

большая активность потока наблюдается вблизи оси, что подтверждается как спектральными, так и вероятностными распределениями пульсаций. Несколько меньшая активность перемешивания наблюдается в пристенной зоне, что обусловлено, по-видимому, влиянием вязкости среды. Оценки наибольшего масштаба вихревых структур, определенные по автокорреляционной функции и по пространственно-временному распределению пульсаций скорости, совпадают. Поскольку в пространственно-временном распределении пульсаций скорости наблюдаются крупномасштабные вихревые структуры с вращением как по потоку ( $1/3$ ), так и против потока ( $2/3$ ), автокорреляционные функции, осредненные за значительный промежуток времени, не имеют явно выраженных многократных пересечений нулевого уровня.

Рассмотренные крупномасштабные вихревые распределения пульсаций скорости позволяют сделать вывод о существенном вкладе крупномасштабных когерентных структур в формирование турбулентного механизма обмена количеством движения между слоями в зоне ламинарно-турбулентного перехода в трубе.

В плане дальнейших работ следует предусмотреть распространение измерений на все исследуемое сечение потока в трубе с увеличением количества измерительных каналов. Многоканальные измерения мгновенного профиля скорости потока следует провести и при развитом турбулентном режиме течения.

Авторы приносят глубокую благодарность В. А. Костомахе за помощь при обработке экспериментальных данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. P. O. A. L. Davies, Yule A. J. Coherent Structures in Turbulence.— J. Fluid Mech., 1975, vol. 69, p. 3.
2. Абрамович Г. Н. Влияние крупных вихрей на структуру турбулентных течений со сдвигом.— МЖГ, 1979, № 5.
3. Заккей В., Барра В., Уонг К. Р. Природа турбулентности в пограничном слое при высоких дозвуковых скоростях.— РТК, 1979, т. 17, № 4.
4. Белоусов П. Я., Евсеев А. Р. Многоканальный лазерный доплеровский измеритель скорости.— В кн.: Исследования по управлению пограничным слоем. Новосибирск: изд. ИТ СО АН СССР, 1976.
5. Лазерные доплеровские измерители скорости.— Новосибирск: Наука, 1975.
6. Wygnauski I., Socolov M., Friedman D. On Transition in a Pipe.— J. Fluid Mech., 1975, vol. 69, p. 283—304.

*Поступила в редакцию 27 августа 1981 г.*

УДК 532.574.082

**В. И. ВОЛКОВ, В. А. МУХИН, В. И. ТИТКОВ,  
Я. Я. ТОМСОНС**  
(Новосибирск)

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ

Для расчета тепломассообмена в неподвижном зернистом слое необходимо знание локального поля скоростей внутри пористой среды. Известно лишь несколько работ по контактным измерениям внутри зернистого слоя [1—3]. В этих работах использовались термоанемометрические, электродиффузионные датчики скорости. Недостатки контактной методики известны: это искажение структуры пористой среды и потока, зависимость показаний датчиков от расстояния до твердой поверхности пористой среды или стенки канала. Поэтому данные, полученные с по-

мощью контактной методики, носят зачастую противоречивый характер. Так, в [1, 2] получено значение локальной скорости потока в пристенной части упаковки выше, чем в центральной; в работе [3] такого превышения не обнаружено. В данной статье приводятся профили скорости внутри пористой среды из стеклянных шариков, полученные с

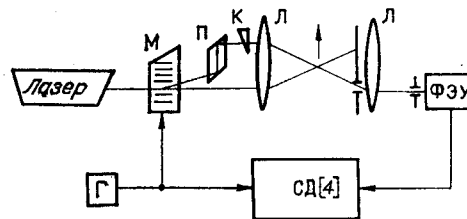


Рис. 1.

помощью лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС). Показатель преломления жидкости подбирался равным показателю преломления стеклянных шариков. Оптическая гомогенность пористой среды и жидкости позволила получить профили скорости, не нарушая структуры пористой среды. Данная методика предъявляет высокие требования к равенству показателей преломления жидкости и шариков, к чистоте жидкости и поверхности шариков, к оптической однородности материала шариков. В опытах использовалась жидкость «кадлий», имеющая показатель преломления, равный показателю преломления стеклянных шариков. Исследования проводились с помощью оптической схемы с опорным пучком и ячейкой Брэгга (рис. 1). Для обработки сигнала использовался следящий демодулятор-спектроанализатор (СД) [4]. Здесь Г — генератор, М — ячейка Брэгга, П — призма, К — оптический клин.

Измерения выполнялись на опытном участке с правильной кубической укладкой в нем шариков. В опытном участке размещалось 16 слоев шариков по 9 ( $3 \times 3$ ) в слое (рис. 2). На рис. 3 приведены профили скорости, полученные в широком сечении опытного участка. Измерения проводились после 10-го слоя шариков от начала упаковки. На осях координат отложены локальная скорость, отнесенная к расходной скорости в не занятом шариками сечении опытного участка, и поперечная координата, отнесенная к диаметру шарика  $d$ . Линия измерения изображена штрихами на схеме поперечного разреза опытного участка в верхней части рис. 3. Течение носит струйный характер, причем с повышением числа  $Re$  максимальные значения скорости в пристенных ячейках  $B$  (см. рис. 3) приближаются к максимальному значению скорости в цент-

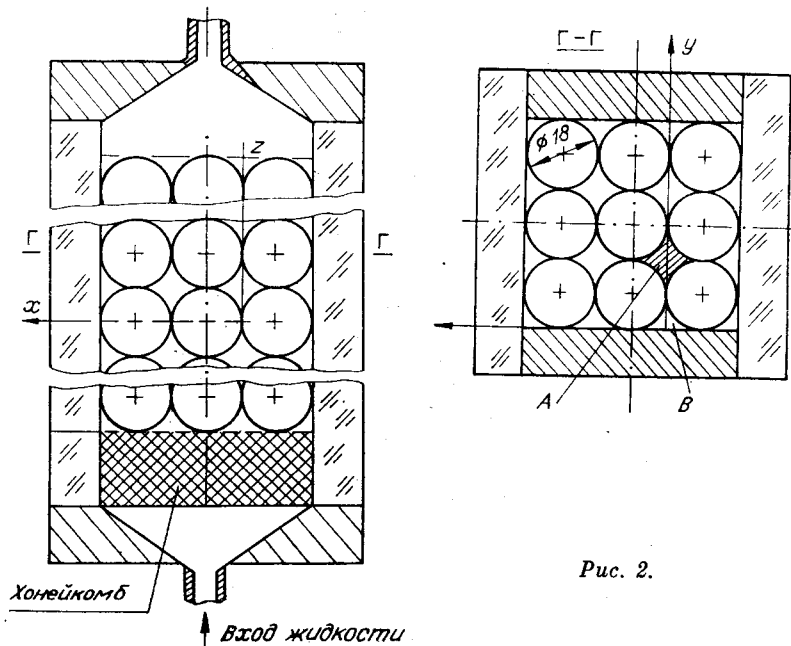


Рис. 2.

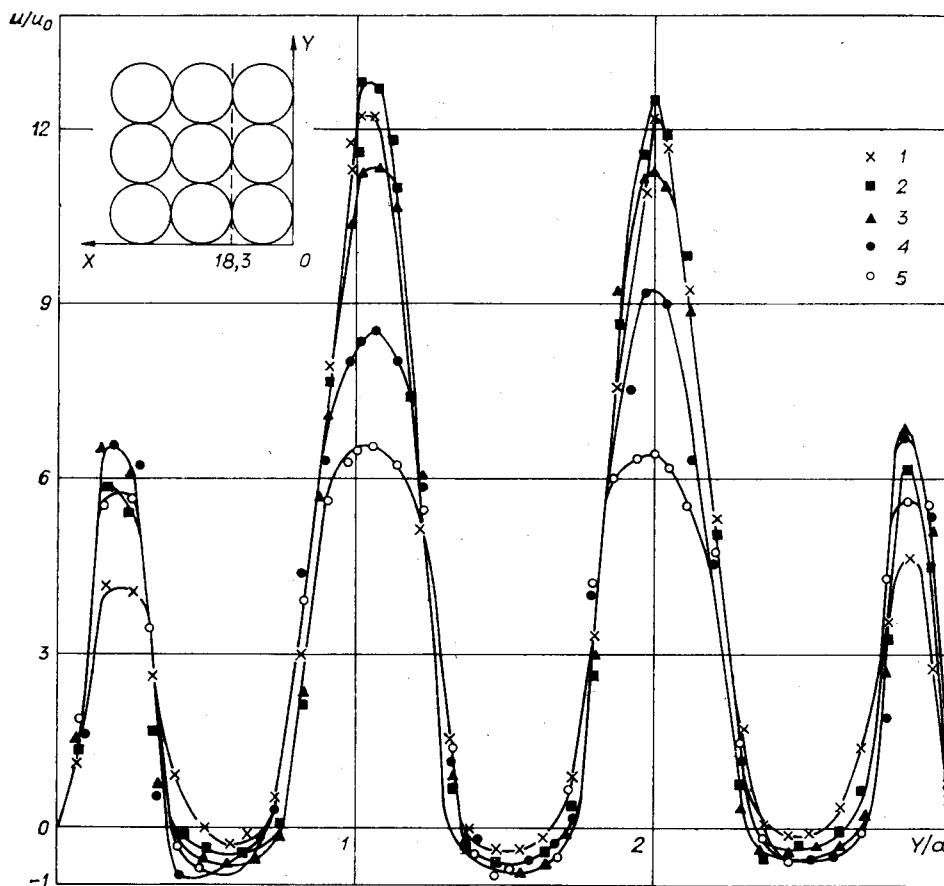


Рис. 3.

ральных ячейках (А на рис. 3) несмотря на то, что проходное сечение ячейки А в два раза больше проходного сечения ячейки В. Это выравнивание максимальных скоростей в ячейках А, В свидетельствует об увеличении влияния турбулентного обмена.

Как показал эксперимент, течение в пористой среде нестационарно, начиная с самых низких чисел  $Re$ . На основной поток накладываются низкочастотные пульсации, связанные, по-видимому, с изменением структуры вихревого течения жидкости в застойных зонах, что особенно заметно при измерении поперечной компоненты скорости. Вблизи областей смещения струи с застойными зонами существуют точки, в которых знаки поперечной компоненты скорости, начиная с чисел  $Re \approx 260$ , изменяются. В этих точках наблюдается случайное скачкообразное низкочастотное изменение скорости. Средний период таких изменений 0—1 мин. На рис. 4 приведен профиль поперечной компоненты скорости на расстоянии 0,25 диаметра шарика от узкого сечения вверх по потоку. Измерения проведены для тех же чисел  $Re$ , что и в предыдущих опытах. Линия измерения изображена штрихами на схеме в верхней части рис. 4. Как видно из рисунка, в данном сечении происходит обычное диффузорное растекание. В сужении знак поперечной компоненты меняется на обратный.

При измерениях на хаотической укладке, наряду с полем локальных скоростей, необходимо определять поле локальной пористости. Была разработана методика, основанная на определении координаты центра измерительного объема при касании им поверхности шарика. Это касание фиксировалось по появлению в спектре доплеровского сигнала отри-

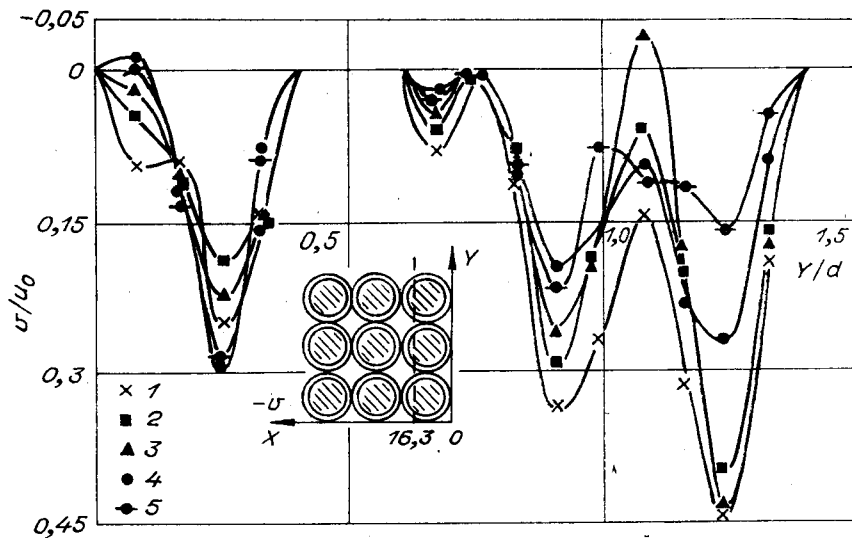


Рис. 4.

чательной составляющей скорости. На рис. 5 приведен профиль продольной компоненты скорости, нормированный на расходную скорость  $u_0$  в зависимости от поперечной координаты  $y$ , отнесенной к диаметру шарика. Опытный участок представлял собой стеклянный цилиндр, отношение диаметра которого к диаметру шарика составляло  $\sim 8$ . Измерения проводились на расстоянии 19 диаметров шарика от входа в опытный участок для трех чисел  $Re$ : 1 —  $Re = 13$ ; 2 —  $53,9$ ; 3 —  $98,2$ .

Из рис. 5 видно, что скорость в пристенных ячейках для чисел  $Re \sim 100$  не превосходит скорости в центральных ячейках. Так же, как и на кубической упаковке, происходит выравнивание скоростей в центральных и пристенных ячейках с повышением числа  $Re$ . В этих экспериментах выявились недостатки используемой оптической схемы, связанные с относительно большим измерительным объемом, размер которого, определенный с учетом пороговой чувствительности следящей системы, составлял 2,8 мм. При этом эквивалентный диаметр свободного пространства близок к радиусу шарика и равен  $\sim 9$  мм. В общем случае измерительный объем оптической схемы внутри хаотической упаковки касается поверхности шариков. Для учета влияния этого касания на значение скорости были проведе-

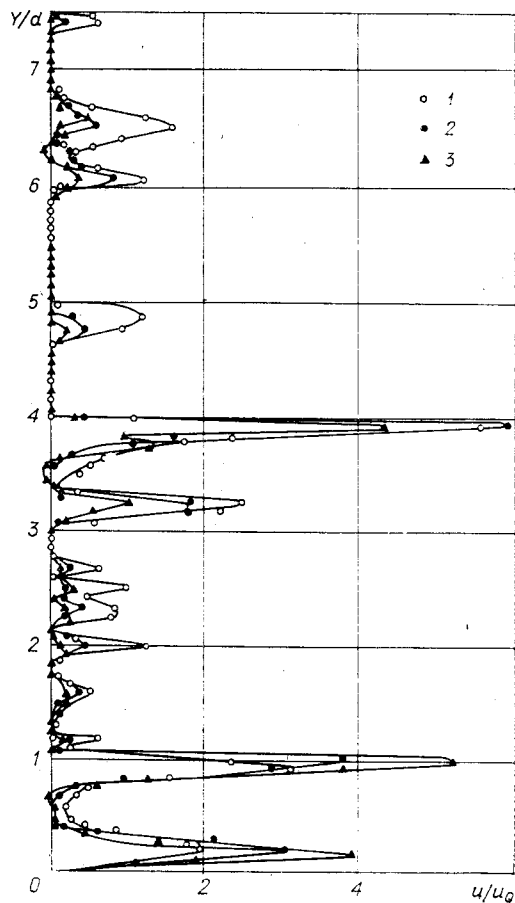


Рис. 5.

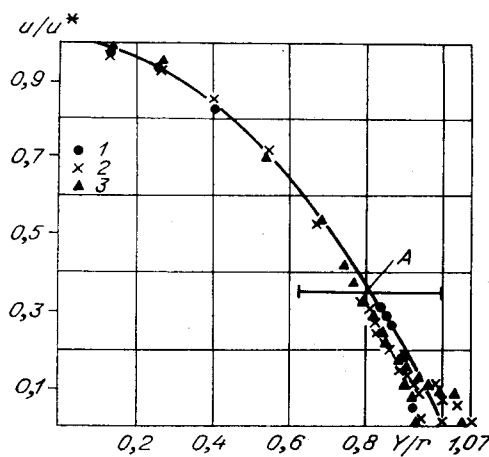


Рис. 6.

ны измерения в цилиндрической стеклянной трубке (внутренний диаметр 22,5 мм) при стабилизированном режиме течения. Результат этого эксперимента представлен на рис. 6 (число  $Re$  построено по расходной скорости и диаметру трубки). Из рисунка видно, что пуазейлевский профиль, отмеченный на графике сплошной линией, воспроизводится с точностью 5% в центральной части трубки. После касания стенки измерительным объемом ошибка возрастает. Измерительный объем изображен чертой длиной 2,8 мм,  $A$  — центр измерительного объема. Из рис. 6 видно, что при касании измерительным объемом стенки и при частичном проникновении его в стенку наблюдается занижение измеренных значений скорости по сравнению с действительными величинами скорости. Это занижение составляет для чисел  $Re$  600 и 950 около  $0,03-0,04u/u^*$ , где  $u^*$  — максимальное значение скорости. Для числа  $Re \sim 250$  ошибка составляет менее 5%, т. е. находится в пределах точности эксперимента. При приближении центра измерительного объема к стенке на расстояние 0,35—0,40 мм погрешность измерений резко возрастает и измерения становятся ненадежными.

Факторов, искажающих профиль скорости, много. К ним относятся градиент скорости, искажение формы измерительного объема и др. Некоторые из них обсуждались в литературе. В данных экспериментах нами наблюдался эффект изменения отношения сигнал — шум вблизи стенки. В частности, в момент касания измерительным объемом стенки и при погружении его в стенку уровень шума становился соизмеримым с доплеровским сигналом. При этом спектр шума располагался вблизи нулевой частоты, что четко наблюдалось с помощью анализатора спектра. Природу шума можно объяснить шероховатостью стенки и «абсорбцией» рассеивающих частиц на стенке. Занижение замеренного профиля скорости по сравнению с расчетным с момента касания стенки измерительным объемом находится в соответствии с возрастанием уровня отношения сигнал — шум.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Schwartz C. E., Smith J. M.— Ind. Eng. Chem., 1953, vol. 45, N 6, p. 1209.
2. Michley H. S., Smith K. A., Korhak E. I.— Chem. Eng. Sci., 1965, vol. 20, p. 237.
3. Кириллов В. А. и др.— ДАН, 1979, т. 245, № 1.
4. Титков В. И., Томсон Я. Я., Данилов Н. С. Лазерный доплеровский измеритель скорости.— В кн.: Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности. [Материалы III Всесоюз. совещ. Новосибирск, 10—12 октября 1979 г.]. Новосибирск, 1980.

Поступила в редакцию 20 января 1981 г.;  
окончательный вариант — 23 сентября 1981 г.