

4. Шумилин Б. Парадоксы межотраслевого пространства. Изобретатель и рационализатор, 1976, № 11.
5. Причуды вибрирующего сосуда. Знание — Сила, 1976, № 12.
6. Эпштейн Л. А. О возможностях теоретического изучения кавитации, как движения сжимаемой жидкости особого рода. Докл. АН СССР, 1945, т. 49, № 6.

УДК 532.57

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ В ЖИДКИХ ПОТОКАХ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОМ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ

В. П. ИВАНОВ, В. П. КЛОЧКОВ, Л. Ф. КОЗЛОВ

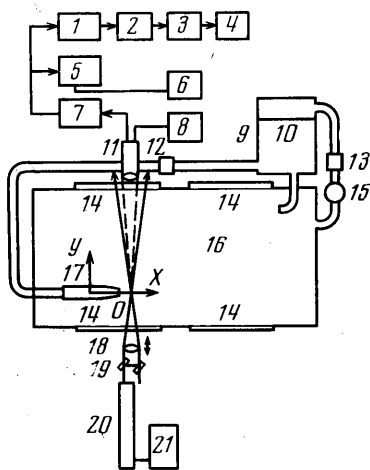
(Киев)

Применение лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) в гидромеханике имеет уже солидную предысторию и работы над его развитием ведутся достаточно интенсивно [1, 2]. Этот метод был с успехом использован для измерения различных параметров течений в каналах или лотках небольших размеров [3-6]. При применении его в других практически важных случаях, в частности в бассейнах или резервуарах больших объемов, наряду с техническими не исключены принципиальные трудности из-за возможных локальных изменений показателя преломления среды на пути лазерного луча [7].

Цель настоящей работы — исследование скоростной структуры потоков в больших объемах с помощью ЛДИС на примере турбулентной затопленной струи воды. С целью оценки влияния толщины слоя воды на применимость метода были опробованы три схемы — на прямом [8] и на обратном [9] рассеянии, а также схема с отражением рассеянного вперед света от зеркала [10].

Приводятся результаты исследования затопленной турбулентной струи с помощью ЛДИС.

1. Для проведения исследований был собран специальный стенд, схематически изображенный на фиг. 1. В гидравлическую часть стенда входят: металлический резервуар 16 объемом 10,3 м³ (4,6×1,5×1,5 м) с четырьмя стеклянными окнами 14 размерами 1×1 м, бак постоянного напора 9 с успокоительной стенкой 10, конический насадок 17 с углом конусности 15° и диаметром выходного отверстия $d_0=12,4$ мм, центробежный насос 15 и регулировочные краны 12, 13 для получения



Фиг. 1

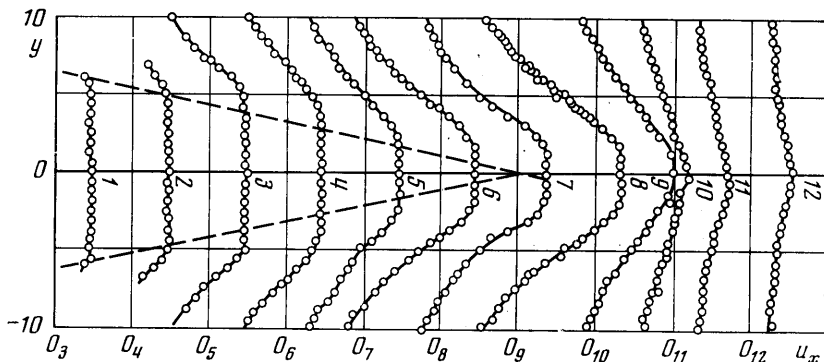
необходимой скорости струи. Насадок соединен с баком 9 гибким шлангом и закреплен на координатном устройстве, обеспечивающем необходимое местоположение его в основном резервуаре, которое было выбрано таким, что толщина слоя воды со стороны оптического квантового генератора составляла 0,3 м, а со стороны противоположного окна 1,2 м.

В измерительную часть входит ЛДИС, собранный по дифференциальной схеме [11] на прямом, обратном или отраженном от зеркала прямом рассеянии и спектроанализирующая аппаратура, позволяющие определять среднюю скорость и интенсивность турбулентности в измеряемой точке потока.

Блок-схема оптической части ЛДИС на прямом рассеянии приведена на фиг. 1. Источником излучения служил лазер 20 типа ЛГ-38 с блоком питания 21. Луч лазера после прохождения светоделительного блока 19, служащего для получения двух зондирующих лучей одинаковой интенсивности, фокусировался линзой 18 в исследуемую точку потока так, чтобы вектор чувствительности K измерителя скорости был ориентирован вдоль оси струи. Поэтому измерялась x -компонента вектора скорости потока (u_x). Координата x была направлена вдоль оси струи, а координата y — вдоль оптической оси ЛДИС. Линза 18 могла перемещаться микрометрическим винтом по оси y с шагом 0,025 мм. Угол пересечения зондирующих лучей θ составлял 9°48'.

Пробный объем имел форму эллипсоида с осями 80, 80, 890 мм, причем большая ось была ориентирована перпендикулярно оси струи. Рассеянный свет собирался блоком фотоприемника *И1*, состоящего из фотоумножителя типа ФЭУ-79, приемного объекта и диафрагмы, который вместе с блоком питания ФЭУ 8 располагался с противоположной стороны резервуара. В этом случае слой воды между фокусирующей линзой и ФЭУ достигал 1.5 м.

Измерение эпюр скоростей в данном сечении струи проводилось путем последовательного перемещения пробного объема вдоль оси *y* с помощью фокусирующей линзы. Переход от данного сечения струи к другому осуществлялся с помощью координатного устройства, на котором закреплялся насадок.



Фиг. 2

Как было отмечено выше, измерения проводились также ЛДИС с обратным рассеянием и с отраженным от зеркала прямым рассеянием. В этих случаях толщина слоя воды между фокусирующей линзой и ФЭУ уменьшалась почти вдвое по сравнению со схемой «на проход».

Электронная схема выделения и регистрации доплеровского сигнала включала в себя (фиг. 1): широкополосный усилитель 7, анализатор спектра частот 5, селективный усилитель 1, квадратичный вольтметр 2, интегратор 3, автоматический потенциометр 4, кварцевый генератор меток 6. Настройка селективного усилителя была синхронизирована с лентопротяжным механизмом автоматического потенциометра. Время усреднения интегратора 4 сек. При достаточно узкой полосе пропускания селективного усилителя и большом времени усреднения на ленте автоматического потенциометра записывается энергетический спектр доплеровского сигнала, который может быть отождествлен с распределением плотности вероятностей значений скорости. Методика определения средней скорости и интенсивности турбулентности по регистрируемому спектру доплеровского сигнала дана в [8, 12-14].

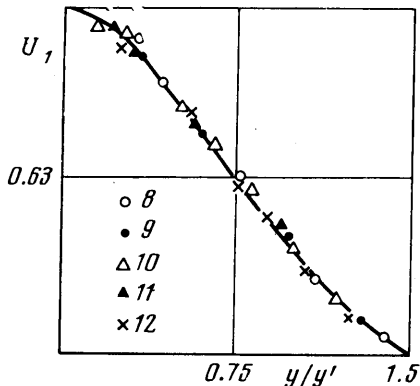
2. С помощью описанных выше схем были измерены поля скоростей в различных сечениях круглой струи. Толщина слоя воды, через который проводились измерения, оказывала существенное влияние на отношение сигнала к шуму, увеличивавшееся в 3-4 раза при уменьшении этой толщины вдвое. По-видимому, слой водопроводной воды в 1.5-2 м близок к предельному для схем ЛДИС на прямом рассеянии с данным типом оптического квантового генератора и ФЭУ. Схема на обратном рассеянии, хотя и обеспечивала возможность измерений, обладала малым уровнем полезного сигнала. Поэтому наиболее предпочтительной для измерений в конкретном случае была схема с отражением рассеянного излучения от зеркала. На фиг. 2 в качестве иллюстрации приведены эпюры скоростей в абсолютных координатах для сечений 1-12 (скорость струи на выходе из насадка $u_* = 2.45$ м/сек), которые соответствуют следующим расстояниям от насадка: 2, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 100, 160, 250 и 350 мм. На оси *x* показаны начала отсчетов O_1-O_{12} кривых с ценой одного деления координатной сетки 1 м/сек. По оси *y* отложено расстояние в мм от оси струи. Пунктиром показано потенциальное ядро струи, внутри которого скорость $u_x = 2.45$ м/сек.

Из фиг. 2 видно, что на протяжении начального участка происходит непрерывная деформация скоростного профиля. Чем дальше от начала струи расположено сечение, тем он ниже и шире. Длина начального участка L_0 равна $4.7 \cdot d_0$, что хорошо согласуется с $L_0 = 4.8d_0$, полученной в [15, 16].

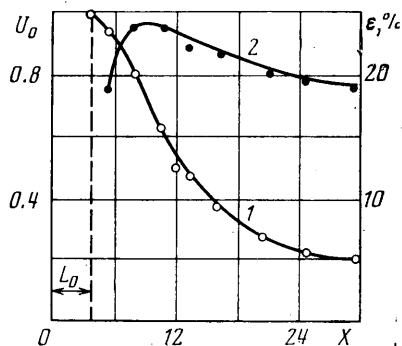
На фиг. 3 приведены безразмерные профили скоростей для основного участка струи (сечения 8-12). На оси абсцисс отложено отношение расстояния от оси струи *y* к расстоянию от оси до таких точек, в которых скорость равна половине осевой y' ;

а на оси ординат $U = u_x/u_0$ — отношение скорости u_x к скорости на оси струи в данном сечении u_0 . Из фиг. 3 видно, что наблюдается полное подобие скоростных полей во всех сечениях основного участка круглой струи. Безразмерные профили совпадают для различных сечений, т. е. являются универсальными [15, 16].

На фиг. 4 приведены безразмерные зависимости осевой скорости $U_0 = u_0/u_*$ (кривая 1) и степени турбулентности $\varepsilon \cdot 100\%$ (кривая 2) от расстояния до насадка



Фиг. 3



Фиг. 4

$X = x/d_0$. Из приведенной зависимости следует, что за начальным участком закон падения безразмерной осевой скорости на основном участке круглой струи имеет вид гиперболической функции. Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются эмпирической зависимостью [15, 16]

$$U_0 = \frac{0.96}{2\alpha X + 0.29}$$

при $\alpha = 0.07 - 0.08$, где α — постоянная, не зависящая от числа Re в очень широком диапазоне чисел Re. Степень турбулентности на оси струи максимальна в начале основного участка струи.

Аналогичные результаты были получены для других значений u_* и находятся в полном соответствии с приведенными в литературе данными [8, 15-18].

Поступила 25 VIII 76

ЛИТЕРАТУРА

1. Bibliography of laser Doppler anemometry literature. Ed. Durst F., Zari M. Publ. DISA Inform. Department, 1974.
2. Лазерное доплеровское измерение скорости потоков жидкости и газов (по материалам отечественной и зарубежной печати). ЦАГИ, Обзор, 1976, № 481.
3. Foreman J. W., George E. W., Jetton J. I., Lewis R. D., Thornton J. R., Watson H. J. Fluid flow measurements with a laser Doppler velocimeter. IEEE J. Quant. Electron., 1966, vol. 2, No. 8.
4. Bourke P. J., Drain L. E., Moss B. C. Measurement of spatial and temporal correlations of turbulence in water by laser anemometry. DISA Inform., 1971, No. 12.
5. Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. Н., Коронкевич В. П., Соболев В. С., Столловский А. А., Уткин Е. Н. Лазерные доплеровские измерители скорости. Новосибирск, «Наука», 1975.
6. Иванов В. П., Ключков В. П., Козлов Л. Ф., Орланов В. И. Исследование развития ламинарного течения на входном участке плоского канала с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 5.
7. Lee R. E. et al. Laser velocimeter spatial coherence and velocity measurements in water. Opto-electronics, 1973, vol. 5, No. 1.
8. Ринкевичюс В. С., Смирнов В. И. Оптический доплеровский метод исследования турбулентных потоков с использованием спектрального анализа сигнала. Квантовая электроника, 1973, № 2 (14).
9. Greated C. A. Resolution and back scattering optical geometry of laser Doppler systems. J. Phys. Ser. E., Scient. Instruments, 1971, vol. 4, No. 8.

10. Baker G. R., Barker S. J., Bofan K. K., Saffman P. G. Laser anemometer measurements of trailing vortices in water. *J. Fluid Mech.*, 1974, vol. 65, No. 2.
11. Ринкевичюс Б. С. Применение ОКГ для определения скорости частиц в двухфазной струе методом гетеродинамирования. *Радиотехника и электроника*, 1966, т. 14, № 10.
12. Власов С. А., Исаева О. В., Калашников В. Н. Средние и пульсационные составляющие скорости в затопленных струях полимерных растворов. *Инж.-физ. ж.*, 1973, т. 25, № 6.
13. Goldstein R. J., Hagen W. F. Turbulent flow measurements utilizing the Doppler shift of scattered laser radiation. *Phys. Fluids*, 1967, vol. 10, No. 6.
14. Ринкевичюс Б. С., Смирнов В. И. Исследование турбулентных потоков лазерным анемометром со спектральным анализом доплеровского сигнала. *Теплофизика высоких температур*, 1975, т. 13, № 3.
15. Абрамович Г. Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948.
16. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
17. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов. М., «Машиностроение», 1969.
18. Бай Ши-и. Теория струй. М., Физматгиз, 1960.

УДК 532.58

ОБ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ БЛОКИРОВАННОГО ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ

Ю. И. ЗИНОВЬЕВ

(Москва)

Приведена характеристика блокированного псевдоожигенного слоя. По экспериментальным данным получены зависимости от определяющих параметров аэродинамического сопротивления первого и второго ярусов дисков, образующих твердую фазу слоя, и статического давления на любой глубине неоднородного по структуре слоя. Рассмотрена связь между плотностью расположения в слое элементов аэродинамического сопротивления и стабильностью его удельного сопротивления по глубине.

1. Характеристика объекта и постановка задачи. В блокированном псевдоожигенном слое (фиг. 1) в отличие от псевдоожигенного зернистого слоя элементы твердой фазы соединены при помощи гибких нитей в отдельные гирлянды 2, концы которых прикреплены к воздухораспределительной решетке 1. Гирлянды располагаются вдоль оси воздушного потока. В занятом ими объеме создается избыточное статическое давление, которое возрастает в направлении от поверхности слоя к распределительной решетке. На помещенное в слой тело действует выталкивающая сила, величина которой для тел, близких по форме к эллипсоиду, однозначно зависит от их объема, а при определенных геометрических характеристиках системы почти пропорциональна объему.

Благодаря стабильности характеристик твердой фазы блокированный псевдоожигенный слой как сепарирующая система имеет ряд технологических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с зернистым псевдоожигенным слоем.

При погружении в слой тела гирлянды отклоняются перед ним в стороны, входя при этом элементами одна в другую. Элементы твердой фазы в форме тонких дисков оказались наиболее приемлемыми как в отношении аэродинамического сопротивления, так и в отношении подвижности гирлянд в направлении, поперечном потоку.

В [1] предложен метод подхода к определению сопротивления наполнителей в зависимости от определяющих параметров на основе струйной теории. Сопротивление пучка труб, расположенных поперек потока, по экспериментальным данным обобщено функцией

$$(1.1) \quad Eu = f(\text{Re}, \xi)$$

где Eu — критерий Эйлера, ξ — коэффициент, характеризующий сужение потока при прохождении между элементами сопротивления.

Блокированный псевдоожигенный слой в отличие от гомогенных структур характеризуется выраженным ярусным строением со свободными промежутками меж-