

ПРИБЛИЖЕННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ В ТУРБУЛЕНТНОЙ ГАЗОВОЙ СТРУЕ

К. А. МАЛИНОВСКИЙ

(Москва)

Уравнения энергии и диффузии в турбулентном плоскопараллельном дозвуковом струйном пограничном слое для несжигаемого газа с учетом общепринятых упрощений имеют вид [1]

$$u \frac{\partial i}{\partial x} + v \frac{\partial i}{\partial y} = \pm \frac{1}{P_\tau} c^2 x^2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial i}{\partial y} \right] \quad (1)$$

$$u \frac{\partial \kappa}{\partial x} + v \frac{\partial \kappa}{\partial y} = \pm \frac{1}{P_d} c^2 x^2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right] \quad (2)$$

Здесь i — энтальпия, κ — весовая концентрация, c — эмпирическая константа, P_τ — турбулентное число Прандтля, P_d — диффузионное число Прандтля. Остальные обозначения общеприняты.

Если подставить выражение для энтальпии $i = c(T)T$ в уравнение (1), то в случае идеального газа все члены можно сократить на теплоемкость, поскольку для идеального газа $C = \text{const}$. В результате получим

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \pm \frac{1}{P_\tau} c^2 x^2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (3)$$

Если принять, что процессы переноса тепла и вещества аналогичны, т. е. считать равными турбулентное и диффузионное числа Прандтля, то уравнения (2) и (3) станут тождественными, и распределения температуры и концентрации будут описываться одним и тем же уравнением.

Это происходит потому, что температура и концентрация в данном случае — однотипные скалярные параметры частиц. Этот факт экспериментально подтверждается тем, что при распространении турбулентной струи профили концентрации смеси в поперечных сечениях струи подобны профилям безразмерной температуры [1]. Это значит, что по измеренному полю температуры в струе можно определить поле концентрации.

В случае истечения струи реального газа в среду иного состава теплоемкость в пограничном слое будет не постоянной величиной, а функцией температуры и концентрации. Поэтому в уравнении (1) нельзя производить сокращения на C , и, следовательно, уравнения для распределения температуры и концентрации будут различными. В этом случае профиль концентрации не должен совпадать с профилем безразмерной температуры.

Распределение концентрации какого-либо компонента в струе характеризует интенсивность турбулентного перемешивания и является очень важной характеристикой. Однако непосредственный замер полей концентрации в струе связан с отбором проб газа и их анализом. Как правило, этот процесс гораздо сложнее и более трудоемок (особенно при высоком давлении), чем снятие полей температуры при помощи термопары.

Поэтому желательно иметь хотя бы приближенный способ, позволяющий находить поле концентрации по полю температуры. Так как по температуре смеси определить концентрацию компонентов в ней невозможно, приходится допустить следующую довольно грубую схему смешения.

Представим струю, образованную истечением компонента a и распространяющуюся в среде, состоящей из компонента b . Если струя неизотермическая, то в пограничном слое, который состоит из смеси компонентов a и b , температура меняется от значения на границе ядра струи T_0 или от значения на оси струи T_m до значения на внешней границе струи T_∞ . Аналогично концентрация меняется от значения κ_0 или κ_m до значения κ_∞ . Допустим, что температура смеси в рассматриваемой точке пограничного слоя образуется в результате такого смешения, когда определенные количества компонентов a и b попадают в рассматриваемую точку с параметрами, которые они имели до смешения. После смешения компонентов в этой точке устанавливается температура T_s .

Такая схема дает возможность определить по следующей формуле [2] температуру смеси в любой точке пограничного слоя, если известна весовая концентрация

в этой точке и условия на границах зоны смешения:

$$T_s = \frac{i_a(T_0)\kappa_a + i_b(T_\infty)\kappa_b}{C_a\kappa_a + C_b\kappa_b} \quad (4)$$

Здесь $i_a(T_0)$ и $i_b(T_\infty)$ — энтальпии компонентов a и b при температурах, которые они имели до смешения; C — теплоемкость; κ — концентрации компонентов, отмеченных индексами a и b .

Если принять, что теплоемкости C_a и C_b не зависят от температуры, можно записать

$$T_s = \frac{C_a T_0 \kappa_a + C_b T_\infty \kappa_b}{C_a \kappa_a + C_b \kappa_b} \quad (5)$$

С учетом того, что $\kappa_b = 1 - \kappa_a$, из формулы (5) можно получить выражение для весовой концентрации компонента a

$$\kappa_a = \frac{C_b(T_\infty - T_s)}{T_s(C_a - C_b) - (C_a T_0 - C_b T_\infty)} \quad (6)$$

При известных условиях на границе зоны смешения, пользуясь этой формулой, можно по профилю температуры T_s построить поле концентрации κ_a или κ_b .

Если рассматриваемое поперечное сечение струи находится не в начальном участке, а в основном, за одну из границ зоны смешения следует принять ось струи. В этом случае вместо C_a и T_0 в формулу (6) следует подставить теплоемкость и температуру на оси C_m и T_m . Теплоемкость на оси можно определить по формуле

$$C_m = C_a \kappa_a + C_b \kappa_b$$

для чего необходимо знать концентрацию компонентов на оси. Определенное таким образом по формуле (6) поле концентрации дает распределение в поперечном сечении состава, концентрация которого на оси струи принимается за единицу. В основном участке струи концентрация компонента a на оси меньше единицы, поэтому, чтобы получить поле концентрации компонента a , необходимо ординаты профиля концентрации, полученного по формуле (6), умножить на концентрацию компонента a на оси рассматриваемого сечения.

Для экспериментальной проверки формулы (6) была спроектирована специальная установка, на которой исследовалась струя углекислого газа в спутных потоках воздуха и гелия. Углекислый газ истекал из сопла с диаметром на срезе 2,5 мм; это сопло было расположено внутри другого сопла, которое создавало спутный поток и имело диаметр на срезе 30 мм. Оба сопла были спрофилированы по Витошинскому. Скорость углекислого газа и спутного потока соответственно была 70 и 20 м/сек. Углекислый газ подавался при 60° С, спутный поток был нагрет до 140° С. Во время экспериментов на расстоянии 30 мм от среза сопла замерялись поля полного давления температуры и объемной концентрации. Поля полного давления замерялись трубкой полного напора диаметром 0,5 мм. Поля температур замерялись хромель-алюмелевой термопарой с диаметром спая 0,4 мм.

Для получения профилей объемной концентрации из ряда точек пограничного слоя отбирались пробы газа определенного объема, после чего этот объем пропусклся через поглотитель (раствор 50%-ной щелочи), в котором растворялся углекислый газ, находящийся в отобранной пробе. По уменьшению объема пробы определялась объемная концентрация. Весовую концентрацию можно определить из объемной, используя уравнение состояния газов, образующих смесь. Для отобранного объема с пробой газа можно записать

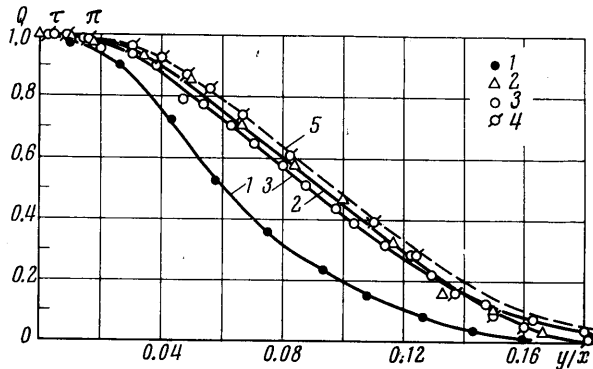
$$\kappa_a = \frac{G_a}{G_a + G_b} = \frac{PV_a/R_a T}{PV_a/R_a T + PV_b/R_b T} = \frac{V_a}{V_a + R_a V_b/R_b} \quad (7)$$

Здесь κ — весовая концентрация компонента, G — вес компонента в отобранной пробе, V — объем компонента в отобранной пробе, R — газовая постоянная компонента.

Из (7) можно получить

$$\kappa_a = \frac{\kappa_a^\circ}{\kappa_a^\circ + R_a \kappa_b^\circ / R_b} \quad (8)$$

Здесь κ_a° , κ_b° — объемные концентрации компонентов a и b . На фиг. 1 и 2 представлены безразмерные поля полного напора 1 , температуры 2 и объемной концентрации 3 , полученные экспериментально при исследовании струи углекислого



Фиг. 1

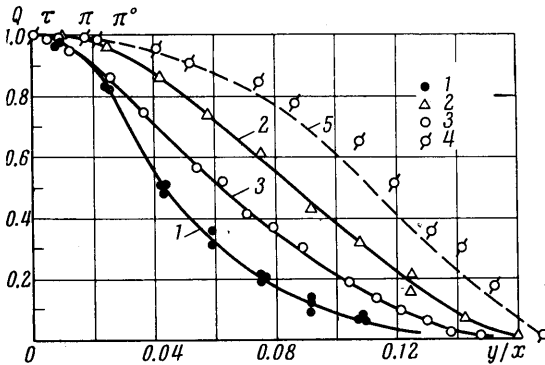
газа в спутных потоках воздуха и гелия. На этих фигурах представлены также профили весовой концентрации 5 , полученные пересчетом по формуле (8) из профиля объемной концентрации.

Опытные данные обрабатывались в виде зависимостей

$$Q = \frac{\Delta \rho u^2}{\Delta (\rho u^2)_m} = \frac{\langle \rho u^2 \rangle - (\rho u^2)_\infty}{(\rho u^2)_m - (\rho u^2)_\infty} = f\left(\frac{y}{x}\right)$$

$$\tau = \frac{\Delta T}{\Delta T_m} = \frac{\langle T \rangle - T_\infty}{T_m - T_\infty} = f\left(\frac{y}{x}\right), \quad \pi = \frac{\langle \kappa \rangle}{\kappa_m} = f\left(\frac{y}{x}\right)$$

Здесь x , y — координаты точки измерения; $\langle \rho u^2 \rangle$ — осредненный скоростной напор в точке измерения; $(\rho u^2)_m$ — полный напор на оси струи, $(\rho u^2)_\infty$ — полный напор в спутном потоке, $\langle T \rangle$ — осредненная температура в точке измерения, $\langle \kappa \rangle$ — осредненная концентрация в точке измерения.



Фиг. 2

Из рассмотрения фиг. 1 следует, что профиль весовой концентрации практически совпадает с профилем безразмерной температуры. Это происходит вследствие сильного отличия в физических свойствах углекислого газа и воздуха. Углекислый газ и гелий имеют сильное отличие в физических свойствах, поэтому и профили, концентрации и температуры, представленные в безразмерном виде, не совпадают (см. фиг. 2).

На фиг. 1—2 нанесены также точки 4 , полученные расчетом по формуле (6) и соответствующие профилю весовой концентрации. Как видно, совпадение расчетных точек 4 с экспериментальной кривой 5 удовлетворительное. Это дает основание рекомендовать формулу (6) для приближенного определения профиля концентрации по замеренному полю температуры.

Поступило 29 VI 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. Физматгиз, 1960.
2. Вукалович М. П., Новиков И. И. Техническая термодинамика. Госэнергоиздат, 1962.