

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ В ЗАТОПЛЕННОЙ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ СТРУЕ

В. Р. КУЗНЕЦОВ (Москва)

Описаны измерения пульсаций концентрации в турбулентном потоке при помощи тлеющего разряда. Приведены результаты измерений средней, среднеквадратичной концентрации, а также вероятностей концентрации в затопленной осесимметричной струе.

При исследовании процессов смешения в турбулентных потоках часто важно знать не только распределения средних концентраций, но и степень смешанности веществ до молекулярного уровня. Наиболее полная информация о том, насколько однородно перемешано вещество, задается распределением вероятностей концентрации.

В работе [1] теоретически показано, что в турбулентном потоке, все параметры которого распределены статистически однородно, вероятность концентрации описывается нормальным законом. В работе [2] приведены отдельные результаты измерений вероятностей температуры в слабо подогретой затопленной осесимметричной струе и показано, что вблизи оси струи вероятность температуры распределена по закону, несколько отличающемуся от нормального.

Ниже описывается попытка в какой-то степени дальнейшего восполнения существующих результатов.

1. В опытах для измерений флуктуаций концентрации использовался тлеющий разряд. Этот метод основан на том, что при постоянном токе, протекающем через разрядный промежуток, разность потенциалов между электродами зависит от скорости и рода газа, движущегося в области катодного падения потенциала. Описываемый метод обладает рядом достоинств.

Во-первых, при нормальном давлении и разрядном токе порядка нескольких миллиампер размеры чувствительного элемента (в данном случае длина и диаметр области катодного падения потенциала) очень малы и составляют десятки микрон. Во-вторых, по имеющимся в литературе сведениям [3] тлеющий разряд очень быстро реагирует на изменения характеристик среды (постоянная времени порядка 10^{-5} сек). В-третьих, напряжение на электродах очень сильно зависит от концентрации примеси в движущейся среде. Так, например, при увеличении концентрации углекислого газа в потоке воздуха от 0 до 1 напряжение измеряемого сигнала возрастает на 100 в.

К числу важных достоинств описываемого метода относится простота аппаратуры. Для создания тлеющего разряда использовался источник постоянного тока напряжением 1300 в и стабилизатор тока. Роль последнего играл диод, работавший в режиме насыщения. Эта схема подробно описана в работе [4].

В опытах измерялись среднее и среднеквадратичное значение напряжения, снимаемого с датчика. Среднее значение напряжения определялось по силе тока, протекавшего в интегрирующей цепочке, имевшей постоянную времени порядка 10 сек. Среднеквадратичное напряжение измерялось ламповым вольтметром.

Было также разработано устройство для измерения вероятности напряжения. Напряжение на выходе из этого устройства могло принимать лишь два значения в зависимости от того, превышает ли напряжение на его входе заранее задаваемую величину или нет. При переменном входном потенциале на выходе возникла последовательность прямоугольных импульсов, напряжение которых осреднялось интегрирующей цепочкой (постоянная времени 10 сек). Нетрудно видеть, что осредненное таким образом напряжение пропорционально вероятности анализируемого сигнала.

Для проверки правильности работы описываемого устройства были проведены специальные испытания, во время которых анализировалась вероятность синусоидальных напряжений различной частоты и амплитуды. Испытания показали, что при помощи описываемого устройства можно измерять вероятность сигнала, напряжение которого выше 0,5 в, а частота не превышает 4000 гц.

2. Метод измерений, использующий в качестве чувствительного элемента тлеющий разряд, имеет ряд недостатков. Во-первых, разряд часто бывает неустойчив и самопроизвольно переходит в искровую форму. Во-вторых, разрядные характеристики не стабильны. Эти обстоятельства привели к тому, что описываемый метод измерений не получил широкого распространения.

Указанные недостатки можно практически полностью преодолеть, если правильно подобрать материал, из которого изготавливаются электроды, их форму, расстояние между ними, а также величину разрядного тока. Из десяти опробованных металлов (Fe, Cu, Al, Pt, Pd, Zr, Mo, W, Ir, Ni) и некоторых сплавов наилучшими свойствами обладает нержавеющая сталь марки ЯИ-Т. Поверхность катода, участвующая в разряде, должна быть плоской, а анод должен заканчиваться небольшой площадкой с характерным размером порядка 0,1 мм. Большое значение имеет качество обработки электродов. Малейшая небрежность в обработке (в том числе и боковых поверхностей) приводит к невоспроизводимым результатам. Разряд горит стабильно, если

расстояние между катодом и анодом составляет 0.05—0.15 мм, а разрядный ток находится в пределах 2—5 мА.

Однако полностью преодолеть нестабильность разрядных характеристик не удается. Так, например, разность напряжений на датчике в углекислом газе и воздухе в процессе эксперимента могла изменяться на 1%.

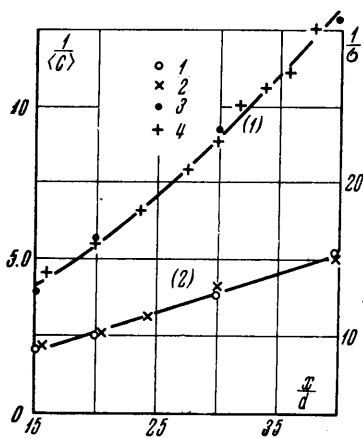
В процессе предварительных опытов установлено, что электроды должны иметь обтекаемую форму. В противном случае в следе за ними возникает протяженная зона обратных токов, что сильно искажает результаты измерений. В опытах использовались электроды крыловидной формы; катод и анод заканчивались плоскими площадками с размерами соответственно $1.5 \times 0.3 \text{ мм}^2$ и $0.1 \times 0.05 \text{ мм}^2$.

Характеристики разряда, зажженного на электродах такой формы, не зависят от скорости потока. Так, например, при вариации скорости воздуха от 0 до 20 м/сек напряжение на датчике остается постоянным и составляет 315 в. Аналогично в диапазоне изменения скоростей углекислого газа от 5 до 20 м/сек напряжение на датчике составляет 420 в.

Установлено также, что показания датчика, вообще говоря, нелинейно зависят от концентрации. Указанное обстоятельство создает определенные трудности при измерении средней и среднеквадратичной концентрации. Наиболее близкой к линейной оказалась зависимость напряжения на датчике от концентрации углекислого газа, находящегося в смеси с воздухом. В этом случае отклонения от линейной зависимости не превышают 10%.

Следует особо остановиться на частотных характеристиках выбранного метода измерений. Выше уже было отмечено, что тлеющий разряд довольно быстро реагирует на изменение характеристик газовой смеси, движущейся в области катодного падения потенциала (эта область находится, практически, на стенке катода). Однако на катоде образуется пограничный слой и требуется определенное время для того, чтобы вещество, диффундирующее из невозмущенного потока, достигло стенки катода.

В силу сказанного расстояние от кромки катода, до места, где стабилизируется разряд, должно быть по возможности минимальным. Оценка показывает, что при измерениях вблизи оси затопленной осесимметричной струи это расстояние должно быть не меньше, чем



Фиг. 1

Здесь l — расстояние от кромки катода до места, где стабилизируется тлеющий разряд, d — диаметр сопла, u — скорость газа, вытекающего из сопла, D — коэффициент молекулярной диффузии, x — расстояние от сопла.

При выводе формулы (2.1) максимальное значение частоты анализируемого сигнала оценено по результатам измерений микромасштаба турбулентности, приведенных в работе [5], а сама оценка получена из условия

$$\tau = \delta^2 / D < 10 / \omega$$

Здесь τ — время, за которое вещество, диффундирующее из невозмущенного потока, появится в заметных количествах на стенке катода, δ — толщина вытеснения пограничного слоя, ω — максимальная частота.

3. Опыты проводились в вертикально расположенной затопленной осесимметричной струе углекислого газа. Струя истекала из сопла диаметром 5 мм. Сопло было специально профилировано и имело большое поджатие (36:1). Поле полных напоров на выходе из сопла было равномерное. Во всех опытах скорость истечения составляла 20 м/сек, число Рейнольдса — $1.3 \cdot 10^4$. Величина l не превышала 0.2 мм, что, как видно из формулы (2.1), обеспечивало удовлетворительные частотные характеристики датчика при измерениях на расстояниях $x > 15 d$.

Средняя и среднеквадратичная концентрация определялись двумя методами. Первый метод основан на том, что тарировочная кривая $c = f(u)$ не слишком сильно отличается от линейной зависимости.

Здесь c — концентрация, u — напряжение на датчике.

Тогда приближенно имеем

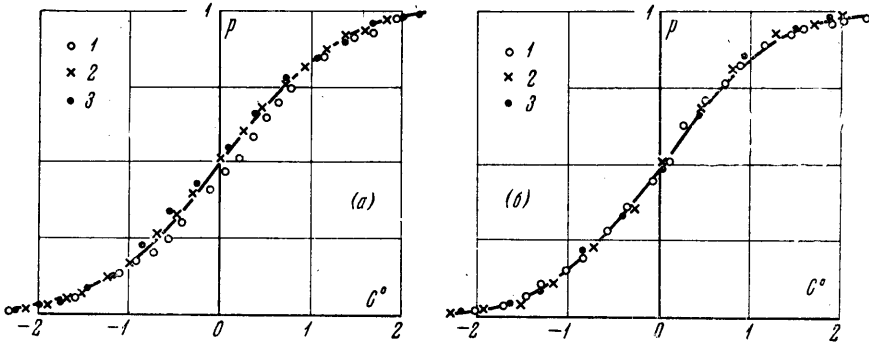
$$\begin{aligned} \langle c \rangle &= f(\langle u \rangle), & \sigma &= \frac{1}{2} [f(\langle u \rangle + \sigma_1) - f(\langle u \rangle - \sigma_1)] \\ \sigma &= \sqrt{\langle (c - \langle c \rangle)^2 \rangle}, & \sigma_1 &= \sqrt{\langle (u - \langle u \rangle)^2 \rangle} \end{aligned} \quad (3.1)$$

При определении величин σ и σ^2 вторым способом использовались соотношения

$$\langle c \rangle = \int_0^1 cdP, \quad \sigma^2 = \int_0^1 c^2 dP - \langle c \rangle^2 \quad (3.2)$$

Здесь P — распределение вероятностей концентрации.

Величину P нетрудно отыскать по вероятности напряжения на датчике и тарировочной кривой $c = f(u)$. Следует, однако, иметь в виду, что оба метода измерений не очень точны. Ошибки первого метода связаны с нелинейным характером зависимости $c = f(u)$. С другой стороны, величину P не удастся надежно измерить во всем диапазоне изменения концентрации, что, как видно из формулы (3.2), обуславливает ошибки второго метода.



Фиг. 2

Несмотря на сказанное выше, оба метода дают близкие результаты, о чем свидетельствуют данные, приведенные на фиг. 1, где представлены данные измерений на оси струи: 1 — величина, обратная средней объемной концентрации (определена по формуле (3.2)), 2 — величина, обратная средней объемной концентрации (определена по формуле (3.1)), 3 — величина, обратная среднеквадратичной концентрации (определена по формуле (3.2)), 4 — величина, обратная среднеквадратичной концентрации (определена по формуле (3.1)).

Распределение средней концентрации при $x > 15d$ описывается автомодельной зависимостью

$$1/\langle c \rangle = k \frac{x}{d} \sqrt{\rho_2/\rho_1}$$

Здесь k — постоянная, ρ_1 и ρ_2 — плотности соответственно газа, вытекающего из сопла, и окружающей среды.

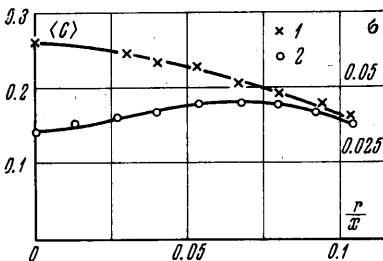
Величина k равна 0.16, что согласуется со значением, рекомендуемым в работе [6], в которой на основании результатов обработки ряда экспериментов установлено, что $k = 0.2 \pm 0.04$.

Распределение среднеквадратичной концентрации при $x < 30d$ несколько отличается от автомодельного, а при $x > 30d$ может быть описано автомодельной зависимостью. Интенсивность флуктуаций концентрации, т. е. величина $\sigma/\langle c \rangle$ с точностью до ошибок измерений при $15d < x < 40d$ остается постоянной и равной 0.16. Полученное значение согласуется с результатами других измерений [7].

На фиг. 2, а приведена зависимость вероятности концентрации углекислого газа от величины c^0 : точки 1, 2, 3 соответствуют значениям $x/d = 20, 30, 40$. Сплошная линия на фиг. 2, а соответствует нормальному закону. Здесь $c^0 = (c - \langle c \rangle) / \sigma$.

Из данных, приведенных на фиг. 2, а, следует, что при не слишком больших амплитудах флуктуаций концентрации ($|c - \langle c \rangle| < \sigma$) наблюдаются систематические отличия от нормального закона. При больших амплитудах флуктуаций с точностью до ошибок эксперимента вероятностная концентрация распределена по нормальному закону.

Кроме исследования характеристик турбулентности на оси струи, в сечении, находящемся на расстоянии $x = 30d$, проведен ряд измерений величин $\langle c \rangle, \sigma, P$.



Фиг. 3

На фиг. 3 представлены распределения: 1 — средней концентрации, 2 — средне-квадратичной концентрации. Видно, что распределение величины σ имеет характерный минимум при $r = 0$.

Здесь r — расстояние от оси струи.

На фиг. 2, б приведены результаты измерений вероятностей концентрации в области, где градиент средней концентрации близок к максимальному: точки 1, 2, 3 соответствуют значениям $r/x = 0.033, 0.067, 0.100$. Проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что в этой области вероятность концентрации распределена по нормальному закону (сплошная линия на фиг. 2, б соответствует нормальному закону).

Автор благодарит С. Ю. Крашенинникова и А. Н. Секундова за внимание к работе и участие в обсуждении ее результатов.

Поступило 7 VIII 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В. Р. О плотности вероятности разности скоростей в двух точках однородного, изотропного турбулентного потока. ПММ, 1967, т. 31, вып. 6.
2. Ибрагимов М. Х., Петрищева Г. А., Таранов Г. С. Исследование турбулентных характеристик свободной круглой струи несжимаемого газа. Инж.-физ. ж., 1968, т. 14, № 3.
3. Хинце И. О. Турбулентность. Ее механизм и теория. М., Физматгиз, 1963.
4. Захаров Ю. Г. Анемометр с тлеющим разрядом. Ж. техн. физ., 1939, т. 9, вып. 21.
5. Corrsin S., Uberoi M. S. Spectra and diffusion in a round turbulent jet. NASA Rept, 1951, No. 1040.
6. Sunavala P. D., Hulse C., Thring M. W. Mixing and combustion in free and enclosed turbulent jet diffusion flames. Combustion and Flame, 1957, vol. 1, No. 2.
7. Corrsin S., Uberoi M. S. Further experiments on the flow and heat transfer in a heated turbulent air jet. NASA Rept 1950, No. 998.

О ВОЗДЕЙСТВИИ НА СТРУЮ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, НАПРАВЛЕННОГО ВДОЛЬ ОСИ СТРУИ

С. И. ИСАТАЕВ, С. Б. ТАРАСОВ

(Алма-Ата)

Приводятся результаты экспериментального исследования влияния продольного акустического воздействия на распределения средней скорости, интенсивности турбулентности и энергетических спектров в круглой струе. Показано, что при таком воздействии доля энергии дискретных вихрей в начальном участке струи может достигать 97% при интенсивности турбулентности порядка 16%.

Воздействие на струю акустического поля, направленного поперек оси струи [1, 2] с частотой, которая совпадает с собственной частотой колебаний в струе, обусловленных образованием дискретных вихрей в начальном участке, вызывает изменение в осредненных и пульсационных характеристиках течения. Скорость вдоль оси струи падает быстрее, интенсивность турбулентности в начальном участке возрастает. В визуальной картине течения наблюдается более четкое формирование дискретных вихрей и более ранний переход к турбулентности [3]. Воздействие на струю звуком высокой частоты [2] называется обратный эффект. В этом случае осевая скорость падает медленнее и интенсивность турбулентности в начальном участке уменьшается. Значительные изменения структуры турбулентной струи вызывают пульсации скорости, создаваемые механическим турбулизатором — диском, установленным в сопле [4, 5].

Опыты проводились на струе, истекающей из круглого сопла диаметром 10 мм, со степенью поджатия 400 и длиной образующей 150 мм. На фиг. 1 приведена схема экспериментальной установки. В успокоительной камере 2 против сопла 1 расположен в конусе 4 акустический излучатель 3 мощностью 10 вт; установка снабжалась успокоительными сетками 5, для уменьшения интенсивности стоячих акустических волн стенки успокоительной камеры покрыты пористой резиной. Были также приняты меры для исключения передачи механической вибрации от вентилятора к диффузору и успокоительной камере. Измерения пульсаций скорости проводились электротермоанемометром постоянной температуры. Нить насадка термоанемометра имела толщину 7 мк и длину 1.5 мм. Энергетические спектры турбулентных