В случае широко применяемого для радиоспектроскопов электромагнита ФЛ-1 изменение амплитуды и фазы модулирующего магнитного поля при изменении постоянного магнитного поля показано на рис. 3. Видно, что при изменении магнитного поля в зазоре электромагнита от 5 до 20 кЭ амплитуда модулирующего поля уменьшается на 50%, а фаза изменяется на 15°. Очевидно, что такие изменения существенно исказят форму линии. Для устранения указанного источника искажения линии в данной работе использовалась система стабилизации: амплитуды и фазы модулирующего поля, подобная описываемой в [5]. Система состоит из фазочувствительной цепи обратной связи по магнитному потоку, избирательного усилителя и усилителя мощности. Частота модуляции ј = 32 Гц. При изменении постоянного магнитного поля от 5 до 20 кЭ эта система стабилизирует амплитуду с точностью до 2%, а изменение фазы при этом не превышает 2°. Спектрометр, в котором применялась данная система стабилизации, аналогичен спектрометру, описываемому в работе [6].

Те искажения формы линии поглощения, к которым пряводят нестабильность амплитуды и фаза модулирующего поля, иллюстрируются рис. 4. Здесь представлена производная линии поглощения без стабилизации (кривая 1) и со стабилизацией (кривая 2) модулирующего поля для образца, состоящего из частиц у-Fe₂O₃. Спектрометр при этом настроен на сигнал поглощения. Частота высокочастотного поля равна 40 ГГц.

Если производная записанного спектра не удовлетворяет условию (1) и при наличии амплитудно-фазовой стабилизации модулирующего поля, то основной причиной искажений следует считать смешивание сигналов дисперсии и поглощения. Этот источник искажений устраняется тщательной настройкой спектрометра на сигнал поглощения.

Таким образом, установлено, что типичные искажения формы линии магнитного резонанса могут быть устранены, если принять во внимание указанные выше причины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Юдин Е. П. «Письма в ЖЭТФ», 1978, 27, 129.
- 2. Ермаков А. Е., Сериков В. В., Иванов О. А., Шур Я. С. «Физика твер-дого тела», 1973, 15, № 2, 617. 3. Masatoshi Takao, Arika Tasaki. «Japan. J. Appl. Phys.», 1973, 12, N 6,
- 940.
- 4. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии. М., 1970. 5. Шпиньков Н. И. «Приборы и техника эксперимента», 1972, № 1, 133.

6. Лазукин В. Н. ЖЭТФ, 1959, **36**, вып. 3, 682.

Кафедра магнетизма

Поступила в редакцию 04.04.78

УДК 551-465

н. К. Шелковников, В. В. Розанов, М. В. Солнцев, А. А. Замятин

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА В КАНАЛЕ ЛАЗЕРНЫМ ДОППЛЕРОВСКИМ ГИДРОМЕТРОМ

В настоящее время одним из наиболее перспективных методов измерения средних и пульсационных составляющих скорости потока является лазерная анемометрия [1-3]. Данный метод использует диффузное рассеяние монохроматического света движущимися неоднородностями исследуемой среды и обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с другими методами.

Лазерный допплеровский измеритель скорости (ЛДИС) дает хорошее пространственное и временное разрешение, не требует тарировки, позволяет проводить измерения в большем диапазоне скоростей, дает возможность исследования пограничных слоев и активных сред. Кроме того, в силу бесконтактности метода при измерениях не вносится дополнительных возмущений в исследуемую среду.

В настоящей работе приведены данные о вертикальном распределении скорости потока в открытом прямоугольном канале со свободной: границей, полученные с помощью ЛДИС.



Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 лазер ЛГ-52-1, 2—оптическая ячейка, 3— нейтральный светофильтр, 4 и 7— линзы, 5— исследуемый поток, 6— диафрагма, 8— фотоприемник, 9— анализатор спектра

При создании экспериментальной установки была выбрана дифференциальная схема ЛДИС как наиболее полно удовлетворяющая поставленной задаче. В дифференциальных схемах имеет место визуализация рабочего объема, частота регистрируемого допплеровского сигнала не зависит от выбора направления наблюдения, проще процесс юстировки, так как не требуется специального согласования фронтовсветовых волн.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался He—Ne-лазер непрерывного действия $Л\Gamma$ -52-1 мощностью 15 мВт, с длиной волны $\lambda = 0.63$ мкм.

Лазерный луч раздваивался оптической ячейкой, состоящей изполупрозрачного зеркала и поворотной призмы. С помощью специально подобранного нейтрального светофильтра лучи выравнивались поинтенсивности и затем фокусировались в исследуемую точку потока. После прохождения через поток жидкости опорные лучи отсекалисьдиафрагмой. Излучение, рассеянное микронеоднородностями жидкости, проходящими через точку пересечения лучей, собиралось линзой на фотокатоде ФЭУ. Фототок на выходе ФЭУ имел составляющую на допплеровской частоте f_{d} , которая регистрировалась с помощью анализатора спектра.

Значение регистрируемой допплеровской частоты линейно связано» с величиной скорости потока в точке пересечения пучков [4]

 $f_{\pi} = \frac{2u\sin\frac{\theta_0}{2}}{\lambda_0} = k \overline{u},$

тде \bar{u} — проекция скорости потока на перпендикуляр к направлению распространения лучей, лежащий в плоскости, образованной пересекающимися лучами, θ_0 — угол между лучами в вакууме, λ_0 — длина волны излучения лазера в вакууме.

Как видно из приведенного выражения, величина коэффициента k не зависит от свойств исследуемой среды, а определяется геометрией установки и для конкретной схемы ЛДИС величина постоянная. В нашем случае k = 3,6 кГц с/см.

Одной из важных характеристик ЛДИС является размер рабочего объема, определяемого как

$$b_x = \frac{d_f}{2\cos\frac{\theta}{2}}, \quad b_y = \frac{d_f}{2\sin\frac{\theta}{2}}, \quad b_z = \frac{d_f}{\sqrt{2}},$$

где b_x , b_y , b_z — половины главных осей эллипсоида рассеяния (объем рассеяния — это эллипсоид, центр которого находится на оптической оси в фокальной плоскости линзы), d_f — диаметр пучка по уровню распределения интенсивности 1/e, θ — угол между лучами в исследуемой среде. Для нашей установки размеры рабочего объема составляли $40 \times 470 \times 40$ мкм, а чувствительность — 2 мм/с.

С помощью описанного лазерного допплеровского гидрометра были проведены измерения вертикального распределения скорости течения в открытом прямоугольном канале. Канал был изготовлен из органического стекла толщиной 3 мм с размерами 56×60×400 мм. На входе канала была установлена решетка для гашения крупномасштабных возмущений. Для исследования использовалась водопроводная вода без искусственно вводимых неоднородностей. Канал был установлен на скамью с микрометрической подачей, что позволяло перемещать его в вертикальном направлении с шагом 0,25 мм. Измерения проводились в осевой части канала в области относительных глубин 0,007 п \$0,993 как при ламинарном (Re=330), так и при турбулентном (Re=1100) режиме течения.

Исследование вертикального распределения скорости течения проводилось с целью обнаружения уменьшения скорости течения в приповерхностном слое, определения величины градиента скорости в этой области и положения экстремума V(z). При этом следует отметить, что хотя уменьшение скорости течения в приповерхностном слое было отмечено Никурадзе (подробнее см. в [5]) еще в 1926 г., тем не менее до последнего времени по этому вопросу имели место противоречивые мнения.

Так, в [6, 7] принималось, что на свободной границе du/dz=0 и на основании этого делался вывод о том, что верхняя граница потока в открытом прямоугольном канале является своеобразным аналогом оси напорного потока в трубе. В [8] высказывалось мнение, что вблизи свободной границы du/dz=0 и что в этой области потока имеет место отрицательная вязкость, так как турбулентное трение $\tau = -\rho u'w'$ в области относительных глубин $\eta \leq 0.91$ имеет отрицательное значение. Принимая, что при $\eta \geq 0.9$ du/dz > 0 автор приходит к выводу, что коэффициент турбулентной вязкости $k = \frac{\tau}{du/dz}$ имеет отрицательное значение. Как известно [9], отрицательная вязкость реализуется в крайне специфических условиях, тем не менее она может иметь место в потоках, где положение экстремума скорости течения и нулевое значение турбулентного трения не совпадают [10].

В связи с вышеизложенным представляется важным определить величину градиента скорости и положение экстремума в приповерхностной части потока. Проведенные ранее измерения [11] не могут дать определенный ответ на поставленные вопросы, так как измерения проводились с помощью стандартной микровертушки Х-6 размером 15 мм, что не позволило провести измерения в самом приповерхностном слое. Кроме того, полученные значения уменьшения скорости лежали в пределах ощибки измерения. В связи с этим и были проведены измерения вертикальных профилей скорости течения с помощью ЛДИС для чисел Re≤1100.





На рис. 2 приведены образцы вертикального распределения скорости течения в открытом прямоугольном канале. Как видно из этих профилей, характерным для них является наличие в приповерхностном слое участка с отрицательным значением прадиента скорости. Величина этого градиента составляла $du/dz = -5 c^{-1}$ при Re=300 и $du/dz = -3.3 c^{-1}$ при Re=1100. Положение экстремума скорости наблюдалось на относительной глубине $\eta = 0.83$ при Re=300 и $\eta = 0.667$ при Re=1100.

Сопоставление данных, полученных с помощью ЛДИС, с результатами, приведенными в [11], показывает, что наличие участка с отринательным значением градиента скорости течения вблизи верхней границы открытого потока имеет место в широком диапазоне чисел Рейнольдса (по крайней мере от Re=104 до Re=300). Поэтому, приняв во внимание данные Никитина [8] об отрицательном значении турбулентного трения в открытом потоке при п≥0,9, можно заключить, что в этой области потока коэффициент турбулентной вязкости является величиной положительной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Аристов Е. М. и др. Измерение скоростей потоков с помощью квантовых генераторов. Л., 1970. оптических
- 2. Василенко Ю. Г. и др. Лазерные допплеровские измерители скорости. Новосибирск, 1975.
- 3. Ринкевичус Б. С. «Успехи физических наук», 1973, 111, 305. 4. Durst E., Zare M. «Appl. Opt.», 1974, 13, 2562.
- 5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., 1974.

8 ВМУ, № 4, физика

114

6. Монин А. С., Яглом А. Я. Статистическая гидродинамика. М., 1969. 7. Минский Е. М. Труды ЦАГИ, 1947, № 625. 8. Никитин И. К. Гидротехника и гидромеханика. Киев, 1964.

9. Старр В. Физика явлений с отрицательной вязкостью. М., 1971.

10. Бредшоу П. Ввеление в турбулентность и ее измерение. М., 1974. 11. Букина Л. А., Шелковников Н. К. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон.», 1975, 16, № 6.

Кафедра физики моря и вод суши

Поступила в редакцию 14.02.78

УДК 533.6.011.72

В. Т. МАРКИН, Н. Н. СЫСОЕВ, Ф. В. ШУГАЕВ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И СТРУКТУРА ПОТОКА ЗА НЕСТАЦИОНАРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ВЗРЫВЕ СФЕРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В ВОЗДУХЕ

При взрыве сферического конденсированного заряда в газе возникает сложное неустановившееся течение, в котором наряду с основной ударной волной (УВ) существуют другие поверхности разрыва. Сходные явления происходят при образовании лазерной искры в газе, взрыве проволочки и т. д. Отсутствие аналитических решений задачи приводит к необходимости использовать численные методы [1-4]. Экспериментально этот вопрос исследован недостаточно полно. В большинстве экспериментальных работ, относящихся к данной области, внимание уделяется распространению освовной УВ и распределению давления за ней [5-6]. В [4] измерено распределение плотности за фронтом УВ. В настоящей работе измерено распределение скорости потока газа

за нестационарной УВ, образовавшейся при взрыве сферического заряда. Экспериментально показано существование вторичных ударных. волн.

Опыты проводились во взрывной камере. Использовались конденсированные заряды сферической формы радиусом (R₀) до 20 мм с плотностью 03=1,63 г/см³ и скоростью детонации D=8200 м/с. Были сняты отдельные кадры картины течения и временные развертки. Кадры были получены с помощью интерферометра Маха — Цендера. Источником света служил импульсный рубиновый ОКГ, работавший в режиме модулированной добротности. Для уменьшения влияния самосвечения продуктов детонации (ПД) на регистрацию процесса применялся оптический фильтр с полосой пропускания в красной области. Модуляция добротности ОКГ осуществлялась при помощи электрооптического» затвора на основе кристалла КDP с напряжением полного раскрытия 12 кВ. Съемка проводилась прибором СФР-2М. Применяемая методика позволяла получать за один эксперимент серию кадров с регулируемым интервалом 5-15 мкс при экспозиции примерно 50 нс.

При получении временных разверток визуализация осуществлялась с помощью сетки, помещенной между источником света и исследуемой неоднородностью. Положение ударных разрывов определялось по излому линий сетки вблизи фронта волны. Регистрация велась в проходящем свете. Обработка разверток проводилась на микроскопе УИМ-2.