

УДК 535.3 : 532.526

**Ю. С. Базилевский, И. А. Чичерин**

*(Санкт-Петербург)*

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ**

Рассматриваются результаты исследований с помощью ЛДА, разработанного для опытного бассейна, средних и пульсационных скоростей в безградиентном потоке, а также спектральных и корреляционных характеристик пограничного слоя модели.

Исследование потока вблизи корпуса моделей судов в опытном бассейне (ОБ), изучение тонкой структуры пограничного слоя (ПС), а также определение уровня шума турбулентного пограничного слоя (ТПС) требуют адекватных невозмущающих измерительных технологий, к числу которых относится лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) [1]. В работе описывается применение ЛДА для измерения распределения скорости в турбулентном безградиентном потоке и получения данных о корреляционных и спектральных характеристиках.

**Описание эксперимента.** Разработанный в ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова лазерный доплеровский анемометр с дифференциальной конфигурацией оптической измерительной схемы (рис. 1) состоит из излучающего и приемного модулей, размещенных в двух герметичных гондолах, ориентированных по потоку и жестко соединенных между собой. Расстояние между гондолами фиксировано и составляет 300 мм. Источником излучения служит гелий-неоновый лазер мощностью 1,5 мВт. Сформированный в воде измерительный объем имеет эллипсоидальную форму с полуосями порядка  $0,05 \times 0,05 \times 1,2$  мм на уровне  $\exp(-2)$  по интенсивности с пространственным периодом  $7,394 \times 10^{-6}$  м.

Сигнальный процессор выполнен в виде вставной функциональной карты в компьютере IBM. После заполнения массива частот в ОЗУ IBM PC/AT производится их статистическая обработка и определение средней скорости, степени турбулентности и средней скорости поступления частиц в измерительный объем. Полученные результаты выводятся на экран монитора и принтер. Использовалось координатное устройство, позволяющее позиционировать зондирующее поле ЛДА в потоке в декартовой системе координат. Координатно-измерительное устройство устанавливалось непосредственно

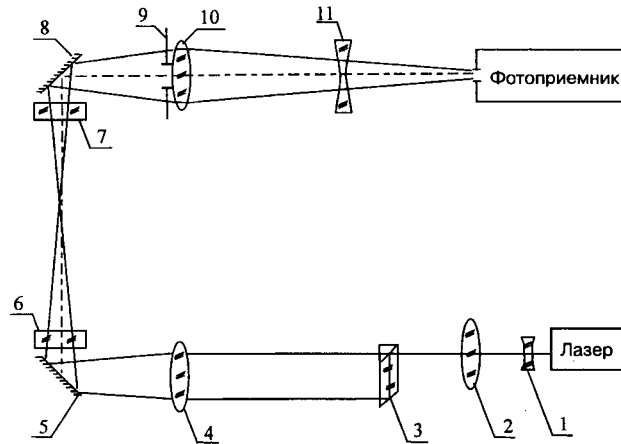


Рис. 1. Оптическая схема ЛДА: 1, 2 – коллиматор; 3 – делительная призма; 4 – линза; 5, 8 – призмы; 6, 7 – защитные стекла; 9 – диафрагма; 10, 11 – объективы

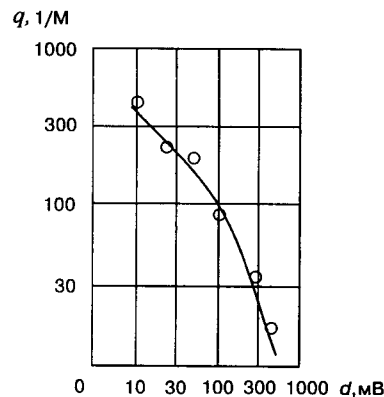
на модели, шарнирно соединенной с буксировочной тележкой опытного бассейна. Таким образом обеспечивалось снижение влияния вибраций от буксировочной тележки на результаты измерений.

При измерениях скорости в опытном бассейне рассеяние лазерного луча происходило от естественных оптических неоднородностей в воде и режим работы был практически одночастичным. Зависимость от пороговой амплитуды доплеровского сигнала концентрации частиц, рассеивающая способность которых превышает энергетическую чувствительность измерительного устройства, представлена на рис. 2.

**Определение характеристик ТПС в безградиентном потоке.** Метрологическая точность измерений средней скорости с помощью ЛДА составляет  $\sim 0,5\%$ . При тестовых измерениях в пограничном слое пластины (понтон) при числах  $Re = V_0 L / \nu \approx 10^7$  и сопоставлении с результатами, полученными с помощью пятиточечного гидродинамического зонда, наблюдается совпадение профилей средних скоростей (отклонение  $\sim 2\%$ ). Распределение уровня турбулентности  $\varepsilon(y)$  в пограничном слое пластины, измеренного с помощью ЛДА, сопоставлено с известными данными Клебанова [2], с результатами других исследователей, а также с данными измерений термоанемометром распределения интенсивности турбулентности в ПС экрана при опытах в аэродинамической трубе. Максимальное расхождение этих данных составляет  $\approx 0,005\varepsilon$ .

При вычислениях применялась программа расчета автокорреляционной функции и спектральной плотности пульсаций скорости, измеренной с помощью ЛДА [3], в предположении пуассоновского распределения одночастичных реализаций

Рис. 2. Зависимость концентрации рассеивающих частиц в опытном бассейне от пороговой амплитуды доплеровского сигнала



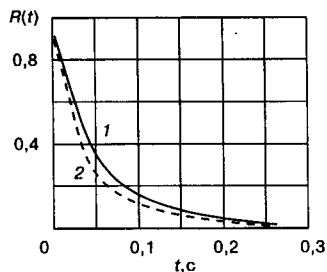


Рис. 3. Сравнение временных корреляций в ТПС на понтоне (кривая 1) и пластине (кривая 2)

доплеровского сигнала. На рис. 3 корреляционная функция  $R(t)$  в ТПС модели схематизированных обводов (понтон) сопоставлена с данными для пластины [4] при  $y/\delta = 0,77$ , где  $\delta$  – толщина ПС;  $y$  – поперечная координата.

При использовании гипотезы «замороженной турбулентности» Тейлора наблюдается влияние маскирующего эффекта [2] на одномерный энергетический спектр, измеренный в трехмерном потоке. Оно проявляется в том, что при некотором волновом числе  $k$  одномерный спектр может порождаться вихрями с волновыми числами, превышающими  $k$ . По этой причине измеренный одномерный спектр в общем случае при  $k = 0$  имеет конечное значение, пропорциональное интегральному масштабу  $L_x$ . На практике при использовании преобразования Фурье [2] величина  $L_x$  определяется по спектральной кривой  $F(f)$  на наименьшей частоте  $f = 0$  путем экстраполяции до нуля измеренных осредненных величин, соответствующих малым значениям частот:

$$L_x = \frac{v_m F(0)}{4}, \quad (1)$$

где  $v_m$  – местная средняя скорость в ТПС на расстоянии  $y$  от обтекаемой поверхности.

На рис. 4 показаны результаты определения  $L_x$  по формуле (1). На этом же рисунке представлены данные ЦАГИ для пластины [5]. Как видно из рисунка, наблюдается совпадение результатов определения  $L_x$  с помощью различных методов (до  $y/\delta < 0,8$ ). Отношение  $L_x$  к толщине ТПС составляет  $L_x/\delta \approx 0,4-0,5$ , что коррелируется с данными других исследователей [1]. По результатам измерений интенсивности пульсаций скорости  $\epsilon$  и масштаба турбулентности  $L_x$  определялся уровень шума ТПС вблизи корпуса.

**Измерение скорости в градиентном потоке.** В качестве объекта для исследования скоростей в градиентном потоке выбиралась вертикальная стойка (хорда  $b = 250$  мм,  $b/e = 6,25$ ,  $e$  – максимальная толщина). ЛДА с координатно-измерительным устройством и вертикальная стойка устанавливались на модели понтона. Измерения средних и пульсационных скоростей в следе за стойкой проводились в трех сечениях при  $b/x = 0,42; 1,0; 2,0$  ( $x$  – продольная координата). Результаты измерений в следе представлены на рис. 5, а, б. Для кривой  $\epsilon(z)$  наблюдается область с высокой степенью турбулентности (до 20 %, см. рис. 5, а). Анализ гистограмм распределения рассеивающих частиц, построенных по данным измерений мгновенных скоростей в точках с низкой и высокой степенью турбулентности, показывает, что в области с высокой степенью турбулентности (в отличие от области с малой

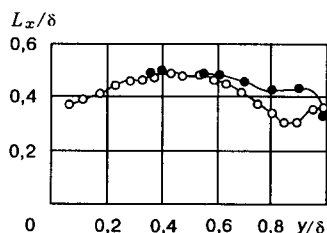


Рис. 4. Распределение масштаба турбулентности по толщине пограничного слоя: ○ – пластина, ● – понтон

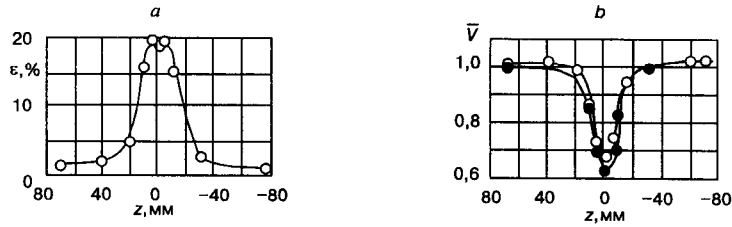


Рис. 5. Распределения уровня турбулентности в следе за стойкой ( $b/x = 0,42$ ) (а) и средней скорости в следе за стойкой (b):  $\circ$  – по формуле (2),  $\bullet$  – по формуле (3)

турбулентностью, где распределение близко к нормальному) плотность распределения скорости имеет моду, смещенную от среднего значения скорости [6]:

$$\langle \hat{V} \rangle = 1/N \sum_{i=1}^N v_i, \quad (2)$$

где  $v_i$  – мгновенная скорость  $i$ -й частицы;  $N$  – число частиц, прошедших через зондируемый объем за время наблюдения. Несмещенная оценка средней скорости дается также известной формулой

$$\langle \hat{V} \rangle = N \left[ \sum_{i=1}^N 1/v_i \right]^{-1}. \quad (3)$$

На рис. 5, b приведены распределения смещенных и несмещенных оценок средних скоростей в следе.

Представленные результаты показывают, что при нахождении средней скорости в турбулентном градиентном потоке следует пользоваться несмещенной оценкой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичюс Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982.
2. Турбулентность – принципы и применения /Под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. М.: Мир, 1980.
3. Базилевский Ю. С., Чичерин И. А., Гречихин В. А. и др. Использование программы спектрального анализа сигнала ЛДА для определения характеристик турбулентного пограничного слоя схематизированной модели судна // Тез. докл. III науч.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков» /Под ред. Б. С. Ринкевичюса, Ю. Н. Дубнищева. М.: МЭИ, 1995.
4. Фавр А. Пространственно-временные корреляции в турбулентных потоках жидкости // Механика: Сб. пер. М.: Мир, 1965. № 2.
5. Гудилин И. В., Ким А. Ю., Шумилкин В. Г. Экспериментальное исследование влияния разрушителей вихревых структур на характеристики турбулентного пограничного слоя // Труды ЦАГИ. 1989. Вып. 2431.
6. Коронкевич В. П., Соболев В. С., Дубнищев Ю. Н. Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1983.