

a и гидростатическое давление p_0 на глубине взрыва по формуле

$$Y = \frac{4}{3} \pi a^3 p_0$$

Максимальный радиус пузыря определяется по фоторегистрограммам, одна из которых приведена на фиг. 7 (развертка во времени процесса расширения и сжатия газового пузыря, возникающего при электроразряде в воде). Снимок сделан через щель методом развертки на вращающийся диск фоторегистра.



Фиг. 7

Максимальный радиус пузыря в пределах ошибок эксперимента не зависит от скорости выделения энергии. Результат понятен, так как общее количество энергии не изменяется, а процесс выделения энергии всегда остается достаточно быстрым по сравнению с процессом расширения газовой полости. Энергия радиального движения слоев жидкости, примыкающих к газовому пузырю, составляет около 22% энергии, первоначально запасенной в конденсаторе, и не зависит от начальной скорости выделения энергии.

В заключение автор благодарит Р. И. Солоухина за внимание к работе.

Поступила 25 VIII 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Рой Н. А. и Фролов Д. П. Об электроакустическом к. п. д. искрового разряда в воде. Докл. АН СССР, 1958, т. 118, № 4.
2. Bailitis E. d. Der Schallimpuls eines Flüssigkeitsfunkens, Z. angew. Phys., 1957, 9, № 9.
3. Коул Р. Подводные взрывы. ИИЛ, 1950.
4. Баженова Т. В. и Солоухин Р. И. Поле давлений, возникающее в воде при электрическом разряде. Физическая газодинамика (Энергетический ин-т им Г. М. Кржижановского), М., Изд.-во АН СССР, 1959.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ (обзор)

А. М. Трохан
(Новосибирск)

Среди большого разнообразия средств измерения скорости газовых потоков все большее внимание привлекает группа, получившая название кинематических способов или способов трассирования.

При измерении кинематическими способами в общей среде газового потока каким-либо образом метится определенный, обычно малый, объем газа и движение этого объема-метки прослеживается при помощи соответствующих средств. Скорость газа при измерении кинематическими способами определяется как

$$V = \Delta S / \Delta t \quad (1)$$

Здесь ΔS — элемент пути, проходимого меткой, Δt — время, V — скорость газа, средняя при прохождении пути ΔS .

Соответственно измеряется либо время прохождения меткой определенного заданного пути, либо путь, проходимый за заданный промежуток времени. Первый способ обычно используется при электрических методах регистрации, второй — при фотографических.

Как видно из (1), при измерении кинематическими способами скорость газа находится в соответствии с определением понятия скорости, что позволяет в максимальной степени исключить влияние на получаемый результат любых посторонних факторов. Другим основным достоинством, делающим кинематические способы иногда единственно возможным средством измерения, является отсутствие необходимости введения в исследуемый поток каких-либо посторонних механических зондов. Это особенно важно при измерении высокоскоростных и высокотемпературных потоков.

Кинематические способы позволяют найти скорость метки, среднюю на данном отрезке пути ΔS . Используя достаточно малые ΔS и Δt , приходим к возможности нахождения скорости в «точке» потока. Размеры этой «точки» зависят от методики измерения, а также от степени совершенства используемого оборудования.

Диапазон параметров газовых потоков, охватываемый различными способами трассирования, очень широк. Он простирается от давлений, соответствующих глубо-

кому вакууму, до десятков и сотен атмосфер и от скоростей в несколько миллиметров до десятков и сотен километров в секунду.

Выбирая соответствующий способ трассирования для решения каждой конкретной экспериментальной задачи, получаем весьма гибкий и точный инструмент газодинамических исследований.

Для трассирования могут использоваться как частицы самого движущегося газа или газа, специально вводимого в поток (трассирование микрочастицами), так и частицы, размеры которых существенно больше размеров молекул (трассирование макрочастицами).

При трассировании микрочастицами число «меченых» частиц велико. В процессе измерения движение индивидуальных частиц каким-то образом усредняется; усреднение это происходит вне потока — в регистрирующем устройстве. При трассировании макрочастицами усреднение происходит внутри потока, так как движение каждой трассирующей частицы определяется воздействием на нее множества частиц, составляющих поток. Величина пространственного и временного усреднения при этом зависит от размеров и массы трассирующей частицы.

1.0. Трассирование микрочастицами. При трассировании микрочастицами для образования метки может использоваться либо изменение параметров состояния исследуемого газа в заданной области потока (температура, плотность, давление), либо изменение его физических свойств (удельная ионизация, светимость и т. д.).

С течением времени в результате процессов переноса разница параметров метки и окружающей среды уменьшается: метка стирается. Для проведения измерений нужно, чтобы, с одной стороны, метка существовала достаточно долго, а с другой, чтобы изменение параметров газа в метке по сравнению с окружающей средой не было слишком резким во избежание появления возмущений потока.

Область применения каждого конкретного способа и аппаратура, требуемая для измерений, зависят в первую очередь от того, какой параметр газа используется для обнаружения метки; именно этот параметр и представляется целесообразным принять за основу для классификации способов трассирования микрочастицами.

1.1. Плотность — температура. Простейшим средством создания в потоке меток, обладающих аномальными плотностью и температурой, является локальный подвод энергии к газу, например, при помощи электрического разряда или тонкой нагретой проволочки, помещаемой в поток. Так как давление газа в метке то же, что и в окружающей среде, то метка отличается от окружающей среды повышенной температурой и пониженной плотностью. Соответственно существуют и два пути обнаружения: по температуре (путем ввода в поток малоинерционного термометра) и по плотности (оптические методы).

Первый из названных способов будет одним из немногих способов трассирования, использующих механические зонды. При импульсном варианте температурного трассирования в поток вводятся электрический разрядник и расположенные ниже по течению одно или два термосопротивления [1]. Пузырек нагретого воздуха, образуемый искрой, приходя в соприкосновение с термосопротивлениями, представляющими собой тонкие проволочки, натянутые поперек потока и включенные в схему моста, вызывает изменение их сопротивления. Измерив время между импульсами разбалансировки моста, вызванными прохождением метки через термосопротивления, и зная расстояние между ними, можно найти скорость потока.

При фазовом варианте прибора в потоке помещается тонкая нить, нагреваемая суммой постоянного и переменного токов. При этом за нитью образуется тепловой след, представляющий собой волны определенной частоты. Измерив расстояние L между соседними точками следа, находящимися в данный момент времени в одинаковой фазе колебаний, например расстояние между соседними гребнями волн, можно найти скорость потока по формуле

$$V = fL \quad (2)$$

где f — частота колебаний.

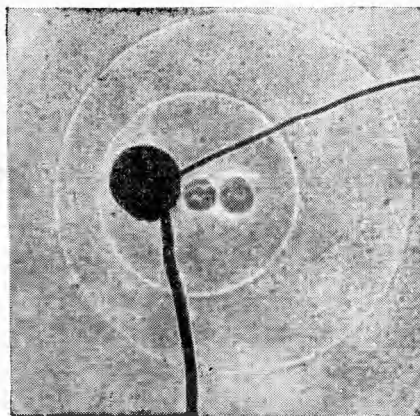
Практически эта операция производится путем ввода в тепловой след одного подвижного зонда с термосопротивлением [2]. Перемещая зонд вдоль направления потока, находят два таких его ближайших положения, при которых сдвиг фазы колебаний, воспринимаемых зондом, относительно тока нагревателя составляет 180 или 360°. Данный способ измерения обеспечивает точность до 1—2% и удобен для определения местных скоростей от нескольких десятков сантиметров до нескольких десятков метров в секунду в установившихся потоках.

Так как показатель преломления газа является функцией его плотности, то тепловая метка с точки зрения оптики представляет собой шпирю — область с аномальным показателем преломления, — и обычные теневые или шпирен-системы позволяют ее обнаружить. Производя стробоскопическое фотографирование или наблюдение, получаем возможность проследить движение нагретого облачка и измерить его скорость. Если для создания метки используется длинная прямолинейная искра, то форма метки в любой момент времени отображает эпюру средних скоростей газа в данном сечении. Это позволяет получить интересные результаты, например, при исследовании пограничного слоя. Оптические методы обнаружения тепловых меток позволяют производить измерения в потоках как малых, так и весьма больших скоростей.

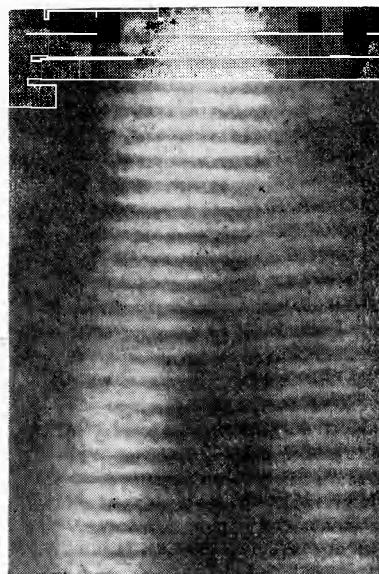
1.2. Давление (акустические методы). Область газа с повышенным относительно

окружающей среды давлением может длительно существовать только в виде движущейся волны. Поэтому особенность способов, использующих трассирование давлением, состоит в том, что метка одновременно движется вместе с потоком и относительно потока (со скоростью, обычно близкой к скорости звука). Измерив скорость абсолютного движения метки и определив или исключив каким-либо образом скорость ее относительного движения, можем найти переносную скорость — скорость потока.

На фиг. 1 представлена теневая фотография цилиндрической звуковой волны, вызванной в потоке электрической искрой, перпендикулярной к потоку [3]. Снимок сделан дважды с интервалом 25 мксек. Черное пятно посередине и две черные линии — тени от мест заделки разрядника в стенке трубы и питающих его проводов. Серые пятна неправильной формы в центрах окружностей — следы шнура воздуха, нагретого искрой. Если



Фиг. 1



Фиг. 2

скорость потока постоянна, то следы волны будут окружностями. Найти их центры в ряде случаев проще, чем центры следов нагретого искрой объема. Разделив расстояние между центрами на время между экспозициями, найдем скорость потока. Исследование формы акустической волны, распространяющейся в потоке газа, в ряде случаев может дать ценную информацию о структуре потока [4].

Исключительно четкую визуализацию полей скоростей дает также использование пучков ультразвука. На фиг. 2 приведена фотография сфокусированных при помощи параболического рефлектора ультразвуковых волн, излучаемых свистком Гартмана, которые вводятся в поток газа через гладкую, акустически прозрачную диафрагму [5]. Отражаясь от верхней стенки аэродинамической трубы, волны снова пересекают поток. Измеряя по фотоснимку расстояние между гребнями соседних волн λ и их относительное смещение в направлении потока μ , можно найти число M для данной области потока

$$M = \mu / \lambda \quad (3)$$

или абсолютную скорость

$$V = f\mu \quad (4)$$

Здесь f — частота ультразвуковых колебаний.

Для получения ультразвуковых волн могут использоваться также кристаллы кварца [6] или какие-либо источники автоколебаний, например вырезы или выступы на обдуваемой поверхности модели.

Необходимо отметить, что точность измерений данным способом невелика ввиду дифракционного размыва границ пучка. Поэтому он пригоден лишь для качественного исследования полей скоростей.

Замена оптической регистрации ультразвуковых пучков на электрическую позволяет получить весьма точные устройства для измерения средних скоростей, пригодные для использования в аэродинамических трубах, на летательных аппаратах, в метеорологии, при исследовании турбулентности и т. д. При этом измеряется либо угол наклона пучка, вызванный движением потока (аналогично фиг. 2), что позволяет непосредственно определить число M потока [7], либо измеряется различие в скорости распространения ультразвука в направлении по потоку и против потока. В этом последнем случае используются либо два пьезокристалла, расположенные на некотором расстоянии вдоль потока и работающие поочередно, то в роли приемника колебаний, то в роли их передатчика [8-10], либо две пары, между одной из которых ультразвук рас-

пространяется по потоку, а между другой — против него [11]. Элементы теории ультразвуковых потокомеров можно найти в [12].

1.3. Ионизация. Для создания в потоке газа областей, обладающих повышенной ионизацией, могут использоваться: электрический разряд (искровой, коронный или высокочастотный), излучение (рентгеновское или ультрафиолетовое), быстрые частицы (искусственно ускоренные или выбрасываемые при радиоактивном распаде). Выбор того или иного средства ионизации всецело определяется конкретными целями и условиями измерений.

Искровой разряд является очень простым средством создания ионных меток и используется наиболее широко [13–15]. Он позволяет получить метки, газ в которых в первоначальный момент ионизован почти полностью. Основным недостатком искрового разряда является сильное ударное возмущение потока в результате выделения большого количества энергии. Значительно меньшее возмущение потока вызывает коронный разряд. Коронный разряд возникает в сравнительно плотном газе в том случае, если поле в разрядном промежутке резко неоднородно. Для создания ионных меток один из электродов (коронирующий электрод) изготавливается в виде острия, а другим служит корпус аэродинамической трубы или модели [16]. Ионная метка при этом имеет почти сферическую форму, время ее образования около 0,1 мксек. Разряд происходит даже тогда, когда коронирующий электрод располагается в изолирующей втулке заподлицо с обдуваемой поверхностью.

Удобным средством создания ионных меток являются пучки мягких рентгеновых лучей [17]. Достоинством рентгеновых лучей так же, как и пучков быстрых частиц, является практически полное отсутствие возмущения потока.

Для ионизации пригодны как α -, так и β -частицы, излучаемые радиоактивными препаратами.

Из α -излучающих препаратов наиболее часто используется полоний, имеющий длину пробега в воздухе при нормальных условиях, равную 4 см. Примеры использования α -частиц можно найти в работах [18–19].

Максимальные энергии β -частиц, излучаемых различными препаратами, лежат в широких пределах от 15 кэв до 15 Мэв. Наиболее удобными для создания ионных меток являются рутений, стронций, таллий и сера.

Использование β -частиц удобно тогда, когда требуется сравнительно глубокое проникновение частиц в поток газа. Приближенный способ расчета ионизации газа, производимый β -излучателями, можно найти в работе [20]. Достоинством устройств, использующих излучение радиоактивных препаратов, является их простота и отсутствие необходимости непосредственного контакта с потоком; недостатком — малая мощность излучения.

Применение радиоактивных изотопов дает, по-видимому, хорошие результаты при создании устройств автоматического регулирования и контроля [21, 22].

Преимуществом искусственно ускоренных частиц по сравнению с частицами, испускаемыми радиоактивными препаратами, является возможность получения достаточно мощных произвольно модулированных пучков. Наиболее удобным оказывается использование электронных пучков, так как достаточное ускорение более тяжелых частиц требует слишком высоких напряжений. Наиболее ценные результаты дает использование электронных пучков при измерении потоков разреженных газов [23].

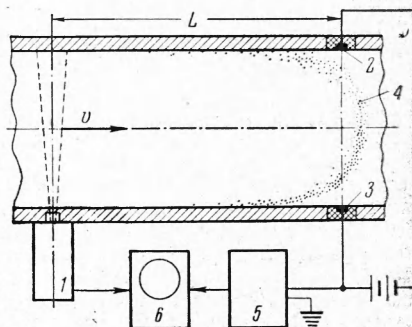
Для обнаружения ионных меток обычно используется либо наведение тока в проводнике при прохождении мимо него ионной метки, либо собирание ионов при помощи сеток, либо электрический разряд, вызываемый прохождением ионного облачка через второй разрядный промежуток, расположенный ниже по потоку.

Если в какой-либо точке M пространства относительно неподвижного проводника движется точечный заряд q , то величина тока i , наводимого в проводнике этим зарядом, определяется по теореме Шокли [24] следующим скалярным произведением:

$$i = q(\mathbf{E}_M, \mathbf{V}) \quad (5)$$

Здесь \mathbf{V} — вектор скорости заряда в данный момент времени; \mathbf{E}_M — напряженность электрического поля, вызываемого в точке M потенциалом, равным единице, на данном проводнике в предположении, что прочие проводники заземлены, а заряд q удален.

Если ионное облако в целом несет некоторый заряд, что имеет место при электрическом разряде, когда значительное количество электронов удаляется из потока, то любой проводник, будучи подключен к регистрирующему устройству, например осциллографу, может служить детектором. Если же облачко в целом нейтрально, то, так как положительные и отрицательные заряды наводят противоположные токи, суммарный



Фиг. 3

ток в проводнике равен нулю. Для регистрации меток в этом случае обычно создают дополнительное электрическое поле, перпендикулярное к потоку. При этом, так как положительные и отрицательные ионы под действием поля движутся в противоположные стороны, то ток, наводимый ими в проводнике, имеет одинаковый знак.

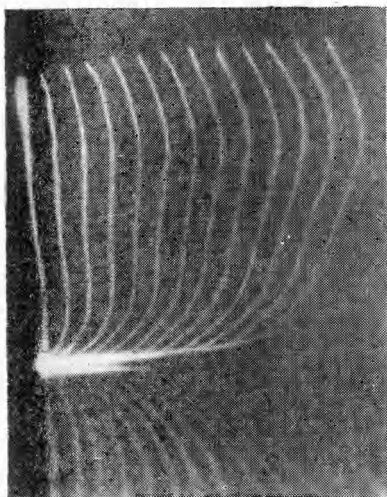
Схема устройства анемометра, использующего трассирование ионами, приведена на фиг. 3. Поток периодически облучается ионизирующим излучением или частицами, испускаемыми источником 1. Проходя около пластин 2, 3, между которыми приложено некоторое напряжение, ионное облачко 4 вызывает появление тока

в регистрирующей цепи. Будучи усилен в усилителе 5, сигнал подается на осциллограф 6, развертка которого запускается источником 1.

Ток в детекторе наводят одновременно все заряженные частицы, находящиеся в потоке, поэтому определить можно лишь некоторую среднюю по сечению скорость потока. При этом для повышения точности измерений приходится использовать весьма большие базы. В силу этого такие устройства применяются, главным образом, для измерения расходов газа и для определения воздушной скорости летательных аппаратов.

Сбор ионов коллекторами и пробой разрядных промежутков меткой позволяют несколько повысить пространственное разрешение при трассировании ионами, однако они требуют введения в исследуемый поток посторонних тел и не свободны от систематических ошибок.

Существенное улучшение пространственного разрешения позволяет получить обнаружение ионной метки при помощи повторного электрического разряда. При этом методе измерения ионное облачко образуется прямолинейной длиной искрой. При повторном приложении напряжения к разрядному промежутку пробой происходит не по прямой линии, а по ионному облачку, принимающему форму интегральной эюры



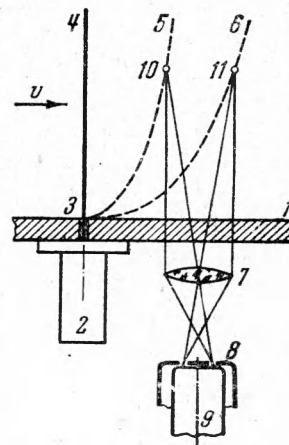
Фиг. 4

скоростей газа в данном сечении. Если время между повторными разрядами известно, то поле скоростей может быть определено по фотоснимку. В результате применения соответствующей электронной аппаратуры для образования искр удалось получить весьма интересные результаты по визуализации поля скоростей потока в аэродинамической трубе [25]. На фиг. 4 приведен пример визуализации поля скоростей в пограничном слое у плоской поверхности модели.

Данный метод может быть применен при давлениях, близких к атмосферному. Уменьшение давления приводит к расширению канала искры, а увеличение свыше 2—3 ат приводит к появлению недопустимых ударных возмущений потока. Он удобен тем, что сравнительно просто позволяет получить «мгновенную» картину полей скоростей в труднодоступных местах газодинамических устройств, например в газовых турбинах. Недостатками его является наличие некоторых систематических ошибок, вызываемых тепловым возмущением потока, нелинейностью первичной искры, влиянием электрических и магнитных полей, диффузией ионов и т. д. Данный метод является промежуточным между трассированием ионами и световым трассированием.

1.4. Излучение. Интенсивный пучок быстрых электронов или рентгеновских лучей, будучи введен в газ, вызывает его свечение. Свечение это так же, как и свечение канала искрового разряда, не прекращается мгновенно. В результате ряда промежуточных процессов, приводящих к рассеиванию поглощенной газом энергии, имеет место так называемое послесвечение, которое может быть обнаружено соответствующими способами.

Использование локального возбуждения свечения в движущейся газовой среде вместе с оптическими методами регистрации позволяет получить максимальное возможное при трассировании пространственное разрешение без ввода в поток посторонних зондов. Пример устройства, позволяющего производить измерение скорости потока способом светового трассирования, показан на схеме фиг. 5. В аэродинамической трубе за стенкой 1 движется исследуемый поток газа. С наружной стороны трубы расположен источник 2, испускающий узкий пучок быстрых электронов или мягких рентгеновских лучей, промодулированный в виде коротких импульсов. Перпендику-



Фиг. 5

лярно к плоскости чертежа расположена оптическая система, состоящая из объектива 7 и диафрагмы 8, имеющей два малых отверстия. За диафрагмой расположен фотоумножитель 9, включенный в регистрирующую цепь. В результате наличия в диафрагме отверстий свет на катод фотоумножителя попадает только из точек потока, расположенных вдоль двух прямых, пересекающих плоскость потока в точках 10 и 11.

Светящийся шнур газа, образовавшись в момент импульсного облучения вдоль прямой 3—4, движется вместе с потоком газа, принимая форму интегральной эюры скоростей. В некоторые моменты времени он пройдет через точки 10 и 11. Зная расстояние между точками 10 и 11 и измерив время между соответствующими импульсами, зарегистрированными фотоумножителем, можно найти среднюю скорость потока вдоль прямой 10—11.

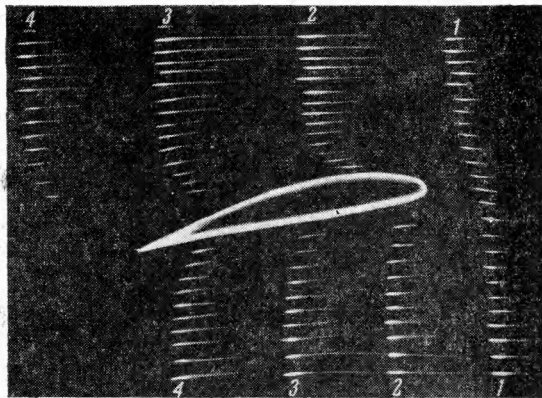
Минимальная база при измерении данным способом может быть весьма малой, достигая в ряде случаев долей миллиметра (фазовый вариант прибора). Основная область применения — измерение быстрых потоков средних и низких давлений. Применяя соответствующие способы слежения за светящейся газовой меткой, например, с использованием электронно-оптического преобразователя, можно исследовать поля скоростей как одно-, так и двух- и трехмерных потоков.

Для измерения скоростей газа, больших нескольких километров в секунду, по-видимому, наиболее целесообразно использовать доплеровский сдвиг спектральных линий, излучаемых частицами потока. Данный способ измерения можно рассматривать как предельный случай трассирования при величине базы, стремящейся к нулю.

Для создания свечения могут быть использованы пары щелочных металлов, термически возбуждаемые потоком^[26]. Однако таким образом можно измерить лишь скорость, среднюю по всему сечению потока и, кроме того, лишь в горячих газах. Широкие возможности для измерения местных скоростей как горячих, так и холодных газов способом доплеровского смещения спектральных линий открывает использование собственного свечения исследуемого газа, возбуждаемого узким пучком электронов или электрическим разрядом. Использование быстрых электронов позволяет производить измерения даже в чрезвычайно нагретых газах, если используется рентгеновская область возбуждаемого ими свечения.

1.5. Радиоактивное излучение. Для трассирования может быть использован радиоактивный газ, например радон, вводимый в поток определенными порциями. Прохождение метки через определенные сечения потока регистрируется счетчиком Гейгера или какими-либо другими детекторами излучения. Использование радиоактивных меток удобно тем, что позволяет производить регистрацию меток даже через толстые металлические стенки (если используются γ -излучатели), а также ввиду большой длительности существования радиоактивной метки. Наиболее целесообразно использовать радиоактивные изотопы для трассирования на больших базах, в труднодоступных устройствах, а также при высоких температурах потока, например, при измерениях в доменных печах, ракетных двигателях и т. д.

1.6. Исследование ударных волн. Для определения скорости движения ударной волны кинематические методы измерения являются практически единственно возможными, так как введение в поток каких-либо зондов при этом обычно недопустимо. Так как интенсивные ударные волны, обычно используемые при газодинамических экспериментах, обладают одновременно высоким давлением, плотностью и температурой, а также повышенной ионизацией и светимостью, то для определения моментов времени, соответствующих прохождению волны через определенные сечения ударной трубы, могут быть использованы самые различные устройства. Чаще всего для этого используется высокочастотное фотографирование или фотографирование на непрерывно движущуюся пленку^[27]. При этом регистрируется либо собственное свечение волны, либо ее шпирен-изображение. Кроме того, используется так называемый метод светового экрана, использующий фотоумножители^[28]. В качестве детекторов могут использоваться термоанемометры^[29], пьезодатчики^[30], коронирующие электроды^[31], пучки электронов^[32] или ионов^[33], ионизационные датчики^[34] и т. д. Измерению скорости ударных волн посвящено множество работ, однако подробное рассмотрение этого вопроса выходит за пределы данного обзора. При этом необходимо отметить, что кинематические методы измерения движения ударных волн не могут быть названы трассированием, так как никаких меток в данном случае не создается, а рассматривается непосредственно исследуемый процесс.



Фиг. 6

2.0. Трассирование макрочастицами. Размеры макрочастиц могут быть различными. Так, например, на фиг. 6 приведена стробоскопическая фотография серии дымовых меток в потоке, обтекающем крылового профиля [35]. Метки образованы путем импульсного выпуска дым из гребенки микротрубок, расположенных выше по потоку. В данном примере размеры частиц столь малы, что метка ведет себя практически так же, как метка, состоящая из микрочастиц. С другой стороны, в ряде случаев для получения больших пространственных осреднений оказывается удобным использование весьма крупных частиц. Так, например, в работе [36] для измерения скорости потока в аэродинамической трубе малых скоростей использовались «частицы», представляющие собой резиновые шарики диаметром 250 м.м., наполненные водородом. Регистрация движения таких частиц крайне проста даже с большого расстояния и использование их может быть весьма полезно при исследовании крупноразмерных потоков.

Большой же частью для измерения скорости газа используются частицы, максимальный размер которых колеблется от нескольких единиц до нескольких десятков микрон. В качестве материала для трассирующих частиц чаще всего используется окись магния, обладающая хорошим коэффициентом отражения и высокой температурой плавления (2800° С). Частицы окиси магния использовались многими авторами для исследования динамической структуры пламен и газоразрядной плазмы [37-40]. Для исследования течений в плазме дугового разряда с успехом использовались частицы угля [41,42], нитрида бора [41] и окиси кальция [37].

При исследовании как дозвуковых, так и сверхзвуковых потоков холодного газа с успехом могут быть применены чешуйки алюминия, обычно используемые для приготовления «серебряных» красок или частицы талька [43-44].

В целом ряде случаев исследуемые потоки содержат достаточное количество частиц, пригодных для целей измерения скорости. Примером могут служить потоки горящих смесей в ракетных двигателях [45, 46], двигателях внутреннего сгорания [47], воздушно-пылевые потоки, течения, сопровождающиеся конденсацией, и т. д.

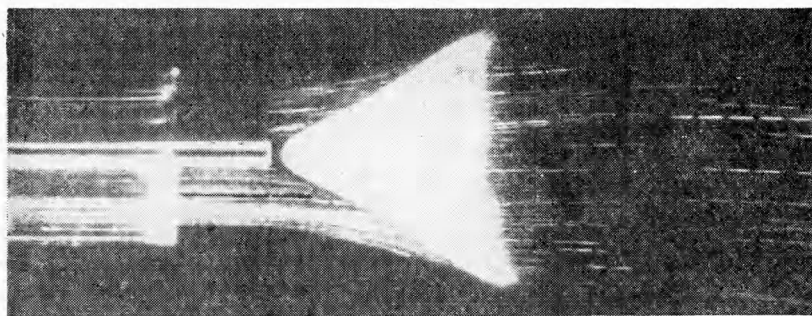
2.1. Соответствие движения частицы движению потока. Так как масса твердой или жидкой частицы, взвешенной в газовой среде, обычно существенно больше массы равновеликого ей объема газа, то изменения величины и направления скорости движения частицы несколько отстают от изменений направления и величины скорости окружающей ее среды. Следствием этого является некоторое различие движения частицы и среды. Для оценки этого различия можно пользоваться следующими приближенными выражениями:

$$\alpha = \tau U / r \quad (6)$$

$$\lambda = -\tau dU / dS \quad (\lambda = (U-V) / U) \quad (7)$$

Здесь α — угол между направлением движения частицы и среды, λ — относительная разность скоростей частицы и среды, r — радиус кривизны траектории частицы, V — скорость потока, U — скорость частицы, τ — время релаксации частицы.

Эти уравнения позволяют, измерив параметры движения трассирующей частицы U , r , dU/dS и зная τ , являющееся характеристической величиной используемых частиц, найти величины α и λ , определяющие точность измерений. Точно так же может быть решена и обратная задача: зная порядок величин параметров исследуемого потока, найти размеры частиц (величину τ), обеспечивающих измерение с точностью не меньшей, чем заданные α и λ .



Фиг. 7

Для сферической частицы, подчиняющейся закону Стокса (малые относительные скорости частицы и среды, плотный газ), время релаксации может быть найдено по формуле

$$\tau = d^2 \rho / 18 \eta \quad (8)$$

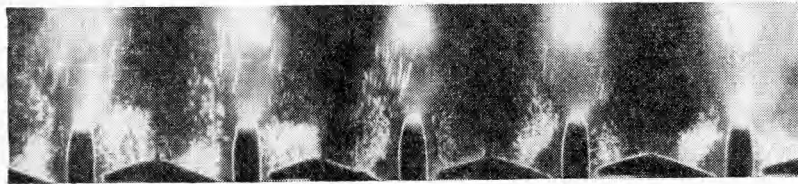
Здесь d — диаметр частицы, ρ — ее плотность, η — вязкость среды.

Чем меньше τ , тем быстрее реагирует частица на изменения движения среды и тем точнее следует за потоком.

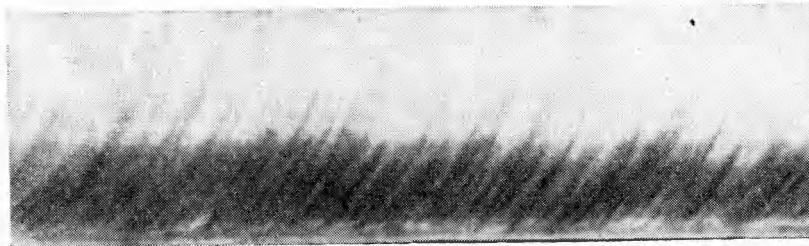
Для экспериментального определения величины времени релаксации частиц обычно пользуются измерением так называемой скорости седиментации V_s — скорости свободного установившегося падения частицы в данной среде

$$V_s = g\tau \quad (9)$$

Зависимость времени релаксации от параметров частицы и среды подробно рассмотрена в монографии Н. А. Фукса [48]. Подробное рассмотрение соответствия движения трассирующей частицы движению потока дано Буро [43].



Фиг. 8



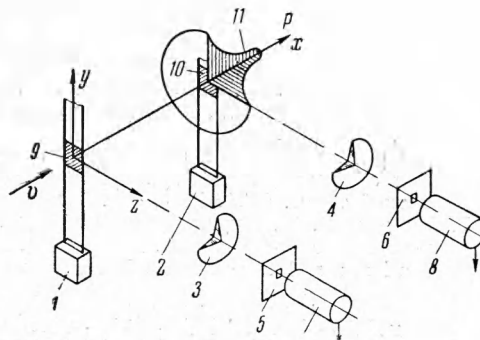
Фиг. 9

2. 2. Регистрация движения трассирующих частиц. Хотя, вообще говоря, для обнаружения движущихся частиц могут быть использованы различные способы, например добавление к материалу частицы радиоактивных изотопов [49], сообщение частице некоторого электрического заряда [50] и т. д., однако практически используется почти исключительно оптическое слежение, так как оно позволяет получить максимальное пространственное разрешение.

Для регистрации движения частиц обычно используется либо фотографирование на неподвижную пленку при стробоскопическом освещении, либо фотографирование на прерывисто или непрерывно движущуюся пленку при непрерывном освещении. На фиг. 7 приведен пример первого из названных способов регистрации [38]. Частицы окиси магния, стробоскопически освещаемые вспышками импульсной лампы, в данном случае используются для исследования горения газа при выходе из трубки с расположенной посредине проволокой. Отчетливо видны линии тока газа. Так как длительность вспышек постоянна, то скорость газа в любой области потока пропорциональна длине светлых штрихов.

На фиг. 8 дан образец покадрового фотографирования [42]. Частицы угля при помощи двух вибрирующих желобов вводятся в область горения вертикально расположенной электрической дуги. Частицы освещаются вспомогательной дугой, расположенной сбоку. Выдержка при съемке составляет $1/250$ сек, частота 24 кадр/сек. Для определения скорости газа в заданной области потока необходимо совмещать соседние снимки и измерять расстояние между соответствующими положениями выбранных частиц.

На фиг. 9 приведен пример регистрации движения частиц (капель горячего топлива) на непрерывно движущуюся пленку [45]. В этом случае был использован ракетный двигатель, имеющий во всю длину окно для наблюдения. Изображение горячей смеси проектировалось на пленку, движущуюся с постоянной скоростью. На фиг. 9 пленка движется справа налево, а изображение частиц — снизу вверх. Траектории горящих капель отчетливо видны. Скорость потока в любой области может быть опреде-



Фиг. 10

лена, как $V = WM \operatorname{tg} \alpha$. Здесь W — скорость движения пленки, M — масштаб изображения, α — угол наклона траектории.

Наряду с положительными свойствами, такими, как исключительная наглядность результатов и возможность «мгновенной» визуализации полей скоростей, фотографические методы регистрации движения трассирующих макрочастиц обладают и весьма существенными недостатками. Основными из них являются большая трудоемкость обработки результатов, особенно если требуется найти какие-либо временные зависимости или если требуется статистическая обработка результатов, и сравнительно невысокая точность измерения. Автором разработано устройство, позволяющее устранить эти недостатки и получить при исследовании характеристик газа «в точке» потока непосредственно числовую или другую удобную для считывания выдачу результатов.

Рассмотрим фиг. 10. Пусть поток, движущийся со скоростью V в направлении оси абсцисс, пересекается двумя узкими пучками света, испускаемыми источниками 1 и 2. Вне потока расположена оптическая система, состоящая из объективов 3, 4 и диафрагм 5, 6, за которыми помещаются фотоумножители 7, 8. Свет, отражаемый частицами при пересечении лучей, испускаемых источниками 1, 2, попадает на фотоумножители только в том случае, если частицы находятся внутри малых областей 9, 10, определяемых геометрией системы. Пусть в некоторый момент времени в первую область 9 попала какая-либо из взвешенных в потоке частиц. Фотоумножитель 7 при этом зарегистрирует импульс. Этот импульс используется для начала отсчета, например, запуская ждущую развертку осциллографа. Фотоумножитель 8 при этом отпирается и регистрирует все частицы, попадающие в область 10, вызывая, например, вертикальные отклонения луча осциллографа. Вероятность того, что среди прочих частиц фотоумножитель 8 зарегистрирует и частицу, вызвавшую начало отсчета, равна интегралу от функции распределения вероятности 11, взятому по области 10, она зависит только от характеристик потока, величины и взаимного расположения областей 9 и 10 и не зависит от количества трассирующих частиц в единице объема потока. Вероятность же того, что будет зарегистрирована случайная частица, не прошедшая через область 9 и являющаяся помехой, пропорциональна плотности взвешенных в потоке частиц. Таким образом, выбирая достаточно малое число трассирующих частиц, можно при многократном наложении результатов измерения получить как угодно большое отношение сигнала к шуму. Через определенный промежуток времени после начала отсчета фотоумножитель 8 запирается, а вся система приходит в первоначальное состояние, ожидая попадания какой-либо из частиц в область 9.

Описываемый способ измерения весьма удобен для исследования характеристик турбулентных течений как холодного, так и горячего газа.

Поступила 1 XII 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Волохов А. Н., Виноградов М. Н. Кинематический метод измерения скорости воздушного потока. Сб. Промышленная аэродинамика, 1953, № 4.
2. Walker R. E., Westenberg A. A. Absolute low speed anemometr, Rev. Scient. Instrum., 1956, 27, 10, 844—848.
3. Elliott D. E. The measurement of high speed air velocity and temperature using sound wave photography, Aeron. Quart., 1955, 6, 3, 181—195.
4. Carrier G. F., Carlson F. D. On the propagation of small disturbances in a moving compressible fluid, Quart. Appl. Math., 1946, 4, 7, 1—12.
5. Dubois M. G., King M. R. Sur la mesure des caractéristiques d'un courant gazeux rapide au moyen d'un faisceau d'ultrasons, Compt. Rend. Acad. sci., 1949, 228, 363—364.
6. Марлоу В., Низанангер К., Кэди У. Метод мгновенного измерения скорости и температуры в высокоскоростном воздушном потоке. Вопр. ракетной техн., 1951, № 1, стр. 54.
7. Кэди У. М. Акустические махмеры. В кн. Физические измерения в газовой динамике и при горении. ИИЛ, 1957.
8. Kalmus H. Electronic flowmeter system, Rev. Scient. Instrum., 1954, 25, 3.
9. Electronic flowmeter is new method for measuring air currents or fluid flow, Electr. Engrn, 1953, 72, 4, 371—372.
10. Шафрановская З. М. Применение ультразвука для измерения теплотехнических параметров. Машгиз, Приборостроение, 1956, № 4, стр. 12—14.
11. Василевский Ю. М. Ультразвуковой измеритель потока. Машгиз, Приборостроение, 1957, № 12, стр. 15—16.
12. Биргер Г. И. Элементы общей теории ультразвуковых расходомеров. Комитет стандартов, мер и измерит. приборов. Измерит. техника, 1961, № 4, стр. 42—48.
13. Mellén G. L. Gas — flow speedometr, Electronics, 1950, 23, 2, 80—81.
14. Педан М. С. Установка для определения скорости воздушного потока методом ионизации. Передовой научн.-техн. и произв. опыт, 1958, № П-58-140, 3—8.
15. Новицкий П. В., Новопашенный Г. Н. Ионизационно-искровые методы измерения скорости и расхода газовых потоков. Ленинградск. политехн. ин-т, Науч.-техн. бюлл., электроизмерит. техн., 1959, № 3, стр. 66—70.
16. Cooley W. C., Stever G. Determination of air velocity by ion transit time measurements, Rev. Scient. Instrum., 1952, 23, 4, 151—154.

17. Brun R., Chartier C. Sur une méthode de mesure électronique de vitesse moyenne d'écoulement gazeux, *Compt. Rend. Acad. sci.*, 1959, 248, 23, 3264—3265.
18. Шумиловский Н. Н., Мельтцер Л. В. Применение радиоактивных изотопов для измерения скоростей газовых потоков и для автоматического контроля расхода газа по методу «меченых молекул». *ДАН СССР*, 1956, т. 106, № 4.
19. Суетин П. Е., Щеглов Г. Т., Дьяченко Р. А. Измерение скорости движения газа трассированием потока ионами, *ПТЭ*, 1959, № 6, стр. 111—114.
20. Шумиловский Н. Н., Мельтцер Л. В. Инженерная методика расчета расходомеров, работающих по методу меченых молекул. *Машгиз, Приборостроение*, 1956, № 11, стр. 4—8.
21. Шумиловский Н. Н., Мельтцер Л. В. Основы теории устройств автоматического контроля с использованием радиоактивных изотопов. *Изд-во АН СССР*, 1959.
22. Захаров Ю. Г., Мельтцер Л. В. Аэродинамическое исследование метода измерения скорости потока, основанного на использовании модулированного радиоактивного излучения. *Сб. Промышленная аэродинамика*, 1958, № 10.
23. Барышова Н. М., Ушаков В. Н. Измерение скорости струи, истекающей из сопла высоковакуумного насоса. *ПТЭ*, 1959, № 5, стр. 94—98.
24. Гринберг Г. А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. М., *Изд-во АН СССР*, 1948.
25. V o m e l b u r g H., H e r z o g J., W e s k e J. The electric spark method for quantitative measurements in flowing gases. *Zs. für Flügwiss.*, 1959, 7, 11, 322—329.
26. B u n d y F. P., S t r o n g H. M., G r e g g A. B. Measurement of velocity and pressure of gases in rocket flames by spectroscopic methods, *J. Appl. Phys.*, 1951, 22, 8, 1069—1077.
27. Саламандра Г. Д., Баженова Т. В., Зайцев С. Г., Солоухин Р. И., Набоко И. М., Савостьянова И. К. Некоторые методы исследования быстропротекающих процессов. *Изд-во АН СССР*, 1960.
28. Бликин У. Измерение скорости распространения ударных волн методом светового экрана. В кн. *Физические измерения в газовой динамике и при горении*, ИИЛ, 1957.
29. D o s a n j h D. S. Use of the hot-wire anemometer as a triggering and timing device for wave phenomena in a shock tube, *Rev. Sc. Instrum.*, 1955, 26, 1, 65—70.
30. G e r r a r d J. H. Piezoelectric pressure gauges for use in a shock tube, *Acustica*, 1959, 9, 1, 17—23.
31. O e r t e l H. Knallwellenoszillographie mittels Koronasonde, *Zs. angew. Phys.*, 1952, 4, 5, 177—183.
32. V e n a b l e D., K a p l a n D. Electron beam method of determining density profiles across shock waves in gases at low densities, *J. Appl. Phys.*, 1955, 26, 5, 639—640.
33. V e n a b l e D. Positive ion oscilloscope trigger for shocks in low — density gases. *Rev. Scient. Instrum.*, 1955, 26, 7, 729.
34. H e c h t G. J., L e d e r m a n A. J., S t e r n R. A., O p p e n h e i m A. K. Determination of flame velocities in gaseous predetonation, *Rev. Scient. Instrum.*, 1960, 31, 10, 1107—1111.
35. L i p p i s c h A. M. Flow visualization, *Aeron. Eng. Rev.*, 1958, 17, 2, 24—32.
36. S i s o j e v V. Sur les mesures de la vitesse de la veine dans une soufflerie aérodynamique. *Publ. Inst. math. Acad. serbe Sci.*, 1953, 5, 165—182.
37. K e n t y C. On convection currents in high pressure mercury arcs, *J. Appl. Phys.*, 1938, 9, 1, 53—66.
38. L e w i s B., E l b e G. Combustion, flames and explosions of gases. N. Y., 1951.
39. P e t e r s e n R. E., E m m o n s H. W. Stability of laminar flames, *The Physics of fluids*, 1961, 4, 4, 456—464.
40. M a x w o r t h y T. Discontinuity properties of laminar flames, *The Physics of fluids*, 1961, 4, 5, 558—564.
41. S u i t s C. G. Convection currents in arcs in air, *Phys. Rev.*, 1939, 55, 2, 198—201.
42. H a g e n a n W. Das Strömungsfeld im freien Kohlenbogen, *Zs. f. Physik*, 1950, 128, 2, 279—288.
43. B o u r o t J. M. Chronophotographie des champs Aérodynamiques, Paris, 1949.
44. C o u v e r t i e r M. P. Sur une méthode de détermination des vitesses dans un écoulement fluide rapide, *J. Phys. et radium*, 1955, 16, 12, 119—120.
45. B e r m a n K., L o g a n S. E. Combustion Studies with a Rocket Motor Having a Full — Length Observation Window. *J. Amer. Rocket. Soc.*, 1952, 22, 2, 78—85.
46. Альтгеймер Д. Методика фотографического изучения горения. *ИИЛ, Вопр. ракетной техн.*, 1953, № 1, стр. 148—157.
47. Соколик А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. *Изд-во АН СССР*, 1960.
48. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. *Изд-во АН СССР*, 1955.
49. Пономаренко В. К. Об аэродинамическом сопротивлении сферической частицы, движущейся с ускорением в потоке воздуха. *Тр. ЛКВВИА им. Можайского*, Ленинград, 1959, вып. 296.
50. L u s c h e r E. Measurements of the speed of little particles in air current. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1953, 4, 9, 284.