[531.112+621.378.325](049.3)

ЛАЗЕРНАЯ ДОППЛЕРОВСКАЯ АНЕМОМЕТРИЯ

Durst F., Melling A., Whitelaw J. H. Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry. — London; New York; San Francisco: Academic Press, 1976.—405 p.

Книга написана английскими и западногерманскими специалистами, отдавшими последние шесть лет своей научной деятельности развитию теоретической и экспериментальной сторон допплеровской анемометрии и систематизации полученного в этой области разнообразного материала.

В самой общей форме можно сказать, что задача допплеровской анемометрии заключается в том, чтобы измерить скорость движения разных сред по допплеровскому сдвигу частоты света, рассеянного на включениях, содержащихся в этих средах, по отношению к частоте первоначального света.

По мысли авторов, книга предназначена для ознакомления читателей с теоретическими основами вопросов, так же как с применением описанных методов для нужд практики. Кроме того, рецензируемая книга является наиболее полным обзором работ, выполненных по анемометрии.

Охвачены практически все вопросы, связанные с измерением скоростей жидкости и газа: основы теории лазерной допплеровской анемометрии, основные оптиче-

ские схемы и их элементы, устройства для обработки сигнала, необходимость использования сильно рассеивающих свет частиц и обсуждение влияния их размеров и концентрации на результаты измерений.

В рецензируемой книге только гл. 1 написана в обычной манере, а все остальные двенадцать глав преподносят читателю излагаемый материал в непривычной форме.

Каждая страница посвящена изложению одного вопроса, из ее заголовка ясно, какой вопрос подлежит обсуждению. Сразу под заголовком часть страницы обведена рамкой из сплошных линий размером 6 × 10 см. В этой рамке даются либо поясняющие изложение чертежи или фотографии, либо основные результаты страницы в виде формул, графиков или утверждений. На остальной части страницы помещается текст, в котором дается пояснение схем и чертежей, разъяснение результатов. Приводится также литература, где рассматриваемый вопрос обсуждается более подробно.

Глава 1, написанная в обычной манере, служит введением ко всей книге; в ней дается краткий исторический очерк возникновения и развития допплеровской анемометрии, снабженный ссылками на работы, положившие начало новому методу измерения скоростей. Описываются основные схемы измерения скоростей потоков, основные методы обработки оптического сигнала.

Указывается, что существенным преимуществом метода является возможность проводить измерения локальной скорости жидкости или газа, не возмущая при этом потока, и эти измерения могут производиться в широком интервале значений скоростей.

Упоминается и о некоторых ограничениях использования метода, связанных, например, с непрозрачностью среды и другими обстоятельствами, более подробно рассмотренными в дальнейшем изложении.

Книга предназначена не обязательно для специалистов-оптиков, но и для представителей самых различных специальностей, в том числе механиков и медиков, заинтересованных в измерении скоростей потоков. Поэтому в гл. 2 книги авторы излагают основные оптические законы, необходимые для понимания метода и разбираемых оптических схем, и выводят формулы, полезные для практических целей. Подробно рассмотрен эффект Допплера в оптике и получены необходимые количественные соотношения.

Далее подробно рассматривается рассеяние света отдельными частицами и совокупностью частиц, влияние движения частиц на поведение интерференционной картины при интерференции света, рассеянного различными частицами.

Объясняются принципы работы трех основных схем лазерной допплеровской анемометрии.

Первая из них, двухлучевая, основана на том, что частица рассеивает одновременно свет двух пересекающихся пучков первоначального света, а при интерференции рассеянного света первого и второго пучков в интерференционной картине появляется низкочастотная составляющая с частотой, равной разности допплеровских смещений для двух разных углов между скоростью частицы и волновым вектором возбуждающего света. Возможно и другое описание этой схемы: два пересекающихся пучка образуют интерференционные полосы, которые пересекает частица, и таким образом рассеянный частицей свет модулирован с частотой, пропорциональной скорости частицы. Эти описания эквивалентны.

Вторая схема — схема гетеродинирования, или схема с опорным пучком. В такой схеме фиксируются частоты биений при интерференции света опорного пучка, ответвленного от того же пучка, который возбуждает рассеяние света, и света, рассеянного движущимися частицами. По частоте биений измеряется скорость частицы.

Применяется также схема «двух рассеянных пучков», в которой на квадратичном детекторе интерферирует свет, рассеянный в двух различных направлениях движущимися вместе с жидкостью частицами.

В этой же гл. 3 рассматривается зависимость отношения сигнала к шуму от направления наблюдения.

В гл. 4 и 5 рассматриваются вопросы, связанные с практическим применением допплеровской анемометрии: выбор геометрии эксперимента при измерении одной или нескольких составляющих скорости, влияние размеров и концентрации рассеивающих частиц на чувствительность метода, требования, предъявляемые к оптическим элементам, методы сдвига частоты света и т. д.

В последующих четырех главах авторы разбирают методы анализа допплеровского сигнала, получаемого с фотодетектора. Сначала описывается форма возможного электрического сигнала, а затем очень подробно — особенности его обработки с помощью спектроанализаторов, гетеродинных систем слежения за мгновенной частотой и систем счета максимумов или нулевых пересечений электрического сигнала. Рассматриваются как основные принципы работы таких приборов, так и их блок-схемы, конструкция отдельных узлов, условия эксперимента, при которых выгодно или, напротив, затруднено использование определенного прибора, причины возникновения ошибок и методы их устранения или учета, влияние шумов и т. п. Разобраны особенности использования каждого из методов анализа сигнала в предельных случаях

очень сильной и очень слабой турбулентности, малой и большой скорости. В конце седьмой, восьмой и девятой глав, каждая из которых посвящена одному методу частотного анализа, излагаются преимущества и недостатки описываемого метода.

Эти главы позволяют получить довольно полное представление о том, как следует выбирать способ анализа сигнала, и интересны не только анемометристам. Предметом этой части книги является, в сущности, практика спектрального анализа слабых сигналов и сигналов, имеющих большую скважность. Этот вопрос важен во многих областях спектроскопии. Следует, однако, отметить, что корреляционный метод анализа освещен не полно, а между тем он может оказаться полезным в тех случаях, когда потоки стационарны. Для нестационарного потока любой метод, основанный на накоплении информации о сигнале во времени, неприменим вовсе или существенно осложняет обработку результатов.

В последующем рассматриваются вопросы, связанные с введением в исследуемый поток частиц, рассеивающих свет. Введение в поток таких рассеивателей сильно облегчает эксперимент, так как рассеяние на частице диаметром около одного микрона примерно в 10^{20} раз сильнее, чем на одиночной флуктуации плотности в чистой жидкости, а концентрацию частиц легко можно менять. Изложены законы движения частиц в потоке с учетом инерции и указаны соображения, позволяющие рассчитать необходимую концентрацию частиц. Рассмотрены также причины, изменяющие концентрацию частиц в потоке: кулоновские силы, коагуляция (для эмульсии), акустические и электрические поля.

Описаны методы получения частиц и измерения их размеров. В частности, указаны возможности получения информации о размерах и концентрации частиц из видности анемометрического сигнала и частоты появления частиц в рассеивающем объеме. Несомненно, вопросы, касающиеся оптимизации параметров рассеивающих частиц, вводимых в исследуемый поток, и выбора их концентрации, важны, и хорошо, что авторы уделили им много внимания.

Глава 12 суммирует сведения, изложенные в гл. 2—11. В ней описываются анемометрические системы, применяемые для различных специальных случаев, таких, как исследование потоков с большой и малой концентрацией рассеивающих частиц, систем с сильной турбулентностью, большой скоростью изучаемого потока. Каждый случай разобран подробно: описывается выбор оптической схемы, рассматривается допустимый диапазон концентраций и размеров рассеивающих частиц, возможные методы их приготовления и введения в раствор, диапазон измеряемых скоростей. Описываются также особенности применения оптической анемометрии в пламенах, где ситуация сильно осложнена наличием больших градиентов скорости, плотности (и концентрации частиц), температуры. Изложенные результаты опираются на опыт, приобретенный в лаборатории, и поэтому они особенно ценны.

В последней, гл. 13 приведены некоторые примеры измерений, выполненных методом лазерной допплеровской анемометрии в последнее время. В ней демонстрируется, в частности, применение лазерной допплеровской анемометрии к изучению ламинарных и турбулентных потоков, к исследованию гидродинамики насосов, турбулентных потоков жидкости и газа. С другой стороны, она служит завершением исторического обзора, начатого в гл. 1.

Нужно с удовлетворением отметить широту круга вопросов, рассмотренных в этой книге. В ней охвачены практически все вопросы допплеровской анемометрии и детально указано, что необходимо учесть при построении оптической и электронной системы для конкретных условий эксперимента. Книга является не только учебником, но и практическим руководством, пользуясь которым можно рассчитать и построить допплеровскую установку, близкую к оптимальной. Тем же, кто только знакомится с допплеровской анемометрией, книга дает достаточно полное представление о предмете.

Она может быть интересна не только специалистам по анемометрии. Главы, описывающие методы спектрального анализа и приборы, полезны всем, кто занимается спектроскопией высокого разрешения и ее применениями.

Подробно рассмотрены причины, вызывающие ошибки и понижение точности измерений.

Жаль, что в рецензируемой книге мало внимания уделено корреляционным методам обработки допплеровского сигнала, хотя сами авторы замечают (гл. 6), что в некоторых случаях это наиболее выгодный, а иногда и единственно возможный способ обработки оптического сигнала.

Книга, как уже указано, подробно излагает предмет и написана так, что в одно и то же время является учебным пособием, монографией и справочником. Она будет полезна специалистам, работающим в различных областях физики, механики, техники и даже медицины.

Л. Л. Чайков