УДК 533.27(045)

Г.А. Янченко

О СМЕШИВАНИИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Сделан анализ процессов смешивания газовых потоков с различными термодинамическими параметрами. Предложена методика расчёта массовых расходов смешивающихся исходных газовых потоков, обеспечивающих получение потока газовой смеси с необходимыми термодинамическими параметрами.

Ключевые слова: газ, поток, смешивание, давление, температура, расход.

Процессы образования многокомпонентных газовых смесей при смешивания газов и газовых потоков с различными термодинамическими параметрами имеют большое значение в технике и в частности в горном деле, например при тепловом кондиционировании части рудничного воздуха впоследствии смешиваемого с остальной частью этого воздуха, получении паровоздушной и парокислородных смесей для газификации твёрдых топлив и так далее.

В процессе смешения исходных газовых потоков (см. рис. 1), имеющие разные параметры состояния, объём получаемого потока не равняется сумме объёмов исходных потоков. Поэтому расчёт параметров получаемого потока нельзя вести на основе баланса внутренней энергии получаемого и исходных потоков. Это необходимо делать на базе 1-го закона термодинамики для газовых потоков.

Смешивание потоков обычно осуществляется за короткий промежуток времени на пути смешивания обычно небольших размеров. Поэтому, если смешивание этих потоков осуществляется без производства элементарной технической работы $dl_{тех}$, то элементарными затратами энергии на изменение потенциальной энергии gdZ смешивающихся потоков, на преодоление сил трения $dl_{тр}$ потока газа о стенки трубопровода и потерь тепла dq в окружающую среду можно пренебречь, то есть $dq = dl_{тех} = gdZ = dl_{тр} = 0$, где. Тогда уравнение 1-го закона термодинамики для единицы массы газовых потоков принимает вид [1]:

$$di = -wdw, \tag{1}$$

где $di; dw$ — элементарные изменения удельной энтальпия потока газа, *Дж/кг*, и скорости w его движения, *м/с*.

После интегрирования (1) и элементарных преобразований результатов интегрирования, получаем:

$$i_н + \frac{w_н^2}{2} = i_к + \frac{w_к^2}{2}, \tag{2}$$

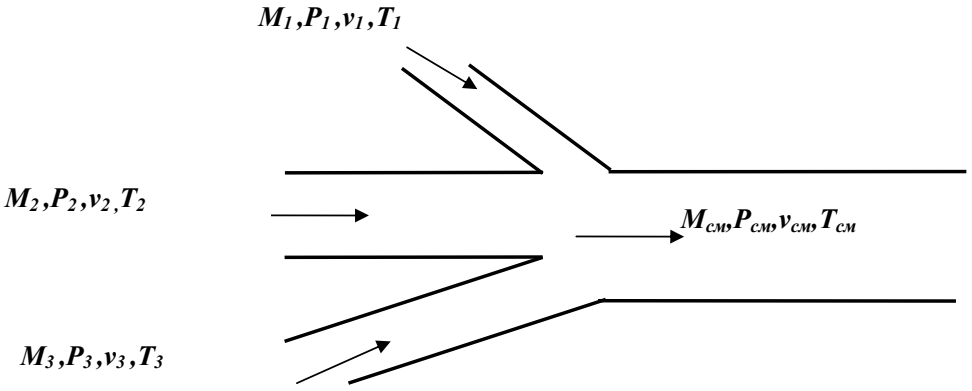

Рис. 1. Схема смешивания газовых потоков: $M_1, M_2, M_3, M_{см}, v_1, v_2, v_3, v_{см}, P_1, P_2, P_3, P_{см}, T_1, T_2, T_3, T_{см}$ ***— соответственно масса, кг, удельный объём, м³/кг, абсолютные давление, Па, и температура, К, 1-го, 2-го и 3-го смешивающихся газовых потоков и потока получаемой газовой смеси***

где $i_н, i_к, \frac{w_н^2}{2}, \frac{w_к^2}{2}$ — удельные энтальпия и кинетическая энергия потока газа соответственно в начальном и конечном состояниях, *Дж/кг*.

Из (2) следует, что при адиабатном стационарном течении газа сумма удельных энтальпии и кинетической энергии потока остаётся постоянной.

Согласно [2], для большинства технических задач в промышленности кинетической энергией потока можно пренебречь.

В этом случае (2) принимает вид

$$i_н = i_к. \tag{3}$$

Так как полная энтальпия веществ I является экстенсивным параметром, обладающим свойством аддитивности, то условно рассматривая всю совокупность исходных потоков как единый поток смеси этих газов можно состояние этого условного потока принять за начальное, а состояние потока, образованного в результате смешения исходных потоков за конечное. Тогда, учитывая (3), можно составить следующее уравнение теплового баланса смешивания потоков:

$$I_{к,см} = \sum_{i=1}^{j} I_{н,i}, \quad \rightarrow \quad G_{см} i_{см} = \sum_{i=1}^{j} G_i i_i \,, \tag{4}$$

где $I_{к,см}, I_{н,i}$ — полная энтальпия получаемого потока газовой смеси и соответствующих ***i***-х исходных газовых потоков, смешивающихся за время $\tau = 1$ *с*, *Дж*; $G_{см}, G_i$ — массовые расходы, *кг/с*, получаемого потока газовой смеси и соответствующих ***i***-х исходных потоков смешивающихся газов, соответственно $G_{см} = \sum_{i=1}^{j} G_i$.

Рассматривая смешивающиеся газовые потоки и поток газовой смеси как идеальные газы и учитывая, что в теплотехнических расчётах у этих газов условно принято считать $I = 0$ при $T = T_0 = 273{,}15$ K ($t = t_0 = 0$ ^0C) и любых давлениях, определим величины $i_{к,см}, i_{н,1}, i_{н,2}, i_{н,3}, \ldots$ как:

$$\left.\begin{aligned} &i_{к,см}(T_{см}) = C_{P,уд,см}(T_0 \ldots T_{см})(T_{см} - T_0),\\ &i_{н,1}(T_1) = C_{P,уд,1}(T_0 \ldots T_1)(T_1 - T_0),\\ &i_{н,2}(T_2) = C_{P,уд,2}(T_0 \ldots T_2)(T_2 - T_0),\\ &i_{н,3}(T_3) = C_{P,уд,3}(T_0 \ldots T_3)(T_3 - T_0),\\ &\ldots\ldots, \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

где $C_{P,уд,1}(T_0 \ldots T_1), \ldots C_{P,уд,см}(T_0 \ldots T_{см})$ — изобарные удельные теплоёмкости смешивающихся исходных газовых потоков и образовавшегося потока газовой смеси, усреднённые в диапазоне температур от T_0 до T_1, $T_2, \ldots$ $T_{см}$ *Дж/(кг·К)*.

Подставив уравнения (5) в последнее уравнение (4), получаем:

$$G_{см} C_{P,уд,см}(T_0 \ldots T_{см})(T_{см} - T_0) = \sum_{i=1}^{j} G_i C_{P,уд,i}(T_0 \ldots T_i)(T_i - T_0). \qquad (6)$$

Соответственно:

$$T_{см} = \frac{\sum_{i=1}^{j} G_i C_{P,уд,i}(T_0 \ldots T_i)(T_i - T_0)}{G_{см} C_{P,уд,см}(T_0 \ldots T_{см})} + T_0 . \qquad (7)$$

Полученные выражения являются трансцендентными, так неизвестна величина $T_{см}$. На практике такие выражения рассчитываются, например, методом последовательных приближений.

Чтобы получить выражение для расчётов $T_{см}$ в явном виде воспользуемся следующим опытным приёмом. Примем в (6) $(T_{см} - T_0) = (T_i - T_0) = 1\ K$ что соответствует нагреву потока газовой смеси и отдельных смешивающихся газовых потоков на 1 K. В этом случае получаем:

$$G_{см} C_{P,уд,см}(T_0 \ldots T_{см}) = \sum_{i=1}^{j} G_i C_{P,уд,i}(T_0 \ldots T_i). \qquad (8)$$

Из (8) следует, что количество тепла, необходимое для нагрева всей газовой смеси на 1 K (это левая часть (8)), равно сумме количеств тепла, необходимых для нагревания каждого из смешивающихся газов также на 1 K (это правая часть (8)).

Учитывая это, заменим знаменатель в правой части выражения (7) на правую часть выражения (8):

$$T_{см} = \frac{\sum_{i=1}^{j} G_i C_{P,уд,i}(T_0 \ldots T_i)(T_i - T_0)}{\sum_{i=1}^{j} G_i C_{P,уд,i}(T_0 \ldots T_i)} + T_0; \rightarrow T_{см} = \frac{\sum_{i=1}^{j} G_i C_{P,уд,i}(T_0 \ldots T_i) T_i}{\sum_{i=1}^{j} G_i C_{P,уд,i}(T_0 \ldots T_i)}. \qquad (9)$$

Учитывая, что массовая доля *i*-го исходного потока в образовавшемся потоке газовой смеси будет $m_i = G_i / G_{см}$, можно (9) преобразовать к виду:

$$T_{см} = \frac{\sum_{i=1}^{j} m_i C_{P,уд,i}(T_0 ... T_i) T_i}{\sum_{i=1}^{j} m_i C_{P,уд,i}(T_0 ... T_i)}. \qquad (10)$$

Согласно [2] для ***i***-го идеального газа справедливо:

$$C_{P,уд,i}(T_0 ... T_i) = \frac{k_i(T_0 ... T_i) R_i}{k_i(T_0 ... T_i) - 1}, \qquad (11)$$

а уравнение Клапейрона для произвольного количества ***i***-го газа, которое смешивается с другими газами за 1 секунду, может быть записано в виде:

$$P_i V_{\tau,i} = G_i R_i T_i; \rightarrow G_i = \frac{P_i V_{\tau,i}(P_i, T_i)}{R_i T_i}, \qquad (12)$$

где $V_{\tau,i}(P_i, T_i)$ — объёмный расход *i*-го смешивающегося газа при его текущих параметрах, *м*^{3}*/с*; $k_i(T_0 ... T_i)$ — показатель адиабаты *i*-го смешивающегося газа, усреднённый в диапазоне температур от T_0 до текущей температуры T_i.

Подставив G_i из (12) в (9) и заменив $C_{P,уд,i}(T_0 ... T_i)$ в (9) на правую часть (11), получим:

$$T_{см} = \frac{\sum_{i=1}^{j} \frac{k_i(T_0 ... T_i)}{k_i(T_0 ... T_i) - 1} P_i V_{\tau,i}(P_i, T_i)}{\sum_{i=1}^{j} \frac{k_i(T_0 ... T_i)}{k_i(T_0 ... T_i) - 1} \cdot \frac{P_i V_{\tau,i}(P_i, T_i)}{T_i}}. \qquad (13)$$

Объёмный расход образовавшегося потока $V_{\tau,см}$ можно также определить из уравнения Клапейрона для произвольного количества газа:

$$V_{см,i}\left(P_{см}, T_{см}\right) = \frac{G_{см} R_{см} T_{см}}{P_{см}}, \qquad (14)$$

где $P_{см}, V_{\tau,см}\left(P_{см}, T_{см}\right)$ — абсолютное давление, *Па*, и объёмный расход, *м*^{3}*/с*, получаемого газового потока; $R_{см}$ — удельная газовая постоянная газовой смеси получаемого газового потока, *Дж/(кг•К)*.

Учитывая, что $R_{см} = \sum_{i=1}^{j} m_i R_i$ [3], получим:

$$R_{см} = \sum_{i=1}^{j} m_i R_i = \sum_{i=1}^{j} \frac{G_i}{G_{см}} R_i = \frac{1}{G_{см}} \sum_{i=1}^{j} G_i R_i \qquad (15)$$

Подставив (15) в (14), получим

$$V_{\tau,см}\left(P_{см},T_{см}\right)=\frac{T_{см}G_{см}\dfrac{1}{G_{см}}\sum\limits_{i=1}^{j}G_iR_i}{P_{см}}=\frac{T_{см}}{P_{см}}\sum_{i=1}^{j}G_iR_i. \qquad (16)$$

Учитывая (12), можно записать:

$$G_iR_i=\frac{P_iV_{\tau,i}\left(P_i,T_i\right)}{T_i}. \qquad (17)$$

Подставив (17) в (16), получим:

$$V_{\tau,см}\left(P_{см},T_{см}\right)=\frac{T_{см}}{P_{см}}\sum_{i=1}^{j}\frac{P_iV_{\tau,i}\left(P_i,T_i\right)}{T_i}. \qquad (18)$$

Из (18) вытекает несколько важных частных случаев:
если абсолютное давление смешивающихся исходных потоков одинаково $P_{см}=P_1=P_2=\ldots,$ то:

$$V_{\tau,см}\left(P_{см},T_{см}\right)=T_{см}\sum_{i=1}^{j}\frac{V_{\tau,i}\left(P_{см},T_i\right)}{T_i}, \qquad (19)$$

если же и температура этих потоков одинакова $T_{см}=T_1=T_2=\ldots,$ то

$$V_{\tau,см}\left(P_{см},T_{см}\right)=\sum_{i=1}^{j}V_{\tau,i}\left(P_{см},T_{см}\right). \qquad (20)$$

Величину $P_{см}$ обычно заранее устанавливаю с помощью вентилей или других запорных механизмов.

Полученные выше выражения для расчётов и $V_{\tau,см}\left(P_{см},T_{см}\right)$ в принципе не позволяют в явном виде решить обратную задачу, а именно определить величины G_i или $V_{\tau,i}\left(P_i,T_i\right)$, чтобы получить поток с наперёд заданными массовым расходом $G_{см}$ и температурой $T_{см}$, если $T_{г,\min}<T_{см}<T_{г,\max}$, где $T_{г,\min},T_{г,\max}$ — минимальная и максимальная температуры смешивающихся исходных газовых потоков, *К*.

Это можно легко сделать для случая смешивания двух потоков. Учитывая, что $G_{см}=G_1+G_2$ представим уравнение (9) в виде, позволяющем определить сначала величину G_1, а далее соответственно и G_2:

$$T_{см}=\frac{G_1C_{P,уд,1}(T_0\ldots T_1)T_1+\left(G_{см}-G_1\right)C_{P,уд,2}(T_0\ldots T_2)T_2}{G_1C_{P,уд,1}(T_0\ldots T_1)+\left(G_{см}-G_1\right)C_{P,уд,2}(T_0\ldots T_2)}. \qquad (21)$$

В шкале термодинамических температур Цельсия (21) соответственно принимает вид:

$$t_{см} = \frac{G_1 C_{P,уд,1}(0...t_1)(t_1 + 273{,}15)}{G_1 C_{P,уд,1}(0...t_1) + (G_{см} - G_1) C_{P,уд,2}(0...t_2)} +$$

$$+ \frac{(G_{см} - G_1) C_{P,уд,2}(0...t_2)(t_2 + 273{,}15)}{G_1 C_{P,уд,1}(0...t_1) + (G_{см} - G_1) C_{P,уд,2}(0...t_2)} - 273{,}15. \quad (22)$$

Конечные выражения для расчёта G_1 не приводятся из-за их громоздкости.

Если разделить числитель и знаменатель (21) и (22) на G_1, то получим выражения для расчётов $T_{см}$ и $t_{см}$ при использовании массовых долей смешивающихся исходных потоков:

$$T_{см} = \frac{m_1 C_{P,уд,1}(T_0...T_1)T_1 + (1 - m_1) C_{P,уд,2}(T_0...T_2)T_2}{m_1 C_{P,уд,1}(T_0...T_1) + (1 - m_1) C_{P,уд,2}(T_0...T_2)}. \quad (23)$$

$$t_{см} = \frac{m_1 C_{P,уд,1}(0...t_1)(t_1 + 273{,}15)}{m_1 C_{P,уд,1}(0...t_1) + (1 - m_1) C_{P,уд,2}(0...t_2)} +$$

$$+ \frac{(1 - m_1) C_{P,уд,2}(0...t_2)(t_2 + 273{,}15)}{m_1 C_{P,уд,1}(0...t_1) + (1 - m_1) C_{P,уд,2}(0...t_2)} - 273{,}15. \quad (24)$$

Подобное выражение можно также получить, если известны температурные зависимости истинных изобарных удельных теплоёмкостей газов обоих смешивающихся потоков $C_{P,уд,1}(T)$ и $C_{P,уд,2}(T)$.

Учитывая, что в результате смешивания двух исходных потоков изменение (уменьшение или увеличение) энтальпии одного потока будет равно изменению (соответственно увеличению или уменьшению) другого потока, запишем уравнение теплового баланса процесса их смешивания в виде:

$$\left|\Delta I_1 (T_1...T_{см})\right| = \left|\Delta I_2 (T_2...T_{см})\right|, \quad (25)$$

где $\left|\Delta I_1 (T_1...T_{см})\right|, \left|\Delta I_2 (T_2...T_{см})\right|$ — изменение по модулю полной энтальпии, *Дж*, первого и второго потоков, смешивающихся за время $\tau = 1$ с, при изменении их температуры соответственно от начальной T_1 и T_2 до конечной $T_{см}$.

Учитывая правое уравнение (4) и метод расчёта величин $\Delta i(T_1...T_2)$ при использовании $C_{P,уд}(T)$ [1], получаем:

$$G_1 \left|\Delta i_1 (T_1...T_{см})\right| = G_2 \left|\Delta i_2 (T_2...T_{см})\right|, \rightarrow \; G_1 \left|\Delta i_1 (T_1...T_{см})\right| = (G_{см} - G_1) \left|\Delta i_2 (T_2...T_{см})\right|, \rightarrow$$

$$\rightarrow G_1 \left| \int_{T_1}^{T_{см}} C_{P,уд,1}(T)dT \right| = (G_{см} - G_1) \left| \int_{T_2}^{T_{см}} C_{P,уд,2}(T)dT \right|, \rightarrow$$

$$\rightarrow m_1 \left| \int_{T_1}^{T_{см}} C_{P,уд,1}(T)dT \right| = \left(1 - m_1\right) \left| \int_{T_2}^{T_{см}} C_{P,уд,2}(T)dT \right|. \qquad (26)$$

В шкале термодинамических температур Цельсия конечные выражения (26) имеют такой же вид.

Возможность определения при смешивании двух потоков G_1 и G_2 для получения потока с заданными $T_{см}$ и $G_{см}$ из выражений (21)….(24) и (26) позволяет рекомендовать следующий алгоритм решения задачи об определения массовых расходов смешивающихся трёх, четырёх и более исходных потоков для получения газового потока с заданными $T_{см}$ и $G_{см}$ (далее требуемый поток).

Суть этого алгоритма заключается в том, что все смешивающиеся исходные потоки необходимо разбить на отдельные группы. В каждой из этих групп будет находиться, либо по два исходных потока, если количество смешивающихся исходных потоков чётное, либо в одной из этих групп будет один исходный поток, если количество смешивающихся потоков будет нечётным. Далее последовательно рассматривается смешивание исходных потоков в каждой из образованных групп. Потом из потоков, образованных в результате смешивания исходных потоков в каждой из этих групп (далее групповой поток), образуются новые группы и последовательно рассматривается смешивание газовых потоков уже в этих новых группах. Процесс продолжается до тех пор, пока в конечном итоге остаются два последних потока (оба из них будут групповыми, если количество смешивающихся исходных потоков чётное, либо один из них будет исходным, если количество исходных потоков будет нечётным), при смешивании которых определяются их массовые расходы. С учётом массовых долей каждого из исходных потоков в ходе последовательных смешиваний определяются величины массовых расходов начальных исходных потоков.

В зависимости от количества смешивающихся исходных потоков и их температур способ реализации этого приёма может несколько различаться.

Рассмотрим основы этого алгоритма на примере смешивания трёх исходных потоков с температурами T_1, T_2 и T_3 для получения требуемого газового потока с массовым расходом $G_{см}$ и температурой $T_{см}$. Соответственно величина $T_{см}$ должна удовлетворять следующему неравенству $T_{г,\min} < T_{см} < T_{г,\max}$.

Потоки в каждой из двух образуемых в этом случае групп подбираются следующим образом. Если температура, например, первого потока T_1 будет больше $T_{см}$, то температуры второго T_2 и третьего T_3 исходных потоков, образующих вторую группу, должны быть такими, чтобы при соответствующих заданных массовых долях каждого из этих потоков m_2' и m_3' температура группового потока, полученного от смешивания второго и третьего исходных потоков, T_{2-3}, определённая по уравнению (23), должна быть меньше $T_{см}$.

Далее из выражений (21)….(24) или (26) определяются величины G_1 и G_{2-3}, где G_{2-3} — массовый расход группового потока, полученного при смешивании второго и третьего исходных газовых потоков. Массовые расходы второго G_2 и третьего G_3 потоков для получения требуемого потока с заданными параметрами $T_{см}$ и $G_{см}$, определяются с учётом заданных величин m'_2 и m'_3 при смешивании второго и третьего потоков во второй группе:

$$G_2 = m'_2 G_{2-3}, \qquad G_3 = m'_3 G_{2-3}. \tag{27}$$

Следует отметить, что при отсутствии каких-либо дополнительных условий на величину хотя бы одного исходного газового потока, такой метод даёт большое количество возможных соотношений G_1, G_2 и G_3, теоретически бесконечно большое. В этом можно убедиться рассмотрев, например, процесс смешивания трёх исходных потоков: воздуха с температурой $T_в$ = 800 K, диоксида углерода CO_2 с температурой T_{CO2} = 400 K и кислорода O_2 с температурой T_{O2} = 300 K для получения газового потока с температурой $T_{см}$ = 500 K и массовым расходом $G_{см} = 4$ *кг / с*.

Согласно [2], температурные зависимости средней изобарной удельной теплоёмкости воздуха, CO_2 и O_2 в пределах от t_1 = 0 ^0C до t_2 = 1500 ^0C имеют следующий вид:

$$C_{P,уд,в}(0...t) = 0,9956 + 0,000093t;$$

$$C_{P,уд,CO2}(0...t) = 0,8725 + 0,0002406t;$$

$$C_{P,уд,O2}(0...t) = 0,919 + 0,0001065t,$$

где $[t] = {}^0C$; $[C_{P,уд}] = кДж/кг\cdot{}^0C$.

Рассмотрим сначала смешивание потоков воздуха и CO_2. Учитывая, что $t_в = T_в - 273,15 = 800 - 273,15 \approx 527\ ^0C$, а $t_{CO2} \approx 127\ ^0C$, определим величины $C_{P,уд,в}(0\ldots527\ ^0C)$ и $C_{P,уд,CO2}(0\ldots127\ ^0C)$:

$$C_{P,уд,в}(0...527\ ^0C) = 0,9956 + 0,000093 \cdot 527 \approx 1,0446\ \frac{кДж}{кг \cdot {}^0C};$$

$$C_{P,уд,CO2}(0...127\ ^0C) = 0,8725 + 0,0002406 \cdot 127 \approx 0,9030\ \frac{кДж}{кг \cdot {}^0C}.$$

Задав, например, $m'_в = m'_{CO2} = 0,5$ определим температуру $t'_{см}$ получаемого в этом случае двухкомпонентного потока «воздух+CO_2»:

$$t'_{см} = \frac{0,5 \cdot 1,0446 \cdot 800 + 0,5 \cdot 0,9030 \cdot 400}{0,5 \cdot 1,0446 + 0,5 \cdot 0,9030} - 273,15 \approx 341\ ^0C \approx 614\ K.$$

Полученная величина $T'_{см}$ = 614 K при заданных $m'_в$ и m'_{CO2} больше заданной $T_{см}$, что соответственно позволяет при смешивании группового двухком-

понентного потока «воздух+CO_2» с потоком O_2 получить требуемый газовый поток с заданной $T_{см}$.

Рассмотрим теперь смешивание группового двухкомпонентного потока «воздух+CO_2» с потоком O_2. Предварительно найдём температурную зависимость средней изобарной удельной теплоёмкости потока «воздух+CO_2»:

$$C_{P,уд,в+CO2}(0...t) = \sum_{1}^{2} m_i C_{P,уд,i} = 0,5(0,9956 + 0,000093t) +$$

$$0,5(0,8725 + 0,0002406t) \approx 0,9340 + 0,0001668t\,.$$

Далее определим необходимые для дальнейших расчётов величины $C_{P,уд,в\,+\,CO2}$ (0…341 ^{0}C) и $C_{P,уд,O2}$ (0…27 ^{0}C):

$$C_{P,уд,в+CO2}(0...341\ ^0C) = 0,9340 + 0,0001668 \cdot 341 \approx 0,9909\ \frac{кДж}{кг \cdot {}^0C};$$

$$C_{P,уд,O2}(0...27\ ^0C) = 0,9190 + 0,0001065 \cdot 27 \approx 0,9219\ \frac{кДж}{кг \cdot {}^0C}.$$

Учитывая, что массовый расход требуемого потока, получаемого в результате смешивания рассматриваемых на этом этапе двух потоков, группового двухкомпонентного потока «воздух+CO_2» и исходного потока O_2, должен составлять $G_{см} = 4\ кг/с$ и иметь температуру $T_{см}$ = 500 K или $t_{см}$ ≈ 227 ^{0}C определим по формуле (22) величину G_{O2}:

$$227 = \frac{G_{O2} \cdot 0,9219 \cdot 300 + \left(4 - G_{O2}\right) \cdot 0,9909 \cdot 614}{G_{O2} 0,9219 + \left(4 - G_{O2}\right) 0,9909} - 273,15, \rightarrow$$

$$\rightarrow 500\left[G_{O2} 0,9219 + \left(4 - G_{O2}\right) 0,9909\right] = 276,57 G_{O2} + 608,4126\left(4 - G_{O2}\right), \rightarrow$$

$$\rightarrow 1981,8 - 34,5 G_{O2} = 2433,6504 - 331,8426 G_{O2}, \rightarrow G_{O2} = \frac{451,8504}{297,3426} \approx 1,52\ \frac{кг}{с}.$$

Следовательно, массовый расход группового потока «воздух+CO_2» будет: $G_{в+CO2} = G_{см} - G_{O2} = 4 - 1,52 = 2,48\ \frac{кг}{с}$. Учитывая, что в потоке воздуха и CO_2 массовые доли обоих компонентов были $m'_в = m'_{CO2} = 0,5$, определим массовые расходы исходных потоков воздуха и CO_2, обеспечивающие в конечном итоге газовый поток с $G_{см} = 4\ \frac{кг}{с}$ и $T_{см}$ = 500 K:

$$G_в = m'_в G_{в+CO2} = 0,5 \cdot 2,48 = 1,24\ кг/с \text{ и } G_{CO2} = 0,5 \cdot 2,48 = 1,24\ кг/с\,.$$

Соответственно, массовые доли каждого исходного потока в получаемом при их смешивании газовом потоке с $T_{см}$ = 500 K будут:

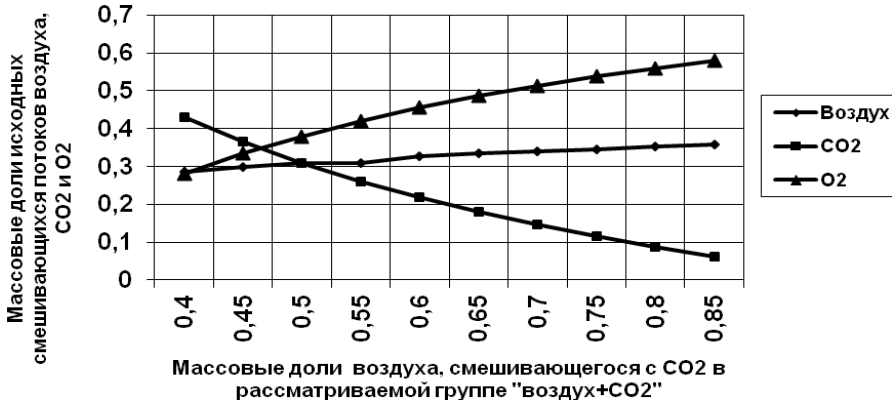

Рис. 2. Характер изменения массовых долей смешивающихся исходных потоков воздуха с температурой $T_в$ = 800 К, CO_2 с температурой T_{CO2} = 400 К O_2 с температурой T_{O2} = 300 К для получения требуемого газового потока с температурой $T_{см}$ = 500 К, в зависимости от массовой доли воздуха, смешивающегося с CO_2 в рассматриваемой группе «воздух+CO_2»

$$m_в = \frac{G_в}{G_{см}} = \frac{1,24}{4} = 0,31 = 31 \text{ мас. \%}; \quad m_{CO2} = \frac{1,24}{4} = 0,31 = 31 \text{ мас. \%}$$

$$\text{и } m_{O2} = \frac{1,52}{4} = 0,38 = 38 \text{ мас. \%}.$$

На рис. 2 представлен характер изменения массовых долей смешивающихся рассматриваемых исходных потоков воздуха, CO_2 и O_2, для получения требуемого газового потока с $T_{см}$ = 500 К в зависимости от массовой доли исходного потока воздуха, смешивающегося с исходным потоком CO_2 в рассматриваемой группе «воздух+CO_2».

Приведённые на рис. 2 графические зависимости наглядно показывают, что при отсутствии каких-либо дополнительных условий на величину, хотя бы одного из смешивающихся исходных потоков, получение требуемого газового потока с заданными параметрами реализуется в очень широком диапазоне изменения массовых долей смешивающихся исходных потоков. Характер этих графических зависимостей показывает, что увеличение массовой доли воздуха $m'_в$ в выделенной рассматриваемой группе «воздух+CO_2» приводит к увеличению массовой доли O_2 m_{O2} и уменьшению массовой доли CO_2 m_{CO2} в требуемом газовом потоке, при этом массовая доля воздуха в этом потоке $m_в$ увеличивается довольно незначительно. Такой характер зависимостей $m_В = f(m'_в)$, $m_{CO2} = f(m'_в)$ и $m_{O2} = f(m'_в)$ обусловлен не только соотношением величин $T_в$ = 800 К, T_{CO2} = 400 К, T_{O2} = 300 К и $T_{см}$ = 500 К, но и температурой $T'_{см}$ группового потока «воздух+CO_2». Если будем рассматривать смешивание двух

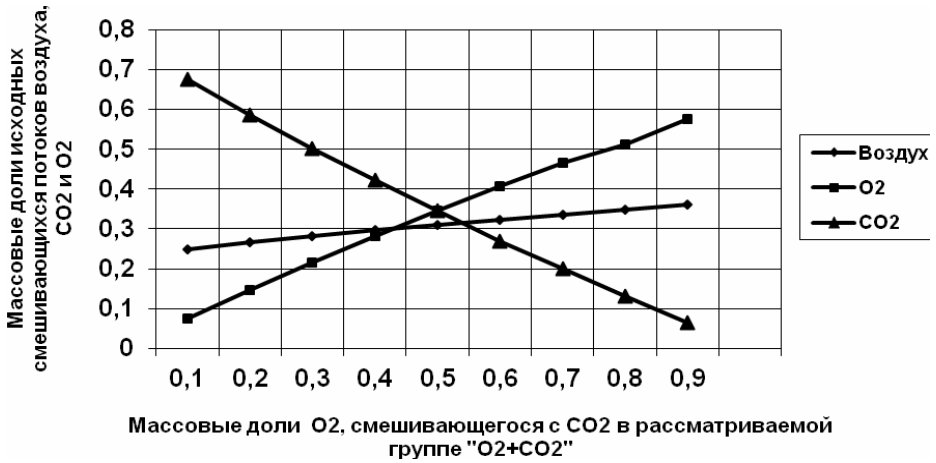

Рис. 3. Характер изменения массовых долей смешивающихся исходных потоков воздуха, CO_2 и O_2 для получения требуемого газового потока с температурой $T_{см}$ = 500 К в зависимости от массовой доли O_2, смешивающегося с CO_2 в рассматриваемой группе «O_2+CO_2»

других исходных газовых потоков в другой выделенной группе, то характер зависимостей $m_в = f(m'_в)$, $m_{CO2} = f(m'_в)$ и $m_{O2} = f(m'_в)$ будет уже несколько иным. Об этом наглядно свидетельствует представленный на рис. 3 характер изменения массовых долей смешивающихся рассматриваемых исходных потоков воздуха, CO_2 и O_2, для получения газового потока с $T_{см}$ = 500 *К* в зависимости от массовой доли потока O_2, смешивающегося с потоком CO_2 в рассматриваемой группе «O_2+CO_2».

В связи с тем, что температуры и O_2, и CO_2 меньше $T_{см}$, то диапазон изменения массовых долей O_2 и CO_2 в группе «O_2+CO_2» может изменяться в очень широких пределах (на рис. 3 представлены результаты расчётов в диапазоне изменения m'_{O2} и m'_{CO2} от 0,1 до 0,9).

Следует сказать, что минимальная величина $m'_в$ в группе «воздух+CO_2» не может быть меньше 0,225, так в этом случае температура потока, образуемого воздухом и CO_2 $T'_{см}$ становится меньше 500 *К* и следовательно температура газового потока, полученного в результате смешивания потока воздуха и CO_2 с любым количеством O_2 будет всегда меньше 500 *К*.

Следует также отметить, что в первом приближении взаимосвязи между смешивающимися исходными потоками в обоих рассмотренных случаях в принципе сохраняются (при увеличении расхода воздуха расходы O_2 и CO_2 в обоих рассмотренных примерах уменьшаются). Однако соотношения между величинами $m_в$, m_{O2} и m_{CO2} в получаемом суммарном газовом потоке уже несколько различаются. Так, например, в первом случае (рис. 2) получение газового потока с заданными параметрами может быть реализовано при $m_в = m_{O2} = 0,310$ и $m_{CO2} = 0,380$, а во втором случае (рис. 3) при тех же

$m_в = 0,310$ массовые доли O_2 и CO_2 уже несколько другие — $m_{O2} = m_{CO2} = 0,345$.

Рассмотренный численный пример наглядно показывает, что при отсутствии дополнительных условий на величины смешивающихся исходных газовых потоков, получить требуемый газовый поток с необходимыми параметрами можно в довольно широком диапазоне изменения массовых расходов исходных газовых потоков.

При смешивании четырёх исходных потоков образуются две группы, при этом исходные потоки с учётом их температуры и возможных массовых долей подбираются таким образом, чтобы температуры получаемых групповых, были, у одного больше заданной температуры $T_{см}$ требуемого газового потока, а у другого меньше. Далее, как и в рассмотренном выше примере определяются массовые расходы всех исходных потоков, обеспечивающие получение требуемого газового потока с заданной величиной $G_{см}$.

При смешивании пяти и более исходных газовых потоков принципиальных отличий в определении величин m_i и T_i предложенным алгоритмом нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Янченко Г.А.* Термодинамика. Часть 3. Энергетические характеристики термодинамических систем и процессов. Законы термодинамики: Учебное пособие. – М.: МГГУ, 2005. – 158 с.
2. *Нашокин В.В.* Техническая термодинамика и теплопередача: Учебное пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1969. — 560 с.
3. *Янченко Г.А.* Термодинамика. Часть 2. Основные свойства и параметры состояния многокомпонентных веществ. Теплоёмкость веществ и показатель адиабаты: Учебное пособие. – М.: МГГУ, 2004. – 129 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Янченко Геннадий Алексеевич — доктор технических наук, профессор, Московского государственного горного университета, ud@msmu.ru

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
(№ 951/04-13 от 28.01.13, 12 с.)
Лебедева Елена Владимировна — старший преподаватель, lebedevmail75@mail.ru, Норильский индустриальный институт.

FORECASTING OF GEOLOGICAL INDICATORS
Lebedeva Elena Vladimirovna