

К РАСЧЕТУ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Г. И. ФУКС

§ 1

Расчет процессов смешения идеальных газов упрощается, если проводить его по молям и использовать таблицы термодинамических свойств газов [1]. Расчет смешения в потоке производят, используя математическое выражение первого закона в виде:

$$Q = ni - (n_1 i_1 + n_2 i_2 + \dots) + \left[n M \frac{c^2}{2} - \left(n_1 M_1 \frac{c_1^2}{2} + n_2 M_2 \frac{c_2^2}{2} + \dots \right) \right], (1)^1$$

где $n, n_1, n_2 \dots$ число молей смеси первого, второго... смешивающихся газов;

$M, M_1, M_2 \dots$ молярные веса смеси первого, второго... смешивающихся газов;

$i, i_1, i_2 \dots$ энтальпии моля смеси первого, второго... газов соответственно (до смешения);

$c, c_1, c_2 \dots$ скорости образовавшейся смеси а также первого, второго... газов (до смешения);

Q — подводимое при смешении тепло.

Из (1) имеем:

$$i + M \frac{c^2}{2} = \frac{n_1}{n} \left(i_1 + M_1 \frac{c_1^2}{2} \right) + \frac{n_2}{n} \left(i_2 + M_2 \frac{c_2^2}{2} \right) + \dots + \frac{Q}{n}. \quad (2)$$

Величина $i + M \frac{c^2}{2}$ представляет собою полную энтальпию движущегося газа на моль (или энтальпию торможения). Введем обозначения:

$$(i) = i + M \frac{c^2}{2},$$

$$(i_1) = i_1 + M_1 \frac{c_1^2}{2}. \quad (3)^2$$

.

¹⁾ Транскрипция формул дана в системе С. И. Расчетные соотношения даются в системе МКГСС в примечаниях.

²⁾ В системе МКГСС $(i) = i + AM \frac{c^2}{2g}$ и т. д.

Тогда

$$(i) = \frac{n_1}{n} (i_1) + \frac{n_2}{n} (i_2) + \dots + \frac{Q}{n}. \quad (4)$$

При расчете смешения величины в правой части являются заданными, либо непосредственно определяются по таблицам термодинамических свойств газов. Предполагается также, что задано давление образовавшейся смеси P , которое должно быть ниже минимального из давлений смешивающихся газов $P_1, P_2, \dots$.

Второе выражение для полной энтальпии смеси можно составить, если учесть, что все ее компоненты имеют одинаковую температуру и одинаковую скорость. Поэтому

$$(i) = \frac{n_1}{n} i_1^0 + \frac{n_2}{n} i_2^0 + \dots + M \frac{c^2}{2}, \quad (5)^3$$

где i_1^0, i_2^0 — энтальпия моля первого, второго... газов соответственно при температуре смеси.

Левая часть (5) вычисляется по (4). Подсчет температуры смеси производится подбором. Задаем предполагаемую температуру смеси t . Это дает возможность:

1. Найти $i_1^0, i_2^0 \dots$ по таблице термодинамических свойств газов.
2. Найти объемный расход газовой смеси V по уравнению состояния:

$$pV = 8314 nT \quad (6)^4$$

и, следовательно, зная сечение потока, определить его скорость c .

Расчет заканчивается, когда подобрана температура, при которой правая и левая части (5) совпадут.

Если можно пренебречь изменением кинетической энергии при смешении, то вместо (4) имеем:

$$i = \frac{n_1}{n} i_1 + \frac{n_2}{n} i_2 + \dots + \frac{Q}{n} \quad (7)$$

и вместо (5)

$$i = \frac{n_1}{n} i_1^0 + \frac{n_2}{n} i_2^0 + \dots \quad (8)$$

По (7) определяется энтальпия моля смеси. По (8) подбором определяется температура смеси.

Если, кроме того, теплообмен в процессе смешения отсутствует и молярные теплоемкости смешивающихся газов мало отличаются друг от друга, то из (7) и (8) получается:

$$t = \frac{n_1 t_1 + n_2 t_2 + \dots}{n_1 + n_2 + \dots}, \quad (9)$$

³⁾ В системе МКГСС $(i) = \frac{n_1}{n} i_1^0 + \frac{n_2}{n} i_2^0 + \dots + AM \frac{c^2}{2g}$.

⁴⁾ В системе МКГСС $pV = 848 nT$.

$$T = \frac{n_1 T_1 + n_2 T_2 + \dots}{n_1 + n_2 + \dots} \quad (9')$$

Из последнего соотношения, используя уравнение состояния (6), можно получить:

$$p V = p_1 V_1 + p_2 V_2 + \dots \quad (10)$$

По (10) непосредственно определяется объемный расход смеси V .

При наличии теплообмена можно считать, что сначала идет процесс смешения без теплообмена, и вычислить предварительную температуру смеси из (9). Поэтому близкое к истинному значение конечной температуры получается по соотношению

$$t^1 \cong t + \frac{Q}{n C_p}, \quad (11)$$

где C_p — средняя теплоемкость моля смеси при постоянном давлении в интервале температур от t до t' . Так как соотношения (9) и (11) являются приближенными и роль теплообмена в процессе смешения обычно невелика, то достаточно точно значение C_p можно получить по уравнению:

$$C_p \cong \frac{n_1}{n} \left(\frac{\Delta i_1^{100}}{100} \right) + \frac{n_2}{n} \left(\frac{\Delta i_2^{100}}{100} \right) + \dots, \quad (12)$$

где Δi_1^{100} , Δi_2^{100} ... изменение энтальпии первого, второго и т. д. газов на 100°C около температуры t .

Объемный расход газа V подсчитывается по (6). Во всех случаях целесообразно расчет сначала проводить по приближенным соотношениям (9) или (9'), (10) и (11), так как тогда решение подбором по (4), (5), (7) и (8) весьма упрощается.

§2.

Для расчета смешения при постоянном объеме используется математическое выражение первого закона в виде:

$$Q = nu - (n_1 u_1 + n_2 u_2 + \dots), \quad (13)$$

где u , u_1 , u_2 ... внутренняя энергия моля смеси, а также кмоля первого, второго... смешивающихся газов.

Из (13) имеем:

$$u = \frac{n_1}{n} u_1 + \frac{n_2}{n} u_2 + \dots + \frac{Q}{n}. \quad (14)$$

При составлении таблиц термодинамических свойств [1] принято, что энтальпии всех газов равны нулю при $t = 0^\circ \text{C}$. Можно считать, что эти же значения имеют величины внутренней энергии всех газов. Тогда, исходя из общей связи $i = u + pv$, с учетом уравнения состояния газа получим для моля газа

$$u = i - 8314 \, t \frac{\text{дж}}{\text{кмоль}}. \quad (15)^5$$

⁵⁾ В системе МКГСС

$$u = i - 1,986 \, t \frac{\text{ккал}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}.$$

С учетом этого соотношения имеем из (14):

$$i - 8314 t = \frac{n_1}{n} (i_1 - 8314 t_1) + \frac{n_2}{n} (i_2 - 8314 t_2) + \dots + \frac{Q}{n}. \quad (16)^6$$

При расчете смешения все величины в правой части надо считать известными, так как $i_1, i_2, \dots$ определяются из таблицы термодинамических свойств по температурам смешивающихся газов $t_1, t_2, \dots$. Для расчета температуры смеси надо учесть, что энтальпия смеси

$$i = \frac{n_1}{n} i_1^0 + \frac{n_2}{n} i_2^0 + \dots \quad (7)$$

Расчет ведется подбором. Задаемся предполагаемой температурой смеси t и по (7) подсчитываем соответственно значение i . Правильность выбора t проверяется по (16).

Если считать, что теплообмен при смешении отсутствует ($Q=0$) и теплоемкости для кмоля газов близки друг к другу, то для подсчета температуры смешения получим:

$$t = \frac{n_1 t_1 + n_2 t_2 + \dots}{n_1 + n_2 + \dots}, \quad (9')$$

$$T = \frac{n_1 T_1 + n_2 T_2 + \dots}{n_1 + n_2 + \dots} \quad (9)$$

того же вида, как для смешения в потоке. Сохраняется также и соотношение (10), по которому в этом случае вычисляется давление смеси.

При наличии теплообмена в процессе смешения сначала по (9) или (9') вычисляется температура смеси при отсутствии теплообмена. Затем учитывается нагрев (охлаждение) образовавшейся смеси в соответствии с величиной Q . Расчетное соотношение для определения температуры смешения будет:

$$t' \cong t + \frac{Q}{n C_v}, \quad (17)$$

где C_v — средняя теплоемкость кмоля смеси в интервале температур t до t' .

Если учесть, что расчеты по (9) и (17) являются приближенными и влияние теплообмена в процессе смешения является второстепенным, то величину C_v можно подсчитать по соотношению:

$$C_v \cong \frac{n_1}{n} \left(\frac{\Delta i_1^{100}}{100} \right) + \frac{n_2}{n} \left(\frac{\Delta i_2^{100}}{100} \right) + \dots - 8314 \frac{\partial J}{\text{кмоль}^\circ \text{К}} \quad (18)^7$$

⁶⁾ В системе МКГСС

$$i - 1,968 t = \frac{n_1}{n} (i_1 - 1,968 t_1) + \frac{n_2}{n} (i_2 - 1,968 t_2) + \dots + \frac{Q}{n}.$$

⁷⁾ В системе МКГСС

$$C_v \cong \frac{n_1}{n} \left(\frac{\Delta i_1^{100}}{100} \right) + \frac{n_2}{n} \left(\frac{\Delta i_2^{100}}{100} \right) + \dots - 1,986 \frac{\text{ккал}}{\text{кмоль} \cdot \text{град.}}$$

После подсчета температуры смеси ее давление определяется из уравнения состояния (6).

§ 3.

Соотношение для расчета температуры при смешении путем подачи n_2 молей газа при p_2 и t_2 в объем, занятый n_1 молями газа при p_1 и t_1 , имеет вид:

$$i - 8314 t = \frac{n_1}{n} (i_1 - 8314 t_1) + \frac{n_2}{n} i_2 + \dots + \frac{Q}{n}, \quad (19)^8$$

где i, t — энтальпия и температура образовавшейся смеси;

i_1 — энтальпия газа, первоначального имевшегося в объеме смешения; i_2 — энтальпия поданного в объем смешения газа.

При расчете все величины в правой части являются заданными или достаточно просто определяются по таблицам термодинамических свойств газов. С другой стороны, энтальпия образовавшейся смеси может быть подсчитана по (8).

Задается предполагаемая температура смеси t и рассчитывают по (8) значение ее энтальпии. Правильность задаваемой температуры проверяется по (19). Давление образовавшейся смеси P подсчитывается по уравнению состояния (6), так как объем получившейся смеси известен. При этом при указанной схеме смешения $P_1 < P < P_2$.

При вычислении энтальпии отдельных газов и их смесей для промежуточных (между табличными) значений температур следует учесть, что в пределах интервала до 100°C для технических расчетов энтальпии вполне допустима линейная интерполяция.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Вукалович, В. А. Кириллин, С. А. Ремизов, В. С. Силецкий, В. Н. Тимофеев. Термодинамические свойства газов. 1953.

⁸⁾ В системе МКГСС

$$i - 1,986 t = \frac{n_1}{n} (i_1 - 1,986 t_1) + \frac{n_2}{n} i_2 + \dots + \frac{Q}{n}$$