

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНОГО  
ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ**

*Ю. Н. Дубнищев, А. Р. Евсеев,  
В. С. Соболев, Е. Н. Уткин*

*(Новосибирск)*

Обсуждаются новые экспериментальные результаты по изучению турбулентного газонасыщенного потока в трубе с применением лазерного доплеровского измерителя скорости и термоанемометра. Получены распределения объемного газосодержания по сечению трубы, профили осредненных скоростей, осредненных и пульсационных характеристик касательного напряжения на стенке в исследуемом потоке. Приводится описание экспериментальной установки и методики измерений.

Газонасыщение как метод снижения гидродинамического сопротивления привлекает внимание исследователей [1,2]. Уменьшение трения при газонасыщении турбулентного пограничного слоя объясняют изменением физических констант газонасыщенной жидкости.

В экспериментальных работах [3,4] исследована зависимость относительной (кажущейся) вязкости различных жидкостей от объемной концентрации малых газовых пузырьков. Результаты исследования показали, что вязкость водопузырьковой жидкости больше вязкости однофазной жидкости. Относительное увеличение вязкости при газонасыщении жидкости зависит не только от объемного газосодержания, но также и от размера газовых пузырьков.

В теоретической работе [5] реальная водопузырьковая среда заменялась некоторой гомогенной однофазной средой с физическими константами, зависящими от объемного газосодержания. Результаты решения задачи показали, что относительное уменьшение гидродинамического сопротивления при газонасыщении турбулентного пограничного слоя является функцией одного параметра — плотности газонасыщенной жидкости на проникаемой стенке.

Существенное изменение физических констант газонасыщенной жидкости должно влиять на свойства пристенной турбулентности и тонкую структуру потока. В [6] высказана гипотеза о том, что пузырьки газа могут уменьшать интенсивность турбулентного обмена количеством движения за счет разделения смежных слоев жидкости в пограничном слое, а также за счет деформации пузырьков.

Экспериментальные исследования в данной работе проводились на гидродинамической установке гравитационного действия.

Рабочая часть представляла собой горизонтальную трубу прямоугольного сечения  $30 \times 40$  мм<sup>2</sup>. В дно рабочей части заподлицо с ним было вставлено проникаемое покрытие длиной 250 мм. Ширина проникаемого покрытия была меньше ширины рабочей части (24 и 40 мм соответственно). Газонасыщение турбулентного потока в трубе осуществлялось вдувом газа сквозь проникаемое покрытие.

Проницаемое покрытие состояло из набора плотно прижатых друг к другу пластинок из органического стекла толщиной по 1 мм. На обе стороны каждой пластинки механическим путем были нанесены риски. Опыты показали, что щели между плотно сжатыми пластинками, благодаря нанесенным рискам, представляют собой совокупность пор с хорошей однородностью по размерам. Размеры пор определялись по отрывному диаметру пузырьков путем расчета по формуле [7]. По оценкам средний размер пор проницаемого покрытия 2—4 мк. Поверхностная пористость покрытия ~1%.

Рассмотрим методики измерения. Для определения газосодержания в эксперименте было использовано ослабление луча лазера при прохождении через водопузырьковый турбулентный поток.

Относительное ослабление луча лазера в указанных условиях можно представить в виде

$$\Delta I = f(l, \bar{C}, D_n),$$

где  $l$  — длина пути луча в двухфазной среде,  $\bar{C}$  — объемное газосодержание среды,  $D_n$  — диаметр рассеивающих свет пузырьков.

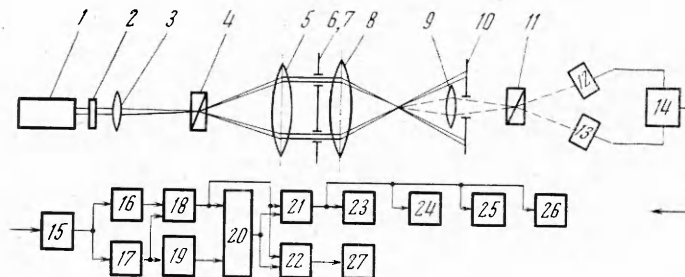
Для определения указанной зависимости были проведены специальные исследования на тарировочной установке, которая представляла собой сосуд с пористым дном.

Для исключения первого и третьего факторов при тарировках длины пути луча лазера в двухфазной среде исследуемого потока в трубе и тарировочном сосуде выбирались равными. Кроме того, для уменьшения диаметров пузырьков, генерируемых проницаемым покрытием при вдуве газа в тарировочном сосуде, вместо воды применялся 1%-ный раствор этилового спирта. Средний размер пузырьков 150 мк.

По результатам тарировки определялось объемное газосодержание в исследуемом двухфазном потоке.

Для исследования поля осредненных скоростей в одно- и двухфазном турбулентном потоке в трубе был применен лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛДИС), разработанный в ИАЭ СО АН СССР.

Схема измерительного устройства представлена на фиг. 1. Оптическая часть содержит последовательно расположенные лазер 1, четверть-



Ф и г. 1

волновую фазовую пластину 2, объектив 3, поляризационный расщепитель (призма Волластона) 4, объектив 5, диафрагмы 6 и 7, фокусирующий объектив 8, приемный объектив 9, полевую диафрагму 10, призму Волластона 11, фотоприемники 12 и 13, выходы которых подключены через дифференциальный усилитель 14 к электронному блоку обработки доплеровского сигнала. Призма Волластона 4 помещена в общей фокальной плоскости объективов 3 и 5, которые образуют афокальную систему.

Луч лазера 1 после прохождения четвертьволновой фазовой пластинки 2 расщепляется поляризационной призмой 4 на два ортогонально-поляризованных пучка, имеющих одинаковую интенсивность. Поскольку объективы 3 и 5 образуют афокальную систему, расщепленные пучки на выходе объектива 5 параллельны. Светонепроницаемый экран с диафрагмами 6 и 7 служит для освобождения световых пучков от некогерентного ореола. Расщепленные пучки объективом 8 фокусируются в исследуемую область потока.

В области пересечения падающих пучков можно выделить две ортогональные оси ( $x$  и  $y$ ), повернутые относительно ортогональных векторов поляризации падающих пучков на угол  $45^\circ$ . Относительный фазовый сдвиг между проекциями векторов поля на оси  $x$  и на оси  $y$  будет отличаться на  $\pi$ . Результирующее световое поле можно представить как суперпозицию двух ортогонально-поляризованных и пространственно-совмещенных интерференционных полей, полосы в которых параллельны и находятся в противофазе, а огибающие — синфазны.

Изображение зондирующего поля в ортогонально-поляризованных рассеянных пучках формируется объективом 9 и призмой 11 на светочувствительных поверхностях фотоприемников 12 и 13. Оси призмы Волластона 11 развернуты относительно векторов поляризации падающих пучков на  $45^\circ$ . При этом изображения интерференционных полей с противофазными интерференционными решетками в рассеянных пучках оказываются разделенными и сформированными каждая на своем фотоприемнике. Рассеянный свет от частицы, проходящий через зондирующую область, модулирован по интенсивности с частотой, обратно пропорциональной периоду решетки.

Можно показать, что частота модуляции равна разностной доплеровской частоте [8]

$$(1) \quad f_D = U \sin \alpha / \lambda,$$

где  $U$  — измеряемая проекция скорости,  $2\alpha$  — угол между направлениями интерферирующих пучков,  $\lambda$  — длина волны излучения лазера. Пространственно-фазовое распределение интенсивности в зондирующем интерференционном поле преобразуется в фазово-временное распределение движущейся рассеивающей частицей. Поэтому выходные токи в каждом из двух фотоприемников описываются соответственно выражениями

$$(2) \quad \begin{aligned} I_1 &= I_n(t) + I_D(t) \cos \omega t, \\ I_2 &= I_n(t) - I_D(t) \cos \omega t, \end{aligned}$$

где  $\omega = 2\pi f_D$ ,  $I_n$  — аддитивная составляющая сигнала,  $I_D$  — амплитуда доплеровской составляющей.

Результирующий ток на выходе дифференциального усилителя 14 определяется как разность выходных сигналов первого и второго фотоприемников [9].

На практике полное подавление аддитивной составляющей сигнала и шумов не достигается из-за деполяризующего влияния рассеивающих частиц.

Для симметрирования выходного сигнала в каждом канале дифференциального усилителя предусмотрена плавная регулировка коэффициента передачи. Дальнейшая обработка доплеровского сигнала производится электронным блоком, который выдает цифровое значение осредненной за заданное время скорости и аналоговое напряжение, пропорциональное мгновенной скорости. Упрощенная блок-схема электронной части ЛДИС показана на фиг. 1.

После предварительного усиления сигнал поступает на блок автоматической фильтрации 15, который осуществляет автоматическое слежение за максимумом текущего спектра доплеровского сигнала. Отфильтрованный сигнал, имеющий вид случайной последовательности симметричных относительно нуля радиоимпульсов, поступает на два пороговых усилителя-ограничителя 16 и 17. Из выходных сигналов этих усилителей узлами 18, 19 и 20 формируются серии счетных остроконечных импульсов и строб-импульсы, длительность которых соответствует длительности этих серий. Счетные импульсы и строб-импульсы поступают на специальный счетчик 22 с заранее задаваемым временем счета. Счетчик дает цифровые показания непосредственно в единицах скорости. Время счета (осреднения) можно изменять в пределах от 0.01 до 10 с. В счетчике предусмотрен выход для вывода информации на ЭВМ 27.

Для получения информации о «мгновенной» скорости потока доплеровская частота преобразуется в аналоговый сигнал частотным детектором с памятью 21, на который подаются те же счетные импульсы и строб-импульсы. Флуктуации выходного напряжения частотного детектора пропорциональны девиациям доплеровской частоты и, следовательно, пульсациям скорости. Спектр пульсаций напряжения соответствует спектру пульсаций скорости. Подавая это напряжение на приборы 23—26, можно определять необходимые статистические характеристики исследуемого потока, в частности интенсивность и спектр турбулентности, автокорреляционную функцию пульсаций и т. д.

Электронный блок обработки доплеровского сигнала имеет три рабочих поддиапазона: 10—100 мм/с, 100 мм/с — 1 м/с, 1—10 м/с. Соответственно полосы воспроизводимых частот пульсаций скорости составляют 0—10, 0—100 и 0—1000 Гц. Относительный уровень шума на аналоговом выходе прибора не превышает 0.01, что соответствует интенсивности турбулентности 1%.

Параллельно с блоком электронной обработки к выходу дифференциального усилителя был подключен анализатор спектра СК4-13, который позволял оценивать спектр доплеровского сигнала. Так как при увеличении концентрации газовой фазы в исследуемой области потока доплеровский спектр из-за модуляционных помех уширяется, то точное измерение средней доплеровской частоты (скорости) затрудняется. Приближенная оценка (с погрешностью  $\pm 5\%$ ) средней частоты спектра при больших концентрациях производилась в этом случае по анализатору спектра.

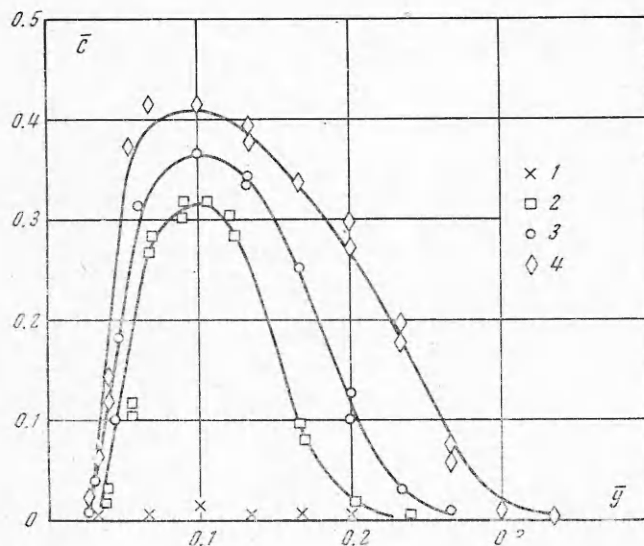
Осредненные и пульсационные характеристики гидродинамического трения на нижней стенке трубы за местом вдува газа измерялись термоанемометром типа РТПС [10] с торцовым датчиком, установленным заподлицо со стенкой. Датчиком служила платиновая пленка размером ( $x \times z$ )  $0,2 \times 2,5$  мм<sup>2</sup>, нанесенная методом вжигания на подложку из тугоплавкого стекла. Сигнал с датчика согласно [11] пропорционален градиенту осредненных скоростей на стенке, т. е. касательному напряжению вязкого трения.

Пульсационная составляющая сигнала с датчика поступала на вход анализатора спектра типа 2112 фирмы «Брюль и Кьер» с третьоктавной шириной полосы пропускания фильтров и записывалась на самописце типа 2305.

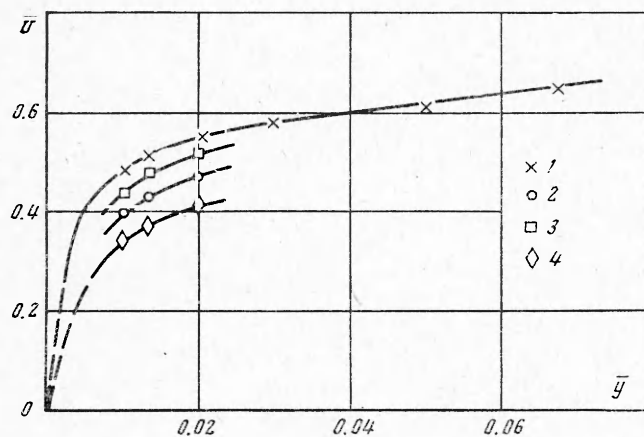
Различные характеристики двухфазного потока измерялись в сечении рабочей части трубы, расположенном в 50 мм за проникаемым покрытием. Все измерения проводились при скорости потока на оси трубы  $U_m = 8,3$  м/с. Число Рейнольдса, определенное по гидравлическому диаметру трубы, равно  $\approx 2,2 \cdot 10^5$ .

На фиг. 2 изображено распределение объемного газосодержания по сечению рабочей части трубы при различных режимах газонасыщения потока.

По оси абсцисс откладывается безразмерное расстояние от нижней стенки трубы  $\bar{y}=2y/H$ , где  $H=30$  мм — высота рабочей части трубы; по оси ординат — объемное газосодержание  $\bar{C}$ . Здесь  $C_q=Q/U_m S_1$  — без-



Ф и г. 2



Ф и г. 3

размерный коэффициент расхода газа,  $Q$  — объемный расход газа,  $S_1$  — смоченная площадь пронизываемого покрытия. Значения  $C_q$  для точек 1—4 равны  $(0,29, 1,72, 2,60, 4,3) \cdot 10^{-3}$  соответственно.

Отметим три основных особенности распределения объемного газосодержания в турбулентном потоке за местом вдува газа: во-первых, в непосредственной близости нижней стенки трубы (в вязком подслое) объемная концентрация газа равна нулю; во-вторых, максимум объем-

ного газосодержания приходится на  $\bar{y}=0,4$ ; в-третьих, при движении к оси трубы объемное газосодержание плавно уменьшается до нуля.

Причиной существования зоны чистой жидкости в непосредственной близости нижней стенки и сосредоточения малых газовых пузырьков на некотором расстоянии от нее, по-видимому, является спла Жуковского, связанная со значительной циркуляцией скорости вокруг только что оторвавшихся с проницаемого покрытия пузырьков газа, и сила плавучести пузырьков.

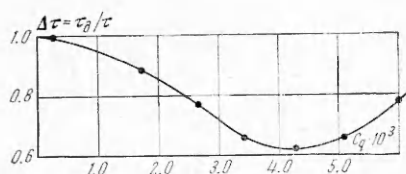
На фиг. 3 изображены профили осредненных скоростей для режимов газонасыщения, соответствующих фиг. 2.

Профиль осредненных скоростей в однофазном потоке показан на фиг. 3 сплошной линией. Он хорошо соответствует степенному закону  $1/7$  для турбулентного потока в трубе. Профиль скоростей в двухфазном потоке измерен не полностью, поскольку при объемных концентрациях больше 3% луч лазера ослабляется настолько, что доплеровский сигнал невозможно было выделить из шумов.

Из графика видно, что чем больше объемное газосодержание в турбулентном потоке, тем меньше градиент осредненных скоростей на нижней стенке трубы.

Следует учесть что из-за большого градиента скоростей в зоне около нижней стенки наиболее критичным размером области пространственного разрешения ЛДИСа была составляющая по оси  $y$ , которая в опыте равнялась 30 мкм. Вся область пространственного разрешения составляла объем  $x \times y \times z$  соответственно  $(0,03 \times 0,6 \times 3 \text{ мм}^3)$ .

На фиг. 4 изображена зависимость относительного гидродинамического сопротивления  $\Delta\tau = \tau_{\partial}/\tau$  от расхода газа, полученная по результатам термоанемометрических измерений с торцовым пленочным датчиком.



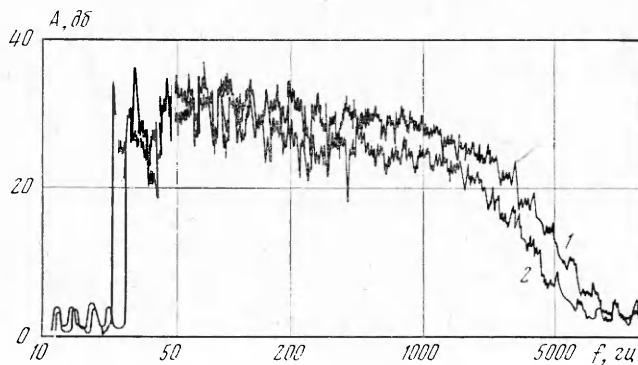
Ф и г. 4

Из графика следует, что чем больше объемное газосодержание потока, тем меньше касательное напряжение на нижней стенке трубы. Характерно наличие оптимального расхода газа, при котором снижение трения максимально.

Результаты термоанемометрических измерений можно сравнить с данными по измерению профиля скоростей на

фиг. 3. В предположении, что жидкость в вязком подслое ньютоновская ( $\bar{C}=0$ ), оценки снижения локального трения по данным на фиг. 3 и 4 совпадают с точностью до ошибки измерений.

На фиг. 5 изображены среднеквадратичные спектры пульсаций тре-



Ф и г. 5



ния в однофазном потоке (1) и при оптимальном газонасыщении (2).

По оси абсцисс отложены частоты пульсаций (Гц), а по оси ординат — среднеквадратичное значение пульсаций трения  $A$  в логарифмическом масштабе. Наибольшие изменения интенсивности пульсаций трения при газонасыщении турбулентного потока в трубе происходят в области частот от 200 до 4000 Гц и при оптимальном газосодержании потока составляют 5 дБ, т. е. интенсивность пульсаций трения уменьшается почти в 1,5 раза. Это свидетельствует о своеобразной стабилизации течения в пристенной зоне, вызванной малыми газовыми пузырьками при больших объемных газосодержаниях.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что при газонасыщении турбулентного потока в трубе имеет место существенное снижение локального гидродинамического сопротивления. При снижении гидродинамического сопротивления градиент осредненных скоростей на обтекаемой стенке уменьшается на такую же величину. Спектральные характеристики пульсаций гидродинамического трения показывают, что снижение трения, вызванное малыми газовыми пузырьками при больших объемных концентрациях, связано со стабилизацией течения в пристенной зоне. Распределение объемной концентрации газа в турбулентном потоке своеобразно: ее максимум приходится на  $\bar{y}=0,1$ , в непосредственной близости обтекаемой стенки (в вязком подслое) пузырьки газа отсутствуют.

Поступила 15 II 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л. Г. Об изменении сопротивления тел путем заполнения пограничного слоя жидкостями с другими физическими константами. ПММ, 1942, т. 6, вып. 1.
2. Федяевский К. К. Уменьшение сопротивления трения путем изменения физических констант жидкости у стенки. Изв. АН СССР, ОТН, 1943, № 9—10.
3. Исаченков В. Н. Вязкость газонасыщенной жидкости. Сб. тр. Ин-та гидродинамики СО АН СССР, Новосибирск, 1963, стр. 16—23.
4. Hinata Shigeru, Ohki Morimatsu. The relationship between the apparent viscosity and the void fraction in two-phase flow. Bull. JSME, 1971, vol. 14, No. 75.
5. Басин А. М., Короткий А. И., Козлов Л. Ф. Управление пограничным слоем судна. Л., «Судостроение», 1968.
6. Тонг Л. Теплопередача при кипении и двухфазное течение. М., «Мир», 1969.
7. Кутателадзе С. С., Стярикович А. М. Гидравлика газо-жидкостных систем. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
8. Барилл Г. А., Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. Н., Коронкевич В. П. Фурье-анализ лазерных доплеровских устройств. Автометрия, 1973, № 5, с. 41—47.
9. Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. Н., Уткин Е. Н. О снижении уровня аддитивных помех в выходном сигнале лазерного измерителя скорости. Оптика и спектроскопия, 1973, т. 35, вып. 2, с. 366—369.
10. Столповский А. А., Ткачев Н. И., Уткин Е. Н. Автокомпенсационные устройства для измерения параметров потоков жидкостей и газов. В кн.: Устройства и элементы систем автоматизации научных экспериментов. Новосибирск, «Наука», 1970.
11. Bellhouse B. J., Schultz D. L. Determination of mean and dynamic skin friction, separation and transition in low-speed flow with a thin-film heated element. J. Fluid. Mech., 1966, vol. 24, pt. 2.