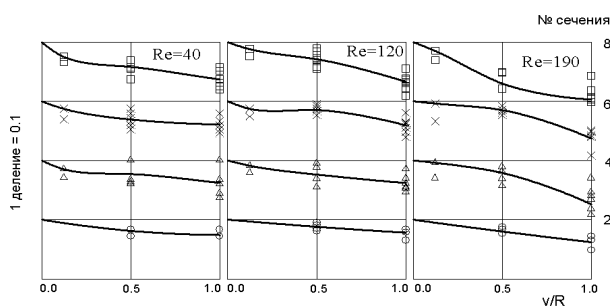


Рис. 3. Распределение давления по сечениям упакованного слоя, отнесенное к пристеночному перепаду давления между данным сечением и отстоящим на 2 см по потоку при различных числах Re (R – радиус опытного участка)

Результаты экспериментов показали, что давление в упаковке уменьшается от стенки к центру, имея минимум в центре, причем это уменьшение монотонно возрастает как при удалении от входа засыпки, так и с ростом числа Re.

Как видно из рисунка 3, на распределении давления по сечению нет особых отражений ламинарно-турбулентного перехода и связанных с этим структурных изменений потока, можно отметить лишь рост уменьшения давления в центре упаковки при приближении к турбулентности (Re =

190 на рис. 3), в то время как распределение давления при ламинарном режиме практически одинаково для различных чисел Re. Тем не менее полученное распределение давления дает информацию о крупномасштабных проявлениях в характере течения, а именно о наличии поперечных перетоков жидкости от стенки участка к центру, что связано с неравномерностью проницаемости упакованного слоя по сечению.

Для оценки множителя k , необходимого для нахождения эффективного коэффициента поперечной дисперсии,

$$D_{эф} = ku_0 d. \quad (1)$$

Так как динамический напор определяется выражением

$$\Delta P = \frac{\rho U^2}{2}, \quad (2)$$

то относительные скорости будут определяться как корень квадратный из отношения давлений:

$$U_{\perp} = \sqrt{\frac{\Delta P_{попер}}{\Delta P_{прод}}}, \quad (3)$$

которые для чисел Re = 25, 40, 75, 120, 190 с усреднением по 4 измерительным сечениям составили 0.065, 0.069, 0.068, 0.068, 0.081 соответственно. Средние значения коэффициента k для дисперсии в хаотичной упаковке имеют большой разброс и лежат в пределах 0.05–0.1 [6].

Проведенное комплексное исследование распределения давления в хаотичной упаковке выявило уменьшение давления в сечении от стенки к центру упаковки при всех режимах течения, что позволяет судить об увеличении поперечной компоненты скорости в этой области. Полученные экспериментальные зависимости позволяют рассчитать новые эффективные теплообменники, использующие зернистый слой в качестве наполнителя. Из проведенного анализа спектров турбулентных пульсаций было предположено, что измерения спектра пульсаций скорости, проведенные термоанемометром, вносят некоторую неточность в информацию о характере поведения спектра.

Литература

1. Merve D.F. van der, Gauvin W.H. Velocity and turbulence measurements of air flow through a packed bed //AIChE journal. 1971. V. 17. №3.
2. Mickley H.S., Smith K.A., Kochak E.I. Fluid flow in packed beds //Chem. Engng. Sci. 1965. V. 20. №3.
3. Евсеев А.Р., Накоряков В.Е., Романов Н.Н. Локальная структура фильтрационного потока в кубической упаковке шаров при больших числах Рейнольдса //Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1989. Вып. 1.
4. Yevseyev A.R., Nakorykov V.E., Romanov N.N. Experimental investigation of a turbulent filtrational flow //Int. J. Multiphase Flow. 1991. V. 17. №1.
5. Анисимов К.Г., Волков В.И. Экспериментальное исследование перепада давления для системы связанных вихрей в зернистых средах // Известия АГУ. 1998. №1.
6. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л., 1979.