

Глава 6. Азот, кислород и воздух

6.1. Имеющийся справочный материал

В настоящий справочник помещены результаты обобщений, которые базируются на совместном статистическом анализе большого количества экспериментальных данных о термических, калорических и акустических свойствах, а также о коэффициентах вязкости и теплопроводности азота, кислорода и воздуха в газообразном, жидком состоянии, а также на кривой сосуществования жидкости и газа. На этой основе были разработаны стандартные справочные данные о термодинамических свойствах и коэффициентах переноса указанных веществ (см. блок ГСССД).

GSSSD

6.2. Термодинамические свойства

Обобщение экспериментальных данных о термодинамических свойствах азота, кислорода и воздуха было выполнено в [6.1–6.3] с использованием эмпирического многоконстантного уравнения «полиномиального» типа, связывающего давление p вещества в газообразном и жидком состоянии с температурой T и плотностью ρ и содержащего несколько десятков «подгоночных» параметров. Для азота и кислорода это уравнение состояния является «единым», т.е. не только описывает свойства вещества в однофазном состоянии, но и предсказывает параметры фазового равновесия газ – жидкость — давление (упругость) насыщенного пара $p_s(T)$ и ортобарические плотности — кипящей жидкости $\rho(T)$ и сухого насыщенного пара $\rho''(T)$. Такое же уравнение (но, разумеется, с другими константами) описано в главе 7 (раздел 7.2) настоящего справочника применительно к диоксиду углерода (7.1). Там же изложены основы его применения для разработки справочных данных о термодинамических свойствах веществ.

Воздух является многокомпонентной смесью, содержащей 68% (массовых) азота, 29% кислорода, а также, в меньших количествах, ряд других веществ [6.3]. Для расчёта термодинамических свойств смесей заданного постоянного состава в однофазных состояниях уравнение состояния (7.1) пригодно в той же мере, что и для чистых веществ. Однако процедура расчёта фазовых равновесий в смесях оказывается существенно иной, чем для индивидуальных веществ, и для её реализации необходимо располагать явной зависимостью давления от состава смеси. Таких данных в [6.3] нет, а предлагаемая там схема расчёта процессов парообразования и конденсации воздуха на основе уравнения состояния методически ошибочна (хотя, возможно, и позволяет описывать такие процессы в воздухе с приемлемой для практики точностью). Поэтому в настоящем справочнике данные о термодинамических свойствах воздуха, в отличие от его компонентов, предлагаются только в однофазных областях жидкости и газа.

Стандартные термодинамические функции, требующиеся для вычисления энтальпии, энтропии, теплоёмкостей и других термодинамических свойств вещества, рассчитываются по известным термодинамическим соотношениям, исходя из формулы, аппроксимирующей температурную зависимость стандартной изобарной теплоёмкости $c_p^\circ(T)$ (см. раздел 7.2).

Построенные в [6.1–6.3] уравнения состояния азота, кислорода и воздуха содержат соответственно 58, 41 и 50 «подгоночных» констант. Кроме того, температурные зависимости стандартной теплоёмкости указанных веществ включают соответственно 13, 15 и 13 эмпирических постоянных.

Справочные данные о термодинамических свойствах азота представлены в настоящем справочнике в диапазоне температур от 65 до 1500 К, кислорода — от 55 до 1500 К, воздуха — от 60 до 1500 К при давлениях от 0.1 до 100 МПа для всех перечисленных веществ. Погрешность данных о плотности — 0.2–0.3%, энтальпии — 0.2–1% при невысоких и до 4% при высоких температурах и давлениях, энтропии — до 0.5%, изобарной теплоёмкости — не более 1% при температурах выше 100 К и 5 % при более низких температурах.

Таблица 6.1. Значения принятых постоянных

Для расчета термодинамических свойств надо вызвать программу

POLINOM

6.3. Переносные свойства

6.3.1. Азот. Основой для составления таблиц переносных свойств азота явились данные работы [6.4], а также результаты экспериментальных исследований, перечень которых и краткий анализ приведены в работе [6.5].

Измерения коэффициента динамической вязкости азота проводились в диапазонах температур 66 – 873 К при давлениях свыше 200 МПа. При температурах выше 873 К в настоящее время опытных данных нет. Поэтому при составлении уравнений вязкости и таблиц вязкости азота для высоких температур были использованы расчетно-теоретические значения, полученные в работе [6.6] для температур 500 – 2000 К и давлений до 250 МПа, а также рассчитанные по теоретически обоснованному вязкостному вириальному уравнению [6.7] в области температур 500 – 2500 К и давлений до 225 МПа. Относительная погрешность этих значений принимается равной 3% и 5% соответственно.

Измерения коэффициента теплопроводности азота проводились в диапазоне температур 70 – 973 К и давлений свыше 100 МПа. В области высоких температур, где опытные данные отсутствуют, использовались вычисленные по теоретически обоснованному теплопроводностному вириальному уравнению [6.7] значения теплопроводности в диапазоне температур 500 – 2500 К для значений плотности до 220 кг/м³.

Таблица 6.2. Переносные свойства азота в однофазной области.

6.3.2. Кислород. Основой для составления таблиц значений переносных свойств являются данные из работы [6.8] и данные работ, перечень которых приведен в [6.9].

Измерения динамической вязкости кислорода проводились в диапазонах температур от 75 до 722 К при давлениях до 80 МПа. Краткий анализ экспериментальных данных, полученных в этих работах, приведен в [6.9]. При подготовке таблиц для высоких температур, где отсутствуют экспериментальные данные по вязкости кислорода,

использовались расчетно-теоретические значения, полученные в работе [6.6] для температур 700 – 1500 К и давлений до 100 МПа, а также вычисленные по теоретически обоснованному вязкостному уравнению [6.7] значения отношения полной вязкости к вязкости разреженного кислорода в той же области температур и плотностей до 250 кг/м³. Погрешность данных в обоих случаях принималась равной 4%.

Измерения теплопроводности кислорода проводились в диапазоне температур от 73 до 373 К и давлений до 70 Мпа. Перечень этих работ и краткий анализ экспериментальных данных по теплопроводности кислорода приведены в работе [6.9]. В области высоких температур, где опытные данные отсутствуют, использовались вычисленные по теоретически обоснованному теплопроводностному вириальному уравнению [6.7] значения отношений теплопроводности к теплопроводности разреженного кислорода в диапазоне температур 400 – 1500 К и плотности до 250 кг/м³.

Таблица 6.3. Переносные свойства кислорода в однофазной области.

6.3.3. Воздух. Основой для составления таблиц переносных свойств воздуха явились перечисленные в [6.10] экспериментальные и расчетные данные воздуха, опубликованные в печати. Подробный анализ результатов измерений вязкости и теплопроводности газообразного и жидкого воздуха выполнен в работе [6.11]. В этой же работе получены уравнения и рассчитаны коэффициенты вязкости и теплопроводности воздуха в газовой фазе в области температур 85 – 2000 К и давлений до 100 МПа. Однако, в связи с полным отсутствием статистических характеристик полученных уравнений и табличных значений был приведен более полный анализ данных в работе [6.10], при котором, кроме данных, обработанных в [6.11], использовались многочисленные измерения вязкости и теплопроводности воздуха, охватывающие широкую область температур и давлений.

Таблица 6.4. Переносные свойства воздуха в однофазной области.

Литература к главе 6

- 6.1. Сычёв В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д., Спиридонов Г.А., Цымарный В.А. Термодинамические свойства азота. М.: Изд-во стандартов, 1977.
- 6.2. Сычёв В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д., Спиридонов Г.А., Цымарный В.А. Термодинамические свойства кислорода. М.: Изд-во стандартов, 1981.
- 6.3. Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д., Спиридонов Г.А., Цымарный В.А. Термодинамические свойства воздуха и его компонентов. М.: Изд-во стандартов, 1978.
- 6.4. ГСССД 49-83. Азот. Второй вириальный коэффициент, коэффициенты динамической вязкости, теплопроводности и число Прандтля разреженного газа в диапазоне температур 65...2500 К. Таблицы стандартных справочных данных. /Вигасин А.А., Люстерник В.Е., Фокин Л.Р. М.: Изд-во стандартов, 1984.
- 6.5. ГСССД 89-85. Азот. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 65...1000 К и давлениях от соответствующих разреженному газу до 200 МПа. Таблицы стандартных справочных данных. /Козлов А.Д., Кузнецов В.М. и др. М.: Изд-во стандартов, 1986.
- 6.6. Воронин М.П. Аналитическое описание диаграмм вязкости технически важных газов в широком диапазоне изменения параметров состояния. Автореф. дисс. канд. техн. наук, Москва, 1984.
- 6.7. Кузнецов В.М. Разработка метода совместной обработки опытных данных и применение его для получения согласованных уравнений равновесных и неравновесных свойств умеренно сжатых газов. Автореф. дисс. канд. техн. наук, Москва, 1980.
- 6.8. ГСССД Р1-79. Кислород. Второй вириальный коэффициент и коэффициенты динамической вязкости, теплопроводности, самодиффузии и термодиффузии при атмосферном давлении в интервале температур 70...2000 К. Таблицы стандартных справочных данных. /Люстерник В.Е., Фокин Л.Р. Деп. во ВНИИ-КИ 12 мая 1980 г. №37.
- 6.9. ГСССД 93-86. Кислород. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 70...500 К и давлениях от соответствующих разреженному газу до 100 МПа. Таблицы стандартных справочных данных. /Козлов А.Д., Кузнецов В.М. и др. М.: Изд-во стандартов, 1986.
- 6.10. ГСССД 109-87. Воздух сухой. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 150...1000 К и давлениях от соответствующих разреженному газу до 100 МПа. Таблицы стандартных справочных данных. /Козлов А.Д., Кузнецов В.М. и др. М.: Изд-во стандартов, 1988.
- 6.11. Kadoya K., Matsunaga N., Nagashima A. Viscosity and thermal conductivity of dry air in the gaseous phase. J. Phys. Chem. Ref. Data 1985, V. 14, №4, p. 947.