

УДК 535.36

АНИЗОТРОПИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

ФИЛИППОВ В. М.

Впервые явление гидродинамического рассеяния света было отмечено при исследовании структуры водного потока в канале. Оптические оси систем, формирующих проходящий и отобранный (рассеянный) пучки света, располагались в плоскости, параллельной направлению течения [1, 2]. В этом случае с выходом жидкости из состояния покоя и установлением ламинарного течения интенсивность рассеянного света уменьшалась. Темп уменьшения падал с ростом скорости потока. Переход ламинарного течения в турбулентное сопровождался возникновением пульсационной составляющей рассеянного света и ростом его средней по времени величины.

Во всех исследованиях вода содержала примеси в виде растворимых солей и взвешенных частиц. Регулирование в широких пределах их концентрации не приводило к изменению характера явления. Хотя появление в измерительном объеме небольшого числа сравнительно крупных частиц затрудняло наблюдения. Понятно, что в условиях данных опытов влиянием пульсаций плотности жидкости из-за пульсаций ее температуры, а тем более скорости на пульсации коэффициента преломления (на рассеяние света) можно пренебречь. И тем не менее вероятно, что скорость и ее производные в первую очередь ответственны за формирование наблюдаемых оптических закономерностей гидродинамического рассеяния света.

Определенные экспериментальные подтверждения сказанного выше были получены при одновременных измерениях структуры потока посредством рассеянного света и термоанемометра [3]. Спектры пульсаций интенсивности света, рассеянного в турбулентных потоках, также свидетельствуют о том, что происходящие его изменения вызваны перестройкой структуры потока.

На фиг. 1 в логарифмическом масштабе приведены образцы одномерного пространственного спектра, полученные в центре канала на расстояниях от входа x около 65 калибров; точки 1, 2, 3 соответствуют значениям числа Рейнольдса: $R = U d / \nu = 8 \cdot 10^3$; $12 \cdot 10^3$; $26 \cdot 10^3$ (U — среднерасходная скорость, d — гидравлический диаметр канала). Переход ламинарного течения в турбулентное начинался при числе $R \approx 6 \cdot 10^3$; при числе $R \approx 8 \cdot 10^3$ поток был полностью турбулентным. Видно, что в спектрах можно выделить три диапазона с показателями степени, равными -1 , $-5/3$ и примерно -3 (кривые 4, 5, 6), кривая 7 соответствует показателю степени $-2,8$ (k — одномерное волновое число размерностью см^{-1}). Известно, что данные законы имеют место и в спектрах скоростей [4, 5].

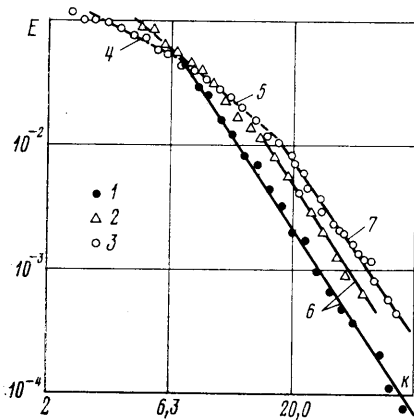
Следует, однако, признать, что однозначное соответствие между характеристиками рассеянного света и параметрами потока еще не установлено. Неполностью поняты и природа гидродинамического рассеяния света, ее объяснения иногда имеют противоречивый характер [6–14]. И несмотря на такое состояние вопроса, явление уже получило практическое использование, служа основой локального оптического метода, который имеет широкое распространение в экспериментальной гидроаэродинамике [15–19]. При помощи данного метода получены новые сведения о механизме возникновения и развития турбулентности в трубах, которые основательно изменяют существующее ранее научное представление о переходе ламинарного течения в турбулентное [20].

Настоящая работа посвящена дальнейшему изучению этого явления. В ходе ее выполнения установлена сильная анизотропия гидродинамического рассеяния света. Работа проводилась на установке ГУ-2 в канале сечением 25×25 мм с плавным входом [20]. Шероховатость и наличие стыков по внутреннему контуру входа канала приводили к началу перехода ламинарного течения в турбулентное при небольшом числе R . Рабочей жидкостью служила дистиллированная вода. Ее температура измерялась термометром с ценой деления 0,1 С. Среднерасходная скорость определялась с погрешностью не более 2%. Источником света служили лампочки накаливания, приемником рассеянного света — фотоумножитель (ФЭУ). Исследования проводились в центре канала на расстояниях x , примерно равных 8 и 48 калибров от входа при ориентации плоскости рассеяния параллельно или перпендикулярно направлению потока. Отбор рассеянного света осуществлялся в плоскости, перпендикулярной каналу. Работа была выполнена в два этапа.

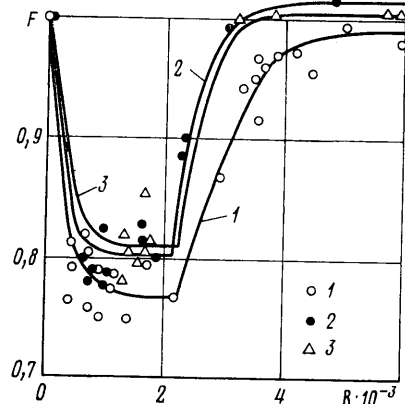
На первом этапе течение создавалось при помощи электропомпы, которая обеспечивала циркуляцию воды через канал. Регулирование скорости позволяло изменять числа R в пределах примерно от $0,5 \cdot 10^3$ до $7 \cdot 10^3$. Для измерений выходного сигнала ФЭУ использовался микроамперметр. Показания микроамперметра регистрировались дискретно с интервалом 15 с в течение 6–12 мин при каждом режиме.

Результаты измерений в сечении $x=48$ приведены на фиг. 2 и 3 в виде зависимости $F=I/I_0$ от числа R . Здесь I_0 — среднее значение выходного сигнала ФЭУ при

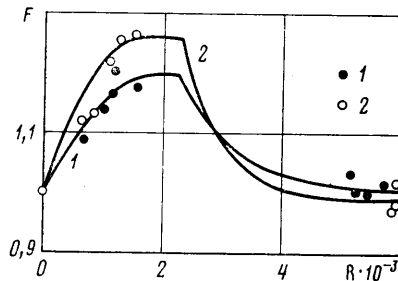
числе $R=0$. Данные фиг 2 получены при ориентации плоскости рассеяния параллельно направлению потока и трех значениях угла α между проходящим и рассеянным лучами света; кривые 1, 2, 3 соответствуют значениям $\alpha=9; 15; 23^\circ$. Зависимости фиг. 3 соответствуют случаю расположения плоскости рассеяния перпендикулярно потоку при $\alpha=11$ и 23° (кривые 1 и 2 соответственно). Из фиг. 2 видно, что, как и прежде [1-3], выход жидкости из состояния покоя первоначально сопровождается резким уменьшением интенсивности рассеянного света с ростом числа R . При числе $R \approx 10^3$ величина F достигала предельного значения, примерно равного 0,8, оставаясь неизменной далее вплоть до начала возникновения турбулентности ($R \approx 2,2 \cdot 10^3$).



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

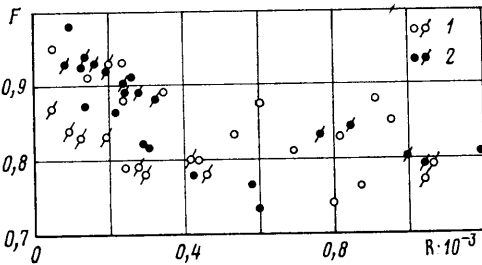
Развитие турбулентности приводило к соответствующему росту средней по времени интенсивности рассеянного света. Исследования зависимости $F=f(R)$ в плоскости расположенной перпендикулярно направлению потока, показали, что она имеет обратный ранее наблюдаемому характер (фиг. 3): возникновение ламинарного течения приводит к росту рассеяния света и его уменьшению при переходе к турбулентному.

На втором этапе данной работы были проведены подробные исследования зависимости $F=f(R)$ в области малых скоростей ламинарного потока, где происходят наиболее значительные изменения величины F . С целью уменьшения возмущений жидкости на входе в канал, ее загрязненности смачивающимися деталями электропомпы течение создавалось путем слива воды из второго по потоку бака гидроустановки. Измерения выходного сигнала ФЭУ выполнялись при помощи цифрового вольтметра с интервалом 10 с в течение 4-8 мин на каждом режиме. Общее время измерений составило около 40 ч.

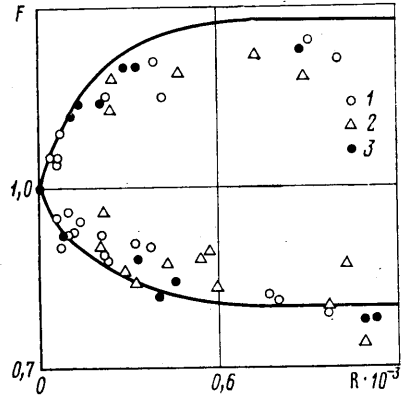
До начала опытов вода находилась в покое. Это время изменялось от нескольких минут до нескольких суток. Влияния времени предварительного покоя жидкости на результаты опытов не было замечено. В пределах существующего разброса значений величины F не было замечено и влияния расстояния рабочего сечения до входа в канал (фиг. 4, плоскость рассеяния параллельна направлению потока, $\alpha \approx 20^\circ$; кривые 1, 2 соответствуют значениям $x=48; 8$).

Поляризационный анализ рассеянного света показал увеличение степени его поляризации с ростом угла рассеяния. При отборе рассеянного света с электрическими колебаниями в заданном направлении экспериментальные точки зависимости

$F=f(R)$ имели меньший разброс. Результаты такого типа исследований для сечения $x=8$ и $\alpha \approx 20^\circ$ приведены на фиг. 5. Верхняя часть графика ($F > 1$) соответствует измерениям в плоскости рассеяния, расположенной перпендикулярно, а нижняя — параллельно направлению потока жидкости. Точками 1 обозначены данные для рассеянного света, электрические колебания которого совершались в направлении потока, 2 — перпендикулярно направлению потока, 3 — 45° к первому и второму положениям. Кривые фиг. 5 проведены с учетом средних значений всех данных второго этапа работы, которые наряду с точками фиг. 4, 5 включали результаты измерений в плоскости, перпендикулярной потоку, на расстоянии $x=48$ для углов $\alpha=20, 36^\circ$ и для $x=8$ при $\alpha=20^\circ$. Из фиг. 5 видно, что в условиях проведенных опытов ориентация



Фиг. 4



Фиг. 5

поляризатора не оказывала влияния на зависимость $F=f(R)$. Количественные различия при измерениях с использованием и без использования поляризационного светофильтра, возможно, как и более значительные изменения F в плоскости рассеяния, расположенной перпендикулярно к направлению потока по сравнению с плоскостью, ориентируемой параллельно, обусловлены наличием в воде некоторого числа сравнительно крупных частиц, вероятность появления которых могла увеличиваться со скоростью потока.

Общим для всех проведенных экспериментов является факт значительного изменения средней по времени интенсивности рассеянного света при переходе жидкости из состояния покоя в ламинарное течение, а затем при возникновении турбулентности. В ламинарном потоке имеет место значительная анизотропия рассеяния света. Установленный эффект анизотропии следует учитывать при использовании метода рассеянного света для исследований смешений различных потоков или измерений концентраций примесей как в лабораторных работах, так и в природных процессах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Струминский В. В., Филиппов В. М. Явления рассеяния света в ламинарных и турбулентных потоках жидкости. — Тр. ЦАГИ, 1962, вып. 847, 29 с.
2. Струминский В. В., Филиппов В. М. Экспериментальные исследования явлений рассеяния света в ламинарных и турбулентных потоках жидкости. — Изв. АН СССР, Мех. и маш., 1962, № 6, с. 10.
3. Филиппов В. М. Исследование структуры потока жидкости методом рассеянного света и термоанемометра. — В кн.: Турбулентные течения. М.: Наука, 1974, с. 166 (Filippov V. M. Investigation of structure of liquid flows by light-scattering and hot-wire anemometer experiments. — Fluid Mech. Soviet Res., 1976, v. 5, № 6, p. 32).
4. Ибрагимов М. Х., Субботин В. И., Таранов Г. С. Спектры турбулентных пульсаций скорости, температуры и их корреляции при течении воздуха в круглой трубе. — Инж.-физ. ж., 1973, т. 24, № 2, с. 357.
5. Гледзер Е. Б., Макаров А. Л. О построении каскадной модели двумерной турбулентности. — Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1979, т. 15, № 9, с. 899.
6. Верховых Н. П., Верховых Ю. Ф., Сысак В. М., Трохан А. М. О рассеянии света в турбулентной жидкости. — ПМТФ, 1970, № 1, с. 181.
7. Кутугеладзе С. С., Авалиани Д. И. Ослабление луча света на турбулентных пульсациях. — Докл. АН СССР, 1971, т. 198, № 5, с. 1058.
8. Кутугеладзе С. С., Авалиани Д. И. Прохождение света через турбулентную жидкость. — Докл. АН СССР, 1972, т. 206, № 2, с. 311.

9. Сысак В. М., Трохан А. М. Об изменениях со временем характеристик рассеяния света водной средой при ее гидродинамическом возмущении.— ПМТФ, 1972, № 6, с. 181.
10. Авалиани Д. И., Заидзе Т. Ш. Рассеяние света на турбулентных пульсациях жидкости.— Сообщ. АН ГССР, 1973, т. 69, № 1, с. 125.
11. Кугателадзе С. С. К вопросу об экспериментальных исследованиях прохождения света через турбулентную жидкость.— ПМТФ, 1975, № 3, с. 134.
12. Шекриладзе И. Г. К вопросу взаимодействия света с турбулентной жидкостью.— ПМТФ, 1976, № 1, с. 160.
13. Гончаров Э. Г., Коваленко Л. Г., Красовский Э. И. Об исследовании микроструктуры турбулентного течения оптическим методом.— ПМТФ, 1978, № 6, с. 78.
14. Базанов В. А., Кугателадзе С. С., Рубцов Н. А. Распространение излучения в турбулентном потоке жидкости при внешней изотермичности.— Изв. СО АН СССР, 1979, № 3, сер. техн. наук, вып. 1, с. 96.
15. Струминский В. В., Филиппов В. М. Способ исследования структуры турбулентных переходных и ламинарных течений. А.с. № 149926.— Оpubл. в Б. И., 1962, № 17.
16. Филиппов В. М., Коблашов В. Ф. Способ исследования структуры турбулентных, переходных и ламинарных течений. А.с. № 232557.— Оpubл. в Б. И., 1969, № 1.
17. Филиппов В. М., Струминский В. В. Экспериментальное исследование возникновения и развития турбулентности в трубах.— В кн.: Турбулентные течения. М.: Наука, 1970, с. 240. *Filippov V. M., Struminskiy V. V. Experimental investigation of the origin and development of turbulence in tubes.— Fluid Mech. Soviet Res., 1972, v. 1, № 6, p. 160.*
18. Щербина Ю. А., Безуглов В. А. Оптический метод измерения характеристик турбулентных пульсаций концентраций пассивной примеси.— Тр. ЦАГИ, 1973, вып. 1477, 22 с.
19. Щербина Ю. А. Многочастичные доплеровские измерители скорости и концентрации. Долгопрудный: Изд-во МФТИ, 1978. 108 с.
20. Филиппов В. М. Экспериментальное исследование возникновения и развития турбулентности в трубах и каналах.— Тр. ЦАГИ, 1980, вып. 2042. 80 с.

Москва

Поступила в редакцию
21.IV.1980Технический редактор *Е. В. Синицына*

Сдано в набор 17.11.81	Подписано к печати 13.01.82	T-01315	Формат бумаги 70×108 ^{1/16}
Высокая печать	Усл. печ. л. 16,8	Усл. кр.-отт. 29,3 тыс.	Уч.-изд. л. 18,8
	Тираж 1724 экз.	Зак. 1039	Бум. л. 6,0

Издательство «Наука». 103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21
2-я типография издательства «Наука». 121099, Москва, Шубинский пер., 10