



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. Ф. Бондаренко, Д. О. Кузнецов, А. М. Семенов,
Приближенное уравнение состояния многокомпонентных газовых смесей, *ТВТ*, 1982, том 20, выпуск 2, 236–243

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.171

13 февраля 2025 г., 16:42:32



УДК 533.7

ПРИБЛИЖЕННОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Бондаренко В. Ф., Кузнецов Д. О., Семенов А. М.

Предлагается теоретически обоснованное приближенное уравнение состояния многокомпонентных смесей реальных газов, представляющее собой комбинацию уравнений состояния чистых компонентов и бинарных смесей, составленных из пар компонентов, входящих в рассматриваемую смесь. Сжимаемость тройных смесей газов, рассчитанная на основе полученного уравнения, сравнивается с экспериментальными данными.

Развитие теоретических методов расчета термодинамических свойств многокомпонентных смесей имеет большое значение, поскольку область их технических приложений непрерывно расширяется и не может быть по очевидным причинам обеспечена экспериментальными данными во всем требуемом диапазоне параметров состояния, концентраций и набора компонентов. Известные в настоящее время различные эмпирические и полуэмпирические методы расчета термодинамических свойств многокомпонентных газовых смесей на основе данных о чистых компонентах, как правило, ограничены либо областью параметров состояния, либо определенными классами компонентов. При этом ясно, что надежность их использования в области параметров, не обеспеченной экспериментальными данными, проблематична в силу эмпирических или полуэмпирических предпосылок, лежащих в основе этих методов [1]. В [2] сделано предположение о возможности теоретического расчета с использованием только данных о термодинамических свойствах комбинаций бинарных смесей, составляющих многокомпонентную смесь. В работах [3, 4] предложен феноменологический метод расчета калорических свойств бинарных и многокомпонентных газовых смесей по данным о свойствах компонентов и вторым смешанным вириальным коэффициентам. Указанный метод оказался достаточно точным и использован для технических расчетов свойств криогенных смесей [5].

В данной работе предлагается новый метод расчета термодинамических свойств многокомпонентных газовых смесей на основе уравнения состояния, представляющего комбинацию феноменологических уравнений состояния компонентов и бинарных смесей.

Для отыскания формы уравнения будем исходить из точного уравнения состояния смеси газов в виде вириального ряда [6]

$$\frac{1}{RT} p(T, \rho_1, \dots, \rho_m) = \sum_{i=1}^m \rho_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m B_2^{(i,j)}(T) \rho_i \rho_j + \\ + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m B_3^{(i,j,k)}(T) \rho_i \rho_j \rho_k + \dots, \quad (1)$$

где $\rho_i = M_i/V$ — мольная плотность i -го компонента; B_2 , B_3 — вириальные коэффициенты.

Давление чистого i -го вещества с плотностью ρ_i в рассматриваемой смеси

$$\frac{1}{RT} p_i(T, \rho_i) = \rho_i + B_2^{(ii)} \rho_i^2 + B_3^{(iii)} \rho_i^3 + \dots \quad (2)$$

Для бинарной смеси i - и j -газов

$$\frac{1}{RT} p_{ij}(T, \rho_i, \rho_j) = \rho_i + \rho_j + B_2^{(ii)} \rho_i^2 + 2B_2^{(ij)} \rho_i \rho_j + B_2^{(jj)} \rho_j^2 + \\ + B_3^{(iii)} \rho_i^3 + 3B_3^{(ijj)} \rho_i^2 \rho_j + 3B_3^{(jij)} \rho_i \rho_j^2 + B_3^{(jjj)} \rho_j^3 + \dots \quad (3)$$

Как видно из (2) и (3), давление любой бинарной смеси, состоящей из компонентов 1 и 2, можно по определению записать в виде

$$p_{12} = p_1 + p_2 + \Delta p_{12}, \quad (4)$$

откуда

$$\Delta p_{12} = p_{12} - p_1 - p_2. \quad (5)$$

Давление тройной смеси также по определению запишем в виде

$$p_{123} = p_1 + p_2 + p_3 + \Delta p_{12} + \Delta p_{13} + \Delta p_{23} + \Delta p_{123}, \quad (6)$$

откуда с учетом (5)

$$\Delta p_{123} = p_{123} - p_{12} - p_{13} - p_{23} + p_1 + p_2 + p_3. \quad (7)$$

Давление любой m -компонентной смеси можно записать в виде тождества

$$p_{12\dots m} = \sum_{1 \leq i \leq m} p_i + \sum_{1 \leq i < j \leq m} \Delta p_{ij} + \sum_{1 \leq i < j < k \leq m} \Delta p_{ijk} + \dots + \Delta p_{12\dots m}, \quad (8)$$

где с учетом (5), (6)

$$\Delta p_{ij} = p_{ij} - p_i - p_j; \quad \Delta p_{ijk} = p_{ijk} - p_{ij} - p_{ik} - p_{jk} + p_i + p_j + p_k \text{ и т. д.} \quad (9)$$

Уравнение (8) получено в результате перегруппировки слагаемых в (1) и представляет собой точное соотношение, в соответствии с которым давление многокомпонентной смеси выражается через давления всех «парциальных» систем, которые можно составить из входящих в смесь m -компонентов m -однокомпонентных, бинарных и т. д., включая и саму рассматриваемую m -компонентную смесь. Вообще говоря, оно не является рядом и поэтому заранее не ясно, можно ли при вычислении давления m -компонентной смеси отбросить какие-либо слагаемые в правой части (8) без существенного ущерба для точности результата.

В частности, если в (8) ограничиться учетом вклада только от однокомпонентных и бинарных систем, т. е. положить $\Delta p_{ijk} = \Delta p_{ijkl} = \dots = 0$, получим

$$p(T, \rho_1, \dots, \rho_m) \approx \sum_{1 \leq i \leq m} p_i(T, \rho_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq m} [p_{ij}(T, \rho_i, \rho_j) - \\ - p_i(T, \rho_i) + p_j(T, \rho_j)] = \sum_{1 \leq i < j \leq m} p_{ij}(T, \rho_i, \rho_j) - (m-2) \sum_{1 \leq i \leq m} p_i(T, \rho_i). \quad (10)$$

На основе уравнений (1)–(9) отброшенные слагаемые могут быть выражены через вириальные коэффициенты. С точностью до четвертого вириального коэффициента первое из них равно

$$\frac{1}{RT} \Delta p_{ijk}(T, \rho_i, \rho_j, \rho_k) = 6B_3^{(ijk)} \rho_i \rho_j \rho_k + 12B_4^{(iik)} \rho_i^2 \rho_j \rho_k + \\ + 12B_4^{(jjk)} \rho_i \rho_j^2 \rho_k + 12B_4^{(ijhk)} \rho_i \rho_j \rho_k^2 + \dots$$

Из приведенного выражения очевидно, что аппроксимация (10) исключает из давления смеси все вклады от таких взаимодействий, в которых принимают участие молекулы трех и более разных сортов.

Оценим возникающую в результате погрешность. Слагаемые со вторым вириальным коэффициентом уравнения (1) точно передаются уравнением (10), а с третьим и последующими — лишь частично: из m^3 слагаемых,

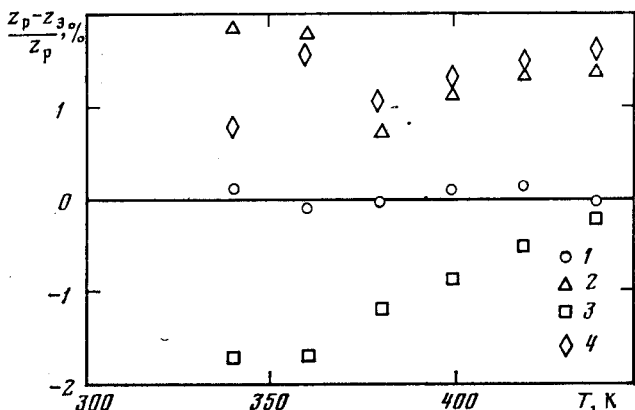


Рис. 1. Сравнение экспериментальных [11] и расчетных величин сжимаемости смеси $\text{CO}_2\text{-He-Ar}$ при $p=3,7\text{-}31,5$ МПа для x_{CO_2} и x_{He} : 1 - 0,365; 0,306; 2 - 0,376; 0,233; 3 - 0,303; 0,382; 4 - 0,322; 0,340

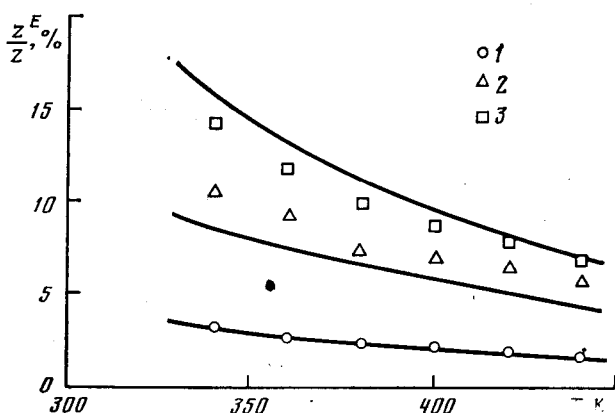


Рис. 2. Зависимость относительного эффекта смешения системы $\text{CO}_2\text{-He-Ar}$ от температуры: 1 - $v=750$ $\text{cm}^3/\text{моль}$; $x_{\text{CO}_2}=0,365$; $x_{\text{He}}=0,306$; 2 - 225; 0,367; 0,233; 3 - 125; 0,322; 0,340. Значки - опытные данные [11], кривые - расчет по уравнению (13)

содержащих третьи вириальные коэффициенты, в (10) присутствуют только $m+3m(m-1)$, учитывающие взаимодействия трех молекул одинаковых сортов $i=j=k$ и трех молекул, среди которых две одинаковые $i=j \neq k$. Взаимодействия трех различных молекул не учтены, и соответствующее число неучтенных членов в третьем вириальном коэффициенте смеси m^3-3m^2+2m .

Полагая для оценки, что вклады всех членов в B_3 смеси по порядку величин одинаковы, получим, что максимальная относительная погрешность в третьем вириальном коэффициенте смеси равна $1-3/m+2/m^2$. Для трехкомпонентной смеси ($m=3$) она равна $\sim 0,2$; для $m=4$ $\sim 0,35$; для $m=10$ $\sim 0,72$. В условиях, когда сам третий вириальный коэффициент вносит вклад $\sim 10\%$ в давление смеси, погрешность расчета давления по соотношению (10) может достигать 2-7% соответственно. Аналогично из m^4 членов четвертого вириального коэффициента не учитывается $m^4-m-4m(m-1)$ слагаемых, и относительная погрешность в четвертом вириальном коэффициенте смеси равна $1-4/m^2+3/m^3$. Для $m=4$ эта величина составляет $\sim 0,15$, а для $m=10$ $\sim 0,95$. Соответственно при вкладе B_4 смеси в давление на уровне 5% погрешность в давлении составит 0,5-5%.

Разумеется, некоторые из указанных вкладов могут компенсировать друг друга. По-видимому, это в действительности имеет место, как показывают результаты приведенных ниже сравнений с опытными данными. Тем не менее в неблагоприятных случаях расчет по соотношению (10) в

зависимости от числа компонентов смеси может приводить к погрешности $\sim 3-10\%$.

Соотношению (10) можно придать вид, более удобный для практических расчетов. Сжимаемость i -го чистого вещества с плотностью ρ_i по определению

$$z_i(T, \rho_i) = p_i(T, \rho_i) / \rho_i RT. \quad (11)$$

В уравнении (10) давление p_i , как видно из (2), должно вычисляться при плотности $\rho_i = \rho x_i$, где $x_i = \rho_i / \rho$ — мольная доля i -го компонента в смеси;

$\rho = \sum_{1 \leq i \leq m} \rho_i$ — плотность смеси. Отсюда

$$p_i(T, \rho_i) = z_i(T, \rho x_i) \rho x_i RT.$$

Сжимаемость бинарной смеси компонентов i и j при плотности ρ_{ij} и мольных долях $x = x_i$, $1-x = x_j$ по определению равна

$$z_{ij}(T, \rho_{ij}, x) = p_{ij}(T, \rho x_i, \rho x_j) / \rho_{ij} RT. \quad (12)$$

В (12) давление p_{ij} , как видно из (3), рассчитывается при плотности $\rho_{ij} = \rho(x_i + x_j)$, а состав бинарной смеси определяется мольными долями

$$x = x_i / (x_i + x_j), \quad 1-x = x_j / (x_i + x_j).$$

Отсюда

$$p_{ij}(T, \rho_i, \rho_j) = z_{ij}[T, \rho(x_i + x_j), x_i / (x_i + x_j)] \rho(x_i + x_j) RT.$$

Разделив обе части равенства (10) на ρRT , получим выражение для сжимаемости рассматриваемой многокомпонентной смеси

$$z(T, \rho, x) = \sum_{1 \leq i < j \leq m} (x_i + x_j) z_{ij}[T, \rho(x_i + x_j), x_i / (x_i + x_j)] - (m-2) \sum_{1 \leq i \leq m} x_i z_i(T, \rho x_i). \quad (13)$$

В левой части (13) x — состав смеси x_1, \dots, x_m : $z(T, \rho, x) \equiv z(T, \rho, x_1, \dots, x_m)$.

Величины сжимаемости компонентов смеси z_i и бинарных систем z_{ij} в уравнении (13) могут быть вычислены по имеющимся таблицам или уравнениям состояния.

Результаты расчета по полученному уравнению состояния (13) подтверждаются сравнением с имеющимися расчетными и экспериментальными данными по сжимаемости для систем CO_2 —He—Ar, H_2 — N_2 — CO_2 и O_2 — N_2 —Ar (воздух).

Для расчета сжимаемости смеси CO_2 —He—Ar использованы исходные данные по сжимаемости компонентов и соответствующих бинарных систем, рассчитанные по уравнениям состояния [7—10]. Среднее отклонение вычисленных по уравнению (13) величин сжимаемости смеси от экспериментальных данных [11] равно 1% в интервале давлений $p \approx 3-30$ МПа, что не превышает суммарной погрешности экспериментальных данных и использованных для вычисления z_i и z_{ij} уравнений состояния (рис. 1). Для этой системы на рис. 2 проведено сравнение вычисленных по уравнению (13) и экспериментальных значений эффекта смешения z^E

$$z^E(T, \rho, x) = z(T, \rho, x) - \sum_{1 \leq i \leq m} x_i z_i(T, \rho). \quad (14)$$

Сравниваются также рассчитанные по уравнению (13) и сглаженные экспериментальные данные по сжимаемости смеси для системы H_2 — N_2 — CO_2 [12] в интервале давлений 5—50 МПа и температур 273—473 К. Для этой системы необходимые для расчета значения сжимаемости бинарных систем CO_2 — N_2 , CO_2 — H_2 , N_2 — H_2 получены на одной и той же установке,

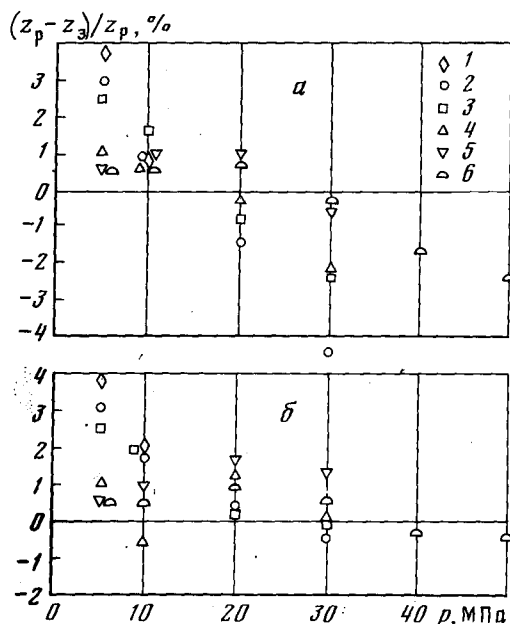


Рис. 3. Сравнение экспериментальных [12] и расчетных величин сжимаемости смеси $\text{H}_2\text{-N}_2\text{-CO}_2$ ($1-3 - x_{\text{H}_2}=0,315; x_{\text{N}_2}=0,352; 4-6 - 0,272; 0,547$): 1 - $T=273 \text{ K}$; 2 - 323; 3 - 373; 4 - 323; 5 - 373; 6 - 473; а - расчет по уравнению (13); б - расчет по уравнению Кричевского - Казарновского - Табачникова [14]

а в [13] на основе этих данных построены соответствующие уравнения состояния, которые и использованы авторами при расчете. Уравнения в [13] для смесей $\text{CO}_2\text{-N}_2$, $\text{CO}_2\text{-H}_2$ и $\text{N}_2\text{-H}_2$ описывают экспериментальные данные [12] со средней погрешностью 1,2; 0,8 и 0,7% соответственно; максимальная ошибка достигает 2,6%. Погрешность экспериментальных данных [12] оценена авторами в 0,5%.

На рис. 3 сравниваются рассчитанные по уравнению (13) и экспериментальные данные [12] (а), а также значения z , рассчитанные по эмпирическому уравнению Кричевского - Казарновского - Табачникова [14] (б), которое считается наиболее точным для многокомпонентных смесей и базируется на данных об индивидуальных веществах и бинарных смесях.

Исходя из приведенных уровней погрешности исходных расчетных и экспериментальных данных, согласие вычисленных значений z с экспериментальными следует признать удовлетворительным (рис. 3, а - среднее отклонение 1,5%, рис. 3, б - 1,1%). Обращает на себя внимание аналогичное поведение значений z , вычисленных независимыми методами, по отношению к экспериментальным данным. Это, по-видимому, свидетельствует о наличии систематической погрешности в экспериментальных данных [12], что для смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2$ подтверждается более поздними хорошо согласующимися измерениями [15-17], где показано, что данные [12] при $p=15-20 \text{ МПа}$ занижены на 1,5-2,0%.

Хороший результат получен при расчете по уравнению (13) сжимаемости газовой смеси $\text{O}_2\text{-N}_2\text{-Ar}$ (воздух) при $p=1-100 \text{ МПа}$ и $T=110-500 \text{ K}$. Рассмотрение воздуха как многокомпонентной смеси действительно необходимо: отклонение от аддитивной схемы расчета (эффект смешения) достигает здесь 8%, а упрощенное рассмотрение воздуха как бинарной смеси $\text{N}_2\text{-O}_2$ (~1% Ar заменен на O_2) приводит к погрешности 3-4%.

Исходные данные по компонентам и бинарным системам в данном случае вычислены по уравнению BWR-44 [18]. Значения характеристических констант k_{12} в уравнении BWR-44 приняты по данным [1, 19]. Точность этого уравнения для O_2 , N_2 , Ar составляет в необходимом для расчета смеси интервале параметров ~0,1-0,3%. Если принять такую же

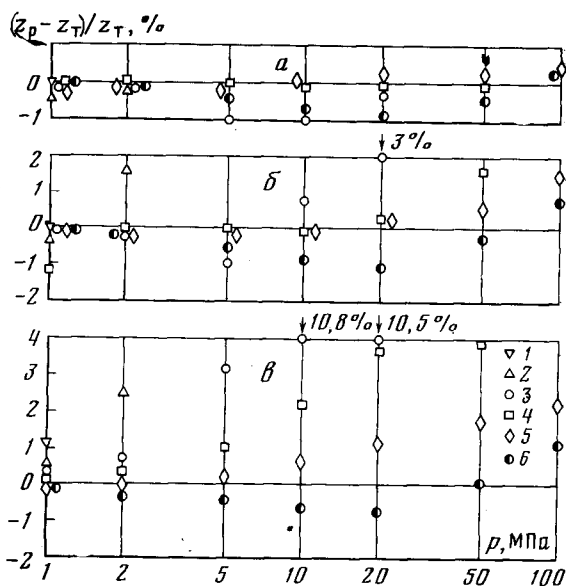


Рис. 4. Сравнение рассчитанных и табличных [20] величин сжимаемости смеси O_2-N_2-Ar (воздух): 1 — $T=110$ К; 2 — 120; 3 — 150; 4 — 200; 5 — 300; 6 — 500; а — расчет по уравнению (13); б — расчет по уравнению Кричевского — Казарновского — Табачникова [14]; в — расчет по уравнению BWR-44 [18]

точность при описании бинарных систем уравнением BWR-44, то погрешность расчета сжимаемости воздуха по уравнению (13) не должна превышать 0,5–1,5%. Как видно из рис. 4, а, эта оценка подтверждается сравнением результатов расчета с табличными данными [20, 21]. В обоих случаях средние отклонения равны 0,3%, а максимальные (вблизи критической области) 1%. Аналогичное сравнение проведено для уравнения Кричевского — Казарновского — Табачникова (рис. 4, б). Здесь среднее отклонение 0,6%, максимальное 3%.

Расчет z для O_2-N_2-Ar , выполненный непосредственно по уравнению BWR-44 [18], дает значительно худшие результаты, чем расчет по уравнению (13) (рис. 4, в). В этом случае среднее отклонение от таблиц [20, 21] 2%, а максимальное (вблизи критической области) 11%.

Таким образом, предлагаемое уравнение состояния может быть использовано для расчета многокомпонентных (начиная с тройной) газовых смесей вплоть до линий равновесия жидкость — газ с погрешностью, близкой к экспериментальной. При температурах выше критической (псевдокритической) уравнение (13) с успехом может применяться до плотностей порядка критической. Для воздуха хороший результат при повышенной температуре (500 К) получен до величины плотности, равной двум критическим.

Из уравнения состояния (13) видно, что фигурирующие в нем сжимаемости чистых компонентов z вычисляются при значениях плотности ρ_i , в $1/x$ раз меньших, чем плотность смеси ρ , а сжимаемости бинарных смесей при значениях ρ_{ij} , в $1/(x_i+x_j)$ раз меньших, чем ρ . Это означает, что в границах применимости приближения (13) сжимаемость смеси $z(T, \rho, x)$ может быть рассчитана в более широком интервале плотностей, чем в том, где имеются данные о $z_i(T, \rho_i)$ и $z_{ij}(T, \rho_{ij}, x)$ (11), (12).

Может создаться впечатление, что по мере роста числа компонентов смеси m пределы применимости уравнения состояния (13) по плотности неограниченно расширяются, или, что то же самое, при данной плотности смеси ρ с ростом m неидеальность смеси неограниченно уменьшается, так как уменьшаются мольные доли x_i , плотности ρ_i и ρ_{ij} , а тем самым сжимаемости парциальных систем z_i и z_{ij} стремятся к единице. В действительности, это результат приближенного характера уравнения (13). По

мере увеличения плотности смеси все большую роль должны играть вклады в z от третьего и старших вириальных коэффициентов, а по мере увеличения числа компонентов m эти вириальные коэффициенты все в большей мере определяются взаимодействиями разнородных молекул. Но именно эти последние и не учитываются в полной мере уравнением (13) и тем менее полно, чем больше число компонентов в смеси. Как показывают проведенные при выводе (13) оценки, в случае $m \gg 1$ можно считать, что старшие вириальные коэффициенты, начиная с B_3 , в (13) фактически не учитываются. Поэтому в действительности качество уравнения (13) должно не улучшаться, а, напротив, ухудшаться по мере роста ρ и m . Однако, как показывают приведенные выше результаты расчетов, при не слишком больших m и умеренных плотностях точность уравнения (13) оказывается вполне приемлемой, и его можно рекомендовать для практических расчетов.

Отметим, что необходимые для расчетов по предложенной методике данные о компонентах и бинарных смесях в настоящее время имеются для достаточно большого набора веществ. Для многих чистых компонентов составлены высокоточные уравнения состояния, например, [7, 20, 24] для ряда бинарных смесей также имеются уравнения состояния [8–10] или накоплены экспериментальные данные, позволяющие такие уравнения построить [22, 23]. Напротив, экспериментальные данные для многокомпонентных смесей немногочисленны и носят отрывочный характер. Это придает большую актуальность проблеме разработки методов расчета свойств многокомпонентных смесей. Одна из попыток подобного рода и представлена в данной работе.

ВНИИ метрологической службы
Московский энергетический институт

Поступила в редакцию
23.II.1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Prausnitz J. M. *Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliff, New Jersey, 1969.
2. Rowlinson J. S., Leland T. W., Sather G. A. *Statistical Thermodynamics of Mixtures of Molecules of Different Sizes.*— Trans. Farad Soc., 1968, v. 64, p. 1447.
3. Алтунин В. В., Бондаренко В. Ф., Кузнецов Д. О. Феноменологический метод расчета энтальпии сжатых газовых смесей.— ТВТ, 1974, т. 13, № 6, с. 1177.
4. Бондаренко В. Ф. Экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование calorических свойств сжатых газовых смесей: Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1975.
5. Боярский М. Ю., Носов Н. И. Определение холодопроизводительности дроссельных систем на смесях при использовании теплового эффекта смешения. Тр. МЭИ, вып. 347, 1977, с. 24.
6. Мейсон Э., Сперлинг Т. *Вириальное уравнение состояния*. М.: Мир, 1972.
7. Алтунин В. В. *Теплофизические свойства двуокиси углерода*. М.: Изд-во стандартов, 1975.
8. Алтунин В. В., Сычев Е. Н. Построение уравнений состояния газовых смесей на ЭЦВМ.— Тр. МЭИ, 1976, вып. 313, с. 11.
9. Алтунин В. В., Сычев Е. Н. Уравнения состояния бинарных растворов двуокиси углерода, аргона, азота.— Тр. МЭИ, 1977, вып. 336, с. 35.
10. Сычев Е. Н. Исследование методов построения уравнения состояния плотных газовых растворов на основе обработки опытных данных с применением ЭЦВМ. Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1977.
11. Алексеев Г. П. Экспериментальное исследование термических свойств газовых смесей. Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. Одесса: ОТИХП, 1975.
12. Кричевский И. Р., Марков В. П. Сжимаемость газовых смесей. I. Данные $P-V-T$ для двойных и тройных смесей водорода, азота и углекислого газа.— ЖФХ, 1940, т. 4, № 1, с. 101.
13. Марков В. П. Сжимаемость газовых смесей. II. Проверка уравнений состояния для газовых смесей.— ЖФХ, 1941, т. 15, № 3, с. 410.
14. Табачников А. Г. Термодинамические свойства химически реагирующих реальных газовых систем. Автореф. дис. на соискание уч. ст. докт. техн. наук. Одесса: ОТИХП, 1971.
15. Алтунин В. В., До Хак Чинь. Термические свойства газовой смеси CO_2-N_2 при повышенных давлениях.— Тр. МЭИ, 1972, вып. 3, с. 64.
16. Ривкин С. Л. Экспериментальное исследование сжимаемости газов. Азот и смеси азота и двуокиси углерода.— В кн.: Теплофизические свойства веществ и материалов. Вып. 8. М.: Изд-во стандартов, 1975, с. 190.

17. *Haney R., Bliss H.* Compressibilities of Nitrogen-Carbon Dioxide Mixtures.— *Ind. Eng. Chem.*, 1944, v. 36, p. 985.
18. *Yamada T.* Improved Generalized Equation of State.— *AIChE Journal*, 1973, v. 19, N 2, p. 286.
19. *Hiza M. J., Duncan A. G.* A Correlation for the Prediction of Interaction Energy Parameters for Mixtures of Small Molecules.— *AIChE Journal*, 1970, v. 16, N 5, p. 733.
20. *Вассерман А. А., Казавчинский Я. З., Рабинович В. А.* Теплофизические свойства воздуха и его компонентов. М.: Наука, 1966.
21. *Сычев В. В., Вассерман А. А., Козлов А. Д. и др.* Термодинамические свойства воздуха. М.: Изд-во стандартов, 1978.
22. *Hiza M. J., Kidnay A. J., Millar R. C.* Equilibrium Properties of Cryogenic Interest. NSRDS Bibliographis Series. IFI Plenum. New York — Washington — London, 1975.
23. *Алтуни В. В., Бондаренко В. Ф., Кузнецов Д. О., Сычев Е. Н.* Современное состояние исследований термодинамических эффектов смешения сжатых газов. Обзорная информация, ГСССД, М., 1977.