

М. П. ВУКАЛОВИЧ, В. А. КИРИЛЛИН, С. А. РЕМИЗОВ
В. С. СИЛЕЦКИЙ, В. Н. ТИМОФЕЕВ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ГАЗОВ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ

М. П. ВУКАЛОВИЧ, В. А. КИРИЛЛИН, С. А. РЕМИЗОВ,
В. С. СИЛЕЦКИЙ, В. Н. ТИМОФЕЕВ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ

*Допущено Министерством высшего образования СССР
в качестве учебного пособия
для высших теплотехнических учебных заведений
и факультетов*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ И СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1953

В книге изложены теория и метод расчета термодинамических величин газов, приведенных к идеальному состоянию, по данным спектроскопического эксперимента, а также даны табличные материалы по теплоемкостям, энтропии и энтальпии одно-, двух- и трехатомных газов неорганического состава и большого числа углеводородов; приведены также значения указанных величин* для типичных газообразных топлив, их продуктов сгорания и продуктов сгорания бензина при различных избытках воздуха.

Кроме того, в книге приведены наиболее достоверные экспериментальные данные по теплопроводности и вязкости ряда технически важных газов.

Книга является учебным пособием для студентов высших теплотехнических учебных заведений и факультетов, а также будет весьма полезна для широкого круга научных работников и инженеров-теплотехников, работающих в проектных организациях, на машиностроительных заводах и на эксплуатации тепловых электростанций.

Рецензенты проф. А. С. Ястржембский и проф. М. В. Носов

Редактор инж. К. А. Пономарева

*Редакция литературы по автотракторной промышленности
Зав. редакцией инж. В. В. БРОКШ*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Принятые на XIX съезде Коммунистической партии Советского Союза директивы по пятому пятилетнему плану ставят перед работниками науки и техники грандиозные задачи по новому, невиданному в истории, развитию всех отраслей промышленности и сельского хозяйства. Одной из наиболее важных отраслей нашего народного хозяйства является энергетика. Поэтому в директивах по новому пятилетнему плану намечено к 1955 г. увеличить производство электроэнергии на 80% по сравнению с 1950 г. При этом мощность тепловых электростанций должна увеличиться примерно в 2 раза. Совершенно ясно, что развитие тепловых электростанций должно проводиться на базе последних достижений науки и техники.

Одним из важнейших условий для этого является наличие надежных исходных данных для проведения различных теплотехнических расчетов тепловых машин.

До последнего времени в этих расчетах применялись уже до некоторой степени устаревшие данные по термодинамическим свойствам газов. Однако достижения науки и в первую очередь спектроскопии позволяют в настоящее время дать нашей промышленности вполне достоверные исходные расчетные данные.

Предлагаемая книга „Термодинамические свойства газов“ по замыслу авторов должна способствовать выполнению этой задачи.

В первой части книги даны основные сведения по теории и методам расчета величин, характеризующих термодинамические свойства газов, приведенных к идеальному состоянию. Изложение ведется на базе современной квантово-статистической теории с применением новейших спектроскопических величин. Рассмотрен также вопрос о влиянии давления на термодинамические величины.

Во второй части книги приведены табличные материалы по теплоемкостям, энтальпиям и энтропиям одно-, двух- и трехатомных газов неорганического состава и большого числа углеводородов, приведенных к идеальному состоянию.

Для удобства пользования табличным материалом при выполнении тепловых расчетов различных тепловых двигателей приведены также значения указанных величин для основных газообразных топлив, их продуктов сгорания и продуктов сгорания бензина, для которых эти величины даны при различных избытках воздуха.

Все значения термодинамических величин даны для требуемых в практике температур. При этом температурный интервал таблиц выбран так, чтобы внутри него была допустима линейная интерполяция табличных величин.

Для выполнения термохимических расчетов в книге приведены также абсолютные (отсчитанные от нуля абсолютной температурной шкалы) значения энтальпии, энтропии, а также значения тепловых эффектов реакций для основных газов при 0°С.

Во второй части также приведены наиболее надежные опытные данные по теплопроводности и вязкости технически важных газов.

Табличные данные для большинства практических случаев могут быть использованы непосредственно, без какой-либо корректировки на давление. В отдельных же случаях табличные значения можно уточнять по рекомендациям, приведенным в первой части книги.

Изложенный в книге метод вычисления термодинамических величин газов разработан В. Н. Тимофеевым с участием других соавторов. Им же собран справочный материал по спектроскопическим константам газов, приведенный в приложении к данной книге.

Настоящая работа призвана удовлетворить запросы весьма широкого круга инженерно-технических и научных работников.

Авторы примут с благодарностью критику и пожелания читателей.

АВТОРЫ

ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН

- $t^{\circ}\text{C}$ — температура, выраженная в градусах стогоградусной шкалы
 $T = t + 273,16^{\circ}$ абс — температура, выраженная в градусах абсолютной шкалы
 P кг/м² — давление газа
 p кг/см² — давление газа
 v м³/кг — удельный объем газа
 γ кг/м³ — удельный вес газа
 γ_0 кг/н.м³ — удельный вес газа при нормальных условиях ($p = 760$ мм рт. ст., $t = 0^{\circ}\text{C}$)
 V м³ — объем газа
 μ — молекулярный вес
 μR ккал/моль град — газовая постоянная, отнесенная к одному молю газа
 A ккал/кгм — тепловой эквивалент механической работы
 $\mu v = 22,4143$ н.м³/моль — объем одного моля идеального газа
 μc_p ккал/моль град — истинная мольная теплоемкость при постоянном давлении
 μc_v ккал/моль град — истинная мольная теплоемкость при постоянном объеме
 μc_{pm} ккал/моль град — средняя мольная теплоемкость при постоянном давлении от 0°C до $t^{\circ}\text{C}$
 μc_{vm} ккал/моль град — средняя мольная теплоемкость при постоянном объеме от 0°C до $t^{\circ}\text{C}$
 c_p ккал/кг град — истинная весовая теплоемкость при постоянном давлении
 c_v ккал/кг град — истинная весовая теплоемкость при постоянном объеме
 c_{pm} ккал/кг град — средняя весовая теплоемкость при постоянном давлении от 0°C до $t^{\circ}\text{C}$
 c_{vm} ккал/кг град — средняя весовая теплоемкость при постоянном объеме от 0°C до $t^{\circ}\text{C}$
 c'_p ккал/н.м³ град — истинная объемная теплоемкость при постоянном давлении
 c'_v ккал/н.м³ град — истинная объемная теплоемкость при постоянном объеме
 c'_{pm} ккал/н.м³ град — средняя объемная теплоемкость при постоянном давлении от 0°C до $t^{\circ}\text{C}$
 c'_{vm} ккал/н.м³ град — средняя объемная теплоемкость при постоянном объеме от 0°C до $t^{\circ}\text{C}$

$\mu i = \mu c_{pm} t$ ккал/моль — энтальпия, отнесенная к одному молю газа, отсчитанная от 0°C

$i = c_{pm} t$ ккал/кг — энтальпия, отнесенная к одному килограмму газа, отсчитанная от 0°C

$i' = c'_{pm} t$ ккал/н.м³ — энтальпия, отнесенная к одному нормальному кубическому метру газа, отсчитанная от 0°C

$\mu I_{273,16}$ ккал/моль — абсолютное значение энтальпии, отнесенной к одному молю газа, при $273,16^\circ$ абс. (0°C)

$I_{273,16}$ ккал/кг — абсолютное значение энтальпии, отнесенной к одному килограмму газа, при $273,16^\circ$ абс. (0°C)

$I'_{273,16}$ ккал/н.м³ — абсолютное значение энтальпии, отнесенной к одному нормальному кубическому метру газа, при $273,16^\circ$ абс. (0°C)

μS ккал/моль град — энтропия, отнесенная к одному молю газа, отсчитанная от 0°C

S ккал/кг град — энтропия, отнесенная к одному килограмму газа, отсчитанная от 0°C

S' ккал/н.м³ град — энтропия, отнесенная к одному нормальному кубическому метру газа, отсчитанная от 0°C

$\mu S_{273,16}$ ккал/моль — абсолютное значение энтропии, отнесенной к одному молю газа, при $273,16^\circ$ абс. (0°C)

$S'_{273,16}$ ккал/н.м³ град — абсолютное значение энтропии, отнесенной к одному нормальному кубическому метру газа при $273,16^\circ$ абс. (0°C)

r_i — объемная доля i -го газа в смеси газов

α — коэффициент избытка воздуха

V_0 н.м³/н.м³ — объем воздуха, приведенный к нормальным условиям, теоретически необходимый для сгорания одного нормального кубического метра горючего газа

$(c'_p)_{пр. сг (топ)} = \sum V_z (c'_p)_z$ ккал/н.м³ топ. град — истинная объемная теплоемкость при постоянном давлении для продуктов сгорания горючего газа, отнесенная к одному нормальному кубическому метру горючего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

$(c'_v)_{пр. сг (топ)} = \sum V_z (c'_v)_z$ ккал/н.м³ топ. град — истинная объемная теплоемкость при постоянном объеме для продуктов сгорания горючего газа, отнесенная к одному нормальному кубическому метру горючего газа при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

$(c'_{pm})_{np. c_2 (mon)} = \sum V_2 (c'_{pm})_2 \text{ ккал/нм}^3 \text{ топ. град}$ — средняя объемная теплоемкость при постоянном давлении для продуктов сгорания горючего газа, отнесенная к одному нормальному кубическому метру горючего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

$(c'_{vm})_{np. c_2 (mon)} = \sum V_2 (c'_{vm})_2 \text{ ккал/нм}^3 \text{ топ. град}$ — средняя объемная теплоемкость при постоянном объеме для продуктов сгорания горючего газа, отнесенная к одному нормальному кубическому метру горючего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

$(c'_p)_{\text{в} (mon)} = V_0 (c'_p)_{\text{в}} \text{ ккал/нм}^3 \text{ топ. град}$ — истинная объемная теплоемкость при постоянном давлении для воздуха, отнесенная к одному нормальному кубическому метру горючего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

$(c'_v)_{\text{в} (mon)} = V_0 (c'_v)_{\text{в}} \text{ ккал/нм}^3 \text{ топ. град}$ — истинная объемная теплоемкость при постоянном объеме для воздуха, отнесенная к одному нормальному кубическому метру горючего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

$(c'_{pm})_{\text{в} (mon)} = V_0 (c'_{pm})_{\text{в}} \text{ ккал/нм}^3 \text{ топ. град}$ — средняя объемная теплоемкость при постоянном давлении для воздуха, отнесенная к одному нормальному кубическому метру горючего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

$(c'_{vm})_{\text{в} (mon)} = V_0 (c'_{vm})_{\text{в}} \text{ ккал/нм}^3 \text{ топ. град}$ — средняя объемная теплоемкость при постоянном объеме для воздуха, отнесенная к одному нормальному кубическому метру горючего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

$i'_{np. c_2 (mon)} = [\sum V_2 (c'_{pm})_2] t \text{ ккал/нм}^3 \text{ топ}$ — энтальпия продуктов сгорания горючего газа, отсчитанная от 0°C , отнесенная к одному нормальному кубическому метру горючего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

$i'_{\text{в} (mon)} = V_0 (c'_{pm})_{\text{в}} t \text{ ккал/нм}^3 \text{ топ}$ — энтальпия воздуха, отсчитанная от 0°C , отнесенная к одному нормальному кубическому метру горючего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

$S'_{np. c_2 (mon)} = \sum V_2 S'_2 \text{ ккал/нм}^3 \text{ топ. град}$ — энтропия продуктов сгорания горючего газа, отсчитанная от 0°C , отнесенная к одному нормальному кубическому метру горючего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

$S'_v(\text{тон}) = V_0 S'_v$ ккал/н.м³тон. град — энтропия воздуха, отсчитанная от 0°С, отнесенная к одному нормальному кубическому метру горячего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

η кг/м сек — коэффициент динамической вязкости газа

ν м²/сек — коэффициент кинематической вязкости газа

λ ккал/м час град — коэффициент теплопроводности газа.

ВВЕДЕНИЕ

Для точного расчета тепловых двигателей, котельных установок и других тепловых машин и агрегатов необходимо располагать таблицами теплоемкостей, энтальпии (теплосодержания) и энтропии для большого числа газов, важных в техническом отношении. Составление таких таблиц является весьма нужным для техники.

Длительное время в теплотехнических расчетах пользовались, как правило, неточными значениями теплоемкостей, а следовательно, также неточными значениями энтальпии и энтропии. Чаще всего значение теплоемкостей определяли при помощи приближенных формул, предложенных различными авторами. Как было установлено в дальнейшем, все эти формулы являются неточными, и при использовании их в расчетах появляются существенные ошибки.

За последние двадцать лет в технике постепенно начали применять таблицы теплоемкостей различных газов, полученные на основе квантовой механики, статистической термодинамики и данных спектроскопического эксперимента.

Известным этапом в этом вопросе явилось издание в 1938 г. книги Д. О. Чернобаева и А. Г. Животовского „Теплоемкость газов“¹. В этой книге были приведены значения теплоемкостей в их зависимости от температуры для двадцати газов.

Дальнейшие успехи теории и главным образом новые экспериментальные работы в области спектроскопического эксперимента позволяют уточнить определяемые значения теплоемкостей, расширить температурный интервал таблиц и номенклатуру газов, для которых такие таблицы могут быть составлены.

Советский Союз является наиболее передовой страной в области теплотехники и энергомашиностроения. Советские инженеры и ученые, успешно работающие над созданием наиболее совершенных тепловых двигателей и агрегатов, особенно нуждаются в точных данных по термодинамическим свойствам различных веществ. Для получения этих данных целые лаборатории и институты, в числе которых можно назвать Энергетический институт им. акад. Г. М. Кржижановского Академии наук СССР и ряд других институтов и лабораторий Академии наук СССР, Институт азотной промышленности, Институт им. Карпова, Московский энергетический институт им. В. М. Молотова, Всесоюзный теплотехнический институт им. Ф. Э. Дзержинского, Центральный котло-турбинный институт им. И. И. Ползунова, — работают над исследованием термодинамических свойств важных для техники веществ.

Большие работы по исследованию свойств водяного пара в области высоких и сверхвысоких давлений и температур проведены и проводятся в МЭИ им. В. М. Молотова и ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского. Проведены многочисленные исследования по определению термодинамических величин газов, важных в техническом отношении, на основании спектроскопического эксперимента с использованием математического аппарата теории квант и статистической термодинамики. Из работ, посвященных этому последнему вопросу, можно прежде всего отметить открытие в 1928 г. советскими физиками академиками Г. С. Лансбергом и

¹ Д. О. Чернобаев и А. Г. Животовский, Теплоемкость газов, изд. АН УССР, Киев, 1938.

Л. И. Мандельштамом явления комбинационного рассеяния света, позволившего получить огромное количество различных данных по колебательным спектрам молекул.

В настоящее время советскими учеными проведены большие экспериментальные и теоретические исследования как в области квантовой механики, так и спектроскопии, а также работы по применению этих данных к расчету термодинамических функций и констант химического равновесия, в результате которых были получены весьма важные для практики результаты. С выполнением этих работ связаны имена советских ученых: В. Н. Кондратьева, М. А. Ельяшевича, Б. И. Степанова, Л. С. Маянца, М. В. Волькенштейна, А. В. Фроста, Я. И. Герасимова, И. М. Годнева, Я. К. Сыркина и др.

Однако положение с табличным материалом по термодинамическим свойствам газов все еще до последнего времени оставалось неудовлетворительным. Большая часть теплотехников до сих пор пользуется спектральными значениями теплоемкостей, опубликованными Чернобаевым и Животовским. Но эти данные также устарели, так как после их опубликования появились новые работы по спектроскопическому эксперименту, а метод подсчета теплоемкостей, использованный в указанных работах, недостаточно точен.

Такое ненормальное положение сложилось потому, что не было разработано единой методики определения теплоемкостей по данным спектроскопического анализа, обеспечивающей достаточно высокую точность вычислений. Не было разработано и издано точных таблиц термодинамических величин для всех или хотя бы большинства газов, для которых имеются надежные спектроскопические константы. Именно такую задачу и поставили перед собой авторы данной книги.

Авторам удалось разработать метод определения термодинамических функций газов, позволяющий сравнительно простым путем с помощью вспомогательных таблиц получать точный и надежный результат.

Как известно, вычисленные на основании спектроскопических данных термодинамические величины справедливы для газов, приведенных к идеальному состоянию, т. е. эти термодинамические величины являются функциями только температуры и не зависят от давления. Однако для большого числа случаев влияние давления настолько мало, что им вполне можно пренебречь. Поэтому приводимые данные имеют большой практический интерес и могут быть непосредственно использованы в различных теплотехнических и термохимических расчетах.

В тех же случаях, когда влиянием давления пренебречь нельзя, в табличные величины может быть введена поправка в соответствии с рекомендациями, приведенными в тексте книги.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ТЕОРИЯ И МЕТОД
ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН ГАЗОВ

1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СООТНОШЕНИЯ

1. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ

Теплоемкость является одной из наиболее важных термодинамических величин, характеризующих различные вещества.

Под теплоемкостью понимают количество тепла, необходимое для изменения температуры единицы массы вещества на 1° в каком-либо процессе. Если при изменении температуры единицы массы вещества от t_1 до t_2 требуется подвести или отнять Q единиц тепла, то величина

$$c_m = \frac{Q}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

и будет теплоемкостью тела.

Если разность температур будет очень мала, то в пределе можно написать

$$c = \frac{dQ}{dt}; \quad (2)$$

это будет теплоемкость тела при данной температуре t .

Обычно величину c_m называют *средней теплоемкостью*, а c — *истинной теплоемкостью*.

Как видно из самого определения величин, между истинной и средней теплоемкостью существует соотношение

$$c_m = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c dt}{t_2 - t_1}.$$

Обычно при составлении различных таблиц теплоемкостей пределы интегрирования принимают $t_1 = 0$ и $t_2 = t$. В этом случае

$$c_m = \frac{\int_0^t c dt}{t},$$

где t — температура по стогоградусной шкале ($t^\circ\text{C}$).

Если за единицу вещества принять 1 моль, т. е. количество килограммов вещества, равное по величине его молекулярному весу, то такая теплоемкость называется *мольной* и обычно обозначается через μc .

Если за единицу вещества принять 1 кг, то такая теплоемкость называется *весовой* и обозначается обычно через c . Очевидно, что весовая теплоемкость будет равна мольной, деленной на молекулярный вес, т. е.

$$c = \frac{\mu c}{\mu} \text{ ккал/кг град.} \quad (3)$$

И, наконец, для газов получило распространение понятие *объемной* теплоемкости, при определении которой принята единица количества вещества, равная 1 м³ газа при нормальных условиях, т. е. при давлении 760 мм рт. ст. и темпера-

туре 0°C . Эта теплоемкость обозначается через c' . При этом объемная теплоемкость будет равна мольной, деленной на объем моля при нормальных условиях, т. е.

$$c' = \frac{\mu c}{\mu v_0} \text{ ккал/н.м}^3\text{град.} \quad (4)$$

Так как для всех идеальных газов объем моля при нормальных условиях является величиной постоянной, то обычно объемную теплоемкость относят к объему моля газа, приведенному к идеальному состоянию.

В этом случае

$$c' = \frac{\mu c}{22,4143} \text{ ккал/н.м}^3\text{град,} \quad (5)$$

где 22,4143 — объем моля идеального газа при нормальных условиях.

Значение теплоемкости газов зависит от внешних условий, при которых тепло подводится к веществу или отводится от него. Если газ заключен в сосуд с постоянным объемом, то в этом случае все тепло расходуется только на изменение его внутренней энергии.

Такая теплоемкость называется теплоемкостью при *постоянном объеме* и обозначается обычно через c_v .

Если же газ может свободно расширяться при постоянном внешнем давлении, то при подводе или отводе тепла происходит не только изменение внутренней энергии газа, но и совершается положительная или отрицательная внешняя работа. Теплоемкость в этом случае называется теплоемкостью при *постоянном давлении* и обозначается обычно через c_p .

Если обозначить через L внешнюю работу газа, отнесенную к 1 молю газа при изменении его температуры на 1° , то очевидно, что

$$\mu c_p = \mu c_v + AL \text{ ккал/моль град,} \quad (6)$$

где A — термический эквивалент работы.

Как известно, внешняя работа при расширении или сжатии газа в обратимом процессе с постоянным давлением равна изменению объема газа, умноженному на давление, т. е.

$$L = P \frac{\Delta v}{\Delta T}, \text{ или в пределе } L = P \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p,$$

следовательно,

$$\mu c_p = \mu c_v + A \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p P. \quad (7)$$

Пользуясь уравнением состояния, можно определить $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$. Так, например, для идеального газа

$$\mu v = \frac{\mu RT}{P}.$$

В этом случае

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{\mu R}{P}$$

и

$$L = P \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \mu R.$$

Следовательно, для идеального газа теплоемкость при постоянном давлении будет больше теплоемкости при постоянном объеме на величину газовой постоянной, выраженной в тепловых единицах, т. е.

$$\mu c_p = \mu c_v + A \mu R. \quad (8)$$

Последнее выражение справедливо для истинных и для средних теплоемкостей.

2. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ГАЗОВ

Каждая молекула газа обладает кинетической и потенциальной энергией. Суммарную энергию всех молекул называют внутренней энергией. В это понятие не входит энергия движения газа как целого, которая учитывается отдельно и называется кинетической энергией газа.

В общем случае внутренняя энергия газа зависит от температуры и давления. Однако при значениях давления и температуры по абсолютной шкале, стремящихся к нулю, внутренняя энергия, как это будет показано ниже, стремится не к нулю, а к некоторому конечному значению.

Так как вычисление абсолютных значений внутренней энергии сопряжено с рядом трудностей, а знание этих значений в большинстве расчетов не требуется, принято условно считать внутреннюю энергию газа при 0° по абсолютной шкале и при давлении, равном нулю, также равной нулю. Следовательно, в практических расчетах принимается не абсолютное значение внутренней энергии газов, а разность между абсолютным значением U^0 при данных температуре и давлении и нулевым ее значением U_0^0 , т. е.

$$U_T = U^0 - U_0^0 \quad (9)$$

Наряду с указанным выше выбором нулевого отсчета для внутренней энергии в технике принято отсчитывать ее от 0° стоградусной шкалы, т. е.

$$U_t = U_T - U_{273,16} \quad (10)$$

где U_t — значение внутренней энергии, отсчитанное от 0° С;

U_T — значение внутренней энергии, отсчитанное от 0° абс.;

$U_{273,16}$ — значение внутренней энергии при нуле стоградусной шкалы или при $273,16^\circ$ абс., отсчитанное от 0° абс.

При таком выборе нулевого отсчета значение внутренней энергии при температурах, меньших нуля, будет отрицательным.

Из первого закона термодинамики следует, что

$$dQ = dU + AdL$$

В процессе при постоянном объеме, когда $AdL = 0$, все тепло затрачивается на изменение внутренней энергии. Следовательно, теплоемкость этого процесса будет

$$c_v = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (11)$$

В том случае, когда процесс происходит при постоянном давлении, изменение внутренней энергии может быть вычислено из соотношения (7). Тогда получим

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_p = c_p - AP \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (12)$$

Соотношения (11) и (12) дают связь между внутренней энергией газа и теплоемкостями при постоянном объеме и при постоянном давлении.

Для газов, приведенных к идеальному состоянию, для которых справедливо уравнение

$$Pv = RT,$$

выражение (13) примет вид

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_p = c_p - AR. \quad (13)$$

3 ЭНТАЛЬПИЯ

При проведении различных термодинамических и термохимических расчетов часто применяют термодинамические функции.

Характерной особенностью этих функций является то, что изменение их в каком-либо общем случае или при некоторых ограничительных условиях зависит только

от начального и конечного состояний тела и не зависит от пути процесса, т. е. дифференциал этих функций будет полным дифференциалом.

Одна из этих функций — внутренняя энергия — была уже рассмотрена ранее. К термодинамическим функциям относится также и *энтальпия* (теплосодержание), обозначаемая буквой i или I .

Энтальпия представляет собой сложную функцию, выражаемую соотношением

$$i = U + APv. \quad (14)$$

Энтальпия, так же как и внутренняя энергия, в общем случае является функцией температуры и давления. Из уравнения (14) видно, что абсолютное значение энтальпии J_0^0 при $P=0$ и $T=0^\circ$ абс. будет равно абсолютному значению внутренней энергии U_0^0 и, следовательно, ее величина при этих условиях не равна нулю. Обычно отсчет энтальпии ведут от значения ее, равного значению внутренней энергии при $P=0$ и $T=0$. Эту энтальпию условно называют абсолютным значением энтальпии и обозначают буквой I_T . Тогда по аналогии с уравнением (9)

$$I_T = I^0 - U_0^0. \quad (15)$$

Наряду с указанным выбором нулевого отсчета для энтальпии в технике принято отсчитывать ее от нуля стоградусной шкалы (0° С). В этом случае энтальпию обозначают обычно буквой i .

Тогда

$$i = I_T - I_{273,16}, \quad (16)$$

где $I_{273,16}$ — значение энтальпии при 0° С или при $273,16^\circ$ абс., отсчитанное от 0° абс.

При таком выборе нулевого отсчета значение энтальпии при температурах меньше 0° С будет отрицательным.

Для идеального газа выбранный метод нулевого отсчета энтальпии по уравнению (16) будет соответствовать методу нулевого отсчета внутренней энергии по уравнению (10).

Действительно, если

$$i = I_T - I_{273,16} = (U_T + ART) - (U_{273,16} + AR \cdot 273,16),$$

или

$$i = (U_T - U_{273,16}) + AR(T - 273,16),$$

то

$$i = U_t + ARt. \quad (17)$$

Из уравнения (17) видно, что при $t=0$ и соответственно $i=0$ величина U_t также будет равна нулю.

Энтальпия имеет большое практическое применение, так как в ряде случаев приходится суммировать внутреннюю энергию и произведение Pv . Кроме того, в отдельных важных для практики случаях тепло процесса оказывается равным изменению энтальпии, что делает ее особенно ценной функцией.

Так, например, в теплотехнике часто рассматриваются процессы подвода или отвода тепла при движении газа. В этом случае, как и в случае статического изменения состояния газа, справедливо уравнение первого закона

$$dQ = dU + APdv. \quad (18)$$

Применительно к газовому потоку это уравнение написано по отношению к наблюдателю, перемещающемуся вместе с потоком газа.

Но кроме уравнения (18) можно написать также уравнение первого закона по отношению к покоящемуся наблюдателю. В этом случае внешняя работа выражается, как известно, уже не произведением Pdv , а в виде $d(Pv)$ и, кроме того, в уравнении первого закона появляется новое слагаемое $d \frac{w^2}{2g}$, представляющее собой изменение кинетической энергии потока.

Таким образом, получаем

$$dQ = dU + Ad(Pv) + Ad \frac{w^2}{2g}. \quad (19)$$

Сопоставляя уравнения (18) и (19), можно написать

$$-vdP = d \frac{w^2}{2g}.$$

Учитывая, что $dU + Ad(Pv) = di$, уравнение (19) можно написать в виде

$$dQ = di + Ad \frac{w^2}{2g}.$$

Из этого уравнения видно, что в указанных процессах внешнее тепло тратится на изменение энтальпии и приращение кинетической энергии перемещаемого газа.

Следовательно, если изменение кинетической энергии равно нулю ($w = \text{const}$), то все тепло затрачивается на изменение энтальпии, а при адиабатическом процессе, когда $dQ = 0$, изменение кинетической энергии происходит вследствие изменения энтальпии.

Не менее важным является вопрос определения теплового эффекта химических реакций в газах. В случае протекания реакции при постоянном давлении тепловой эффект реакции будет равен сумме изменений внутренней энергии продуктов начального и конечного состояний реакции и внешней работы:

$$Q = U_0 - U_1 + AP(v_0 - v_1),$$

или

$$Q = (U_0 + APv_0) - (U_1 + APv_1) = i_0 - i_1,$$

т. е. в этом случае тепловой эффект реакции равен изменению энтальпии.

Разность энтальпий начала и конца процесса определяется работа компрессора с адиабатическим сжатием воздуха, полезная работа паросилового цикла и др.

При проведении расчетов в указанных случаях особенно удобно пользоваться диаграммами, по одной оси на которых наносится энтальпия, а по другой — какой-либо другой параметр.

4. ЭНТРОПИЯ

Понятие энтропии связано со вторым законом термодинамики и выражается для обратимых процессов соотношением

$$dS = \frac{dQ}{T}; \quad (20)$$

эта функция имеет большое значение для количественных приложений второго закона и, в частности, для оценки необратимости процессов. Для изолированной системы, в которой происходят только обратимые процессы, энтропия системы будет неизменна, если же в подобной системе будут протекать и необратимые процессы, то энтропия системы будет возрастать. Следовательно, для любой изолированной системы

$$dS \geq 0.$$

Статистическая термодинамика дает истолкование энтропии как меры термодинамической вероятности системы. При этом энтропия будет пропорциональна логарифму этой вероятности, т. е.

$$S = k \ln w, \quad (21)$$

где w — термодинамическая вероятность системы;

k — коэффициент пропорциональности.

Энтропия, так же как внутренняя энергия и энтальпия, является термодинамической функцией и, так как дифференциал этой функции есть полный дифференциал

(изменение энтропии не зависит от пути процесса), она является параметром состояния газа.

При $p = \text{const}$

$$dQ_p = c_p dT_p = T dS_p$$

или

$$\frac{c_p}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_p. \quad (22)$$

При $v = \text{const}$

$$dQ_v = c_v dT_v = T dS_v,$$

откуда

$$\frac{c_v}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_v. \quad (23)$$

Выражения (22) и (23) дают связь между изменением энтропии и теплоемкостями c_p и c_v .

Указанные свойства энтропии позволяют использовать ее при проведении ряда термодинамических и термохимических расчетов. Известно, что при обратимых адиабатических процессах энтропия рабочего тела остается неизменной. Применение в этом случае энтропии сильно упрощает расчеты.

Из соотношения (20) следует, что

$$dQ = T dS. \quad (24)$$

Отсюда видно, что в процессе с постоянной температурой тепло процесса легко определяется, если известно изменение энтропии, так как в этом случае

$$Q_T = T (S_2 - S_1).$$

По диаграмме $T - S$, где площадь под кривой процесса дает значение тепла обратимого процесса, очень удобно производить различные расчеты, связанные с циклами газовых машин.

Еще большее значение для различных теплотехнических расчетов имеет диаграмма $i - S$.

В термохимии знание абсолютных (отсчитанных от 0° абс.) значений энтропии упрощает нахождение констант равновесия. Этим далеко не исчерпывается значимость энтропии.

В подавляющем большинстве практических случаев требуется знание разности значений энтропии, поэтому выбор нулевого отсчета для энтропии определяется только практической целесообразностью. В технических расчетах этот отсчет, так же как для энтальпии, принято производить от 0°C , т. е. при этой температуре условно принимать значение энтропии равным нулю.

В тех случаях, когда необходимо знать абсолютное значение энтропии, его вычисляют на основании спектроскопических данных. Об этом подробнее будет сказано ниже.

5. ДРУГИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Рассмотрим еще две термодинамические функции, которые имеют большое значение при термохимических расчетах.

Первая из них называется *свободной энергией* и обозначается обычно буквой F . Свободная энергия может быть определена из соотношения

$$F = U - TS. \quad (25)$$

Эта функция является параметром состояния и поэтому элементарное изменение ее есть полный дифференциал. Из этого свойства свободной энергии легко получаются важные соотношения

$$\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_v = -S, \quad (26)$$

$$\frac{1}{A} \left(\frac{\partial F}{\partial v}\right)_T = -P. \quad (27)$$

Физический смысл свободной энергии состоит в том, что ее уменьшение по абсолютной величине равно максимальной работе, совершаемой системой при обратимом изотермическом процессе.

Другой важной стороной практической значимости свободной энергии является то, что она служит критерием самопроизвольности изохорно-изотермических процессов, т. е. в изохорно-изотермическом необратимом процессе свободная энергия убывает и в момент наступления равновесия она достигает минимума. При этом условие $dF_{T,v} = 0$ отвечает обратимому протеканию процесса.

Другая функция — *изобарный потенциал* обозначается буквой Z . Изобарный потенциал определяется соотношением

$$Z = I - TS = F + APv. \quad (28)$$

Элементарное изменение этой функции является полным дифференциалом. Из этого вытекают следующие соотношения:

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P = -S; \quad (29)$$

$$\frac{1}{A} \left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T = v. \quad (30)$$

Уменьшение изобарного потенциала по абсолютной величине равно работе, совершаемой системой при обратимом изобарно-изотермическом процессе.

Из уравнения (28) видно, что уменьшение изобарного потенциала в данном случае по абсолютной величине равно максимальной работе, за вычетом работы против внешнего давления, т. е. так называемой *максимальной полезной работе*.

В любом самопроизвольном изобарно-изотермическом процессе происходит уменьшение изобарного потенциала системы, если при этом полезная работа не равна нулю.

При наступлении равновесия указанного процесса изобарный потенциал принимает минимальное значение.

Следовательно, и свободная энергия, и изобарный потенциал являются критериями равновесия и самопроизвольности процессов.

При вычислении констант равновесия химических реакций применяют часто тепловую функцию, называемую *термалом*.

Эту функцию весьма просто определить из выражения для изобарного потенциала

$$\tau = -\frac{Z}{T} = S - \frac{I}{T}. \quad (31)$$

Из рассмотрения термодинамических функций видно, что необходимо иметь две основные функции — энтропию и энтальпию. Все остальные функции могут быть вычислены на основании следующих соотношений:

$$U = I - APv; \quad (32)$$

$$F = I - (TS + APv); \quad (33)$$

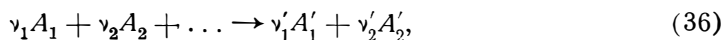
$$Z = I - TS; \quad (34)$$

$$\tau = S - \frac{I}{T}. \quad (35)$$

6. ПОНЯТИЕ О ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ И КОНСТАНТЕ РАВНОВЕСИЯ

Знание термодинамических функций и теплоемкостей газов имеет весьма большое значение для химической технологии.

Допустим, что требуется осуществить реакцию



где A_1, A_2, \dots — обозначения химического состава исходных веществ;

ν_1, ν_2, \dots — стехиометрические числа исходных веществ;

A'_1, A'_2, \dots — обозначения химического состава продуктов реакции;

ν'_1, ν'_2, \dots — стехиометрические числа продуктов реакции.

В практическом отношении необходимо выяснить следующее:

1. Возможно ли вообще протекание этой реакции в требуемом направлении? Какие для этого должны быть созданы условия?

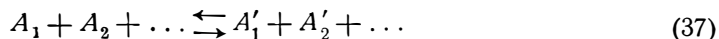
2. Так как ни одна реакция, в принципе, не может протекать до конца, т. е. до полного исчезновения хотя бы одного из веществ, участвующих в реакции, то требуется знать пределы, до которых в данных условиях может быть проведена реакция. Или иначе: каково будет количественное соотношение исходных веществ и продуктов реакции после установления химического равновесия?

3. Какие условия необходимо создать для быстреего и более полного протекания реакции?

Для того чтобы ответить на поставленные вопросы, необходимо знать также теплоемкости веществ, участвующих в реакции.

Познакомимся вкратце с некоторыми положениями химической термодинамики¹, с помощью которых можно дать ответ на поставленные выше вопросы. При этом ограничимся анализом только лишь таких реакций, в которых все вещества находятся в газообразном состоянии, т. е. рассмотрим так называемые гомогенные реакции.

Напишем сначала уравнение простейшей химической реакции



В уравнении (37) все стехиометрические числа равны единице и поэтому при написании опущены. Значок \rightleftharpoons свидетельствует о том, что любая реакция протекает всегда одновременно в обоих направлениях. Но скорости протекания реакции слева направо v и справа налево v' могут быть часто неравны между собой.

В соответствии с классической кинетической теорией газов любое химическое превращение может быть следствием только соударения соответствующих молекул. Для того чтобы вещества A_1 и A_2 могли взаимно прореагировать, необходимо соударение молекул этих веществ. Очевидно, что скорость реакции будет пропорциональна, при прочих равных условиях, числу соударений молекул в единицу времени.

На основании сказанного можно написать, что скорость протекания реакции по уравнению (37) слева направо

$$v = k [A_1] \cdot [A_2] \dots, \quad (38)$$

где $[A_1], [A_2]$ — соответственно концентрации веществ A_1, A_2 , выраженные, например, числом молей на единицу объема;

k — константа скорости реакции, зависящая для данного вида реакции от ряда условий и прежде всего от температуры.

¹ В химической термодинамике рассматриваются термодинамические процессы, при протекании которых система претерпевает химические превращения. Химическую термодинамику называют термодинамикой химических процессов.

Скорость протекания реакции по уравнению (37) справа налево может быть представлена аналогичным уравнением

$$v' = k' [A'_1] \cdot [A'_2] \dots, \quad (39)$$

где $[A'_1]$, $[A'_2]$ — концентрации продуктов реакции;

k' — константа скорости реакции, в общем отличная от k .

Из уравнений (38) и (39) видно, что ни одна реакция не может закончиться полным исчезновением одного из веществ, участвующих в реакции (т. е. не может дойти до конца), так как с уменьшением концентрации, например, исходных веществ и, следовательно, с увеличением концентрации продуктов реакции скорость протекания реакции слева направо будет уменьшаться, а справа налево — увеличиваться. Неизбежно должен наступить такой момент, когда скорости v и v' будут равны одна другой и внешне будет казаться, что никакой реакции вообще не протекает. Такое состояние называется химическим равновесием.

Очевидно, что для химического равновесия на основании уравнения (38) и (39) можно написать

$$k [A_1] \cdot [A_2] \dots = k' [A'_1] \cdot [A'_2] \dots,$$

откуда следует

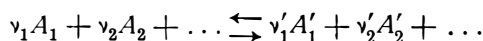
$$\frac{k}{k'} = \frac{[A'_1] \cdot [A'_2]}{[A_1] \cdot [A_2]} \dots = K_c. \quad (40)$$

В последнем уравнении величина K_c называется константой равновесия, которая зависит от следующих факторов:

- 1) свойств реагентов (участвующих в реакции веществ);
- 2, параметров системы и в первую очередь — температуры;
- 3) других условий протекания реакции, в частности, освещенности.

Уравнение, определяющее зависимость константы равновесия от термодинамических параметров процесса и от теплоты реакции, будет приведено ниже.

Для более общего случая уравнение химической реакции можно написать в виде



В этом случае скорость протекания реакции слева направо может быть представлена выражением

$$v = k [A_1]^{\nu_1} \cdot [A_2]^{\nu_2} \dots, \quad (41)$$

а скорость протекания реакции справа налево

$$v' = k' [A'_1]^{\nu'_1} \cdot [A'_2]^{\nu'_2} \dots \quad (42)$$

То обстоятельство, что в выражении скорости реакции концентрации входят в степени, равной значению стехиометрического числа данного вещества, также нетрудно объяснить при помощи кинетической теории: вероятность столкновения между собой ν_1 молекул вещества A_1 и ν_2 молекул вещества A_2 будет пропорциональна соответствующим степеням концентраций, т. е.

$$[A_1]^{\nu_1} \cdot [A_2]^{\nu_2}.$$

В случае химического равновесия $v = v'$, т. е.

$$k [A_1]^{\nu_1} \cdot [A_2]^{\nu_2} \dots = k' [A'_1]^{\nu'_1} \cdot [A'_2]^{\nu'_2}.$$

Тогда константа равновесия K_c может быть выражена как

$$K_c = \frac{[A'_1]^{\nu'_1} \cdot [A'_2]^{\nu'_2}}{[A_1]^{\nu_1} \cdot [A_2]^{\nu_2}} \quad (43)$$

Уравнение (43) является наиболее общим для определения состава продуктов реакции при химическом равновесии по заданным параметрам процесса, определяющим значение константы K_c .

7. ВЫРАЖЕНИЕ КОНСТАНТЫ РАВНОВЕСИЯ ЧЕРЕЗ ПАРЦИАЛЬНЫЕ ДАВЛЕНИЯ

Для химических реакций, происходящих в газовых системах, можно ввести константу равновесия K_p , выраженную не через концентрации, а через парциальные давления веществ, участвующих в реакции, что во многих случаях (особенно при проведении экспериментов) является более удобным.

Обозначив число молей газов, участвующих в реакции, через n , а объем, занимаемый газами, через V , можно для каждого газа написать термическое уравнение состояния

$$\left. \begin{aligned} P_{A_1} &= \frac{n_{A_1}}{V} RT = [A_1] RT; \\ P_{A_2} &= \frac{n_{A_2}}{V} RT = [A_2] RT; \\ &\dots \dots \dots \\ P_{A'_1} &= \frac{n_{A'_1}}{V} RT = [A'_1] RT; \\ P_{A'_2} &= \frac{n_{A'_2}}{V} RT = [A'_2] RT, \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} [A_1] &= \frac{P_{A_1}}{RT}; \\ [A_2] &= \frac{P_{A_2}}{RT}; \\ &\dots \dots \dots \\ [A'_1] &= \frac{P_{A'_1}}{RT}; \\ [A'_2] &= \frac{P_{A'_2}}{RT}; \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

и, следовательно, на основании уравнения (43) можно написать

$$K_c = \frac{P_{A'_1}^{\nu'_1} P_{A'_2}^{\nu'_2}}{P_{A_1}^{\nu_1} P_{A_2}^{\nu_2} \dots} \cdot \frac{(RT)^{\nu'_1 + \nu'_2 + \dots}}{(RT)^{\nu_1 + \nu_2 + \dots}}$$

Введя обозначение

$$K_p = \frac{P_{A'_1}^{\nu'_1} P_{A'_2}^{\nu'_2} \dots}{P_{A_1}^{\nu_1} P_{A_2}^{\nu_2} \dots}, \quad (46)$$

получим

$$K_p = K_c (RT)^{\nu_1 + \nu_2 + \dots - \nu'_1 - \nu'_2 - \dots} \quad (47)$$

Если в реакции, протекающей при неизменном числе молей газа, т. е. в такой реакции, для которой алгебраическая сумма стехиометрических чисел равна нулю, $\nu_1 + \nu_2 + \dots - \nu'_1 - \nu'_2 - \dots = 0$, то $(RT)^{\nu_1 + \nu_2 + \dots - \nu'_1 - \nu'_2 - \dots} = 1$ и, следовательно, для таких реакций $K_p = K_c$.

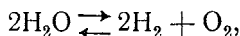
8. КОНСТАНТА РАВНОВЕСИЯ И СТЕПЕНЬ ДИССОЦИАЦИИ

Очевидно, что к диссоциации, так же как и к любой химической реакции, можно отнести все сказанное о химическом равновесии и о константах равновесия.

Если рассмотреть реакцию вида



аналогично диссоциации водяного пара

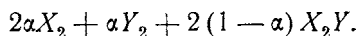


то эта реакция тоже происходит не полностью, так как в определенный момент времени наступает равновесие, при котором, кроме продуктов реакции X_2 и Y_2 , будем иметь также некоторое количество исходного вещества X_2Y .

Под степенью диссоциации α при определенной температуре T понимают отношение числа молей X_2Y , распавшихся на X_2 и Y_2 , к исходному числу молей X_2Y .

Следовательно, при установившемся равновесии из 2α молей X_2Y образуется 2α молей X_2 и α молей Y_2 , а $2(1 - \alpha)$ молей X_2Y остаются недиссоциированными.

Смесь газа поэтому состоит из



Константу равновесия реакции K_p можно выразить также через степень диссоциации α . Разберем в виде примера следующий случай.

Известно, что

$$K_p = \frac{P_{X_2}^2 P_{Y_2}}{P_{X_2Y}^2}; \quad (49)$$

для каждого из газов можем написать уравнение состояния

$$\left. \begin{aligned} P_{X_2} V &= 2\alpha RT; \\ P_{Y_2} V &= \alpha RT; \\ P_{X_2Y} V &= 2(1 - \alpha) RT. \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

Так как сумма парциальных давлений равна общему давлению

$$P = P_{X_2} + P_{Y_2} + P_{X_2Y},$$

а объемы отдельных компонентов, естественно, равны один другому, то, суммируя уравнения (50), получим

$$PV = (2 + \alpha) RT. \quad (51)$$

Используя уравнения (50) и (51), можно выразить парциальное давление каждого газа через суммарное давление

$$\left. \begin{aligned} P_{X_2} &= \frac{2\alpha}{2+\alpha} P; \\ P_{Y_2} &= \frac{\alpha}{2+\alpha} P; \\ P_{X_2Y} &= \frac{2(1-\alpha)}{2+\alpha} P. \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

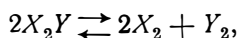
Подставив парциальные давления из уравнения (52) в уравнение (49), получим

$$K_p = \frac{\alpha^3}{(2+\alpha) \cdot (1-\alpha)^2} P; \quad (53)$$

обозначив $\frac{\alpha^3}{(2+\alpha) \cdot (1-\alpha)^2} = \beta$, можем написать

$$K_p = \beta P. \quad (54)$$

Если будем рассматривать не реакцию уравнения (48)



а химически равноценную ей реакцию

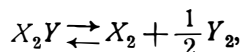


то, хотя степень диссоциации α при этом останется неизменной, зависимость между K_p и α примет другой вид; в выражении (49) для константы равновесия K_p парциальные давления будут иметь половинные значения показателей степеней, соответствующие вдвое меньшим стехиометрическим числам.

Следовательно, зависимость константы равновесия K_{II} для реакции по уравнению (55) от константы равновесия K_I реакции по уравнению (48) будет выражена соотношением

$$K_I = K_{II}^2.$$

Таким образом, для реакции по уравнению (55)



например, $H_2O \rightleftharpoons H_2 + \frac{1}{2}O_2$,

получим

$$K_p = \frac{\alpha^{1,5}}{(2+\alpha)^{0,5} (1-\alpha)} P^{0,5}. \quad (56)$$

На это обстоятельство при числовых расчетах нужно обращать особое внимание, так как, например, диссоциация водяного пара одними авторами рассчитывается на 2 моля ($2H_2O$), а другими на 1 моль (H_2O), вследствие чего получаются различные зависимости между K_p и α .

В дальнейшем при расчете диссоциации за исходное вещество будем принимать 1 моль диссоциирующего газа.

Из приведенного выше следует, что зависимость степени диссоциации α от константы равновесия K_p будет различна для различных реакций.

Ниже приводим выражения, связывающие K_p и α для тех реакций, которые представляют наибольший практический интерес.

Не повторяя приведенного выше метода определения зависимости между K_p и α для каждой реакции, имеющей большое значение в практическом отношении, ограничимся только окончательными выражениями, представляющими эту зависимость.

1. Для реакции типа



в которой на 1 моль исходного вещества X_2 при диссоциации образуется 2 моля продуктов реакции, например, $O_2 \rightleftharpoons 2O$, $H_2 \rightleftharpoons 2H$, $N_2 \rightleftharpoons 2N$, $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$ *, получим

$$K_p = \frac{4\alpha^2}{1-\alpha^2} P; \quad \beta = \frac{4\alpha^2}{1-\alpha^2}. \quad (58)$$

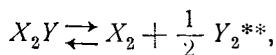
2. Для реакции типа



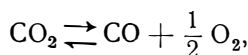
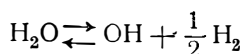
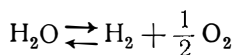
в которой 1 моль исходного вещества X_2Y при диссоциации образует также 2 моля, но только двух продуктов реакции, имеющих различные молекулы, например, $H_2O \rightleftharpoons O + H_2$, $H_2O \rightleftharpoons H + OH$, получим

$$K_p = \frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} P; \quad \beta = \frac{\alpha^2}{1-\alpha^2}. \quad (60)$$

3. Для реакции рассмотренного нами ранее вида по уравнению (55)



в которой 1 моль исходного вещества при диссоциации образует 1 моль продукта реакции X_2 и половину моля продукта реакции Y_2 , т. е. в общей сложности 1,5 моля продуктов реакции, например:



получим уже приведенное нами уравнение (56)

$$K_p = \frac{\alpha^{1,5}}{(2+\alpha)^{0,5}(1-\alpha)} P^{0,5}; \quad \beta = \frac{\alpha^{1,5}}{(2+\alpha)^{0,5}(1-\alpha)},$$

или

$$K_p^2 = \frac{\alpha^3}{(2+\alpha)(1-\alpha)^2} P; \quad \beta = \frac{\alpha^3}{(2+\alpha)(1-\alpha)^2}.$$

Численные значения констант равновесия K_p и соответствующие им значения степени диссоциации α для реакций различных типов в функции температуры $t^\circ C$ при $p=1$ ата приведены в табл. 1—9.

* Реакция $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$ должна быть отнесена к реакции типа $X_2 \rightleftharpoons X + X$ потому, что углерод C в свободном состоянии является твердым веществом, а следовательно, его парциальное давление не принимается в расчет.

** Настоящей реакции также аналогична реакция $XY_2 \rightleftharpoons XY + \frac{1}{2} Y_2$, в которой 1 моль исходного вещества XY_2 , диссоциируя, образует также 1,5 моля продуктов реакции (1 моль XY и 0,5 моля Y_2).

Таблица 1

Константы равновесия K_p и степени диссоциации α для реакции $O_2 \rightleftharpoons 2O$ типа $X_2 \rightleftharpoons X + X$, при $p = 1 \text{ атм}$

t °C	$K_p = \frac{p_O^2}{p_{O_2}}$	α	t °C	$K = \frac{p_O^2}{p_{O_2}}$	α
800	$2,24 \cdot 10^{-18}$	$7,48 \cdot 10^{-10}$	1500	$1,092 \cdot 10^{-8}$	$5,23 \cdot 10^{-5}$
900	$2,73 \cdot 10^{-16}$	$8,26 \cdot 10^{-9}$	1600	$6,82 \cdot 10^{-8}$	$1,306 \cdot 10^{-4}$
1000	$1,57 \cdot 10^{-14}$	$6,28 \cdot 10^{-8}$	1800	$1,58 \cdot 10^{-6}$	$6,285 \cdot 10^{-4}$
1100	$5,05 \cdot 10^{-13}$	$3,55 \cdot 10^{-7}$	2000	$2,10 \cdot 10^{-5}$	$2,29 \cdot 10^{-3}$
1200	$1,014 \cdot 10^{-11}$	$1,59 \cdot 10^{-6}$	2200	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$6,81 \cdot 10^{-3}$
1300	$1,390 \cdot 10^{-10}$	$5,90 \cdot 10^{-6}$	2400	$1,183 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$
1400	$1,400 \cdot 10^{-9}$	$1,87 \cdot 10^{-5}$	2600	$5,84 \cdot 10^{-3}$	$3,82 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2

Константы равновесия K_p и степени диссоциации α для реакции $H_2 \rightleftharpoons 2H$ типа $X_2 \rightleftharpoons X + X$, при $p = 1 \text{ атм}$

t °C	$K_p = \frac{p_H^2}{p_{H_2}}$	α	t °C	$K_p = \frac{p_H^2}{p_{H_2}}$	α
800	$1,98 \cdot 10^{-16}$	$7,04 \cdot 10^{-9}$	1500	$8,07 \cdot 10^{-8}$	$1,420 \cdot 10^{-4}$
900	$1,387 \cdot 10^{-14}$	$5,89 \cdot 10^{-8}$	1600	$4,16 \cdot 10^{-7}$	$3,23 \cdot 10^{-4}$
1000	$5,06 \cdot 10^{-13}$	$3,56 \cdot 10^{-7}$	1800	$6,89 \cdot 10^{-6}$	$1,312 \cdot 10^{-3}$
1100	$1,112 \cdot 10^{-11}$	$1,67 \cdot 10^{-6}$	2000	$7,03 \cdot 10^{-5}$	$4,19 \cdot 10^{-3}$
1200	$1,60 \cdot 10^{-10}$	$6,33 \cdot 10^{-6}$	2200	$4,95 \cdot 10^{-4}$	$1,113 \cdot 10^{-2}$
1300	$1,66 \cdot 10^{-9}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	2400	$2,61 \cdot 10^{-3}$	$2,56 \cdot 10^{-2}$
1400	$1,288 \cdot 10^{-8}$	$5,68 \cdot 10^{-4}$	2600	$1,099 \cdot 10^{-2}$	$5,24 \cdot 10^{-2}$

Таблица 3

Константы равновесия K_p и степени диссоциации α для реакции $N_2 \rightleftharpoons 2N$ типа $X_2 \rightleftharpoons X + X$, при $p = 1 \text{ атм}$

t °C	$K_p = \frac{p_N^2}{p_{N_2}}$	α	t °C	$K_p = \frac{p_N^2}{p_{N_2}}$	α
800	$5,22 \cdot 10^{-29}$	$3,61 \cdot 10^{-15}$	1500	$4,74 \cdot 10^{-15}$	$3,44 \cdot 10^{-8}$
900	$5,30 \cdot 10^{-26}$	$1,15 \cdot 10^{-13}$	1600	$6,68 \cdot 10^{-14}$	$1,293 \cdot 10^{-7}$
1000	$1,83 \cdot 10^{-23}$	$2,14 \cdot 10^{-12}$	1700	$7,18 \cdot 10^{-13}$	$4,24 \cdot 10^{-7}$
1100	$2,70 \cdot 10^{-21}$	$2,60 \cdot 10^{-11}$	1800	$6,17 \cdot 10^{-12}$	$1,242 \cdot 10^{-6}$
1200	$2,04 \cdot 10^{-19}$	$2,26 \cdot 10^{-10}$	2000	$2,58 \cdot 10^{-10}$	$8,03 \cdot 10^{-6}$
1300	$8,87 \cdot 10^{-18}$	$1,489 \cdot 10^{-9}$	2200	$5,93 \cdot 10^{-9}$	$3,85 \cdot 10^{-5}$
1400	$2,48 \cdot 10^{-16}$	$7,871 \cdot 10^{-9}$	2400	$8,53 \cdot 10^{-8}$	$1,461 \cdot 10^{-4}$

Таблица 4

Константы равновесия K_p и степени диссоциации α для реакции
 $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$ типа $X_2 \rightleftharpoons X + X$, при $p = 1 \text{ атм}$

t °C	$K_p = \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}}$	α	t °C	$K_p = \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}}$	α
0	$1,452 \cdot 10^{-24}$	$6,02 \cdot 10^{-13}$	700	$9,02 \cdot 10^{-1}$	$4,29 \cdot 10^{-1}$
100	$1,023 \cdot 10^{-15}$	$1,60 \cdot 10^{-8}$	800	6,44	$7,86 \cdot 10^{-1}$
200	$1,384 \cdot 10^{-10}$	$5,88 \cdot 10^{-6}$	900	$3,25 \cdot 10$	$9,44 \cdot 10^{-1}$
300	$3,06 \cdot 10^{-7}$	$2,77 \cdot 10^{-4}$	1000	$1,262 \cdot 10^2$	$9,85 \cdot 10^{-1}$
400	$6,81 \cdot 10^{-5}$	$4,13 \cdot 10^{-3}$	1100	$3,98 \cdot 10^2$	$9,95 \cdot 10^{-1}$
500	$3,71 \cdot 10^{-3}$	$3,09 \cdot 10^{-2}$	1200	$1,071 \cdot 10^3$	$9,99 \cdot 10^{-1}$
600	$7,98 \cdot 10^{-2}$	$1,398 \cdot 10^{-1}$	1300	$2,530 \cdot 10^3$	$9,99 \cdot 10^{-1}$

Таблица 5

Константы равновесия K_p и степени диссоциации α для реакции
 $H_2O \rightleftharpoons H_2 + O$ типа $X_2Y \rightleftharpoons X_2 + Y$, при $p = 1 \text{ атм}$

t °C	$K_p = \frac{p_{H_2} p_O}{p_{H_2O}}$	α	t °C	$K_p = \frac{p_{H_2} p_O}{p_{H_2O}}$	α
800	$9,98 \cdot 10^{-19}$	$9,99 \cdot 10^{-10}$	1800	$6,20 \cdot 10^{-7}$	$7,88 \cdot 10^{-4}$
1000	$6,69 \cdot 10^{-15}$	$8,18 \cdot 10^{-8}$	2000	$8,13 \cdot 10^{-6}$	$2,85 \cdot 10^{-3}$
1200	$3,98 \cdot 10^{-12}$	$2,00 \cdot 10^{-6}$	2200	$7,12 \cdot 10^{-5}$	$8,44 \cdot 10^{-3}$
1400	$5,66 \cdot 10^{-10}$	$2,38 \cdot 10^{-5}$	2400	$4,50 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^{-2}$
1600	$2,85 \cdot 10^{-8}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	2600	$2,21 \cdot 10^{-3}$	$4,70 \cdot 10^{-2}$

Таблица 6

Константы равновесия K_p и степени диссоциации α для реакции
 $H_2O \rightleftharpoons H_2 + \frac{1}{2} O_2$ типа $X_2Y \rightleftharpoons X_2 + \frac{1}{2} Y_2$, при $p = 1 \text{ атм}$

t °C	$K_p = \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0,5}}{p_{H_2O}}$	α	t °C	$K_p = \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0,5}}{p_{H_2O}}$	α
800	$6,67 \cdot 10^{-10}$	$9,62 \cdot 10^{-7}$	1800	$4,93 \cdot 10^{-4}$	$7,86 \cdot 10^{-3}$
1000	$5,33 \cdot 10^{-8}$	$1,78 \cdot 10^{-5}$	2000	$1,77 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$
1200	$1,312 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	2200	$5,22 \cdot 10^{-3}$	$3,72 \cdot 10^{-2}$
1400	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$7,70 \cdot 10^{-4}$	2400	$1,309 \cdot 10^{-2}$	$6,73 \cdot 10^{-2}$
1600	$1,091 \cdot 10^{-4}$	$2,87 \cdot 10^{-3}$	2600	$2,90 \cdot 10^{-2}$	$1,12 \cdot 10^{-1}$

Таблица 7

Константы равновесия K_p и степени диссоциации α для реакции $\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$ типа $X_4 \rightleftharpoons X_2 + X_2$, при $p = 1 \text{ атм}$

t $^{\circ}\text{C}$	$K_p = \frac{p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{CH}_4}}$	α	t $^{\circ}\text{C}$	$K_p = \frac{p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{CH}_4}}$	α
300	$4,63 \cdot 10^{-3}$	$3,40 \cdot 10^{-2}$	800	22,0	0,920
400	$6,30 \cdot 10^{-2}$	0,1244	900	53,3	0,965
500	$4,56 \cdot 10^{-1}$	0,320	1000	111,7	0,983
600	2,17	0,593	1100	206	0,991
700	7,60	0,909	1200	346	0,995

Таблица 8

Константы равновесия K_p и степени диссоциации α для реакции $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ типа $X\text{Y}_2 \rightleftharpoons X\text{Y} + \frac{1}{2} \text{Y}_2$, при $p = 1 \text{ атм}$

t $^{\circ}\text{C}$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{O}_2}^{0,5}}{p_{\text{CO}_2}}$	α	t $^{\circ}\text{C}$	$K_p = \frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{O}_2}^{0,5}}{p_{\text{CO}_2}}$	α
800	$5,92 \cdot 10^{-10}$	$8,88 \cdot 10^{-7}$	1600	$4,11 \cdot 10^{-4}$	$6,94 \cdot 10^{-3}$
1000	$8,49 \cdot 10^{-8}$	$2,43 \cdot 10^{-5}$	1800	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$
1200	$3,13 \cdot 10^{-6}$	$2,69 \cdot 10^{-4}$	2000	$9,48 \cdot 10^{-3}$	$5,49 \cdot 10^{-2}$
1400	$4,82 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	2500	$1,319 \cdot 10^{-1}$	$2,75 \cdot 10^{-1}$

Таблица 9

Константы равновесия K_p и степени диссоциации α для реакции $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H} + \text{OH}$ типа $X_2\text{Y} \rightleftharpoons X + X\text{Y}$, при $p = 1 \text{ атм}$

t $^{\circ}\text{C}$	$K_p = \frac{p_{\text{OH}} \cdot p_{\text{H}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$	α	t $^{\circ}\text{C}$	$K_p = \frac{p_{\text{OH}} \cdot p_{\text{H}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$	α
800	$4,5 \cdot 10^{-18}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	1800	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$
1000	$2,6 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	2000	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$
1200	$1,7 \cdot 10^{-11}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	2200	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
1400	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	2400	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$
1600	$8,9 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	2600	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$

9. ЗАВИСИМОСТЬ КОНСТАНТЫ РАВНОВЕСИЯ ОТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ ДИССОЦИИРУЮЩЕГО ГАЗА

Зная термодинамические функции веществ, участвующих в реакции, и тепловой эффект Q_p реакции при постоянном давлении для определенной температуры (например, для условий $t = 0^\circ\text{C}$, $p = 1 \text{ атм}$), можно вычислить значение константы равновесия K_p .

Используя основные термодинамические уравнения, а также тепловую теорему, можно получить следующую весьма важную зависимость:

$$-\lg K_p = \frac{1}{4,573} \left[-\frac{(Q_p)_{273,16}}{T} + \sum (S_{273,16})_{A_n} - \sum (S_{273,16})_{A'_n} + \sum \tau_{A_n} - \sum \tau_{A'_n} \right], \quad (61)$$

где $S_{273,16}$ — абсолютное значение энтропии при 0°C , отсчитанное от $T = 0^\circ$ абс.; $(Q_p)_{273,16}$ — тепловой эффект реакции при 0°C . Эта величина принимается положительной при выделении тепла и отрицательной — при поглощении.

Значения тепловых эффектов реакций горючих газов приведены в табл. 10.

$\tau = S - \frac{I}{T}$ — значение термала, отсчитанное от 0°C .

Индексы A и A' указывают, что значения соответствующих величин принимаются для исходных продуктов A и для продуктов реакции A' .

Таким образом, приводимые таблицы термодинамических свойств газов в идеальном состоянии могут быть использованы при определении $K_p = f(T)$, что, как сказано выше, весьма важно для расчетов термодинамических процессов.

Зная степени диссоциации α , можно подсчитать теплоемкость одного моля диссоциированного газа.

Для реакции типа $X_2 \rightleftharpoons X + X$ уравнение теплоемкости будет иметь вид:

$$\mu c_{p_d} = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \mu c_{p_{X_2}} + \frac{2\alpha}{1+\alpha} \mu c_{p_X}. \quad (62)$$

Соответственно, для реакции типа $X_2 Y \rightleftharpoons X_2 + \frac{1}{2} Y_2$:

$$\mu c_{p_d} = \frac{1-\alpha}{1+0,5\alpha} \mu c_{p_{X_2 Y}} + \frac{\alpha}{2(1+0,5\alpha)} \mu c_{p_{Y_2}} + \frac{\alpha}{1+0,5\alpha} \mu c_{p_{X_2}}. \quad (63)$$

Так как в процессах химических реакций изменение температуры связано не только с изменением состава продуктов реакции, но и с выделением или поглощением тепла реакции, то общее уравнение тепла должно быть в этом случае записано в виде

$$dQ = \mu c_{p_d} dT + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right)_p \cdot \frac{Q_p}{1+\alpha} dT. \quad (64)$$

Тепло, выделенное в реакции при изменении температуры на dT , равно

$$\frac{dQ_d}{dT} = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right)_p Q_p, \quad (65)$$

может быть вычислено по величине степени диссоциации α .

Согласно уравнению Вант-Гоффа,

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{Q_p}{RT^2}. \quad (66)$$

Если в уравнение (66) подставить значение K_p согласно уравнению (58)

$$K_p = \frac{4\alpha^2}{1-\alpha^2} P$$

и считать $p = 1 \text{ атм}$, то получим

$$\frac{dQ_d}{dT} = \frac{\alpha(1-\alpha^2) Q_p^2}{2kT^2}. \quad (67)$$

Таблица 10

Тепловые эффекты реакций горючих газов при $t = 0^\circ \text{C}$

Наименование газа	Формула реакции	$(Q_p)_{273,16}$			
		H ₂ O—жид- кость	H ₂ O — пар		
			ккал/моль	ккал/моль	ккал/м ³
Окись углерода .	$\text{CO} + 0,5 \cdot \text{O}_2 = \text{CO}_2$	67 590	67 590	3 016	2 413
Водород	$\text{H}_2 + 0,5 \cdot \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$	68 260	57 740	2 576	28 640
Метан	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	212 860	191 820	8 558	11 957
Этан	$\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5 \cdot \text{O}_2 = 2 \cdot \text{CO}_2 + 3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	372 940	341 380	15 231	11 353
<i>n</i> — Пропан . . .	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5 \cdot \text{O}_2 = 3 \cdot \text{CO}_2 + 4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	530 760	488 690	21 800	11 083
<i>n</i> — Бутан	$\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5 \cdot \text{O}_2 = 4 \cdot \text{CO}_2 + 5 \cdot \text{H}_2\text{O}$	687 950	635 350	28 345	10 932
<i>n</i> — Пентан . . .	$\text{C}_5\text{H}_{12} + 8 \cdot \text{O}_2 = 5 \cdot \text{CO}_2 + 6 \cdot \text{H}_2\text{O}$	845 350	782 230	34 900	10 843
Бензол	$\text{C}_6\text{H}_6 + 7,5 \cdot \text{O}_2 = 6 \cdot \text{CO}_2 + 3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	783 210	751 650	33 530	9 624
Этилен	$\text{C}_2\text{H}_4 + 3 \cdot \text{O}_2 = 2 \cdot \text{CO}_2 + 2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	337 290	316 255	14 110	11 274
Пропилен	$\text{C}_3\text{H}_6 + 4,5 \cdot \text{O}_2 = 3 \cdot \text{CO}_2 + 3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	492 120	460 560	20 550	10 945
Бутилен	$\text{C}_4\text{H}_8 + 6 \cdot \text{O}_2 = 4 \cdot \text{CO}_2 + 4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	649 870	617 790	27 120	10 833
Пентилен	$\text{C}_5\text{H}_{10} + 7,5 \cdot \text{O}_2 = 5 \cdot \text{CO}_2 + 5 \cdot \text{H}_2\text{O}$	806 970	754 370	33 660	10 757
Ацетилен	$\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \cdot \text{O}_2 = 2 \cdot \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	310 560	300 040	13 385	11 524
Метилацетилен . .	$\text{C}_3\text{H}_4 + 4 \cdot \text{O}_2 = 3 \cdot \text{CO}_2 + 2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	463 110	442 070	19 723	11 035
Этилацетилен . . .	$\text{C}_4\text{H}_6 + 5,5 \cdot \text{O}_2 = 4 \cdot \text{CO}_2 + 3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	620 900	589 340	26 290	10 896
Пентин	$\text{C}_5\text{H}_8 + 7 \cdot \text{O}_2 = 5 \cdot \text{CO}_2 + 4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	778 080	736 000	32 820	10 806
Циклопентан . . .	$\text{C}_5\text{H}_{10} + 7,5 \cdot \text{O}_2 = 5 \cdot \text{CO}_2 + 5 \cdot \text{H}_2\text{O}$	793 700	741 110	33 060	10 577
Метилциклопентан	$\text{C}_6\text{H}_{12} + 9 \cdot \text{O}_2 = 6 \cdot \text{CO}_2 + 6 \cdot \text{H}_2\text{O}$	949 030	885 920	39 520	10 527
Этилциклопентан .	$\text{C}_7\text{H}_{14} + 10,5 \cdot \text{O}_2 = 7 \cdot \text{CO}_2 + 7 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1 106 540	1 032 910	46 080	10 520
Пропилциклопентан	$\text{C}_8\text{H}_{16} + 12 \cdot \text{O}_2 = 8 \cdot \text{CO}_2 + 8 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1 263 910	1 179 750	52 630	10 514
Циклогексан . . .	$\text{C}_6\text{H}_{12} + 9 \cdot \text{O}_2 = 6 \cdot \text{CO}_2 + 6 \cdot \text{H}_2\text{O}$	945 140	882 020	39 350	10 481
Метилциклогексан	$\text{C}_7\text{H}_{14} + 10,5 \cdot \text{O}_2 = 7 \cdot \text{CO}_2 + 7 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1 099 920	1 026 290	45 790	10 452
Этилциклогексан .	$\text{C}_8\text{H}_{16} + 12 \cdot \text{O}_2 = 8 \cdot \text{CO}_2 + 8 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1 258 250	1 174 090	52 380	10 463
Пропилциклогексан	$\text{C}_9\text{H}_{18} + 13,5 \cdot \text{O}_2 = 9 \cdot \text{CO}_2 + 9 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1 415 490	1 320 810	58 930	10 463

Для смеси газов $(Q_p)_{273,16} = \sum C_m H_n (Q_p)_{C_m H_n}$

Уравнение (67) применимо для реакций типа $X_2 \rightleftharpoons X + X$. Если в уравнение (66) подставить значения K_p из уравнения (56), то после несложных действий получим уравнения, аналогичные уравнениям (67) для реакции типа $X_2 Y \rightleftharpoons X_2 + \frac{1}{2} Y_2$.

10. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ И СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЕДИНИЦАМИ ИЗМЕРЕНИЯ

По последним (на 1951 г.) данным измерений и согласованных расчетов наиболее важные физические константы приведены в табл. 11.

Таблица 11

Физические константы

Наименование констант	Обозначения	Размерность	Величины
Число молекул в моле ¹ , отнесенное к атомным весам по физической шкале ($0^{16} = 16$)	$N_{\text{физ}}$	—	$(6,02544 \pm 0,00011) \cdot 10^{26}$
Число молекул в моле, отнесенное к атомным весам по химической шкале	N	—	$(6,02380 \pm 0,00011) \cdot 10^{26}$
Скорость света	c	км/сек	$299790,2 \pm 0,9$
Постоянная Планка	h	эрг·сек	$(6,62377 \pm 0,00018) \cdot 10^{-27}$
„ Больцмана	$k = \frac{\nu R}{N}$	эрг/град	$(1,38026 \pm 0,00006) \cdot 10^{-16}$
	$\frac{hc}{k}$	см·град	1,438672

¹ Под термином „моль“ везде подразумевается килограмм-молекула. Для грамм-молекулы принято обозначение *г-моль*.

За единицу измерения энергии во всех термодинамических величинах принята интернациональная электрическая килокалория, равная:

$$1 \text{ ккал} = \frac{1}{860} \text{ международного квт-ч.}$$

Соотношение между принятой единицей измерения энергии и другими распространенными единицами измерения дано в табл. 12.

В спектроскопических расчетах часто единицей измерения энергии служит волновое число (см^{-1}).

Волновое число связано с энергией по соотношению Планка

$$E = h\nu c;$$

отсюда следует, что единице измерения в волновых числах соответствует энергия

$$1 \text{ см}^{-1} = hc = 1,98574 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/молекула,}$$

или, если относить энергию не к 1 молекуле, а к 1 г-молю химической шкалы атомных весов, то единице волнового числа соответствует энергия

$$1 \text{ см}^{-1} = hcN = 1,19617 \cdot 10^8 \text{ эрг/гмоль.}$$

Соотношение между энергетическими единицами

Таблица 12

Единицы	Абсолютный килоджоуль	Интернациональный килоджоуль	Интернациональная килокалория	Килокалория Национального Бюро стандартов США	Килокалория 20° С (ОСТ)	Килокалория 15° С	Интернациональный киловатт-час	Килограмм-метр	Сило-час
1 абсолютный килоджоуль	1	0,99981	0,23884	0,23990	0,23912	0,23890	$2,772 \cdot 10^{-4}$	101,972	$3,7767 \cdot 10^{-4}$
1 интернациональный килоджоуль	1,00019	1	0,23889	0,23905	0,23917	0,23895	$2,778 \cdot 10^{-4}$	101,991	$3,7774 \cdot 10^{-4}$
1 интернациональная килокалория	4,18685	4,18605	1	1,00066	1,00116	1,00026	$1,1628 \cdot 10^{-3}$	426,94	$1,5813 \cdot 10^{-3}$
1 килокалория Национального Бюро стандартов США	4,18409	4,18330	0,99934	1	1,00050	0,99959	$1,1620 \cdot 10^{-3}$	426,66	$1,5802 \cdot 10^{-3}$
1 килокалория 20° (ОСТ)	4,182	4,18121	0,99884	0,99950	1	0,99909	$1,1614 \cdot 10^{-3}$	426,45	$1,5794 \cdot 10^{-3}$
1 килокалория 15°	4,18580	4,18500	0,99975	1,00041	1,00091	1	$1,1625 \cdot 10^{-3}$	426,83	$1,5809 \cdot 10^{-3}$
1 интернациональный киловатт-час	3600,68	3600,00	860,00	860,56	860,99	860,21	1	367 167	1,3599
1 килограмм-метр	$9,80665 \cdot 10^{-3}$	$9,80479 \cdot 10^{-3}$	$2,3423 \cdot 10^{-3}$	$2,3438 \cdot 10^{-3}$	$2,3470 \cdot 10^{-3}$	$2,3428 \cdot 10^{-3}$	$2,7236 \cdot 10^{-6}$	1	$3,7037 \cdot 10^{-6}$
1 сило-час	2647,80	2647 80	632,41	632,83	633,14	632,7	0,73536	270 000	1

Основные физические константы и соотношения

Таким образом, таблица единиц энергии должна быть дополнена следующими переводными коэффициентами (см. табл. 13).

Таблица 13

Соотношение между энергетическими единицами

Единицы	см^{-1}	эрг/молекула	эрг/гмоль	ккал/моль	электрон-вольт (eV)
1 см^{-1}	1	$1,98574 \cdot 10^{-16}$	$1,19617 \cdot 10^8$	2,8569	$1,2398 \cdot 10^{-4}$
1 эрг/молекула	$5,0359 \cdot 10^{15}$	1	$6,02380 \cdot 10^{23}$	$1,4387 \cdot 10^{16}$	$6,2432 \cdot 10^{13}$
1 эрг/гмоль	$8,3600 \cdot 10^{-9}$	$1,66008 \cdot 10^{-24}$	1	$0,23884 \cdot 10^{-7}$	$1,03645 \cdot 10^{-10}$
1 ккал/моль	0,35003	$6,9 \cdot 069 \cdot 10^{-17}$	$4,18696 \cdot 10^7$	1	$0,43395 \cdot 10^{-4}$
1 электрон-вольт (eV)	8066,0	$1,6017 \cdot 10^{-12}$	$9,6483 \cdot 10^{11}$	$2,3044 \cdot 10^4$	1

Газовая постоянная в уравнении состояния идеального газа

$$\mu R = \frac{P\mu v}{T},$$

отнесенная к грамм-молю по химической шкале атомных весов, равна

$$\mu R = kN = 8,31441 \cdot 10^7 \text{ эрг/гмоль град},$$

или в килокалориях на моль

$$\mu R = 1,985814 \text{ ккал/моль град}.$$

Объем 1 моля газа, отнесенного к атомным весам по химической шкале при нормальных условиях (температура $T = 273,16^\circ \text{C}$ и давление P , равное одной физической атмосфере, т. е. $P = 10332,28 \text{ кг/м}^2$),

$$\mu v = \frac{\mu RT}{P} = 22,4143 \text{ нм}^3/\text{моль}.$$

II. ПОНЯТИЕ ОБ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ

1. КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Классические уравнения термодинамики не дают зависимости теплоемкости и термодинамических функций газов от температуры. При определении теплоемкости по уравнению

$$c_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (68)$$

предполагается уже известной зависимость внутренней энергии газа U от температуры.

Рассмотрим вопрос о зависимости теплоемкости газов от давления.

Термодинамическое соотношение

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial P} \right)_T = AT \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right)_v, \quad (69)$$

при известном уравнении состояния газа

$$P = f(T, v),$$

позволяет однозначно определить зависимость теплоемкости от давления вполне определенно.

Так, например, для идеальных газов, подчиняющихся уравнению состояния

$$Pv = RT, \quad (70)$$

теплоемкость газа не будет зависеть от давления, так как в этом случае

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial P} \right)_T = AT \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right)_v = 0. \quad (71)$$

В отношении же зависимости теплоемкости от температуры для того же идеального газа термодинамика такой определенности не дает.

По уравнениям классической термодинамики нельзя определить не только зависимость теплоемкости от температуры, но даже указать хотя бы порядок величины теплоемкости для различных газов.

Большое прогрессивное значение в развитии термодинамики имела кинетическая теория газа, согласно которой впервые была сделана попытка связать энергию вещества с молекулярными и атомарными представлениями.

Эта теория позволила также расширить наши знания и в области учения о теплоемкости. По этой теории беспорядочное движение отдельных молекул сопровождается перераспределением энергии по степеням свободы всех молекул так, что в среднем на каждую степень свободы приходится одна и та же энергия.

Имея в виду, что средняя энергия поступательного движения для 1 моля идеального газа равна

$$E_n = \frac{3}{2} RT \quad (72)$$

и что поступательное движение по числу координат, необходимых для определения положения, имеет три степени свободы, можно найти энергию, приходящуюся на одну степень свободы,

$$E_i = \frac{1}{3} E_n = \frac{1}{2} RT. \quad (73)$$

Следовательно, теплоемкость моля идеального газа с i степенями свободы движения равна

$$c_v = i \frac{\partial E_i}{\partial T} = i \frac{R}{2}. \quad (74)$$

Если принять значение мольной газовой постоянной равным

$$\mu R = 1,985814 \text{ ккал/моль град},$$

то по кинетической теории теплоемкости различных газов должны иметь следующие значения:

для одноатомных газов	$\mu c_v = 2,978$	ккал/моль град
„ двухатомных „	$\mu c_v = 4,964$	„
„ трехатомных „	$\mu c_v = 5,957$	„

Опыт показывает, что значение теплоемкости одноатомного газа, вычисленное по приведенной формуле, действительно близко к истинному. Однако уже для двухатомных газов начинаются отклонения, хотя порядок величин сохраняется тот же. С существенно большим отклонением опытных данных от расчетных получается для многоатомных газов, для которых в ряде случаев даже не сохраняется порядок расчетных величин.

Основным дефектом кинетической теории является то, что при помощи этой теории нельзя определить зависимость теплоемкости от температуры, в то время как опыт подтверждает эту зависимость для большинства газов.

Все попытки объяснить отклонения от формулы, выведенной на основании кинетической теории, оказались безуспешными. На основании принципа равного распределения энергии можно определить порядок величин теплоемкости газов и в некоторых случаях, например для одноатомных газов, довольно точно вычислить и ее значения. Однако согласно этому принципу невозможно раскрыть зависимость теплоемкости от температуры и вычислить значения теплоемкости для многоатомных газов.

Основное принципиальное затруднение, с которым мы встречаемся в термодинамике и в классической кинетической теории при рассмотрении зависимости теплоемкости от температуры, заключается в том, что в термодинамике мы оперируем средними величинами, определяющими состояние газа (макросостоянием), не рассматривая подробно характера и структуры внутренней энергии. А этих средних данных оказывается недостаточно, чтобы определить характер изменения внутренней энергии в зависимости от температуры.

2. ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ; КВАНТОВАНИЕ ЭНЕРГИИ

Для того чтобы найти зависимость внутренней энергии газа от температуры, необходимо рассмотреть энергию каждой молекулы в отдельности, т. е. рассмотреть микросостояния.

Как известно, в газе содержится много молекул, каждая из которых может обладать различным количеством энергии. Допустим, что мы узнали энергию отдельной молекулы и характер ее изменения. Тогда, просуммировав значения энергии молекул по числу молекул, заключенных в данном объеме газа, мы могли бы определить внутреннюю энергию газа.

Таким образом, для определения внутренней энергии требуется знание энергий отдельных молекул, распределение числа молекул по величине энергии, которой они обладают, и способы ее суммирования.

При рассмотрении изменений энергии газа в термодинамике обычно предполагают, что энергия газа может изменяться непрерывно, т. е. что она есть непрерывная функция переменных, ее определяющих. Это предположение подтверждается опытом и в действительности оно может быть осуществимо, так как мы рассматриваем макросостояния газа, т. е. явления, характеризующие средние свойства отдельных молекул. При рассмотрении же микроскопического состояния, т. е. состояния каждой молекулы в отдельности, оказывается, что предположение о непрерывности изменения энергии уже не соответствует действительности.

Вопросы определения энергии отдельных молекул и законы ее изменения рассматриваются в квантовой механике.

Основным положением, на котором базируется современная квантовая механика, является представление, по которому с каждым движением материальной точки может быть сопоставлен некоторый колебательный процесс с длиной волны

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (75)$$

где m — масса частицы;

v — скорость ее движения;

h — так называемый квант действия, равный по современным данным

$$h = (6,62377 \pm 0,00018) 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек};$$

этот колебательный процесс, соответствующий движению материи, описывается волновым дифференциальным уравнением

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2m}{h^2} (\epsilon - V)\psi = 0, \quad (76)$$

где ϵ — полная энергия движения;

V — потенциальная энергия;

ψ — некоторая величина, характеризующая колебательный процесс;

$\Delta\psi$ — оператор Лапласа

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}. \quad (77)$$

Физическое толкование длины волны и величины ψ в волновом уравнении выходит за пределы поставленной нами задачи.

При решении волнового уравнения необходимо соблюдать граничное условие, являющееся основным положением квантовой механики, по которому ψ должно быть однозначно, конечно и непрерывно во всех точках пространства.

Волновое уравнение может быть решено при заданных граничных условиях и определенных значениях энергии ϵ . Эти значения энергии называются собственными (фундаментальными) значениями уравнения.

Предположим, что в молекуле, состоящей из двух атомов, атомы колеблются один относительно другого, причем сила, вызывающая колебания, подчиняется закону Гука. Тогда потенциальная энергия колебаний такого рода равна:

$$V = 2\pi^2\nu^2mx^2, \quad (78)$$

где ν — частота колебаний;

x — переменная координата — расстояние между атомами;

m — масса.

При подстановке значений потенциальной энергии в волновое уравнение (76) оно примет вид

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2} (\epsilon - 2\pi^2\nu^2mx^2)\psi = 0. \quad (79)$$

Уравнение может быть решено и решение будет удовлетворять граничным условиям, если значение энергии молекулы ε , т. е. собственное значение, будет

$$\varepsilon = \left(v + \frac{1}{2} \right) h\nu, \quad (80)$$

где v — целое положительное число, так называемое квантовое колебательное число.

Нас в данном случае не интересует само решение дифференциального уравнения, важно лишь то, что решение это может быть выполнено только при определенных условиях, а именно, когда энергия колебания будет определяться уравнением (80); следовательно, энергия колебания может принимать значения

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2} h\nu; \quad \varepsilon_1 = \frac{3}{2} h\nu; \quad \varepsilon_2 = \frac{5}{2} h\nu \text{ и т. д.,}$$

т. е. уровни энергии образуют дискретный непрерывный ряд чисел. При этом изменение энергии этого вида, очевидно, равно

$$\varepsilon' - \varepsilon'' = h\nu$$

(здесь ε' и ε'' — значения колебательной энергии молекулы в двух соседних энергетических состояниях).

В этом — основной смысл современных квантовых представлений об энергии. Прерывность энергии была подмечена еще Планком, который при рассмотрении вопросов излучения замкнутого тела пришел к выводу, что энергия может изменяться скачками, равными кванту энергии,

$$\varepsilon' - \varepsilon'' = h\nu; \quad (81)$$

иными словами, если частица совершает колебания, то не всякая прибавка энергии будет восприниматься ею, а воспринимается только та прибавка, которая будет равна целому кванту.

Квантовые представления об энергии отнюдь не находятся в противоречии с обычными классическими представлениями об энергии. Эти классические представления являются как бы частным случаем общих квантовых. В самом деле, если квант очень мал, что может быть, когда частота колебаний очень мала, то энергия будет изменяться непрерывно. Как говорят, такая энергия „не квантуется“.

3. ПОНЯТИЕ О НУЛЕВОЙ ЭНЕРГИИ

Важность написанных выше соотношений заключается также и в том, что энергия колебаний не может быть равной нулю; ее минимальное значение равно

$$\varepsilon_{\min} = \frac{1}{2} h\nu. \quad (82)$$

В классической термодинамике и кинетической теории материи обычно предполагается, что при температуре газа, равной абсолютному нулю, всякое движение прекращается и, следовательно, запас энергии внутримолекулярных колебаний при этой температуре, который может быть извлечен в виде тепла, равен нулю. Согласно квантовой теории это предположение оказывается неверным.

Следовательно, надо предполагать существование нулевой энергии. Само по себе это предположение о нулевой энергии, казалось бы, не имеет практического смысла, так как мы можем энергию отсчитывать от любого состояния и совершенно не обязательно отсчитывать ее от абсолютного нуля. Однако это верно лишь при условии, что начальный уровень энергии для всех газов одинаков; но это условие как раз и не соблюдается, так как из написанного выше соотношения видно, что нулевая энергия связана с частотой колебаний внутри молекул, а эта частота собственных колебаний может быть отлична и в действительности отлична для разных газов. Это обстоятельство имеет большое значение для физической химии при вычислении ряда физических констант в процессах с выделением тепла в химических реакциях.

III. ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Перейдем к рассмотрению вопроса о конкретном определении энергии молекул.

По современной теории строения молекулы энергия молекулы складывается из следующих видов:

- 1) энергии поступательного движения молекул ε_t ;
- 2) энергии вращения молекулы ε_r ;
- 3) энергии внутримолекулярных колебаний ε_v ;
- 4) энергии возбуждения электронов (электронной) ε_e .

Следовательно, полная энергия молекулы равна

$$\varepsilon = \varepsilon_t + \varepsilon_r + \varepsilon_v + \varepsilon_e.$$

При этом каждый вид энергии может зависеть один от другого. Об этом будет сказано более подробно при дальнейшем изложении.

2. ЭНЕРГИЯ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Энергия поступательного движения может быть найдена на основании кинетической теории без применения квантовой механики, так как в обоих случаях результат будет одинаков. Однако для общности изложения дадим уравнение на основании квантовой теории.

С поступательным движением молекулы в замкнутом пространстве можно сопоставить колебательный процесс с длиной фазовой волны

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

где v — скорость поступательного движения;

m — масса молекулы.

Поток молекул,двигающихся поступательно в каком-либо направлении, при встрече с препятствием, мешающим его распространению, должен подобно лучу света подвергаться дифракции, т. е. материальному потоку молекул должны быть свойственны основные признаки света.

Это подтверждается опытами, в которых наблюдалась дифракция молекул от кристаллической поверхности и на основании которых было получено полное подтверждение формулы $\lambda = \frac{h}{mv}$.

Так как число волн в замкнутом пространстве должно быть ограничено, то должно быть ограничено и число возможных значений энергии поступательного движения, т. е. поступательная энергия должна быть квантована.

Распределение энергии отдельных молекул по нескольким дискретным квантовым значениям можно получить, решая волновое дифференциальное уравнение (76). Из этого решения следует, что энергия поступательного движения молекулы равна

$$\varepsilon_t = \frac{h^2}{8ml^2} (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2), \quad (83)$$

где l — длина ребра объема газа, имеющего форму куба;
 n_1 , n_2 и n_3 — простые целые числа, соответствующие трем направлениям осей координат.

Как показывает теория, энергию поступательного движения можно считать независимой от энергии молекулы других перечисленных выше видов.

3. ЭНЕРГИЯ КОЛЕБАНИЙ ДВУХАТОМНОЙ МОЛЕКУЛЫ

Рассмотрим первоначально колебание в двухатомной молекуле.

Выше, при рассмотрении энергии колебаний, мы предполагали, что в молекуле совершаются гармонические колебания. Предположим теперь, что квазиупругая энергия молекулы в общем виде выражается уравнением

$$V = kr_e^2 \left(\frac{1}{2} \xi^2 - \beta \xi^3 - \gamma \xi^4 - \dots \right), \quad (84)$$

где $\xi = \frac{r - r_e}{r_e}$;

r — переменное расстояние между колеблющимися атомами, составляющими молекулу;

r_e — расстояние между атомами в состоянии равновесия.

Под воздействием выраженной таким образом силы в молекуле возникнут ангармонические колебания, причем по общеизвестным законам механики частота собственных колебаний молекулы будет равна

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}; \quad (85)$$

она в первую очередь зависит от константы k , характеризующей силу связи атомов в молекуле, т. е. величины, связанной с теплотой диссоциации молекулы.

Кроме того, частота собственных колебаний зависит от приведенной массы молекулы, равной

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \quad (86)$$

где m_1 и m_2 — массы атомов.

Для таких молекул, как N_2 , O_2 , H_2 , очевидно, что

$$\mu = \frac{m}{2}, \quad (87)$$

следовательно, частота собственных колебаний тем больше, чем меньше масса m .

Величина, характеризующая степень ангармоничности колебаний, т. е. степень отклонения данного колебания от гармонического, равна

$$x\nu = \frac{3h}{8\pi I} \left(\gamma + \frac{5}{2} \beta^2 \right) \text{сек}^{-1}, \quad (88)$$

где I — момент инерции молекулы.

Следовательно, степень ангармоничности при заданных коэффициентах энергии связи γ и β тем больше, чем меньше момент инерции молекул.

Если выражение для квазиупругой энергии подставить в волновое уравнение и решить его, то найдем, что энергия молекулы будет равна (собственные значения функции):

$$\varepsilon_v = h\nu \left(v + \frac{1}{2} \right) - x\nu h \left(v + \frac{1}{2} \right)^2 \text{ эрг}, \quad (89)$$

где ν — так называемое квантовое колебательное число, которое может принимать любые целые положительные значения (0, 1, 2 и т. д.).

В дальнейшем изложении, как это принято в спектроскопии, энергия молекулы или ее составляющие будут выражены не в эргах, а в см^{-1} , а вместо колебательной частоты ν сек. $^{-1}$ введена колебательная частота

$$\omega = \frac{\nu}{c} \text{ см}^{-1},$$

где c — скорость света в $\text{см}/\text{сек}$.

Если в уравнение потенциальной энергии добавить члены более высокой степени при ξ , то значения энергии молекулы, как ангармонического осциллятора, могут быть выражены уравнением

$$\begin{aligned} \varepsilon = \omega_e \left(v + \frac{1}{2} \right) - \omega_e x_e \left(v + \frac{1}{2} \right)^2 + \omega_e y_e \left(v + \frac{1}{2} \right)^3 - \\ - \omega_e z_e \left(v + \frac{1}{2} \right)^4 + \dots; \end{aligned} \quad (90)$$

здесь константы

$$\omega_e x_e \ll \omega_e; \quad \omega_e y_e \ll \omega_e x_e; \quad \omega_e z_e \ll \omega_e y_e.$$

Уравнение (90) можно рассматривать в известной мере как эмпирическое, так как оно описывает действительную потенциальную функцию с приближением.

В случае ангармонического колебания уровни энергии при изменении квантового числа не являются равноотстоящими, как при гармоническом осцилляторе; расстояния между отдельными уровнями с увеличением квантового числа уменьшаются.

Так же, как и при гармоническом колебании, в ангармоническом осцилляторе при самом низшем энергетическом состоянии, характеризуемом квантовым числом $\nu = 0$, энергия не равна нулю, но в отличие от уравнения (82) может быть выражена соотношением

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2} \omega_e - \frac{1}{4} \omega_e x_e + \frac{1}{8} \omega_e y_e - \frac{1}{16} \omega_e z_e. \quad (91)$$

Колебательная энергия, в отличие от поступательной, зависит от других видов энергии, в частности, от энергии электронных переходов. При переходе молекулы от одного состояния электронной энергии к другим изменяются основная собственная частота колебаний и коэффициент ангармоничности.

В табл. 14 приведены значения собственных частот и степени ангармоничности для двухатомных молекул; все константы приведены для нормального электронного состояния. В табл. 14 приведены также и вращательные константы двухатомных молекул.

Таблица 14

Колебательные и вращательные константы для нормальных электронных состояний двухатомных молекул

Молекула	Нормальное состояние	ω_e (см^{-1})	$\omega_e x_e$ (см^{-1})	D_0 (eV)	B_e (см^{-1})	α_e (см^{-1})	r_e (Å)	Примечание
Ag ¹⁰⁹ Br ⁸¹	(1 Σ)	247,72	0,6795	2,6				Значение D_0 получено из термохимических данных То же
Ag ¹⁰⁷ C ¹³⁵	(1 Σ)	343,2	1,65	3,1				
AgH ¹	1 Σ^+	1760,0	34,05 *	(2,3)	6,453	0,203	1,618	Значение D_0 получено из термохимических данных
AgH ²	1 Σ^+				3,2595	0,0732	1,6174	
Ag ¹⁰⁷ J ¹²⁷	(1 Σ)	206,18	0,4327	2,0				
AgO ¹⁶	(2 Σ^-)	493,2	4,10	(1,8)				Значение r_e вычислено из истинного, а не из эффективного значения B_e То же
Al ²⁷ Br ⁷⁹	1 Σ	378,0	1,28		0,1591	0,000850	2,296	
Al ²⁷ Br ⁸	1 Σ	376,8	1,27		0,1581	0,000842	2,296	
Al ²⁷ Cl ³⁵	1 Σ	481,3	1,95	$\leq 4,72$	0,242	0,002	2,14	
Al ²⁷ H ¹	1 Σ^+	1682,57	29,145 *	$< 3,07$	6,3962	0,188	1,6461	
Al ²⁷ H ²	1 Σ^+	1212,02	15,200 *	$< 3,10$	3,3185	0,069	1,6458	
(Al ²⁷ H ¹) ⁺	2 Σ^+	(1610)			6,763	0,398	1,602	
Al ²⁷ J ²⁷	1 Σ	316,1	1,0	(3,1)				
Al ²⁷ O ¹⁶	2 Σ	978,2	7,12	(4,03)	0,6415	0,00575	1,618	
As ⁷⁵	1 Σ_g^+	429,44	1,120 *	3,96				В состоянии Π дублетное расщепление: 1023,7 см^{-1}
(As ⁷⁵) ⁺		314,8	1,25	(2,4)				
As ⁷⁵ N ¹⁴	1 Σ^+	1067,96	5,36	(6,5)				
As ⁷⁵ O ¹⁶	2 Π	966,6	4,92	(4,9)				
Au ¹⁹⁷ C ¹³⁵	(1 Σ)	382,8	1,30	(3,5)				
Au ¹⁹⁷ H ¹	1 Σ^+	2305,01	43,12	(3,6)	7,2401	0,2136	1,5239	
Au ¹⁹⁷ H ²	1 Σ^+	1634,98	21,66 *	(3,7)	3,6415	0,0761	1,5239	
BaBr	(2 Σ)	(192)						
Ba ¹³⁸ C ¹³⁵	2 Σ^+	279,2	0,78	(2,2)				
BaF ¹⁹	2 Σ^+	468,9	1,79	(3,8)				
BaH ¹	2 Σ^+	1172	16	$< 1,82$	3,382	0,066	2,232	
BaO ¹⁶	(1 Σ) ^{**}	671,48	2,20	(6,3)	0,3644	0,0016	1,797	
B ₂ ¹¹	3 Σ_g^-	1035,2	9,35		1,212	0,014	1,590	
B ¹¹ Br ⁷⁹	1 Σ^+	686,3	3,8	(4,12)	0,487		1,890	
B ¹¹ C ¹³⁵	1 Σ^+	839,12	5,11	(5,1)	0,6838	0,00646	1,716	
Be ⁹ C ¹³⁵	2 Σ^+ ^{**}	846,58	5,11	(4,3)				
Be ⁹ F ¹⁹	2 Σ^+	1265,62	9,12	(5,4)	1,4877	0,01685	1,3616	
Be ⁹ H ¹	2 Σ^+	2058,5	35,5 *	(2,2)	10,308	0,300	1,343	
Be ⁹ H ²	2 Σ^+				5,6807	0,1218	1,3427	
(Be ⁹ H ¹) ⁺	1 Σ^+	2221,7	39,79 *	(3,6)	10,7996	0,2935 *	1,3123	
(Be ⁹ H ²) ⁺	1 Σ^+	1647,6	21,9 *	(3,6)	5,9546	0,1233	1,3114	
Be ⁹ O ¹⁶	1 Σ^+	1486,87	11,70	(5,7)	1,6514	0,0186	1,3308	
B ¹¹ F ¹⁹	3 Π	1323,64	9,40	(5,7)	1,4120	0,0179	1,3088	
B ¹¹ H ¹	1 Σ^+	(2366)	(49)	$< 3,49$	12,018	0,413	1,2326	Состояние 3 Π — самое нижнее из известных состояний, но, по всей вероятности, не нормальное состояние

Продолжение табл. 14

Молекула	Нормальное состояние	ω_e (см^{-1})	$\omega_e x_e$ (см^{-1})	D_0 (eV)	B_e (см^{-1})	r_e^* (см^{-1})	r_e^e (Å)	Примечание
B^{11}H_2	$1\Sigma^+$	(1780)		$< 3,53$	6,532	0,166	1,231	Значение D_0 получено из тепловых данных
$(\text{B}^{11}\text{H}_1)^+$	$2\Sigma^+$	(2435)			(12,374)		(1,2148)	
B_2^{209}	(1Σ)	173,7	0,41	3,34				
$\text{Bi}^{209}\text{Br}^{79}$		209,34	0,468	2,9				
$\text{Bi}^{209}\text{Cl}^{35}$		307,66	0,954	(3,0)				
$\text{Bi}^{209}\text{F}^{19}$		510,7	2,05	(3,9)				
$\text{Bi}^{209}\text{H}_1$	$1\Sigma^{**}$	1698,9	31,6	(2,7)	5,137	0,148	1,809	
$\text{Bi}^{209}\text{H}_2$	$1\Sigma^{**}$	1205,5	16,05	(2,7)	2,592	0,054	1,806	
$\text{Bi}^{209}\text{I}^{127}$		163,9	0,31	(2,7)				
$\text{Bi}^{209}\text{O}^{16}$	**	493,39	1,32	(5,7)				
$\text{B}^{11}\text{N}^{14}$	3Π	1502,3	12,3		1,666	0,025	1,281	
$\text{B}^{11}\text{O}^{16}$	$2\Sigma^+$	1885,44	11,769	(9,1)	1,7803	0,01648	1,2050	
$\text{Br}^{79}\text{Br}^{81}$	$1\Sigma_g^+$	323,2	1,07	1,971	0,08091	0,00027	2,284	Значение D_0 получено из данных по $D_0(\text{Br}_2)$, $D_0(\text{Cl}_2)$ и теплоты образования BrCl , полученной термохимическим методом
BrCl	($1\Sigma^+$)	(430)		2,26				
BrF^{19}	$1\Sigma^+$	668	3					
C_2^{12}	$3\Pi_u$	1641,70	11,71	3,6	1,6320	0,01659	1,3121	
CaBr	(2Σ)	(280,2)						
CaCl^{35}	(2Σ)	364,5	0,80	$\leq 2,76$	(0,26)		(1,9)	
$\text{Ca}^{(40)}\text{F}^{19}$	1Σ	857,3	(2,5)	$\leq 3,15$	(0,3215)		(2,018)	
$\text{Ca}^{(40)}\text{H}_1$	$2\Sigma^+$	1299	19,5	$\leq 1,70$	4,278	0,096	2,002	
$\text{Ca}^{(40)}\text{H}_2$	$2\Sigma^+$				2,196	0,035	2,001	
Ca^{127}	(2Σ)	242,0	0,64	(2,1)				
$\text{Ca}^{(40)}\text{O}^{16}$		640	5					
C^{12}Cl	2Π	(843,6)						В состоянии 2Π дублетное расщепление: 136 см^{-1}
Cd_2	$1\Sigma_g^+$			0,087				
CdBr	**	230,0	0,50	(2,5)				
CdCl^{35}	2Σ	330,5	1,2					
CdF^{19}		(550)						
CdH_1	$2\Sigma^+$	1430,7	46,3*	0,678	5,437	0,218*	1,762	
CdH_2	$2\Sigma^+$			0,704	2,788	0,168	1,75	
$(\text{CdH}_1)^+$	$1\Sigma^+$	1775	37,3	(2,0)	6,070	0,187	1,668	
$(\text{CdH}_2)^+$	$1\Sigma^+$	1262,5	19,01	(2,0)	3,075	0,0682	1,665	
CdI^{127}	2Σ	178,5	0,625	(1,6)				
CeO^{16}	**	865,0	2,99	(7,7)				
C^{12}H_1	$2\Pi_r$	2824	46	3,47	14,453	0,528	1,1201	
C^{12}H_2	$2\Pi_r$	2073	25	3,52	7,805	0,204	1,119	
Cl_2^{35}	$1\Sigma_g^+$	564,9	4,0	2,481	0,2438	0,0017	1,989	
$(\text{Cl}_2^{35})^+$	(2Π)**	645,3	2,90	(4,4)	0,270	0,002	1,89	
ClF^{19}	$1\Sigma^+$	793,2	9,9	2,66	0,518	0,006	1,625	

Продолжение табл. 14

Молекула	Нормальное состояние	ω_e (см^{-1})	$\omega_e x_e$ (см^{-1})	D_0 (eV)	B_e (см^{-1})	α_e (см^{-1})	r_e (Å)	Примечание
Cl_2N^{14}	$2\Sigma^+$	2068,705	13,144	(5,96)	1,8991	0,01735	1,1721	Значение D_0 вычислено с помощью тепловых данных из значения D_0 (CO)
Cl_2O^{16}	$1\Sigma^+$	2170	13,461 *	(9,144)	1,9314	0,01748	1,1284	
$(\text{Cl}_2\text{O}^{16})^+$	$2\Sigma^+$	2211,1	15,12	(6,5)	1,978	0,0214	1,115	Значение D_0 получено путем сравнения сплошного спектра поглощения F_2 со сплошным спектром поглощения других галогенов, а значение r_e — из опытов с дифракцией электронов
Cl_2S^{32}	$1\Sigma^+$	2121,33	12,64	(7,8)	1,8465	0,0169	1,1291	
CoBr	**	(31)						(1,543)
C. Cl	**	420,8	0,69	(7,9)				
C. H ¹	$3\Phi_4$	(18,9)			(7,151)			
CoO		(840)						
Cl_2P^{31}	$2\Sigma^+$	1239,67	6,86	(6,9)	0,79863	0,00597	1,5622	
CrO^{16}		838,8	6,5	(3,8)				
Cs_2^{133}	$1\Sigma_g^+$	41,930	0,08035 *	0,45				
Cl_2S^{32}	$1\Sigma^+$	1285,1	6,5	(7,8)	0,8190	0,005	1,536	
Cl_2Se	$1\Sigma^+$	1036,0	4,8 *	(6,8)			(1,65)	
$\text{Cs}^{133}\text{H}^1$	$1\Sigma^+$	890,7	12,6	(1,9)	2,709	0,057	2,494	
Cu_2	$1\Sigma_g^+$	154	4,0	(0,17)				
$\text{Cu}^{63}\text{Br}^{79}$		314,13	0,865	(3,5)				
$\text{Cu}^{63}\text{Cl}^{35}$		417,02	1,64	(3,3)				
$\text{Cu}^{63}\text{F}^{19}$	1Σ	619,5	3,79	(3,1)	(0,3780)		(1,749)	
Cu^{63}H^1	$1\Sigma^+$	1940,4	37,2 *	(3,0)	7,938	0,249	1,463	
Cu^{63}H_2	$1\Sigma^+$	1384,38	19,14	(3,0)	4,0375	0,0914	1,4627	
$\text{Cu}^{63}\text{J}^{127}$		264,83	0,71	(3,0)				
CuO^{16}	2Σ	318,6	4,4					
DyO		489,50	2,25					
F_2^{19}	$1\Sigma_d^+$			2,8			1,45	
FeCl	**	406,6	1,2	(4,3)				(1,4761)
FeH ¹					(7,8155)			
FeO^{16}		875	5					
$\text{Ga}^{69}\text{Br}^{81}$	1Σ	263,0	0,8	2,7				
$\text{Ga}^{69}\text{Cl}^{35}$	1Σ	365,0	1,1	(3,7)				
$\text{Ga}^{69}\text{J}^{127}$	1Σ	216,4	0,5	2,9				
GaO^{16}	(2Σ)	767,69	6,34	2,9				
GdO^{16}	**	836	3,0					
GeBr	2Π	296,6	0,9	(3)				
$\text{Ge}^{74}\text{Cl}^{35}$	2Π	408,4	1,6	(3,2)				В состоянии 2Π — дублетное расщепление: 1150 см^{-1} В состоянии 2Π — дублетное расщепление: 975 см^{-1}

Продолжение табл. 14

Молекула	Нормальное состояние	ω_e ($см^{-1}$)	$\omega_e x_e$ ($см^{-1}$)	D_0 (eV)	B_e ($см^{-1}$)	α_e ($см^{-1}$)	r_e (Å)	Примечание
Ge ⁷⁴ O ¹⁶	1 Σ	985,7	4,3	(6,9)	0,4704	0,0029	1,651	
Ge ⁷⁴ S ³²	(1 Σ)	575,8	1,80	(5,6)	—		(2,11)	
GeSe		4,06,8	1,2	(4,1)			(2,50)	
GeTe		323,4	1,0	(3,2)			(2,85)	
H ₂	1 Σ_g^+	4371	113,5 *	4 4776	60,564	2,7931 *	0,7414	
H ¹ H ²	1 Σ_g^+	3786	85,2 *	4,5133	45,439	1,8051 *	0,7413	
H ₂ ²	1 Σ_g^+	3092,3	56,8 *	4,5557	30,312	0,98898 *	0,7417	
(H ₂ ¹) ⁺	2 Σ_g^+	2297	62	2,6490	23,8	1,4	1,06	
H ¹ Br	1 Σ^+	2643,67	45,21	3,60	8,471	0,226	1,414	Значение D_0 получено из данных по D_0 (H ₂), D_0 (Br ₂) и теплоты образования HBr, найденной термическим способом
(H ¹ Br) ⁺	2 Π_i			3,3	[7,955]		[1,459]	В состоянии 2 Π_i — дублетное расщепление 2653 $см^{-1}$. Значение D_0 получено из данных по D_0 (HBr), I (HBr) = 12,1 eV и I (Br) = 11,8 eV
H ¹ Cl ³⁵	1 Σ^+	2988,95	51,65	4,431	10,5909	0,3019	1,2747	Значение D_0 получено из данных по D_0 (H ₂), D_0 (Cl ₂) и теплоты образования HCl, найденной термохимическим путем
H ² Cl ³⁵	1 Σ^+	(2090,78)		4,48	5,445	0,1118	1,275	
(H ¹ Cl ³⁵) ⁺	2 Π_i	2675,4	53,5	4,5	9,9463	0,3183	1,3154	Значение D_0 получено из данных по D_0 (HCl), J (HCl) = 12,9 eV и J (Cl) = 13,0 eV.
(H ² Cl ³⁵) ⁺	2 Π_i	(1863,96)		4,6	5,1108	0,1170	1,3161	То же
He ₂ ⁴	3 Σ_u^+	(1732)		(2,5)	7,695	0,21	1,046	Состояние 3 Σ_u^+ — самое низкое устойчивое состояние, но не нормальное. Значение D_0 получено из опытов с возбужденным электронным ударом D_0 (He ₂) \geq 4,23 и D_0 (He ₂ ⁺) \geq 4,70 eV
(He ₂ ⁴) ⁺	2 Σ_u^+	(1628)		(3)	(7,09)	(0,25)	(1,05)	Значение D_0 получено из опытов с возбужденным электронным ударом D_0 (He ₂) \geq 4,23 и D_0 (He ₂ ⁺) \geq 4,70 eV

Продолжение табл. 14

Молекула	Нормальное состояние	ω_e (см^{-1})	$\omega_e x_e$ (см^{-1})	D_0 (eV)	B_e (см^{-1})	α_e (см^{-1})	r_e (Å)	Примечание
H ₂ F ¹⁹	1 Σ^+	4141,305	90,886 *	6,4	20,967	0,879 *	0,9166	Значение D_0 получено из данных по D_0 (H ₂), D_0 (F ₂) и теплоты образования HF, определенной термодинамическим способом
Hg ₂	1 Σ_g^+	(36)		0,08			3,3	
HgBr	2 Σ	186,25	0,975	(1,1)				
HgCl ¹³⁵	2 Σ^+	292,61	1,6025 *	1,04			2,33	
HgCl ¹³⁷	2 Σ^+	285,80	1,529 *	1,04			2,33	
HgF ¹⁹	2 Σ	490,8	4,05					
HgH ¹	2 Σ^+	1387,09	82,75 *	0,372	5,549	0,312 *	1,741	
HgH ₂	2 Σ^+	995,15	49,93 *	0,395	2,799	0,113 *	1,738	
(HgH ¹) ⁺	1 Σ^+	2033,87	46,16 *	(2,5)	6,613	0,206	1,594	
(HgH ₂) ⁺	1 Σ^+	1442,15	23,24 *	(2,5)	3,328	0,0736	1,594	
HgJ ¹²⁷	2 Σ	125,8	1,08	(0,5)				Значение D_0 получено из данных по D_0 (H ₂), D_0 (J ₂) и из теплоты образования HJ, определенной термодинамическим способом
HgTl		(26,2)	(0,69)	0,031				
H ₂ J ¹²⁷	1 Σ^+	2309,53	39,73	2,75	6,551	0,183	1,604	
H ¹ S ³²	2 $1I_i$				(9,47)		(1,35)	
J ₂ ¹²⁷	1 Σ_g^+	214,36	0,593 *	1,5422	0,03736	0,00012	2,667	
J ¹²⁷ Br ⁷⁹	1 Σ^+	268,4	0,78	1,818				
J ¹²⁷ Cl ¹³⁵	1 Σ^+	384,18	1,465	2,153	0,11414	0,000502 *	2,321	
Jn ¹¹⁵ Br ⁸¹	1 Σ	221,0	0,6	≤ 3,3			2,57	
Jn ¹¹⁵ Cl ¹³⁵	1 Σ^+	317,4	1,01	(4,65)	(0,1107)		(2,38)	
Jn ¹¹⁵ Cl ¹³⁷	1 Σ^+	310,8	0,97	(4,65)	(0,1107)		(2,38)	
JnH ¹	1 $\Sigma^+ **$				(4,921)		(1,852)	
Jn ¹¹⁵ J ¹²⁷	1 Σ	177,1	0,4	≤ 2,7			2,86	
JnO ¹⁶	2 $\Sigma **$	703,09	3,71 *	(1,3)				
K ₂ ³⁹	1 Σ_g^+	92,64	0,354	0,514	0,05622	0,000219	3,923	Значение r_e найдено из опытов по электронной дифракции
KBr	1 Σ^+	231	0,75	3,96			2,94	
KCl	1 Σ^+	280	0,9	4,53			2,79	
К(39)H ¹	1 Σ^+	983,3	14,40	0,579	3,407	0,0673*	2,244	
K(39)H ₂	1 Σ^+				(1,641)		(2,32)	То же

Продолжение табл. 14

Молекула	Нормальное состояние	ω_e (см^{-1})	$\omega_e x_e$ (см^{-1})	D_0 (eV)	B_e (см^{-1})	α_e (см^{-1})	r_e (Å)	Примечание
KJ ¹²⁷	1 Σ^+	212	0,7	3,33			3,23	Значение r_e найдено из опытов по электронной дифракции
La ¹³⁹ O ¹⁶	2 Σ	811,6	2,23	(9)				
Li ₂ ⁷	1 Σ_g^+	351,346	2,557 *	1,14	0,67293	0,00719	2,6723	
Li ⁷ Cs ¹³³	1 Σ^+	(167)						Значение r_e вычислено по истинным, а не по эффективным значениям B_e , приведенным в настоящей таблице
Li ⁷ H ¹	1 Σ^+	1405,65	23,20 *	(2,5)	7,5131	0,2132 *	1,5956	
Li ⁷ H ²	1 Σ^+	1055,12	13,228 *	(2,5)	4,2338	0,09198 *	1,5951	То же
LiJ ¹²⁷	1 Σ^+	450	1,5 *	3,38				
LiK	1 Σ^+	(207)						
LiRb	1 Σ^+	(185)						
LuO ¹⁶		841,66	4,07	(5,3)				
Mg ²⁴ Br	(2 Σ)	373,2	1,34	(3,2)				
Mg ²⁴ C ¹³⁵	(2 Σ)	466,0	2,10	(3,2)				
Mg ⁽²⁴⁾ F ¹⁹	2 Σ	690,75	3,95	(3,7)	(0,518)		(1,75)	
Mg ⁽²⁴⁾ H ¹	2 Σ^+	1494,9	31,5	< 2,50	5,818	0,1668 *	1,731	
Mg ⁽²⁴⁾ H ²	2 Σ^+	1077,76	16,09	> 2,52	3,0307	0,0654 *	1,7302	
(Mg ⁽²⁴⁾ H ¹) ⁺	1 Σ^+	1695,3	30,2 *	(2,1)	6,390	0,190	1,652	
(Mg ⁽²⁴⁾ H ²) ⁺	1 Σ^+	1226,6	16,30 *	(2,1)	3,321	0,064 *	1,653	
MgJ ¹²⁷	(2 Σ)	(312)						
MgO ¹⁶	(1 Σ) ^{**}	665,74	4,41	(3,1)				
MnBr	7 Σ	289,7	0,9					
MnCl	7 Σ	384,9	1,4					
MnF ¹⁹	7 Σ	612	3					
MnH ¹	7 Σ	(1580)						
MnJ ¹²⁷	7 Σ	240	1,5					
MnO ¹⁶	**	840,70	4,89	(4,4)				
N ₂ ¹⁴	1 Σ_g^+	2359,61	14,445	7,384	2,007	0,018	1,095	
(N ₂ ¹⁴) ⁺	2 Σ_g^+	2207,19	16,136 *	6,351	1,931	0,020	1,117	Значение D_0 получено из данных по $D_0(N_2)$; $J(N)$ и $J(N_2)$
(N ₂ ¹⁵) ⁺	1 Σ_g^+	2132,57	15,063 *		1,8014	0,0180		
Na ₂ ²³	1 Σ_g^+	159,23	0,726 *	0,763	0,15471	0,00079 *	3,079	
Na ²³ Br	1 Σ^+	315	1,15	3,85			2,64	Значение r_e получено из опытов по электронной дифракции
Na ²³ Cl	1 Σ^+	380	1,0	4,25			2,51	Значение r_e получено из опытов по электронной дифракции
Na ²³ Cs ¹³³	1 Σ^+	(97)						
Na ²³ H ¹	1 Σ^+	1172,2	19,72 *	(2,2)	4,9012	0,1353	1,8875	
Na ²³ H ²	1 Σ^+	(826,10)		(2,2)	2,5575	0,0520	1,8867	

Продолжение табл. 14

Молекула	Нормальное состояние	ω_e ($см^{-1}$)	$\omega_e x_e$ ($см^{-1}$)	D_0 (eV)	B_e ($см^{-1}$)	α_e ($см^{-1}$)	r_e (Å)	Примечание
Na ²³ J ¹²⁷	1 Σ^+	286	0,75	3,16			2,90	Значение r_e получено из опытов по электронной дифракции
Na ²³ K	1 Σ^+	123,29	0,400	0,63				
Na ³⁹ Rb	1 Σ^+	106,64	0,455	(0,8)	1,566			
N ¹⁴ Br ⁸¹	**	693	5,0					
N ¹⁴ H ¹	3 Σ^-	(3300)		(3,4)		0,64	1,038	Неизвестно, действительно ли состояние 2 Π является нормальным. Дублетное расщепление: 484 $см^{-1}$
NiBr	**	(350)						
NiCl	2 Π	418,1	0,74	(7,3)	7,823			
NiH ¹	2 $\Delta_{5/2}$	(1926,6)				0,248	1,475	
NiO ²⁶	2 Π_r	615						В состоянии 2 Π_r дублетное расщепление: 120,5 $см^{-1}$, значение D_0 получено из данных по $D_0(N_2)$, $D_0(O_2)$ и теплоты образования NO, определенным термодинамическим способом
N ¹⁴ O ¹⁶	2 Π_r	1906,52	14,504	5,29	1,709	0,0183	1,150	
(N ¹⁴ O ¹⁶) ⁺	**				(1,961)		(1,073)	
N ¹⁴ S ³²	2 Π_r	1220,0	7,75	(5,9)				
O ₂ ¹⁶	3 Σ_g^-	1580,36	12,073 *	5,082	1,4456	0,0158	1,2076	В состоянии 2 Π_r дублетное расщепление: 223 $см^{-1}$
(O ₂ ¹⁶) ⁺	2 Π_g	1876,4	16,53	6,48	1,6722	0,01984	1,1228	
O ¹⁶ H ¹	2 Π_i	3727,95	78,15 *	4,334	18,862	0,693	0,9710	В состоянии 3 Π_g^- дублетное расщепление: 198 $см^{-1}$
O ¹⁶ H ²	2 Π_i	2721,2	44,25	4,334	10,028	0,325	0,969	
(O ¹⁶ H ¹) ⁺	3 Σ^-	(2955)			16,793	0,732	1,0290	
P ₂ ³¹	1 Σ_g^+	780,43	2,804 *	5,033	0,3046	0,00165 *	1,890	В состоянии 2 Π дублетное расщепление: 82,6 $см^{-1}$. Приведенные константы относятся к нижней составляющей дублета
Pb ₂		256,5	2,96	(0,7)				
Pb ¹⁷⁹		207,5	0,50	(2,7)				
PbC ¹³⁵		303,9	0,88	(3,2)				
PbF ¹⁹	2 Π	507,2	2,31	(3,4)				
PbH ¹	2 Σ^{**}	1564,1	29,75	$\leq 2,57$	4,971	0,144	1,848	
Pb ²⁰⁶ O ¹⁶	1 Σ	721,8	3,70	(4,3)	0,3073	0,0019	1,923	
Pb ²⁰⁸ C ³²	1 Σ	428,14	1,201	(5)	0,10605	0,00087	2,315	
PbSe	(1 Σ)	277,78	0,452	(5)			(3,1)	
PbTe	(1 Σ)	211,79	0,119	(12)			(4,0)	

Продолжение табл. 14

Молекула	Нормальное состояние	ω_e (см^{-1})	$\omega_e x_e$ (см^{-1})	D_0 (eV)	B_e (см^{-1})	α_e (см^{-4})	r_e (Å)	Примечание
P ₃₁ H ₁	$3\Sigma^-$	(2380)			(8,411)		(1,433)	
P ₃₁ H ₂	$3\Sigma^-$				4,363			
P ₃₁ N ₁₄	$1\Sigma^+$	1337,24	6,983	(6,3)	0,7862	0,00557	1,491	
P ₃₁ O ₁₆	$2\Pi_r$	1230,64	6,52	(6,2)	0,7629	0,0055	1,447	В состоянии $2\Pi_r$ дублетное расщепление: 221 см^{-1}
Pr ¹⁴¹ O ₁₆	**	818,9	1,20					
Rb ₂ ⁸⁵	$1\Sigma_g^+$	56,78	0,0785	0,49				
RbCs ¹³³	$1\Sigma^+$	49,41						
RbH ₁	$1\Sigma^+$	936,77	14,15	*	3,019	0,07	2,368	
S ₂ ³²	$3\Sigma_g^-$	725,8	2,85	$\leq 3,6$	0,296	0,0016	1,893	
S ₂ ³² S ₃₄	$3\Sigma_g^-$							
Sb ₂	(1Σ)	269,85	0,567	(3,7)				
Sb ⁱ²⁰⁹	(1Σ)	220,0	0,50	(3,0)				
SbC ¹³⁵		370,0	1,00					
SbF ¹⁹	(3Π)	614,0	2,67	(4,0)				
SbN ¹⁴	(1Σ)	942,0	5,6	(4,8)				
SbO ¹⁶	**	824,3	5,9	(3,5)				
Sc ⁴⁵ O ¹⁶	2Σ	971,55	3,95	(7)				
S ₂ ⁰	3Σ	391,77	1,06	2,7	0,0907	0,00027	2,16	
SeO ¹⁶		908,9	4,8	(5)				
SiBr	2Π	425,4	1,5	(3,7)				В состоянии 2Π дублетное расщепление: 418 см^{-1}
Si ²⁸ C ¹³⁵	2Π	535,4	2,20	(4,2)				В состоянии 2Π дублетное расщепление: 207,9 см^{-1}
Si ⁽²⁸⁾ F ¹⁹	2Π	856,7	4,7	(4,8)	(0,5795)		[1,603]	В состоянии 2Π дублетное расщепление: 160,83 см^{-1}
Si ⁽²⁸⁾ H ₁	$2\Pi_r$	(2080)			7,496	0,213	1,521	
Si ⁽²⁸⁾ H ₂	$2\Pi_r$				(3,842)		(1,528)	
Si ²⁸ N ¹⁴	$2\Sigma^+$	1151,680	6,5600	(6,2)	0,7310	0,00567	1,572	
S ₂ ³² O ¹⁶	$1\Sigma^+$	1242,03	6,047	*	(7,4)	0,00494	1,510	
Si ²⁸ S ³²	$1\Sigma^+$	749,5	2,56	(6,2)			1,928	
SiSe	(1Σ)	580,0	1,78	*	(5,8)		(2,10)	
Si ²⁸ Te	(1Σ)	480,4	1,16	*	(5,5)		(2,29)	
SnBr	2Π	247,7	0,62	3,0				В состоянии 2Π дублетное расщепление: 2467 см^{-1}
SnCl ¹³⁵	2Π	352,4	1,1	(3,5)				В состоянии 2Π дублетное расщепление: 236 см^{-1}
SnF ¹⁹	2Π	585,3	2,67	(3,9)				В состоянии 2Π дублетное расщепление: 2317,3 см^{-1}
SnH ₁	2Π				(5,31)			

Продолжение табл. 14

Молекула	Нормальное состояние	ω_e (см^{-1})	$\omega_e x_e$ (см^{-1})	D_0 (eV)	B_e (см^{-1})	α_e (см^{-1})	r_e (Å)	Примечание
SnO ¹⁶	1Σ	822,4	3,73	(5,7)	0,3540	0,00450	1,838	
SnS ³²	(1Σ)	488,25	1,47	(5,0)	(0,157)		(2,06)	
SnSe	(1Σ)	333,16	1,247	(2,7)			(2,81)	
SnTe		263,7	1,1	(4,1)			(3,29)	
S ³² O ¹⁶	$3\Sigma^-$	1123,73	6,116	4,002	0,70894	0,00562	1,4935	
SrBr	(212)							
SrCl ³⁵	2Σ	301,1	0,71	(3,9)				
SrF ¹⁹	(2Σ)	500,1	(2,2)					
SrH ¹	$2\Sigma^+$	1206,2	17,0	(1,2)	3,6751	0,0814	2,1457	
SrH ²	$2\Sigma^+$			(1,2)	1,8609	0,0292	2,1451	
SrJ ¹²⁷		173,9	0,42	(2,2)				
SrO ¹⁶	$1\Sigma^{**}$	633,14	2,35	(5,2)	0,3738	0,00085	1,826	
Te ₂	3Σ	251,5	0,55	2,3			2,59	r_e — из опытов по дифракции электронов
TeO ¹⁶		796,1	3,40	(5,7)				
Ti ⁴⁸ Cl ³⁵	**	456,4	6,3	(1,0)				
Ti ⁽⁴⁸⁾ O ¹⁶	$3\Pi_n$	1008,12	4,519	(6,9)	0,5355	0,0031	1,620	
TlBr ⁸¹	$1\Sigma^+$	192,10	0,39	3,189				
TlCl ³⁵	1Σ	283,75	0,818	3,797				
TlF ¹⁹	1Σ	475,00	1,89	< 4,72				
TlH ¹	($1\Sigma^+$)	1390,7	22,7	(2,6)	4,806	0,154 *	1,870	
TlJ ¹²⁷	$1\Sigma^+$	~ 122		≤ 2,6				
V ⁵¹ O ¹⁶	(3Δ) **	1012,7	4,9	(6,4)	0,3876	0,0024	1,890	
Y ⁸⁹ O ¹⁶	(2Σ)	855,1	2,49	(9)				
ZnCl ³⁵	2Σ	390,5	1,55	(3,0)				
ZnH ¹	$2\Sigma^+$	1607,60	55,135 *	(0,85)	6,6794	0,2500 *	1,5947	
ZnH ²	$2\Sigma^+$				(3,3497)		(1,605)	
(ZnH ¹) ⁺	$1\Sigma^+$	1916	39 *	(2,5)	7,41	0,25	1,51	
(ZnH ²) ⁺	$1\Sigma^+$	1364,8	19,8	(2,5)	3,767	0,107	1,513	
ZnJ ¹²⁷	**	223,4	0,75	(2,0)				
Zr ⁹⁰ O ¹⁶	3Π	936,6	3,45	(7,8)	(0,619)	(0,007)	1,416	В состоянии 3Π три составляющие триплета имеют энергии: 0; 292,1, 605,5 см^{-1} .

* После $\omega_e x_e$ или α_e означает, что в уравнении (90) имеются термы, содержащие более высокие степени $\left(v + \frac{1}{2}\right)$

** Неизвестно, действительно ли это состояние является нормальным.

Скобки означают, что константы и символы в скобках точно не известны.

4. ЭНЕРГИЯ КОЛЕБАНИЙ ТРЕХ- И МНОГОАТОМНЫХ МОЛЕКУЛ

Значительно сложнее определение энергии и частот собственных колебаний многоатомных молекул.

Не рассматривая подробно вопроса о координатах колебания атомов в трех- и многоатомных молекулах и силах, действующих между ними, отметим лишь, что при каждом колебании молекулы, происходящем с определенной частотой, изменяются все колебательные координаты. При этом можно выделить те координаты,

которые преимущественно изменяются, и соответственно им классифицировать колебания молекулы.

Если колебания происходят по линии, соединяющей атомы, то такие колебания называют валентными.

Валентные колебания вызывают изменения длин связей с определенными частотами. Эти связи могут быть различного рода. Так, например, для органических молекул возможны валентные колебания простых связей С—С, двойных связей С=С, связей С—Н.

При наличии в молекуле ряда связей данного рода можно выделить характеристические колебания.

Колебания, состоящие в изменении величины углов, т. е. совершающиеся по направлению, перпендикулярному к линии, соединяющей атомы, называют деформационными.

В органических молекулах, содержащих группы типа $> \text{CH}_2$, $-\text{CH}_3$, $=\text{CH}_2$ и т. д., деформационные колебания можно подразделить на внутренние деформационные колебания, при которых изменяются углы между связями внутри группы, например, углы Н—С—Н в группе CH_2 , и на внешние деформационные колебания, при которых изменяются углы, определяющие поворот всей группы в целом, например $\text{C}=\text{C} \begin{matrix} \text{H} \\ \diagdown \\ \text{H} \end{matrix}$ для группы CH_2 , связанной двойной связью с другими атомами углерода.

Деформационные колебания могут быть у углов различного рода, например, углов С—С—С, Н—С—Н.

Следует помнить, что при действительных колебаниях величины углов и длины связей изменяются одновременно, поэтому подразделение на деформационные и валентные колебания может быть принято как приближение, характеризующее преимущественные изменения.

Число собственных колебаний молекулы определяется на основании следующих соображений. Всякая молекула, состоящая из N атомов, обладает $3N$ степенями свободы, из которых три степени свободы приходятся на поступательное движение молекулы в целом.

Число степеней свободы вращательного движения молекулы зависит от формы молекулы. Если молекула имеет три момента инерции I_1 , I_2 , I_3 , то число ее вращательных степеней свободы равно 3; если молекула имеет прямолинейную форму, т. е. практически имеет два момента инерции, то число степеней свободы вращательного движения равно 2.

Следовательно, число собственных колебаний для молекулы, имеющей три момента инерции, равно

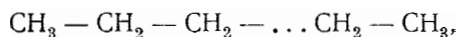
$$3N - 3 - 3 = 3N - 6.$$

Для линейной молекулы число собственных колебаний равно

$$3N - 3 - 2 = 3N - 5.$$

В последнем случае $N - 1$ колебаний являются валентными, так как возможно число $N - 1$ связей между атомами, остальные $(3N - 5) - (N - 1) = 2N - 4$ будут деформационными колебаниями. Для молекул, имеющих три момента инерции, соответственно $N - 1$ колебаний являются валентными, а $2N - 5$ — деформационными.

В качестве примера (табл. 15) приводим число различного рода колебаний для нормальных предельных углеводородов $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, имеющих строение



т. е. содержащих по $n - 2$ группы CH_2 и по 2 группы CH_3 .

Таблица 15

Род колебаний	Обозначение	Число колебаний
Валентные колебания углеродной цепи	ν_{CC}	$n - 1$
Валентные колебания связи С—Н в группах CH_3 и CH_2	$(\nu_{CH})_{CH_3}$ $(\nu_{CH})_{CH_2}$	По 3 колебания, всего $3 \times 2 = 6$ По 2 колебания, всего $2(n - 2) = 2n - 4$
Внутренние деформационные колебания в группах CH_3 и CH_2	$(\delta_{CH})_{CH_3}$ $(\delta_{CH})_{CH_2}$	По 3 колебания, всего $3 \times 2 = 6$ По 1 колебанию, всего $1(n - 2) = n - 2$
Внешние деформационные колебания групп CH_3 и CH_2	$(\delta'_{CH})_{CH_3}$ $(\delta'_{CH})_{CH_2}$	По 2 колебания, всего $2 \times 2 = 4$ По 3 колебания, всего $3(n - 2) = 3n - 6$
Деформационные колебания углеродной цепи	δ_{CC}	$n - 2$
Вращательные колебания вокруг связей С—С	χ	$n - 1$
Всего колебаний	—	$3N - 6 = 3(3n + 2) - 6 = 9n$

Волновое уравнение для системы N частиц с координатами x_i, y_i, z_i и массами m_i может быть написано в виде

$$\sum_i \frac{1}{m_i} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z_i^2} \right) + \frac{8\pi^2}{h^2} (\varepsilon - V) \psi = 0. \quad (92)$$

Если надлежащим образом выбрать координаты и принять соотношение (78) для квазиупругой силы, под действием которой совершаются колебания, то потенциальная энергия многоатомной молекулы может быть выражена уравнением

$$V = \frac{1}{2} (\lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_{3N} \xi_{3N}^2); \quad (93)$$

здесь λ_i — корни так называемого векового уравнения, получаемого при преобразовании координат; подставляя значение V в уравнение (92), получим, что волновое уравнение можно разбить на $3N - 6$ уравнений вида

$$\frac{1}{\psi_i} \cdot \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial \xi_i^2} + \frac{8\pi^2}{h^2} \left(\varepsilon_i - \frac{1}{2} \lambda_i \xi_i^2 \right) = 0. \quad (94)$$

Уравнение (94) аналогично уравнению (79) и является волновым уравнением отдельного простого гармонического осциллятора с потенциальной энергией, равной

$$V_i = \frac{1}{2} \lambda_i \xi_i^2. \quad (95)$$

Решение уравнения (94) возможно, и оно будет удовлетворять граничным условиям, если собственные значения энергии i -го гармонического осциллятора будут принимать вид

$$\varepsilon_i = \omega_i \left(v_i + \frac{1}{2} \right), \quad (96)$$

где v_i — колебательное квантовое число, принимающее значение

$$v_i = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Полная колебательная энергия всей системы частиц многоатомной молекулы будет равна

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \omega_1 \left(v_1 + \frac{1}{2} \right) + \omega_2 \left(v_2 + \frac{1}{2} \right) + \omega_3 \left(v_3 + \frac{1}{2} \right) + \\ & + \dots = \sum_i \omega_i \left(v_i + \frac{1}{2} \right). \end{aligned} \quad (97)$$

В этом случае суммирование распространяется на все $3N - 6$ или $3N - 5$ нормальных колебаний.

Нулевая энергия или энергия в самом низком колебательном состоянии $v_1 = 0$; $v_2 = 0$; $v_3 = 0$ равна

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2} \omega_1 + \frac{1}{2} \omega_2 + \frac{1}{2} \omega_3 + \dots = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=3N-6} \omega_i. \quad (98)$$

В многоатомной молекуле нулевая энергия может достичь значительной величины, причем при обычных температурах основную долю в общей энергии молекулы составляет нулевая энергия; чем больше частоты, тем выше нулевая энергия. Другие виды энергии имеют существенное значение только при малых частотах вследствие влияния фактора Больцмана $e^{-\frac{\omega}{kT}}$, о котором будет сказано ниже.

В многоатомной молекуле возможен случай, когда два или несколько нормальных колебаний имеют одинаковую частоту. Такие колебания принято называть вырожденными.

При наличии вырожденных колебаний уравнение (97) сохраняет свою силу:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \omega_1 \left(v_1 + \frac{1}{2} \right) + \omega_2 \left(v_2 + \frac{1}{2} \right) + \dots + \omega_a \left(v_a + \frac{1}{2} \right) + \\ & + \omega_b \left(v_b + \frac{1}{2} \right) + \dots, \end{aligned} \quad (99)$$

но так как

$$\omega_a = \omega_b,$$

то можно принять

$$\omega_i = \omega_a = \omega_b; \quad v_i = v_a + v_b;$$

тогда уравнение (99) запишем в виде

$$\varepsilon = \omega_1 \left(v_1 + \frac{1}{2} \right) + \omega_2 \left(v_2 + \frac{1}{2} \right) + \dots + \omega_i (v_i + 1), \quad (100)$$

или в общем случае

$$\epsilon = \sum \omega_i \left(\nu_i + \frac{d_i}{2} \right), \quad (101)$$

где d_i — кратность вырождения, равная для дважды вырожденного колебания $d_i = 2$, для трижды вырожденного $d_i = 3$, и т. д.

При рассмотрении колебаний многоатомных молекул большое значение имеют так называемые характеристические частоты.

Установлено теоретически и экспериментально, что некоторые частоты колебаний повторяются в колебаниях молекул различных веществ, обладающих общей связью.

Наиболее характеристическими оказались частоты C—H, C=C, C≡C; так, например, все молекулы со связью ≡C—H имеют нормальные частоты, примерно, 3300 $см^{-1}$ и 700 $см^{-1}$, все молекулы со связью ≥C—H имеют частоту, примерно, 3020 $см^{-1}$. С точностью до ±100 $см^{-1}$ значения характеристических колебательных частот приведены в табл. 16.

Таблица 16

Группа	Валентное колебание $см^{-1}$	Группа	Деформационное колебание $см^{-1}$
≡C—H	3300		700
≥C—H	3020		1100
	2960		1000
—O—H	3680		
	1700		1450
—C≡C—	2050		
	1650		1450
	900		300

Наличие характеристических частот, например, группы C—H, можно объяснить следующим: масса протона меньше массы остальных ядер молекулы, следовательно, амплитуда его колебаний во много раз больше, так как можно считать, что атом водорода совершает колебания по отношению к телу очень большой массы. Частота колебаний будет зависеть только от сил, связывающих водород с остальной частью, и будет почти одинакова для различных молекул. Так как атом водорода всегда находится на конце связи, то его колебания будут или только валентными, или только деформационными.

Подробный разбор вопроса о характеристических частотах не входит в нашу задачу. Этот вопрос достаточно подробно разработан в ряде специальных руководств. Особенно оригинально он изложен в книге М. В. Волькенштейна, М. А. Ельшевича и Б. И. Степанова „Колебания молекул“¹. Из этой работы мы заимствуем приведенные в табл. 17 типичные (характеристические) частоты колебаний.






¹ Издательство технико-теоретической литературы, М. 1949.

Таблица 17





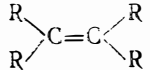
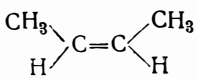
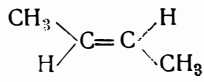
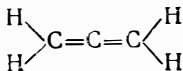
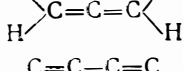
Типичные (характеристические) частоты колебаний

Связи	Молекулы и группы	Частоты	Форма колебаний	Примечание
Связи с водородом				
C—H	Алифатические соединения $R_1R_2R_3CH$; Cl_3CH	3020	$\nu(S)$	
$\begin{array}{c} \text{H} \\ \diagdown \\ \text{C} \\ \diagup \\ \text{H} \end{array}$	Алифатические соединения $R_1R_2CH_2$	1450 2853 2908	$\delta(S)$ $\nu(S)$ $\nu(aS)$	Характерное значение в инфракрасном спектре 2926. В комбинационном спектре перекрывается линиями группы CH_3
	Циклогексан	2630 2662 2697 2852 2871 2886 2905 2922 2937		
$\begin{array}{c} \text{H} \\ \diagdown \\ \text{C} \\ \diagup \\ \text{H} \end{array}$	Алифатические соединения RCH_3	1380 1450 2853 2879	δ $\delta(S)$ ν $\nu(S)$	Большое число частот, вероятно, связано с резонансным расщеплением
	$HalCH_3$	2908 2938 2967	$\nu(S)$ ν $\nu(aS)$	
C—D	$R_1R_2R_3CD$; Cl_3CD	2247	$\nu(S)$	
C—H	Этиленовые соединения $=C \begin{array}{l} \diagup R \\ \diagdown H \end{array}$	3010	$\nu(S)$	
$\begin{array}{c} \text{H} \\ \diagdown \\ \text{C} \\ \diagup \\ \text{H} \end{array}$	$=C \begin{array}{l} \diagup H \\ \diagdown H \end{array}$	1415 3081	$\delta(S)$ ν	
C—H	$\equiv C-H$ C_2H_2, HCN	3304	$\nu(S)$	
C—H	Ароматические соединения	3047 3063	$\nu(aS)$ $\nu(S)$	В бензоле, толуоле и т. д.
C—D	Ароматические соединения	3099 2265 2293	$\nu(aS)$ $\nu(aS)$ $\nu(S)$	
N—H	R_1R_2NH	3329 3343	$\nu(S)$ $\nu(S)$	
$\begin{array}{c} \text{H} \\ \diagdown \\ \text{N} \\ \diagup \\ \text{H} \end{array}$	RNH_2	3315 3372	$\nu(S)$ $\nu(aS)$	В инфракрасном спектре типично 1650 см^{-1} , δ — колебание
O—H	Спирты Вода	3683 3380B	$\nu(S)$ $\nu(S)$	
O—D	Тяжелые спирты	2720	$\nu(S)$	То же

Продолжение табл. 17

Связи	Молекулы и группы	Частоты	Форма колебаний	Примечание
S—H	Вода	2490B	ν (S)	Инфракрасный спектр
Se—H	Меркаптан	2570	ν (S)	
	Селено-меркаптаны H ₂ Se	2303	ν (S)	
		1110	δ (S)	
		2330	ν (aS)	
P—H	PH ₃	2310	ν (S)	
B—H	B ₂ H ₆	2101		
		2489		
		2523		
Si—H	Cl ₃ SiH SiH ₄	2257	ν (S)	
		910	δ (aS)	
		2183	ν (aS)	
H—F	HF	(3935)	ν (S)	
H—Cl	HCl	2886	ν (S)	
H—Br	HBr	2558	ν (S)	
H—I	HI	2233	ν (S)	
H—H	H ₂	4160	ν (S)	
H—D	HD	3630	ν (S)	
D—D	D ₂	2993	ν (S)	
Простые связи				
C—Cl	Алифатические соединения RCl	648	ν (S)	Две частоты поворотных изомеров. Характеристичны при отсутствии C—S, C—Br и C—F-связей
		726	ν (S)	
	CH ₂ Cl ₂	283	δ (S)	Характеристичны при отсутствии C—S, C—Br, C—F-связей
		700	ν (S)	
		736	ν (aS)	
	CHCl ₃	366	δ (S)	Характеристичны при отсутствии C—S, C—Br и C—F-связей
		667	ν (S)	
		762	ν (aS)	
C—Br	RBr	563	ν (S)	Поворотная изомерия. Характеристичны при отсутствии C—S, C—Cl, C—I и C—F-связей
		647	ν (S)	
	CH ₂ Br ₂	174	δ (S)	Характеристичны при отсутствии C—S, C—Cl, C—I и C—F-связей
		576	ν (S)	
		637	ν (aS)	
	CHBr ₃	222	δ (S)	Характеристичны при отсутствии C—S, C—Cl, C—F и C—I-связей
		539	ν (S)	
		655	ν (aS)	
C—I	RJ	502	ν (S)	Поворотная изомерия. Характеристичны при отсутствии C—Br-связей
	593	ν (S)		
	CH ₂ J ₂	121	δ (S)	Характеристичны при отсутствии C—Br-связей
		483	ν (S)	
		566	ν (aS)	
C—S	RSH	651	ν (S)	Поворотная изомерия. Характеристичны при отсутствии C—Cl, C—Br-связей
		701	ν (S)	
		736	ν (S)	
C—Se	H ₂ C ₂ SeH	558	ν (S)	

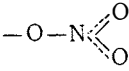


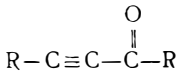
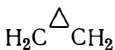
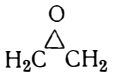
Продолжение табл. 17

Связи	Молекулы и группы	Частоты	Форма колебаний	Примечание
C—F	CH ₃ F	1049	ν (S)	Характеристичны при отсутствии C—C, C—O, C—N-связей
C—N	CH ₃ NH ₂	1045	ν (S)	
C—O	CH ₃ OH	1033	ν (S)	Характеристичны при отсутствии C—C, C—N, C—F-связей
	(CH ₃) ₂ O	413 920 1150	δ (S) ν (S) ν (aS) } }	
	Zn (CH ₃) ₂	503	ν (S)	
	Cd (CH ₃) ₂	464	ν (S)	
	Hg (CH ₃) ₂	514	ν (S)	
Si—Si	Si ₂ H ₆	435	ν (S)	В инфракрасном спектре жидкости
B—B	B ₂ H ₆	793	δ	
		806		
		821		
O—O	H ₂ O ₂	877	ν (S)	
N—N	H ₂ N·NH ₂	876 1110	ν (S) δ	
N—O	H ₂ N—OH	906	ν (S)	
N—O	N ₂ O	1287	ν (S)	
S—S	H ₂ S ₂	510	ν (S)	
Двойные связи				
C=C		1676	ν (S)	Данные приведены для тетраметилэтилена
C=C	cis-соединения 	1669	ν (S)	
C=C	trans-соединения 	1681	ν (S)	Частоты C=C меняются (понижаются), если эти связи расположены рядом с C—Cl, C—C ₃ H ₅ -связями и т. д.
C=C	—C—C=C	1639	ν (S)	
C=C	... C—C=C—C ...	1670	ν (S)	1 — бутен
C=C		1069	ν (S)	
C=C		1980	ν (aS) } }	
C=C	C=C—C=C	1635	ν (S)	Бутадиен

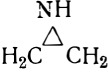
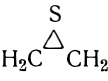
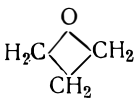
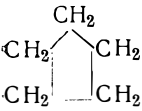


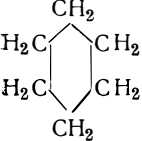




Продолжение табл. 17

Связи	Молекулы и группы	Частоты	Форма колебаний	Примечание
C=O	$\begin{array}{l} \text{H} \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagup \\ \text{R} \end{array}$	1720	$\nu(S)$	
C=O	$\begin{array}{l} \text{R} \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagup \\ \text{R} \end{array}$	1710	$\nu(S)$	
C=O	$\begin{array}{l} \text{C}=\text{C} \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagup \\ \text{R} \end{array}$	1668	$\nu(S)$	Измененные по сравнению с алифатическими кетонами, C=O-частоты нехарактеристичны в присутствии C=C и C-N-связей
C=O	$\begin{array}{l} \text{C}_6\text{H}_5 \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagup \\ \text{R} \end{array}$	1682	$\nu(S)$	
C=O	$\begin{array}{l} \text{HO} \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagup \\ \text{R} \end{array}$	1652	$\nu(S)$	
C=O	$\begin{array}{l} \text{H}_2\text{N} \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagup \\ \text{R} \end{array}$	1660	$\nu(S)$	
C=O	$\begin{array}{l} \text{Cl} \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagup \\ \text{R} \end{array}$	1792	$\nu(S)$	
C=O	$\begin{array}{l} \text{RO} \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagup \\ \text{R} \end{array}$	1734	$\nu(S)$	
C=O	O=C=O	1285	$\nu(S)$	Резонансное расщепление. Нет характеристичности в комбинационном спектре
C=O	O=C=O	1388		
		2350		
C=O	H ₂ C=C=O	1130	$\nu(S)$	Нехарактеристичны в комбинационном спектре. Частота 2049 должна быть интенсивной в инфракрасном спектре
		2049		
C=N	$\begin{array}{l} \text{RO} \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{NH} \\ \diagup \\ \text{RO} \end{array}$	1658	$\nu(S)$	Нехарактеристичны в присутствии C=O и C=C-связей
C=N	$\begin{array}{l} \text{R} \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{N}-\text{OH} \\ \diagup \\ \text{H} \end{array}$	1660	$\nu(S)$	
C=N	$\begin{array}{l} \text{R} \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{N}-\text{OH} \\ \diagup \\ \text{R} \end{array}$	1665	$\nu(S)$	
C=S	$\begin{array}{l} \text{H}_3\text{C} \\ \diagdown \\ \text{C}=\text{S} \\ \diagup \\ \text{H}_2\text{N} \end{array}$	716	$\nu(S)$	Нехарактеристично в присутствии C-Cl
N=N	H ₃ C-N=N-CH ₃	1576	$\nu(S)$	
N=O	H ₅ C ₂ O-N=O	1641	$\nu(S)$	


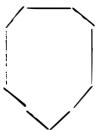
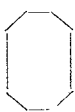



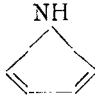
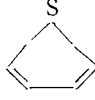

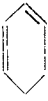
Продолжение табл. 17

Связи	Молекулы и группы	Частоты	Форма колебаний	Примечание
	R—O—NO ₂	580 1280 1634	δ (S) ν (S) ν (aS)	
	RNO ₂	656 1376 1401 1561	δ (S) ν (S) ν (aS)	
	C ₆ H ₅ NO ₂	535 1345 1523	δ (S) ν (S) ν (aS)	
Тройные связи				
C≡C	R—C≡C—H	2119	ν (S)	Резонансное расщепление
C≡C	R—C≡C—R	2238 2304	ν (S)	
C≡C		2243	ν (S)	
C≡N	HCN	2094	ν (S)	
C≡N	RCN	2249	ν (S)	
C≡N	RNC	2146	ν (S)	
C≡N	CN [—] (KCN)	2080	ν (S)	
C≡N	OCN [—]	2192	ν (S)	
C≡N	CNO [—]	2206	ν (S)	
C≡N	HNCN [—]	2096	ν (S)	
C≡N	SCN [—]	2066	ν (S)	
C≡N	RSCN	2153	ν (S)	
C≡N	NCCN [—]	2163 2322	ν (S) ν (aS)	
C≡N	SeCN [—]	2052	ν (S)	
N≡N	N ₂	2330	ν (S)	
N≡N	N ₂ O	2223	ν (S)	
N≡N	RN ₃	1276 2104	ν (S) ν (S)	N—N В инфракрасном спектре 2145
N≡N	N ₃ [—]	1346 2066	ν (S)	
Циклические соединения				
	CH ₂	865	ν (aS)	
		1187	ν (S)	
		807 868 1268	δ ν (aS) ν (S)	









Продолжение табл. 17

Связи	Молекулы и группы	Частоты	Форма колебаний	Примечание
		818 855 1215	δ $\nu (aS)$ $\nu (S)$	
		625 1120	$\nu (S)$	
		1028	$\nu (S)$	
		886	$\nu (S)$	
		913	$\nu (S)$	
		898	$\nu (S)$	
		802	$\nu (S)$	
		813	$\nu (S)$	
		817	$\nu (S)$	
		835	$\nu (S)$	
		832	$\nu (S)$	

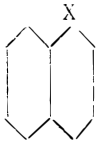

Продолжение табл. 17

Связи	Молекулы и группы	Частоты	Форма колебаний	Примечание
NH 		83	$\nu(S)$	
		729	$\nu(S)$	
		700	$\nu(S)$	
		896 1104 1611 3060	$\nu(S)$ $\nu(S)$ $\nu(S)$ $\nu(S)$	Связь C=C Связь=C-H
		1105 1496 3088	$\nu(S)$ $\nu(S)$ $\nu(S)$	Связи C=C-C=C Связи=C-H
		1138 1380 1483	$\nu(S)$ $\delta(S)$ $\nu(S)$	
	NH 	1144 1379 1469 3383	$\nu(S)$ $\delta(S)$ $\nu(S)$ $\nu(S)$	Связи C=C-C=C Связь N-H
	S 	685-730 832 1032 1079 1358 1404	$\delta(aS)$ $\nu(S)$ $\nu(S)$ $\nu(S)$	
		825 1650		Связь C=C
		847 1428 1574 3041		

Продолжение табл. 17

Связи	Молекулы и группы	Частоты	Форма колебаний	Примечание
		1676		Связь C=C
	 Пиридин	604 990 1030 1217 1581 1596 3055		
	 Бензол	404 606 671 849	$\delta (aS)$ $\nu (aS)$ $\delta (aS)$ $\delta (aS)$	Инфракрасный спектр газа, спектр комбинационного рассеяния жидкости
		992 1037 1178 1485 1585 1606	$\nu (S)$ $\delta (aS)$ $\delta (aS)$ $\nu (aS)$ $\nu (aS)$ $\nu (aS)$	
		623 786 1004 1030 1585 1604 3060	$\delta (aS)$ $\nu (S)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$ $\nu (aS)$ $\nu (aS)$	Данные для толуола В спектрах других монозамещенных (X=NH ₂ , OH, SH, F, Cl, Br, J, NO ₂ , NCO, NCS, CN, COOH, COOCH ₃ , COF ₂ , COCl, COBr, COJ, CONH ₂ , COCH ₃ , COH) — близкие значения
		1156 1600 3050		
		995 1170 1600 3050		
		630 1170 1600 3050		
	 Нафталин	512 762 1022 1146 1380		Наиболее интенсивные комбинационные линии нафталина

Продолжение табл. 17

Связи	Молекулы и группы	Частоты	Форма колебаний	Примечание
	Нафталин	1462 1576 3055		
		514 702 1021 1145 1378 1470 1580		Данные для X=CH ₃
		514 766 1015 1168 1384 1470 1572		Данные для X=CH ₃
Неорганические ионы				
	ClO ₄ ⁻	459 625 928 1119	δ (aS) δ (aS) ν (S) ν (aS)	Тетраэдр
	JO ₄ ⁻	227 295 337 349 795 828 842 851	δ (aS) δ (aS) ν (S) ν (aS)	Деформированный тетраэдр (снятое вырождение) в кристаллической KJO ₄
	SO ₄ ⁻	451 613 981 1104	δ (aS) δ (aS) ν (S) ν (aS)	Тетраэдр
	PO ₄ ⁻	420 562 937 1022	δ (aS) δ (aS) ν (S) ν (aS)	Тетраэдр
	SiO ₄ ⁻	876 925 1005	ν (aS) ν (aS) ν (aS)	Фенацит Топаз Циркон
	NO ₃ ⁻	720 830 1050 1390	δ (aS) δ (aS) ν (S) ν (aS)	Плоский треугольник
	CO ₂ ⁻	680 878 1063 1415	δ (aS) δ (aS) ν (S) ν (aS)	

Продолжение табл. 17

Связи	Молекулы и группы	Частоты	Форма колебаний	Примечание
	NO_2^-	813 1240 1331	$\delta (S)$ $\nu (aS)$ $\nu (S)$	Симметрия C_{2v}
	ClO_3^-	479 613 932 982	$\delta (aS)$ $\delta (aS)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$	Пирамида C_{3v}
	BrO_3^-	356 418 805 830	$\delta (aS)$ $\delta (S)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$	То же
	JO_3^-	326 360 790 820	$\delta (aS)$ $\delta (S)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$	Пирамида C_{3v}

Неорганические соединения

H_2O	1615 3694 3802	$\delta (S)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$	} Пары
D_2O	1179 2666 2784	$\delta (S)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$	
H_2S	1290 2611 2684	$\delta (S)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$	
SO_2	519 1151 1361	$\delta (S)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$	} " "
UO_2^{++}	197 226 853 865 909	$\nu (S)$	
SO_3	534 652 1071 1396	$\delta (aS)$ $\delta (S)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$	Жидкость (652 — газ) Пирамида C_{3v}
NH_3	934 964 1628 3334	$\delta (S)$ $\delta (aS)$ $\nu (S)$	} Пирамида C_{3v} δ расщеплена вследствие туннельного эффекта Данные для газа
SiH_4	910 978 2187 2183	$\delta (aS)$ $\delta (aS)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$	

Продолжение табл. 17

Связи	Молекулы и группы	Частоты	Форма колебаний	Примечание
	SnCl ₄	104 134 366 403	$\delta (aS)$ $\delta (aS)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$	Тетраэдр
	SF ₆	363 524 617 644 776 965	$\delta (aS)$ $\delta (aS)$ $\delta (aS)$ $\nu (aS)$ $\nu (S)$ $\nu (aS)$	Октаэдр Q_h

Если в выражение (93) ввести кубические члены, члены четвертой или более высокой степени, то можно характеризовать ангармонические колебания молекулы. В этом случае волновое уравнение многоатомной молекулы (92) уже не распадается на несколько независимых уравнений.

Следовательно, энергию молекулы нельзя представить в виде суммы независимых слагаемых, соответствующих различным колебаниям; в выражение энергии молекулы в этом случае войдут перекрестные члены, характеризующие динамическую связанность с другими колебаниями.

Общее уравнение энергии многоатомной молекулы для ангармонических колебаний при невырожденных колебаниях может быть записано в виде

$$\varepsilon = \sum_i \omega_i \left(v_i + \frac{1}{2} \right) + \sum_i \sum_{k \geq 1} x_{ik} \left(v_i + \frac{1}{2} \right) \left(v_k + \frac{1}{2} \right); \quad (102)$$

в этом случае последний член характеризует динамическую связанность отдельных колебаний.

Постоянные x_{ik} малы по сравнению с частотами нормальных колебаний, они обычно отрицательны и их порядок 0,01 ω_i .

Нулевая энергия при ангармонических колебаниях отличается от нулевой энергии гармонических колебаний и ее значение равно

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2} \sum_i \omega_i + \frac{1}{4} \sum_i x_{ik}. \quad (103)$$

Для молекул, обладающих дважды или трижды вырожденными колебаниями, необходимо учитывать дополнительные особенности. Прежде всего для квантовых чисел вырожденных колебаний вместо $v_i + \frac{1}{2}$ будут входить множители $v_a + \frac{d_a}{2}$, а само квантовое число v_a будет равно сумме квантовых чисел вырожденных колебаний. Но главное заключается в том, что при вырожденных колебаниях в уравнение энергии добавляются члены, зависящие от кратности вырождения и характеризующие то обстоятельство, что уровни, совпадающие один с другим в приближении гармонического осциллятора, при учете ангармоничности расщепляются на несколько уровней. В частности, каждый дважды вырожденный уровень, описываемый квантовым числом v_i и имеющий степень вырождения $d_i = 2$, расщепляется на подуровни, характеризующиеся квантовым числом l_i , принимающим значения

$$l_i = v_i, \quad v_i - 2, \quad v_i - 4, \dots, 1 \text{ или } 0.$$

Величина энергии расщепления равна $g_i l_i^2$, где коэффициент g зависит от постоянных ангармоничности и имеет их же порядок.

Общее выражение для энергии вырожденных колебаний имеет вид

$$\varepsilon = \sum_i \omega_i \left(v_i + \frac{d_i}{2} \right) + \sum_i \sum_{k \geq 1} x_{ik} \left(v_i + \frac{d_i}{2} \right) \cdot \left(v_k + \frac{d_k}{2} \right) + \sum_i \sum_{k \geq 1} g_{ik} l_i l_k, \quad (104)$$

где l_i — квантовое число, принимающее значение

$$l_i = v_i, \quad v_i - 2, \quad v_i - 4, \dots, 1 \text{ или } 0.$$

Для невырожденных колебаний $l_i = 0$, $g_{ik} = 0$.

5. ВРАЩАТЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ДВУХАТОМНОЙ МОЛЕКУЛЫ

Рассмотрим первоначально вращения в двухатомной молекуле.

Если рассматривать молекулу как жесткую систему с неизменным расстоянием между ядрами, то при решении волнового уравнения в предположении, что потенциальная энергия равна нулю, получим выражение для кинетической энергии вращения такой молекулы в виде

$$\varepsilon_r = \frac{\hbar}{8\pi^2 I c} K(K+1), \quad (105)$$

где $K = 0, 1, 2, 3, \dots$ — целое положительное число, так называемое вращательное квантовое число;

I — момент инерции молекулы, равный

$$I = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} r_e^2,$$

где m_1, m_2 — массы атомов;

r_e — расстояние между этими массами.

Однако при вращении ядер будет развиваться центробежная сила, создающая условия, при которых молекулу как твердую (жесткий ротатор) рассматривать нельзя. В этом случае необходимо учитывать наличие потенциальной энергии V . Если принять, что для малых отклонений потенциальная энергия может быть представлена в виде энергии гармонических колебаний

$$V = \frac{\hbar r_e}{2} \xi^2, \quad (106)$$

то решение волнового уравнения для случая нежесткого ротатора приведет к выражению энергии вращения или собственного значения функции в виде

$$\varepsilon_r = B_e K(K+1) + D_e K^2(K+1)^2, \quad (107)$$

где

$$B_e = \frac{\hbar}{8\pi^2 I_e c}; \quad (108)$$

$$D_e = -\frac{4B_e^3}{\omega_e^2}; \quad (109)$$

здесь ω_e — частота собственных колебаний молекулы.

В уравнении (107) член $D_e K^2(K+1)^2$, обусловленный нежесткостью молекулы, характеризует влияние центробежной силы, в результате действия которой при вращении молекулы увеличивается расстояние между ядрами.

Чтобы получить лучшее приближение, необходимо в уравнение (107) добавить члены, содержащие $K(K+1)$ в более высоких степенях:

$$\varepsilon_r = B_e K(K+1) + D_e K^2(K+1)^2 + F_e K^3(K+1)^3 + H_e K^4(K+1)^4. \quad (110)$$

Но в молекуле, кроме вращения, происходят колебания ядер. Эти колебания неизбежно будут изменять расстояние между ядрами и, следовательно, изменят и момент инерции. Если учесть взаимодействие между колебаниями и вращением, то вращательная энергия будет равна

$$\epsilon_r = B_v K(K+1) + D_v K^2(K+1)^2 + F_v K^3(K+1)^3 + H_v K^4(K+1)^4, \quad (111)$$

где коэффициенты B_v , D_v , F_v и H_v учитывают влияние колебания ядер. В первом приближении значение этих коэффициентов может быть принято равным

$$B_v = B_e - \alpha_e \left(v + \frac{1}{2} \right); \quad (112)$$

$$D_v = D_e - \beta_e \left(v + \frac{1}{2} \right); \quad (113)$$

$$F_v = F_e - \gamma_e \left(v + \frac{1}{2} \right); \quad (114)$$

$$H_v = H_e - \delta_e \left(v + \frac{1}{2} \right); \quad (115)$$

здесь v — квантовое колебательное число. Как видим, с возрастанием квантового колебательного числа величина B_v уменьшается и, следовательно, увеличивается момент инерции, происходит как бы растяжение молекулы.

Изменение коэффициента вращательной постоянной B_v в зависимости от квантового числа обусловлено в основном двумя причинами.

Во-первых, при гармонических колебаниях среднее значение $\frac{1}{\mu r^2}$ во время колебания не равно отношению $\frac{1}{I_e}$, где I_e — средний момент инерции, и, следовательно,

$$B_v = \frac{h}{8\pi^2 c \mu} \left(\frac{1}{r^2} \right) \neq B_e = \frac{h}{8\pi^2 c I_e},$$

хотя среднее значение межуатомного расстояния r равно межуатомному расстоянию r_e в положении равновесия.

Во-вторых, при ангармоническом колебании и наличии кубических членов и членов более высокой степени в уравнении потенциальной энергии среднее межуатомное расстояние во время колебаний больше, чем межуатомное расстояние r_e в положении равновесия.

Эмпирически найдено, что обычно

$$\alpha_e \approx 1,4 B_e \frac{\omega_e x_e}{\omega_e},$$

а константа β_e при D_v равна

$$\beta_e = -\frac{\alpha_e^2}{6\omega_e} + D_e \left(\frac{8\omega_e x_e}{\omega_e} - \frac{5\alpha_e}{B_e} \right).$$

Значение констант B_e , α_e и расстояния между ядрами r_e для двухатомных молекул приведено в табл. 14.

Значение констант D_e , β_e ... в большинстве случаев очень мало и эти константы приводят обычно только при наличии очень точных спектральных данных; однако иногда для расчета термодинамических величин они могут иметь значение.

6. ВРАЩАТЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ТРЕХ- И МНОГОАТОМНЫХ МОЛЕКУЛ

Для вращательной энергии многоатомной линейной молекулы получается выражение, аналогичное уравнению (107) или (110). В этом случае, так же как и для двухатомной молекулы, момент инерции, входящий в константу B_e , является моментом инерции относительно оси, перпендикулярной к оси молекулы и проходящей через центр тяжести.

Для многоатомных линейных молекул этот момент инерции равен

$$I_B = \sum m_i r_i^2, \quad (116)$$

где r_i — расстояние i -го атома с массой m_i от центра тяжести.

Влияние колебания молекулы на энергию вращения в многоатомных молекулах в первом приближении может быть выражено формулой, аналогичной уравнению (112) для двухатомной молекулы,

$$B_v = B_e - \sum_i \alpha_i \left(v_i + \frac{d_i}{2} \right), \quad (117)$$

где v_i — колебательные квантовые числа для каждого колебания молекулы;

d_i — степень вырождения колебаний.

Для невырожденных колебаний составляющая α_i является положительной, т. е. с увеличением квантового числа величина B_v уменьшается. Для вырожденных колебаний α_i может быть как положительной, так и отрицательной.

При вырожденных колебаниях выражение для вращательной энергии должно учитывать также колебательный момент l количества движения, характеризующий динамическую связанность отдельных колебаний [см. формулу (104)].

В этом случае энергия вращения равна

$$\varepsilon_r = B_v [K(K+1) - l^2] - D_v [K(K+1) - l^2]^2; \quad (118)$$

здесь, так же как и в формуле (104), квантовое число вращения должно быть больше или равно l :

$$K = l, l+1, l+2 \dots$$

Обычно влияние величины l на вращение не учитывают или включают его в формулу для колебательной энергии (член gl^2).

Константа α , учитывающая влияние колебательного движения на вращение для многоатомных молекул, так же как и для двухатомных, учитывает изменение константы B при гармоническом колебании ($\alpha_{гарм}$) и изменение вследствие ангармоничности ($\alpha_{анг}$). Но для многоатомных молекул на величину α влияет также третья причина — взаимодействие кориолисова ускорения $\alpha_{кор}$.

При движении материальной точки по отношению к системе координат, вращающихся с постоянной скоростью, возникает центробежное ускорение, обусловленное силой

$$F_{центр} = mr\omega^2,$$

и кориолисово ускорение, обусловленное силой

$$F_{кор} = 2mv_a \omega \sin \varphi,$$

где m — масса частицы;

v_a — скорость ее движения по отношению к координатам;

r — расстояние от оси вращения.

При учете центробежной силы вводится в уравнение энергии поправка в виде постоянной D .

Введение кориолисовой силы обуславливает появление добавочной связи между вращением и колебанием, так как это кориолисово взаимодействие возникает только тогда, когда молекула колеблется, т. е. когда величина $v_a \neq 0$. Кориолисово взаимодействие, учитываемое коэффициентом $\alpha_{кор}$, может быть больше влияния центробежных сил.

Таким образом, в общем виде константа α для многоатомной молекулы равна

$$\alpha = \alpha_{гарм} + \alpha_{анг} + \alpha_{кор}.$$

Значительно сложнее определение вращательной энергии для многоатомных нелинейных молекул. Усложнение связано с тем, что для описания движения ротатора в общем виде следует учитывать три момента инерции.

Если для описания движения выбрать три оси, перпендикулярные одна другой и проходящие через центр тяжести таким образом, чтобы распространенные на все атомы величины сумм вида $\sum m_i x_i y_i$, $\sum m_i y_i z_i$, $\sum m_i x_i z_i$ были равны нулю (здесь m_i — масса атома; x_i , y_i , z_i — координаты относительно оси вращения), то такие оси называются главными осями и моменты инерции, отвечающие им, — главными моментами инерции.

Главные моменты инерции молекулы обозначают обычно через I_A , I_B , I_C , причем I_C — максимальное значение момента инерции, I_A — минимальное значение.

Молекулу, имеющую три различных главных момента инерции ($I_A \neq I_B \neq I_C$), называют, в отношении вращения, асимметричным волчком или асимметричным ротатором.

При равенстве двух главных моментов инерции ($I_A = I_B \neq I_C$) молекулу называют симметричным волчком или симметричным ротатором.

Если все три момента инерции равны ($I_A = I_B = I_C$), то молекулу называют сферическим (шаровым) волчком.

Энергия вращения молекулы нежесткого симметричного волчка в общем виде выражается уравнением

$$\begin{aligned} \varepsilon_r = & B_e K(K+1) + (A_e - B_e) J^2 - D_e K^2 (K+1)^2 - \\ & - D_{ey} K(K+1) J^2 - D_y J^4. \end{aligned} \quad (119)$$

В этом случае

$$B_e = \frac{h}{8\pi^2 c I_B}; \quad (120)$$

$$A_e = \frac{h}{8\pi^2 c I_A}; \quad (121)$$

члены $D_e K^2 (K+1)^2$, $D_{ey} K(K+1) J^2$ и $D_y J^4$ учитывают центробежное растяжение.

В формулах (119) — (121) J — квантовое число, которое не может быть больше квантового числа K , т. е. для данного значения квантового числа K величина J равна

$$J = K, K-1, \dots, -K.$$

По формуле (119) состояниям, отличающимся только знаком при квантовом числе K , отвечает одна и та же энергия, так как J всегда в четной степени, т. е. все состояния с $J > 0$ дважды вырождены. Указанное положение соответствует двум противоположным направлениям вокруг оси волчка.

Колебание молекулы в этом случае изменяет оба момента инерции, а взаимодействие колебания и вращения, так же как и в линейной молекуле, можно учесть в первом приближении уравнениями

$$B_v = B_e - \sum \alpha_i^B \left(v_i + \frac{d_i}{2} \right); \quad (122)$$

$$A_v = A_e - \sum \alpha_i^A \left(v_i + \frac{d_i}{2} \right); \quad (123)$$

в этом уравнении α складывается из трех частей: гармонической, ангармонической и кориолисовой и, следовательно, энергия вращения будет равна

$$\begin{aligned} \varepsilon_v = & B_v K(K+1) + (A_v - B_v) J^2 - D_v K^2 (K+1)^2 - \\ & - D_{Iv} K(K+1) J^2 - D_v J^4. \end{aligned} \quad (124)$$

Для вырожденных колебаний уравнение (124) должно быть дополнено членом, учитывающим действие кориолисовой силы. В общем виде уравнение для вращательной энергии симметричного волчка при вырожденных колебаниях будет иметь вид

$$\varepsilon_r = B_v K(K+1) + (A_v - B_v) J^2 - D_v K^2 (K+1)^2 - \\ - D_{Iv} K(K+1) J^2 - D_I J^4 - 2A_v \sum_i \pm (\xi_i l_i) J, \quad (125)$$

где l_i — квантовое число, которое может принимать значение $l_i = v_i, v_i - 2, v_i - 4, \dots, 1$ или 0 ; ξ_i — коэффициент, так же как B_v и A_v , зависящий от квантового числа v_i :

$$(\xi_i)_v = (\xi_i)_l - \sum a_i^{\xi} \left(v_i + \frac{d_i}{2} \right). \quad (126)$$

Для сферического волчка, когда все три момента инерции равны один другому, энергия вращения молекулы может быть выражена уравнением (110), т. е. таким же, как и для линейной молекулы.

Влияние колебаний на энергию вращения сферического волчка также аналогично этому влиянию в линейной молекуле и может быть учтено уравнениями (112)—(115). Однако в этом случае для дважды вырожденных колебательных состояний влияние кориолисова взаимодействия отсутствует.

Энергия вращения асимметричного волчка, т. е. вращения молекулы, имеющей все три главных момента инерции, неравные один другому, не может быть выражена формулой в явном виде аналогично формулам (119), (123) и (125) для симметричного волчка.

Несмотря на то, что к этому виду вращения относится большое число многоатомных молекул, в том числе и молекула водяного пара, энергия вращения асимметричного волчка может быть выражена лишь приближенным уравнением.

Хорошим приближением является следующее уравнение:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} (B_v + C_v) K(K+1) + \left[A_v - \frac{1}{2} (B_v + C_v) \right] W_{\tau}. \quad (127)$$

где A_v, B_v и C_v — эффективные вращательные постоянные, равные

$$A_v = A_e - \sum \alpha_i^A \left(v_i + \frac{1}{2} \right); \quad (128)$$

$$B_v = B_e - \sum \alpha_i^B \left(v_i + \frac{1}{2} \right) \quad (129)$$

$$C_v = C_e - \sum \alpha_i^C \left(v_i + \frac{1}{2} \right); \quad (130)$$

здесь A_e, B_e, C_e — вращательные постоянные, относящиеся к положению равновесия:

$$A_e = \frac{h}{8\pi^2 c I_A^e}; \quad B_e = \frac{h}{8\pi^2 c I_B^e}; \quad C_e = \frac{h}{8\pi^2 c I_C^e}. \quad (131)$$

Величина W_{τ} является сложной функцией A, B, C и K . При данном значении K величина W_{τ} принимает $2K+1$ различных значений.

Все $2K+1$ значения величины W_{τ} при данном квантовом числе K являются корнями векового определителя степени $2K+1$

Аналогично симметричному волчку, при асимметричном волчке вследствие центробежных сил вращательные уровни энергии искажаются тем больше, чем больше квантовое число K .

Было найдено, что для молекулы типа H_2O смещение уровней вследствие нежесткости примерно равно

$$\delta\varepsilon = -DK^4,$$

где константа D зависит от A и C и различна для разных уровней. Для H_2O эта поправка составляет (при $K=11$) $\delta\epsilon = 280 \text{ см}^{-1}$ или $8,7\%$ от всей энергии вращения; при низшем уровне эта поправка составляет $\delta\epsilon = 4,3 \text{ см}^{-1}$.

Однако изменения, вызванные центробежными силами, значительны только для легких молекул; для тяжелых молекул, вращающихся с меньшими скоростями, эти изменения невелики. Мы подробно не приводим сложных формул для определения величин W_τ и $\delta\epsilon$. Как будет показано ниже, термодинамические величины для молекул асимметричного волчка можно вычислить по приближенным формулам, в которые величины W_τ и $\delta\epsilon$ в явном виде не входят.

Использование приближенных формул является необходимостью, вызванной сложностью более или менее точных уравнений или их недостаточной обоснованностью. В дальнейшем по мере того как будут накапливаться данные о строении молекулы, вычисление термодинамических величин должно базироваться на непосредственных уравнениях типа (127) для энергии молекулы.

7. ЭНЕРГИЯ СВОБОДНЫХ И ЗАТОРМОЖЕННЫХ ВНУТРЕННИХ ВРАЩЕНИИ

Выше мы рассмотрели вращение молекулы как единого комплекса. Но в многоатомных молекулах возможно также вращение одной части молекулы относительно другой ее части, т. е. так называемое внутреннее вращение.

В углеводородах это внутреннее вращение возможно вокруг единичной связи $C-C$.

Теория внутреннего вращения еще недостаточно разработана, а имеющиеся решения относятся к ряду частных случаев строения молекулы.

При внутреннем вращении потенциальная функция молекулы, как функция угла поворота одной группы относительно другой, имеет несколько минимумов.

В общей форме выражение для потенциальной энергии чаще всего будет в виде

$$2V = \sum_{n=1}^N V_{0n} (1 - \cos m_n \varphi_n), \quad (132)$$

где φ_n — угол внутреннего вращения;

m — число тождественных минимумов функции;

n — номер волчка, если рассматривать молекулу, представляющую собой жесткий остов с присоединенными к нему симметричными волчками;

V_{0n} — тормозящий внутренний потенциал (потенциальный барьер) для n -го волчка.

Если молекула представляет собой два коаксиальных волчка, как, например, для этана C_2H_6 , то выражение для потенциальной энергии будет иметь вид

$$2V = V_0 (1 - \cos m\varphi), \quad (133)$$

где V_0 — потенциальный барьер.

Если использовать указанное выражение для потенциальной функции и подставить его в волновое уравнение, то последнее распадется на два уравнения: на уравнение, которое будет характеризовать вращение молекулы в целом, и на уравнение, описывающее внутреннее вращение.

Для случая молекулы, состоящей из жесткого остова с присоединенными к нему симметричными волчками, движение волчка вокруг собственной оси будет определяться уравнением

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + (a_n + 2\theta_n \cos 2x)\psi = 0, \quad (134)$$

где n — номер волчка;

$$x = \frac{V_n \varphi}{2};$$

$$\theta_n = \frac{8\pi^2 A_n \omega_n}{h^2 V_n^2} V_{0n}; \quad (135)$$

здесь A_n — момент инерции волчка относительно своей оси;

Ω_n — безразмерный фактор, равный

$$\Omega_n = 1 - \sum_{i=1}^{i=3} \left(\frac{A_n}{I_i} \right) \lambda_{ni}^2, \quad (136)$$

где I_i — момент инерции всей молекулы;

λ_{ni} — направляющие косинусы оси n -го волчка в системе осей молекулы.

Величина $A_n \Omega_n$ является приведенным моментом инерции волчка:

$$I_{np}^0 = A_n \Omega_n. \quad (137)$$

Для молекул, имеющих несколько волчков, приведенный момент всей молекулы равен

$$I_{np} = I_{np}^0 = \frac{1}{2} \sum_n \frac{A_n A'_n}{I_n^0} \sum_{i=1}^{i=3} \frac{\lambda_{ni} \lambda'_{ni}}{I_i}. \quad (138)$$

Исследование уравнения (134) показывает, что имеются периодические решения его, устойчивые при дискретной области значения параметра a_n .

Собственные значения энергии, соответствующие уравнению (134), могут быть получены из решения уравнения. Это решение хотя и известно, но имеет сложный для вычисления характер.

Если вращение свободно, т. е. $\theta_m = 0$ вследствие равенства нулю тормозящего внутреннего потенциала V_0 , то в результате решения уравнения (134) получим следующие собственные значения энергии свободного внутреннего вращения молекулы, представляющей собой симметричный волчок:

$$\varepsilon_f = \frac{A_1 A_2}{A} \left(K_1 - K_2 \frac{A}{A_1} \right)^2; \quad (139)$$

здесь

$$A_1 = \frac{h}{8\pi^2 c I_{A_1}}; \quad A_2 = \frac{h}{8\pi^2 c I_{A_2}}; \quad A = \frac{h}{8\pi^2 c I_A}, \quad (140)$$

где I_A — момент инерции относительно оси волчка;

I_{A_1} , I_{A_2} — моменты инерции вращающихся одна относительно другой частей молекулы;

K_1 — квантовое число движения первой части молекулы (момент инерции I_{A_1}), которое может принимать значения

$$K_1 = 0; \quad \pm 1; \quad \pm 2;$$

$K_2 = K - K_1$ — квантовое число движения второй части молекулы.

Для молекул типа C_2H_6 , $CH_3 - C \equiv C - CH_3$, C_2H_4 , состоящих из двух одинаковых частей, $\frac{A}{A_1} = \frac{1}{2}$, т. е. формула (139) может быть записана в виде

$$\varepsilon_f = A (K_1 - K_2)^2 = AK_i^2, \quad (141)$$

где K_i — квантовое число внутреннего вращения.

Если учитывать взаимодействие вращения и колебания, то уравнение (141) должно быть записано в виде

$$\varepsilon_f = A (K_1 - K_2 \mp \rho)^2. \quad (142)$$

Энергия свободного внутреннего вращения, выраженная уравнениями (139) или (141) и (142), должна быть добавлена к энергии вращения молекулы в целом, т. е. к уравнению (125) или (127).

Второй крайний случай решения уравнения (134) применяется при больших θ (соответственно при больших тормозящих внутренних потенциалах V_0) и малых углах вращения x .

В этом случае, разлагая в уравнении (134) $\cos 2x$ в ряд по x и ограничиваясь первыми членами ряда разложения, можем уравнение (134) записать в виде

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + (a_{mT} + 2\theta_m - 4\theta_m x^2)\psi = 0. \quad (143)$$

Указанное уравнение является уравнением гармонического осциллятора. Собственные значения энергии, характеризуемые этим уравнением, равны

$$\varepsilon = \left(\nu_t + \frac{1}{2} \right) \omega_t, \quad (144)$$

где ω_t — частота колебаний.

$$\omega_t = m \sqrt{\frac{V_0 A_1 A_2}{A}}, \quad (145)$$

где A — вращательная постоянная, соответствующая моменту инерции всей молекулы относительно ее оси;

A_1 и A_2 — так же, как при свободном вращении, вращательные постоянные, соответствующие моментам инерции I_{A_1} , I_{A_2} двух групп молекулы, поворачивающихся одна относительно другой и определяемые уравнением (140).

Момент инерции всей молекулы I_A равен сумме моментов инерции I_{A_1} и I_{A_2} двух вращающихся групп молекулы:

$$I_A = I_{A_1} + I_{A_2}.$$

Колебания с частотой ω_t называются крутильными колебаниями. Крутильные колебания возникают при больших V_0 , т. е. тогда, когда кинетическая энергия внутреннего вращения меньше тормозящего внутреннего потенциала V_0 , и когда части молекулы не могут преодолеть потенциального барьера и выполнить поворот.

Энергия крутильных колебаний по уравнению (144) в том случае, когда колебания имеют место, должна быть добавлена к общей энергии колебания молекул.

Мы рассмотрели два предельных случая внутреннего вращения. В промежуточных случаях происходит заторможенное вращение, энергия которого может быть получена из собственных значений решения уравнения (134).

8. ЭЛЕКТРОННАЯ ЭНЕРГИЯ

Связь атомов в молекуле осуществляется с помощью электронов, энергия которых зависит от междядерного расстояния.

Энергия возбуждения электронных уровней обычно велика, и только в некоторых случаях необходимо учитывать разность энергии между различными электронными состояниями.

Электронные состояния характеризуются проекцией результирующего орбитального момента L на ось симметрии молекулы.

Величина этой проекции Λ называется квантовым числом, которое характеризует электронное состояние молекулы с различной величиной энергии.

Квантовое число Λ при данном значении L может принимать значения

$$\Lambda = 0, 1, 2, \dots, L.$$

Электронное состояние с различными квантовыми числами $\Lambda = 0; 1; 2; 3$ принято обозначать следующим образом:

$\Lambda = 0$	—	состояние Σ ;
$\Lambda = 1$	—	» Π ;
$\Lambda = 2$	—	» Δ ;
$\Lambda = 3$	—	» Φ .

Результирующий угловой момент спинов всех электронов является вторым квантовым числом S , которое может принимать значения $0; \frac{1}{2}; 1$.

В результате взаимодействия с магнитным полем, благодаря спину, энергетический уровень расщепляется на $2S + 1$ составляющих.

Величину $2S + 1$ называют мультиплетностью уровня.

При $S = 0$ $2S + 1 = 1$ — синглетное состояние;

$S = \frac{1}{2}$ $2S + 1 = 2$ — дублетное состояние;

$S = 1$ $2S + 1 = 3$ — триплетное состояние.

Мультиплетность $2S + 1$ обозначается числовым индексом наверху у символа слева, обозначающего основное состояние: $^1\Sigma$, $^3\Sigma$ и т. д.

В классификации молекулярных электронных состояний имеют также большое значение свойства симметрии электронных собственных функций. В зависимости от того, будет ли волновая функция при отражении от плоскости симметрии оставаться неизменной или менять свой знак, различают разные электронные состояния.

Если функция неизменна, то это симметричное состояние обозначают в индексе наверху справа знаком плюс (например, Σ^+), если функция меняет знак (несимметричное состояние) — обозначают знаком минус (Σ^-). Кроме того, для симметричных молекул различают еще четное электронное состояние (Σ_g) и нечетное состояние (Σ_u).

9. СТАТИСТИЧЕСКИЙ ВЕС

При рассмотрении колебаний многоатомной молекулы указывалось, что для многоатомной молекулы возможен случай, когда два или несколько колебаний молекулы имеют одинаковую частоту или, что одно и то же, имеют одинаковую энергию колебаний. Такие энергетические состояния принято называть вырожденными.

Для двухатомных молекул колебания всегда невырождены, т. е. степень вырождения равна единице. Для многоатомных молекул степень вырождения может иметь различные значения.

Математически наличие вырожденных состояний для колебаний молекулы характеризуется совпадением корней λ_i векового уравнения.

Значительно более сложная картина получается при рассмотрении энергии вращения. Здесь оказывается, что, например, при вращении двухатомной молекулы при отсутствии внешнего поля каждое состояние содержит $2K + 1$ уровней, совпадающих по величине энергии, т. е. при вращении каждое состояние с данным квантовым числом K является вырожденным, причем степень вырождения равна $2K + 1$.

Принято число энергетических уровней, при которых энергия молекулы равна одна другой или отличается одна от другой незначительно, называть статистическим весом.

Следовательно, для вращательной энергии двухатомной молекулы статистический вес равен

$$p_r = 2K + 1. \quad (146)$$

Выше указывалось, что решение волнового уравнения возможно при наличии собственных значений функции. Это решение и определяет энергию молекулы. Однако при решении волнового уравнения получаются не только собственные значения, т. е. энергия стационарных состояний, но также и собственные функции ψ .

Исследование решения показывает, что одному и тому же собственному значению, определяющему энергию стационарных состояний, может соответствовать несколько различных собственных функций. Наличие этих собственных функций и определяет вырождение или статистический вес.

В двухатомных молекулах, имеющих два одинаковых ядра, при обмене ядрами состояние молекулы называют симметричным, если полная собственная функция остается без изменения. Наоборот, если собственная функция меняет свой знак, то такое состояние называют асимметричным.

Статистические веса симметричных и несимметричных состояний различны и зависят от явления ядерного спина.

Хотя это различие в статистических весах и имеет очень важное значение при изучении свойств и строения молекулы (оно, например, определяет различные модификации газов: орто-модификацию, имеющую больший статистический вес и пара-модификацию, имеющую меньший вес), но, как будет показано в дальнейшем, это различие не оказывает влияния на значение термодинамических величин при обычных температурах, и поэтому этот вопрос мы подробно не рассматриваем.

Статистический вес вращательной энергии линейных многоатомных молекул равен, так же как и для двухатомных молекул,

$$p_r = 2K + 1.$$

Аналогично определяется статистический вес и при вращении молекул симметричного волчка. Здесь следует только учитывать, что квантовое число J , которое наряду с числом K определяет энергию вращения, может иметь значения: $J = \pm K$, т. е. состояния, отличающиеся знаком при J , являются дважды вырожденными.

Статистический вес энергии вращения сферического волчка отличен от статистического веса вращения симметричного волчка.

Сферический волчок можно рассматривать как симметричный волчок, у которого вращательные постоянные A и B равны одна другой:

$$A = B.$$

Следовательно, все уровни с одинаковым K , но различным J совпадают один с другим; отсюда следует, что статистический вес сферического волчка равен

$$p_r = (2K + 1)^2. \quad (147)$$

Кроме статистического веса состояний вращательной энергии, должен быть учтен дополнительный статистический вес, определяющий все возможные ориентации ядерного спина

$$p_s = (2S_1 + 1)(2S_2 + 1) \dots \quad (148)$$

Так как статистический вес, определяющий ядерный спин, остается постоянным при изменении вращательной и колебательной энергий, этот вопрос подробно рассматривать не будем.

IV. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ГАЗА

1. МЕТОД СУММИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ; СУММА СОСТОЯНИЙ

В объеме газа, содержащем множество молекул, каждая из молекул в отдельности обладает определенным количеством энергии ϵ , соответствующим одному из энергетических уровней или состояний.

Для того чтобы найти суммарную энергию газа, необходимо прежде всего определить, какое количество молекул обладает той или иной энергией из всех возможных для молекулы энергетических уровней.

Согласно основным положениям статистической физики, при тепловом равновесии газа отношение числа молекул n_1 с энергией ϵ_1 к числу молекул n_2 с энергией ϵ_2 определяется уравнением

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{e^{-\frac{\epsilon_1}{kT}}}{e^{-\frac{\epsilon_2}{kT}}} = e^{-\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{kT}}, \quad (149)$$

где k — газовая постоянная, отнесенная к одной молекуле, $k = \frac{R}{N}$;

T — абсолютная температура ($T = t + 273,16^\circ$ абс);

ϵ — энергия одной молекулы в тех же единицах измерения, что и газовая постоянная.

Если энергия измеряется в волновых числах, как это обычно принято в спектроскопических расчетах, то значение ϵ должно быть умножено на величину hc , и уравнение (149) может быть записано в виде

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{e^{-\frac{\epsilon_1}{T} \cdot \frac{hc}{k}}}{e^{-\frac{\epsilon_2}{T} \cdot \frac{hc}{k}}} = e^{-\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{T} \cdot \frac{hc}{k}}, \quad (150)$$

где h — постоянная Планка;

c — скорость света.

Соотношения между единицами измерения даны в разделе физических констант.

Пользуясь приведенным уравнением, можно число молекул, обладающих той или иной энергией, выразить через число молекул, имеющих определенную энергию ϵ_0 .

Удобней всего принять за начало отсчета энергии и числа молекул, соответствующих этой энергии, так называемую нулевую энергию, за которую обычно принимают минимум энергии молекулы, находящейся в самом низком электронном состоянии. Этот минимум для определенного электронного состояния соответствует колебательному квантовому числу $v = 0$ и выражается для двухатомных молекул формулой (91) и для многоатомных молекул формулой (103).

Очень важный для химической термодинамики вопрос о нулевой энергии мы здесь не рассматриваем. Так, при определении всех термодинамических величин будем принимать во внимание формулу (150), из которой следует, что абсолютное

значение нулевой энергии не влияет на распределение энергии по числу молекул, так как это распределение определяется разностью энергий $\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_2$.

Условившись о начале отсчета энергии, обозначим число молекул, находящихся в состоянии нулевой энергии или, что все равно, обладающих энергией ε_0 , через n_0 . Тогда очевидно, что количество молекул, имеющих энергию ε , будет равно

$$n = n_0 e^{-\frac{\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_0}{T} \cdot \frac{hc}{k}}, \quad (151)$$

или, вводя

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_0,$$

т. е. обозначая через ε разность энергий между действительной энергией и нулевой, будем иметь

$$n = n_0 e^{-\frac{\varepsilon}{T} \cdot \frac{hc}{k}}. \quad (152)$$

Учитывая, что для каждого состояния, характеризуемого энергией ε , имеется несколько уровней, определяемых статистическим весом, можем написать окончательное уравнение, определяющее распределение числа молекул по величине энергии, в виде

$$n = n_0 p e^{-\varepsilon \frac{hc}{kT}}; \quad (153)$$

из этого уравнения следует, что при колебаниях молекулы число молекул, находящихся в различных квантовых состояниях, определяемых квантовым числом v , будет быстро уменьшаться с увеличением квантового числа.

Для вращательных состояний число молекул с увеличением вращательного квантового числа увеличивается, проходит максимум, а затем уменьшается.

Полное количество молекул в 1 моле газа, очевидно, определится как сумма величин, определяемых по уравнению (153) по всем возможным уровням энергии,

$$n_0 p_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + \dots = N, \quad (154)$$

или

$$n_0 p_0 + n_0 p_1 e^{-\varepsilon_1 \frac{hc}{kT}} + n_0 p_2 e^{-\varepsilon_2 \frac{hc}{kT}} + n_0 p_3 e^{-\varepsilon_3 \frac{hc}{kT}} + \dots = N. \quad (155)$$

Преобразуя уравнение (155), получаем

$$N = n_0 \sum_i p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}} = n_0 Q. \quad (156)$$

Величину множителя обычно обозначают через

$$Q = \sum_i p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}} \quad (157)$$

и называют статистической суммой или суммой состояний. Эта величина представляет собой сумму произведения p_i на величину $e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}$, взятую по всем возможным энергетическим уровням.

Если при суммировании приняты только энергетические уровни колебательной энергии, то сумму, взятую по всем энергетическим уровням колебания, называют колебательной суммой состояний; аналогично сумму произведений по всем энергетическим уровням вращения называют вращательной суммой состояний.

Величина Q является одним из основных понятий статистической термодинамики. Через эту величину, как мы увидим ниже, можно выразить теплоемкость и все термодинамические функции.

2. УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Если бы энергия молекулы изменялась непрерывно, то суммарную энергию газа или его внутримолекулярную энергию легко было бы найти интегрированием

$$U = \int_0^{\infty} \varepsilon_i n d\varepsilon. \quad (158)$$

Однако энергия изменяется дискретно, следовательно, необходимо интегрирование заменить суммированием:

$$U = \sum_i n_i \varepsilon_i. \quad (159)$$

Это очень важное обстоятельство практически сильно осложняет все вычисления при определении термодинамических величин.

Выражение (159) можно представить в таком виде:

$$U = \varepsilon_0 n_0 p_0 + n_1 \varepsilon_1 + n_2 \varepsilon_2 + \dots \quad (160)$$

или, подставляя из уравнения (153) значение n ,

$$\begin{aligned} U - U_0 &= n_0 p_1 \varepsilon_1 e^{-\frac{\varepsilon_1}{kT}} + n_0 p_2 \varepsilon_2 e^{-\frac{\varepsilon_2}{kT}} + \dots + n_0 p_i \varepsilon_i e^{-\frac{\varepsilon_i}{kT}} = \\ &= n_0 \sum_i \varepsilon_i p_i e^{-\frac{\varepsilon_i}{kT}}, \end{aligned} \quad (161)$$

где $U_0 = \varepsilon_0 n_0 p_0$ — нулевая внутренняя энергия, т. е. энергия газа при температуре $T = 0$.

Подставив в уравнение (161) n_0 из формулы (156) и учитывая, что ε_i обычно измеряется в волновых числах, уравнение для определения внутренней энергии можем писать в виде

$$U - U_0 = N \frac{\sum_i \varepsilon_i h c p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}}{\sum_i p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}}, \quad (162)$$

или, заменяя N через соотношение

$$N = \frac{R}{k} \quad (163)$$

и умножая числитель и знаменатель на одно и то же число T^2 , имеем

$$U - U_0 = RT^2 \frac{\sum_i \varepsilon_i \frac{hc}{kT^2} p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}}{\sum_i p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}}; \quad (164)$$

числитель этого выражения представляет собой производную от суммы состояний

$$\frac{dQ}{dT} = \sum_i \varepsilon_i \frac{hc}{kT^2} p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}. \quad (165)$$

Следовательно, можно написать

$$U - U_0 = R \frac{T}{Q} \left(T \frac{dQ}{dT} \right), \quad (166)$$

или в другом виде

$$U - U_0 = RT^2 \frac{d \ln Q}{dT}. \quad (167)$$

Уравнения (164), (166) и (167) являются основными, определяющими внутреннюю энергию газа по величине энергии молекулы ϵ . Общее выражение для энтальпии газа

$$I - U_0 = RT + RT^2 \frac{d \ln Q}{dT} = RT \left[1 + \left(T \frac{dQ}{dT} \right) \frac{1}{Q} \right]. \quad (168)$$

Теплоемкость газа при постоянном давлении

$$c_p = \frac{dI}{dT} = R + R \frac{d}{dT} \left(T^2 \frac{d \ln Q}{dT} \right). \quad (169)$$

Последнее уравнение можно представить в ином виде:

$$c_p = \frac{R}{Q} \left(T^2 \frac{d^2 Q}{dT^2} \right) - R \left[\frac{1}{Q} \left(T \frac{dQ}{dT} \right) - 1 \right]^2 + 2R. \quad (170)$$

Энтропия, приходящаяся на внутренние степени свободы (без энтропии поступательного движения), будет равна

$$S^0 - S_0^0 = \int_0^T c_v \frac{dT}{T} = R \left[\ln Q + T \frac{d \ln Q}{dT} \right] \Big|_0^T, \quad (171)$$

или

$$S^0 - S_0^0 = R \left[\ln Q_T + \frac{T d \ln Q_T}{dT} - \ln Q_0 \right]. \quad (172)$$

Член $R \ln Q_0$ равен энтропии газа при абсолютном нуле:

$$S_0^0 = R \ln Q_0 = R \ln p_0. \quad (173)$$

Следовательно,

$$S = R \left[\ln Q + \frac{T d \ln Q}{dT} \right] = \left[\ln \psi + \frac{1}{Q} \left(T \frac{dQ}{dT} \right) \right] R. \quad (174)$$

Таким образом, вычисление термодинамических функций, как видно из уравнений (167), (168), (169) и (174), сводится к определению суммы состояний Q .

Полная энергия молекулы газа, как указывалось, складывается из энергии поступательной ϵ_r , внутренней энергии вращения ϵ_r , колебания ϵ_v и электронной ϵ_e .

Следовательно, уравнение для суммы состояний можно написать в виде

$$Q = \sum p_i e^{-\frac{(\epsilon_t + \epsilon_{вн})}{kT}}; \quad (175)$$

здесь $\epsilon_{вн}$ — внутримолекулярная энергия, равная

$$\epsilon_{вн} = \epsilon_r + \epsilon_v + \epsilon_e.$$

Но так как поступательную энергию ϵ_t можно считать независимой от других видов энергии, то можно написать

$$Q = \sum p_t e^{-\frac{\epsilon_t}{kT}} \sum p_{вн} e^{-\frac{\epsilon_{вн}}{kT}}, \quad (176)$$

или, обозначая

$$Q_{пост} = \sum p e^{-\frac{\epsilon_t}{kT}}; \quad (177)$$

$$Q_{вн} = \sum p_i e^{-\frac{\epsilon_{вн}}{kT}}, \quad (178)$$

сумму состояния можно выразить в виде

$$Q = Q_{пост} Q_{вн}. \quad (179)$$

Подставляя из уравнения (83) значение поступательной энергии молекулы в уравнение (177) и суммируя по всем значениям квантовых чисел n_1, n_2, n_3 , получаем следующее выражение для суммы состояния поступательной энергии:

$$Q_{пост} = V \left(\frac{2\pi mkT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (180)$$

где V — объем 1 моля газа в $см^3$;

m — вес 1 молекулы, равный молекулярному весу, деленному на количество молекул, $m = \frac{\mu}{N}$;

h — постоянная Планка;

k — газовая постоянная, отнесенная к одной молекуле.

Подставляя значение $Q_{пост}$ из уравнения (180) в уравнения (166), (168) и (170), будем иметь

$$U_{пост} = \frac{3}{2} RT; \quad (181)$$

$$c_{v,пост} = \frac{3}{2} R; \quad (182)$$

$$c_{p,пост} = \frac{5}{2} R. \quad (183)$$

т. е. получаем полное совпадение с классической кинетической теорией газа. Значение энтропии определится из уравнения (174):

$$S_{пост} = R \left\{ \ln \left[\left(\frac{2\pi mkT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{V}{N} \right] + \frac{5}{2} \right\} \quad (184)$$

или

$$S_{пост} = R \ln \left(\frac{2\pi k}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} + R \ln \frac{V}{N} (mT)^{\frac{3}{2}} + \frac{5}{2} R. \quad (185)$$

Имея в виду теперь, что

$$V = \frac{RT}{aP}, \quad (186)$$

где a — переводной множитель давления из $\frac{дин}{см^2}$ в атмосферы, и группируя все постоянные, получаем

$$S_{пост} = R \ln \left[\left(\frac{2\pi k}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{k}{a} \right] + \frac{3}{2} R \ln \mu + \frac{5}{2} R \ln T + \frac{5}{2} R - R \ln P. \quad (187)$$

Подставляя теперь значения

$$k = 1,38026 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/град}; \quad h = 6,62377 \cdot 10^{-27} \text{ эрг}\cdot\text{сек};$$

$$N = 6,02380 \cdot 10^{23} \text{ 1/2-моль}; \quad a = 1,013246 \cdot 10^6 \text{ дин/см}^2\text{ат},$$

имеем

$$\frac{S_{пост}}{R} + \ln p = \frac{3}{2} \ln \mu + \frac{5}{2} \ln T - 1,16493 \quad (188)$$

или, приняв за стандартные условия идеальный газ при одной атмосфере, можно написать окончательное уравнение для определения энтропии поступательного движения

$$S_{пост} = 6,85876 \lg \mu + 11,43126 \lg T - 2,31333; \quad (189)$$

здесь μ — молекулярный вес газа.

V. МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ГАЗОВ

1. СПОСОБ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО СУММИРОВАНИЯ

Вычисления термодинамических величин по приведенным выше уравнениям представляют значительные трудности, связанные с суммированием отдельных рядов

Существует несколько способов вычисления, основанных на некоторых допущениях, упрощающих вычислительную работу, но вместе с тем дающих возможность получить результат с необходимой точностью приближения.

Наиболее простым, но наиболее трудоемким является способ непосредственного суммирования.

Кроме суммы состояний, обозначенной через Q ,

$$Q = \sum_i p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}, \quad (190)$$

введем обозначения

$$Q_1 = \sum_i \varepsilon_i \frac{hc}{kT} p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}; \quad (191)$$

$$Q_2 = \sum_i \left(\varepsilon_i \frac{hc}{kT} \right)^2 p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}, \quad (192)$$

где p_i — число уровней с одинаковой энергией или статистический вес для i -го состояния;

ε_i — энергия молекулы в квантовом состоянии i , которая может быть определена из общего выражения

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{e, \Lambda} + \varepsilon_{v, v} + \varepsilon_{r, K, v} \quad (193)$$

где v и K — целые положительные числа: 0, 1, 2, 3... и т. д., так называемые квантовые числа; при этом каждое i -состояние определяется любой парой чисел v и K при определенном электронном квантовом числе Λ .

Значение электронной энергии $\varepsilon_{e, \Lambda}$ зависит от электронного состояния молекулы, определяемого квантовым числом Λ (состояние Σ , Π , Δ , Φ).

Колебательная энергия определится суммой членов ряда, в котором суммирование распространено на все числа \bar{j} , от $\bar{j} = 1$ до \bar{j} :

$$\varepsilon_{v, v} = \sum_{\bar{j}=1}^{\bar{j}} y_{\bar{j}0} \left(v + \frac{1}{2} \right)^{\bar{j}}; \quad (194)$$

колебательно-вращательная энергия определится суммой членов ряда, в котором суммирование распространено по всем числам \bar{j} и \bar{q} , от $\bar{j}=0$ и $\bar{q}=1$:

$$\varepsilon_r = \sum_{\bar{j}=0} \sum_{\bar{q}=1} \nu_{\bar{j}, \bar{q}} \left(v + \frac{1}{2} \right)^{\bar{j}} K^{\bar{q}} (K+1)^{\bar{q}}. \quad (195)$$

Пользуясь указанными обозначениями, выражение для термодинамических величин можно представить в следующем виде.

Внутренняя энергия 1 моля газа равна

$$U - U_0 = RT \frac{\sum_i \varepsilon_i \frac{hc}{kT} p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}}{\sum_i p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}}; \quad (196)$$

после замены выражения для сумм она может быть представлена в виде

$$U - U_0 = RT \frac{Q_1}{Q}. \quad (197)$$

Теплоемкость моля газа при постоянном давлении

$$c_p = \frac{5}{2} R + \frac{\partial (U - U_0)}{\partial T} = \frac{5}{2} R + R \left[\frac{\sum_i \left(\varepsilon_i \frac{hc}{kT} \right)^2 p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}}{\sum_i p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}} - \frac{\left(\sum_i \varepsilon_i \frac{hc}{kT} p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}} \right)^2}{\left(\sum_i p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}} \right)^2} \right],$$

или

$$c_p = \frac{5}{2} R + R \left[\frac{Q_2}{Q} - \left(\frac{Q_1}{Q} \right)^2 \right] \quad (198)$$

и энтропия газа

$$S - S_0 = R \left[\ln Q + \frac{Q_1}{Q} \right] + S_{\text{ном}}. \quad (199)$$

Метод вычисления термодинамических величин по указанным уравнениям следующий:

1. Для определенного квантового состояния i , характеризуемого квантовыми числами: электронным, колебательным и вращательным, по известным из спектроскопических данных величинам $\nu_{\bar{j}, \bar{q}}$, ε_e , Λ энергию молекулы ε_i определяют по уравнению (193).

2. Для данного квантового состояния i определяют статистический вес p_i .

3. Для заданной температуры T вычисляют число молекул, находящихся в данном квантовом состоянии, $n_i = p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}$, величину $p_i \varepsilon_i \frac{hc}{kT} e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}$ и произведение числа молекул на квадрат отношения $\varepsilon_i \frac{hc}{kT}$:

$$p_i \left(\varepsilon_i \frac{hc}{kT} \right)^2 e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}.$$

4. Затем определяют энергию для другого i -го состояния, в котором увеличено на единицу колебательное ν или вращательное K квантовые числа.

5. Суммированием значений $p_i e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}$, $p_i \varepsilon_i \frac{hc}{kT} e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}$, $p_i \left(\varepsilon_i \frac{hc}{kT} \right)^2 e^{-\varepsilon_i \frac{hc}{kT}}$ по уравнениям (190)—(192) определяют Q , Q_1 и Q_2 .

6. По вычисленным Q , Q_1 и Q_2 из уравнений (197) — (199) находят c_p , $U - U_0$, $S - S_0$ для данной температуры T .

Изложенный метод позволяет в самом общем виде вычислить все термодинамические величины. Точность вычислений зависит от числа членов ряда, взятых для суммирования. Чем больше число членов ряда, тем точнее вычисления.

Хотя ряды Q , Q_1 и Q_2 довольно быстро убывают, все же для точных вычислений приходится брать большое число членов, что в значительной мере увеличивает объем вычислений.

2. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Для упрощения расчетов прибегают к приближенным способам вычисления.

В качестве первого приближения обычно принимают, что электронная энергия, энергия колебания и энергия вращения независимы одна от другой и что общая энергия молекулы является суммой отдельных видов энергий, т. е.

$$\varepsilon = \varepsilon_v + \varepsilon_r + \varepsilon_e.$$

Если учитывать это приближенное положение, то сумму отдельных состояний по всем видам энергии можно вычислить путем последовательного суммирования по электронным, колебательным и вращательным состояниям:

$$Q = \sum_i p_i e^{(\varepsilon_v + \varepsilon_r + \varepsilon_e) \frac{hc}{kT}} = \sum_{v=0}^{\infty} p_v e^{-\varepsilon_v \frac{hc}{kT}} \sum_{K=0}^{\infty} p_r e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} \sum_{l=0}^{\infty} p_e e^{-\varepsilon_e \frac{hc}{kT}} \quad (200)$$

или, обозначая

$$Q_v = \sum_{v=0}^{\infty} p_v e^{-\varepsilon_v \frac{hc}{kT}}; \quad (201)$$

$$Q_r = \sum_{K=0}^{\infty} p_r e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}}; \quad (202)$$

$$Q_e = \sum_{l=0}^{\infty} p_e e^{-\varepsilon_e \frac{hc}{kT}}, \quad (203)$$

сумма состояний может быть записана в виде

$$Q = Q_v Q_r Q_e. \quad (204)$$

Предположение о независимости отдельных составляющих энергии молекулы одна от другой приводит к тому, что все термодинамические величины могут быть выражены суммой, в которой каждая составляющая характеризуется соответствующей энергией.

По уравнению (204) сумма состояний равна произведению суммы состояний электронной, колебательной и вращательной энергий, следовательно,

$$\ln Q = \ln (Q_v Q_r Q_e) = \ln Q_v + \ln Q_r + \ln Q_e; \quad (205)$$

подставляя это значение $\ln Q$ в формулы (167), (169) и (174), получаем

$$U - U_0 = RT^2 \frac{d \ln Q}{dT} = RT^2 \frac{d \ln Q_v}{dT} + RT^2 \frac{d \ln Q_r}{dT} + RT^2 \frac{d \ln Q_e}{dT} \quad (206)$$

или, обозначая электронную составляющую внутренней энергии через

$$U_e - U_0 = RT^2 \frac{d \ln Q_e}{dT}, \quad (207)$$

вращательную через

$$U_r = RT^2 \frac{d \ln Q_r}{dT} \quad (208)$$

и колебательную составляющую через

$$U_v - U_0 = RT^2 \frac{d \ln Q_v}{dT}, \quad (209)$$

получаем внутреннюю энергию газа, так же как и энергию отдельной молекулы, равную сумме отдельных составляющих,

$$U - U_0 = (U_e - U_0) + (U_v - U_0) + U_r. \quad (210)$$

Аналогичное соотношение будем иметь для энтропии

$$S_{вн} - S_0 = (S - S_0)_e + (S - S_0)_v + S_r, \quad (211)$$

где электронная составляющая энтропии

$$(S - S_0)_e = R \left(\ln Q_e + T \frac{d \ln Q_e}{dT} \right); \quad (212)$$

энтропия колебательного движения

$$(S - S_0)_v = R \left(\ln Q_v + T \frac{d \ln Q_v}{dT} \right) \quad (213)$$

и энтропия вращательного движения молекулы

$$(S - S_0)_r = R \left(\ln Q_r + T \frac{d \ln Q_r}{dT} \right). \quad (214)$$

Теплоемкость газа также является суммой электронной c_e , колебательной c_v и вращательной c_r частей:

$$c_p = \frac{5}{2} R + c_e + c_v + c_r, \quad (215)$$

где

$$c_e = -R \frac{d}{dT} \left[\frac{d \ln Q_e}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \right]; \quad (216)$$

$$c_v = -R \frac{d}{dT} \left[\frac{d \ln Q_v}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \right]; \quad (217)$$

$$c_r = -R \frac{d}{dT} \left[\frac{d \ln Q_r}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \right]. \quad (218)$$

VI. МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ И ЭНТРОПИИ ДВУХАТОМНЫХ ГАЗОВ

1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ ПО ВЫЧИСЛЕНИЮ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Колебательная энергия молекулы, как следует из уравнения (90), определяется уравнением

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_v = \omega_e \left(v + \frac{1}{2} \right) - x_e \omega_e \left(v + \frac{1}{2} \right)^2 + y_e \omega_e \left(v + \frac{1}{2} \right)^3 - \\ - z_e \omega_e \left(v + \frac{1}{2} \right)^4 + \dots \end{aligned} \quad (219)$$

Как обусловлено выше, колебательная энергия отсчитывается от состояния $v = 0$, следовательно,

$$\varepsilon_v = \bar{\varepsilon}_v - \varepsilon_0 = \omega_0 v - x_0 \omega_0 v^2 + y_0 \omega_0 v^3 - z_0 \omega_0 v^4 + \dots, \quad (220)$$

где обозначено

$$\omega_0 = \omega_e - x_e \omega_e + \frac{3}{4} y_e \omega_e - \frac{1}{2} z_e \omega_e; \quad (221)$$

$$x_0 \omega_0 = x_e \omega_e - \frac{3}{2} y_e \omega_e + \frac{3}{2} z_e \omega_e; \quad (222)$$

$$y_0 \omega_0 = y_e \omega_e - 2z_e \omega_e. \quad (223)$$

Сумма состояний колебательной энергии будет равна

$$Q_v = \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\varepsilon_v \frac{hc}{kT}} = \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\varepsilon_v \frac{c_2}{T}}, \quad (224)$$

где для краткости обозначено

$$c_2 = \frac{hc}{k} = 1,43867; \quad (225)$$

v_D — наибольшее колебательное квантовое число, при котором молекула диссоциирует; как известно, это квантовое число определяется условием равенства нулю разности энергии молекулы при изменении квантового числа на единицу:

$$\Delta\varepsilon = 0. \quad (226)$$

Так, например, если энергия молекулы описывается уравнением простых ангармонических колебаний

$$\varepsilon_v = \omega_0 v - x_0 \omega_0 v^2, \quad (227)$$

то в соответствии с уравнением (226) предельное квантовое число определяется уравнением

$$v_D = \frac{\omega_0}{2x_0\omega_0}; \quad (228)$$

этому предельному квантовому числу соответствует энергия диссоциации, равная

$$D_0 = v_D \omega_0 - x_0 \omega_0 v_D^2 = \frac{\omega_0}{4x_0}. \quad (229)$$

Однако, как известно, действительная энергия диссоциации двухатомных молекул для заданного электронного уровня обычно ниже расчетной по уравнению (229). Это объясняется тем, что уравнение (227) для энергии молекулы не вполне точно описывает действительную зависимость.

Для того чтобы использовать уравнение (226) для определения предельного квантового числа и соответствующей ему энергии диссоциации, очевидно, необходимо уравнение энергии (227) дополнить членами более высокого порядка, т. е. принять уравнение (219) в общем виде.

Легко видеть, что выбор числа членов уравнения (219) и точность определения значения предельного квантового числа определяет точность подсчета суммы состояний по уравнению (224).

Так как всегда

$$\omega_e \gg x_e \omega_e; \quad x_e \omega_e \gg y_e \omega_e,$$

то в уравнении (219) члены большего порядка начинают оказывать влияние только при большом квантовом числе, при котором значение энергии молекулы уже сравнительно велико и, следовательно, члены $e^{-\frac{\varepsilon_v c_2}{T}}$ ряда уравнения (224), соответствующие этой большой энергии, имеют относительно меньшее значение.

Из уравнений (220) и (224) можно видеть, что чем больше величина $\frac{\omega_0 c_2}{T}$, тем меньше следует брать число членов ряда, указанного в уравнении (224), чтобы получить значение суммы состояний с одной и той же точностью.

Следовательно, чем выше температура и ниже частота колебаний молекулы, тем большее число членов надо принимать в уравнении (220) и точнее определять предельное квантовое число при подсчете суммы состояний по уравнению (224).

Рассмотрим методы подсчета термодинамических величин колебательной составляющей для трех видов уравнений энергии колебаний молекулы:

1) гармонические колебания

$$\varepsilon_v = \omega_0 v, \quad (230)$$

2) ангармонические колебания с квадратным членом в уравнении энергии

$$\varepsilon_v = \omega_0 v - x_0 \omega_0 v^2, \quad (231)$$

3) ангармонические колебания с членами четвертой степени в уравнении энергии

$$\varepsilon_v = \omega_0 v - x_0 \omega_0 v^2 + y_0 \omega_0 v^3 - z_0 \omega_0 v^4. \quad (232)$$

2. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

При простых гармонических колебаниях сумма состояний колебательной энергии определяется уравнением

$$Q_v^0 = \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\omega_0 \frac{c_2}{T} v}. \quad (233)$$

Величину $\omega_0 c_2$ обычно обозначают через θ :

$$\theta = \omega_0 c_2 = \omega_0 \frac{hc}{k} \quad (234)$$

и называют „характеристической температурой“, так как она имеет размерность температуры

$$\frac{\text{см}^{-1} (\text{эрг} \cdot \text{сек}) (\text{см} \cdot \text{сек}^{-1})}{\text{эрг/град}} = \text{град}.$$

При таком обозначении выражение (233) перепишем в виде

$$Q_v^0 = \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-v \frac{\theta}{T}}; \quad (235)$$

или

$$\sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-v \frac{\theta}{T}} = 1 + e^{-\frac{\theta}{T}} + e^{-2 \frac{\theta}{T}} + e^{-3 \frac{\theta}{T}} + e^{-4 \frac{\theta}{T}} + \dots + e^{-v_D \frac{\theta}{T}}.$$

Приведенный ряд легко может быть просуммирован.

Заменяя через q значение $e^{-\frac{\theta}{T}}$, получим степенной ряд, сумма членов которого равна

$$\sum_{n=0}^{n=v_D} q^n = 1 + q + q^2 + q^3 + \dots = \frac{1 - q^{v_D+1}}{1 - q},$$

так как q всегда меньше единицы.

Подставляя вновь значение q в выражение (235), будем иметь

$$\sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-v \frac{\theta}{T}} = \frac{1 - e^{-\frac{\theta}{T}(v_D+1)}}{1 - e^{-\frac{\theta}{T}}}. \quad (236)$$

При гармонических колебаниях квантовое число может принимать все значения от 0 до ∞ , следовательно, предельное его значение равно

$$v_D = \infty.$$

Таким образом, сумма состояний колебательной энергии простых гармонических колебаний равна

$$Q_v^0 = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\theta}{T}}}. \quad (237)$$

При значении $\frac{\theta}{T} \ll 1$ сумма состояний может быть подсчитана достаточно точно по приближенному уравнению

$$Q_v^0 = \frac{T}{\theta} \left[1 + \frac{\theta}{T} + \frac{\left(\frac{\theta}{T}\right)^2}{12} - \frac{\left(\frac{\theta}{T}\right)^4}{720} \right],$$

которое получается при разложении уравнения (237) в ряд.

Дифференцируя уравнение (237) по температуре, получим величины $T \frac{dQ_v^0}{dT}$ и $T^2 \frac{d^2Q_v^0}{dT^2}$, необходимые для определения теплоемкости, энтропии и энтальпии.

Таблица 18

Сумма состояний Q_v^0 и значений величин $T \frac{dQ_v^0}{dT}$ и $T^2 \frac{d^2Q_v^0}{dT^2}$ для простых гармонических колебаний

$\frac{\theta}{T}$	Q_v^0	Δ	$T \frac{dQ_v^0}{dT}$	Δ	$T^2 \frac{d^2Q_v^0}{dT^2}$	Δ
0,55	2,3638	—0,1474	1,7730	—0,1554	0,088928	0,007559
0,60	2,2164	—0,1241	1,6176	—0,1321	0,096437	0,007405
0,65	2,0923	—0,1068	1,48545	—0,11379	0,103892	0,007240
0,70	1,9865	—0,0902	1,37166	—0,09907	0,111132	0,007107
0,75	1,8953	—0,0793	1,27259	—0,08728	0,118239	0,006863
0,80	1,8160	—0,0695	1,18541	—0,07731	0,125102	0,006729
0,85	1,7465	—0,0614	1,10810	—0,06905	0,131831	0,006575
0,90	1,6851	—0,0545	1,03905	—0,06215	0,138406	0,006357
0,95	1,6306	—0,0486	0,97690	—0,05622	0,144763	0,00619
1,00	1,5820	—0,0437	0,92068	—0,05116	0,15095	0,00598
1,05	1,5383	—0,0393	0,86952	—0,04680	0,15693	0,00574
1,10	1,49896	—0,03560	0,82272	—0,04323	0,16267	0,00550
1,15	1,46336	—0,03235	0,77949	—0,03936	0,16817	0,00533
1,20	1,43100	—0,02943	0,74013	—0,03667	0,17350	0,00507
1,25	1,40154	—0,02691	0,70346	—0,03399	0,17857	0,00489
1,30	1,37463	—0,02467	0,66947	—0,03169	0,18346	0,00461
1,35	1,34996	—0,02264	0,63778	—0,02955	0,18807	0,00442
1,40	1,32732	—0,02086	0,60823	—0,02768	0,19249	0,00417
1,45	1,30546	—0,01924	0,58055	—0,02598	0,19666	0,00391
1,50	1,28722	—0,01778	0,55457	—0,02441	0,20057	0,00368
1,55	1,26944	—0,01646	0,53016	—0,02300	0,20425	0,00344
1,60	1,25298	—0,01528	0,50716	—0,02173	0,20769	0,00318
1,65	1,23770	—0,01419	0,48543	—0,02053	0,21087	0,00296
1,70	1,22351	—0,01319	0,46490	—0,01944	0,21383	0,00271
1,75	1,21032	—0,01229	0,44546	—0,01845	0,21654	0,00245
1,80	1,19803	—0,01146	0,42701	—0,01745	0,21899	0,00230
1,85	1,18657	—0,01070	0,40956	—0,01663	0,22129	0,00202
1,90	1,17587	—0,01000	0,39293	—0,01583	0,22331	0,00178
1,95	1,16587	—0,00935	0,37710	—0,01507	0,22509	0,00156

Продолжение табл. 18

$\frac{\theta}{T}$	Q_v^0	Δ	$T \frac{d Q_v^0}{dT}$	Δ	$T^2 \frac{d^2 Q_v^0}{dT^2}$	Δ
2,00	1,15652		0,36203		0,22655	
2,1	1,13956	-0,01696	0,33397	-0,02806	0,22915	0,00250
2,2	1,12461	-0,01495	0,30830	-0,02567	0,23069	0,00154
2,3	1,11143	-0,01318	0,28485	-0,02345	0,23146	0,00077
2,4	1,09977	-0,01166	0,26333	-0,02152	0,23144	-0,00102
2,5	1,08943	-0,01034	0,24356	-0,01977	0,23068	-0,00076
2,6	1,08023	-0,00920	0,22534	-0,01822	0,22922	-0,00146
2,7	1,07205	-0,00818	0,20855	-0,01679	0,22713	-0,00209
2,8	1,06475	-0,00730	0,19303	-0,01552	0,22441	-0,00272
2,9	1,05823	-0,00652	0,17869	-0,01434	0,22117	-0,00324
3,0	1,05240	-0,00583	0,16542	-0,01327	0,21742	-0,00375
3,1	1,04717	-0,00523	0,15314	-0,01228	0,21324	-0,00418
3,2	1,04249	-0,00468	0,141759	-0,01138	0,20866	-0,00458
3,3	1,03830	-0,00419	0,131216	-0,010543	0,20375	-0,00491
3,4	1,03453	-0,00377	0,121439	-0,009777	0,19852	-0,00523
3,5	1,03114	-0,00339	0,112374	-0,009065	0,19305	-0,00547
3,6	1,02809	-0,00305	0,103972	-0,008402	0,18738	-0,00587
3,7	1,02535	-0,00274	0,096174	-0,007798	0,18156	-0,00582
3,8	1,02288	-0,00247	0,088943	-0,007231	0,17556	-0,00600
3,9	1,02066	-0,00222	0,082239	-0,006704	0,16953	-0,00603
4,0	1,01866	-0,00200	0,076024	-0,006215	0,16340	-0,00613
4,2	1,01522	-0,00344	0,064911	-0,011113	0,15111	-0,01229
4,4	1,01243	-0,00279	0,055371	-0,009540	0,138948	-0,01216
4,6	1,01015	-0,00228	0,047181	-0,008190	0,127077	-0,011871
4,8	1,00830	-0,00185	0,040161	-0,007020	0,115652	-0,011425
5,0	1,00678	-0,00152	0,034147	-0,006014	0,104756	-0,010896
5,2	1,00555	-0,00123	0,029006	-0,005141	0,094493	-0,010263
5,4	1,00454	-0,00101	0,024611	-0,004395	0,084883	-0,009610
5,6	1,00371	-0,00083	0,020862	-0,003749	0,075971	-0,008912
5,8	1,00304	-0,00067	0,017667	-0,003195	0,067756	-0,008215
6,0	1,00248	-0,00056	0,0149466	-0,002720	0,060233	-0,007523
		-0,00082		-0,0012772		-0,013060

Продолжение табл. 18

$\frac{\theta}{T}$	Q_v^0	Δ	$T \frac{dQ_v^0}{dT}$	Δ	$T^2 \frac{d^2Q_v^0}{dT^2}$	Δ
6,4	1,00166	-0,00055	0,0106694	-0,0030789	0,047173	-0,010623
6,8	1,00111	-0,00036	0,0075905	-0,0022070	0,036550	-0,008498
7,2	1,00075	-0,00025	0,0053835	-0,0015763	0,028052	-0,006708
7,6	1,00050	-0,00017	0,0038072	-0,0011218	0,021349	-0,005222
8,0	1,00033	-0,00011	0,0026854	-0,0007957	0,016127	-0,004026
8,4	1,00022	-0,00007	0,0018897	-0,0005628	0,012101	-0,003075
8,8	1,00015	-0,00005	0,00132686	-0,00039712	0,0090261	-0,0023303
9,2	1,00010	-0,00003	0,00092974	-0,00027946	0,0066958	-0,0017524
9,6	1,00007	-0,00003	0,00065028	-0,00019624	0,0049434	-0,0013105
10,0	1,00004		0,00045404		0,0036329	

Тогда

$$T \frac{dQ_v^0}{dT} = \frac{\left(\frac{\theta}{T}\right) e^{-\frac{\theta}{T}}}{\left(1 - e^{-\frac{\theta}{T}}\right)^2}; \quad (238)$$

$$T^2 \frac{d^2Q_v^0}{dT^2} = \frac{2\left(\frac{\theta}{T}\right)^2 e^{-\frac{2\theta}{T}}}{\left(1 - e^{-\frac{\theta}{T}}\right)^3} - \frac{\left(\frac{\theta}{T}\right) e^{-\frac{\theta}{T}} \left(2 - \frac{\theta}{T}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{\theta}{T}}\right)^2}; \quad (239)$$

подставляя выражения из уравнений (238) и (239) в уравнения (166), (170) и (174), получим уравнения для определения внутренней энергии

$$U_v - U_0 = \frac{R\theta}{e^{\frac{\theta}{T}} - 1}, \quad (240)$$

теплоемкости

$$c_v = \frac{R \left(\frac{\theta}{T}\right)^2 e^{\frac{\theta}{T}}}{\left(e^{\frac{\theta}{T}} - 1\right)^2} \quad (241)$$

и энтропии

$$S_v - S_0 = \frac{R \frac{\theta}{T}}{e^{\frac{\theta}{T}} - 1} - R \ln \left(1 - e^{-\frac{\theta}{T}}\right). \quad (242)$$

Вычисление по приведенным формулам не составляет большого труда и может быть еще облегчено, если использовать табл. 18 и 19, в которых по уравнениям (237) — (242) подсчитаны значения Q_v^0 , $T \frac{dQ_v^0}{dT}$, $T^2 \frac{d^2Q_v^0}{dT^2}$, c_v , $S_v - S_0$ и $U_v - U_0$ в зависимости от $\frac{\theta}{T}$.

Таблица 19

Теплоемкость, внутренняя энергия и энтропия при простых гармонических колебаниях

$\frac{\theta}{T}$	c_v	Δ	$\frac{U - U_0}{T}$	Δ	$S_v - S_0$	Δ
0,55	1,9366	—0,0094	1,4895	—0,0402	3,1978	—0,1680
0,60	1,9272	—0,0099	1,4493	—0,0395	3,0298	—0,1540
0,65	1,9173	—0,0105	1,4098	—0,0386	2,8758	—0,1415
0,70	1,9068	—0,0115	1,3712	—0,0378	2,7343	—0,1313
0,75	1,8953	—0,0121	1,3334	—0,0371	2,6030	—0,1219
0,80	1,8832	—0,0128	1,2963	—0,0363	2,4811	—0,1138
0,85	1,8704	—0,0135	1,2600	—0,0355	2,3673	—0,1067
0,90	1,8569	—0,0139	1,2245	—0,0348	2,2606	—0,0992
0,95	1,8430	—0,0147	1,1897	—0,0340	2,1614	—0,0948
1,00	1,8283	—0,0153	1,1557	—0,0332	2,0666	—0,0889
1,05	1,8130	—0,0158	1,1225	—0,0326	1,9777	—0,0840
1,10	1,7972	—0,0165	1,0899	—0,0318	1,8937	—0,0785
1,15	1,7807	—0,0169	1,0581	—0,0310	1,8142	—0,0754
1,20	1,7638	—0,0175	1,0271	—0,0304	1,7388	—0,0717
1,25	1,7463	—0,0180	0,9967	—0,0296	1,6671	—0,0680
1,30	1,7283	—0,0185	0,9671	—0,0289	1,5991	—0,0651
1,35	1,7098	—0,0189	0,9382	—0,0282	1,5340	—0,0617
1,40	1,6909	—0,0192	0,9100	—0,0276	1,4723	—0,0590
1,45	1,6717	—0,0197	0,8824	—0,0269	1,4133	—0,0564
1,50	1,6520	—0,0203	0,8555	—0,0261	1,3569	—0,0538
1,55	1,6317	—0,0204	0,8294	—0,0256	1,3031	—0,0514
1,60	1,6113	—0,0207	0,8038	—0,0250	1,2517	—0,0493
1,65	1,5906	—0,0210	0,7788	—0,0243	1,2024	—0,0473
1,70	1,5696	—0,0215	0,7545	—0,0236	1,1551	—0,0450
1,75	1,5481	—0,0216	0,7309	—0,0230	1,1101	—0,0435
1,80	1,5265	—0,0221	0,7079	—0,0225	1,0666	—0,0415
1,85	1,5046	—0,0220	0,6854	—0,0218	1,0251	—0,0397
1,90	1,4826	—0,0222	0,6636	—0,0213	0,9854	—0,0384
1,95	1,4604	—0,0225	0,6423	—0,0207	0,9470	—0,0367

Продолжение табл. 19

$\frac{\theta}{T}$	c_v	Δ	$\frac{U - U_0}{T}$	Δ	$S_v - S_0$	Δ
	ккал/моль град					
2,00	1,4379		0,6216		0,9103	
2,1	1,3926	-0,0453	0,5820	-0,0396	0,8412	-0,0691
2,2	1,3470	-0,0456	0,5444	-0,0376	0,7776	-0,0636
2,3	1,3011	-0,0459	0,5089	-0,0355	0,7189	-0,0587
2,4	1,2550	-0,0461	0,4755	-0,0334	0,6645	-0,0544
2,5	1,2092	-0,0458	0,4440	-0,0315	0,6140	-0,0505
2,6	1,1635	-0,0457	0,4143	-0,0297	0,5675	-0,0465
2,7	1,1182	-0,0453	0,3863	-0,0280	0,5245	-0,0430
2,8	1,0733	-0,0449	0,3600	-0,0263	0,4845	-0,0400
2,9	1,0290	-0,0443	0,3353	-0,0247	0,4478	-0,0367
3,0	0,9856	-0,0434	0,3121	-0,0232	0,4136	-0,0344
3,1	0,9427	-0,0429	0,2904	-0,0217	0,3819	-0,0317
3,2	0,9008	-0,0419	0,2700	-0,0204	0,3527	-0,0292
3,3	0,8599	-0,0409	0,2510	-0,0190	0,3257	-0,0270
3,4	0,8199	-0,0400	0,2331	-0,0179	0,3005	-0,0252
3,5	0,7810	-0,0389	0,2164	-0,0167	0,2772	-0,0233
3,6	0,7433	-0,0377	0,2008	-0,0156	0,2558	-0,0214
3,7	0,7066	-0,0354	0,1863	-0,0145	0,2359	-0,0199
3,8	0,6712	-0,0337	0,1727	-0,0136	0,2176	-0,0183
3,9	0,6369	-0,0324	0,1600	-0,0127	0,2006	-0,0170
4,0	0,6039	-0,0310	0,1482	-0,0118	0,1849	-0,0157
4,2	0,5413	-0,0262	0,12697	-0,0108	0,1571	-0,01251
4,4	0,4837	-0,0216	0,10861	-0,00963	0,13305	-0,01072
4,6	0,4309	-0,0172	0,09275	-0,00831	0,11279	-0,00894
4,8	0,3829	-0,0131	0,07910	-0,00737	0,09552	-0,00754
5,0	0,3392	-0,0092	0,06736	-0,00630	0,08082	-0,00656
5,2	0,2995	-0,0056	0,05728	-0,00537	0,06831	
5,4	0,2639	-0,0032	0,04865		0,05759	
5,6	0,2319	-0,0024	0,04128		0,04865	
5,8	0,2035	-0,00254	0,03498		0,04111	

Продолжение табл. 19

$\frac{\theta}{T}$	c_v	Δ	$\frac{U - U_0}{T}$	Δ	$S_v - S_0$	Δ
	ккал/моль град					
6,0	0,1781	—0,0427	0,02961	—0,00846	0,03455	—0,01012
6,4	0,13543	—0,03296	0,02115	—0,00609	0,02443	—0,00715
6,8	0,10247	—0,02562	0,01506	—0,00438	0,01728	—0,00517
7,2	0,07685	—0,01946	0,01068	—0,00312	0,01211	—0,00357
7,6	0,05739	—0,01469	0,007557	—0,002223	0,008539	—0,002582
8,0	0,04270	—0,01113	0,005331	—0,001579	0,005957	—0,001787
8,4	0,03157	—0,00834	0,003752	—0,001117	0,004170	—0,001191
8,8	0,02323	—0,00615	0,002635	—0,000789	0,002979	—0,000993
9,2	0,01708	—0,00477	0,001846	—0,000555	0,001936	—0,000596
9,6	0,012312	—0,003376	0,001291	—0,000389	0,0013901	—0,0003972
10,0	0,003936		0,000903		0,0009229	

3. ПРОСТЫЕ АНГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

При простых ангармонических колебаниях энергия молекулы описывается уравнением (231) в виде многочлена второй степени и, следовательно, в этом случае сумма состояний определится уравнением

$$Q_{vl} = \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\frac{(\omega_0 v - x_0 \omega_0 v^2) \frac{\theta}{T}}{T}} \quad (243)$$

или, вводя характеристическую температуру,

$$Q_{vl} = \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\frac{(v - x_0 v^2) \frac{\theta}{T}}{T}}, \quad (244)$$

где v_D — предельное квантовое число, определяемое для рассматриваемого случая колебаний молекулы уравнением (228).

Напишем сумму ряда уравнения (244) в виде

$$Q_{vl} = \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\frac{v \frac{\theta}{T}}{T}} + \Delta, \quad (245)$$

где поправка Δ равна, очевидно,

$$\Delta = \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\frac{(v - x_0 v^2) \frac{\theta}{T}}{T}} - \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\frac{v \frac{\theta}{T}}{T}}, \quad (246)$$

и так как Δ является величиной второго порядка малости, то заменим сумму интегралом

$$\Delta = \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-(v-xv^2)\frac{\theta}{T}} - \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\frac{\theta}{T}v} = \int_0^{v_D} \left[e^{-(v-xv^2)\frac{\theta}{T}} - e^{-v\frac{\theta}{T}} \right] dv. \quad (247)$$

Для интегрирования уравнения (247) введем новую переменную

$$E = -\left(v - xv^2\right)\frac{\theta}{T} + \mu^2, \quad (248)$$

где

$$\mu = \frac{\left(\frac{\theta}{T}\right)^{\frac{1}{2}}}{2x^{\frac{1}{2}}}. \quad (249)$$

Решая уравнение (248) относительно v , будем иметь

$$v = \frac{1}{2x} - \frac{2\mu}{\theta} \sqrt{E}; \quad (250)$$

дифференцируя, получим

$$dv = -\frac{\mu}{\theta} \cdot \frac{dE}{\sqrt{E}}. \quad (251)$$

Путем подстановки из уравнений (251) и (248) заменим переменные в уравнении (247)

$$\Delta = -\frac{\mu}{\theta} \int_{\mu^2}^0 e^{E-\mu^2} \frac{dE}{\sqrt{E}} - \int_0^{v_D} e^{-v\frac{\theta}{T}} dv$$

или в другом виде

$$\Delta = \frac{\mu e^{-\mu^2}}{\theta} \int_0^{\mu^2} e^E \frac{dE}{\sqrt{E}} - \int_0^{v_D} e^{-v\frac{\theta}{T}} dv. \quad (252)$$

Здесь изменена переменная интегрирования, так как из уравнений (248) и (228) следует:

при $v = 0$

$$E = \mu^2;$$

при $v = v_D$

$$E = -\left(\frac{1}{2x} - \frac{x}{4x^2}\right)\frac{\theta}{T} + \frac{\theta}{4x} = 0.$$

Интеграл

$$F(\mu) = \frac{1}{2} e^{-\mu^2} \int_0^{\mu^2} e^E \frac{dE}{\sqrt{E}} = e^{-\mu^2} \int_0^{\mu} e^{y^2} dy \quad (253)$$

в элементарных функциях непосредственно решен быть не может, поэтому в табл. 21, расположенной в конце этого раздела, дается значение $F(\mu)$, вычисленное для различных μ .

Величина интеграла $F(\mu)$ является функцией параметра μ , который в нашем случае определяется уравнением (249).

Произведя подстановку из уравнения (253) в уравнение (252) и имея в виду, что

$$\int_0^{v_D} e^{-v \frac{\theta}{T}} dv = \frac{1 - e^{-v_D \frac{\theta}{T}}}{\frac{\theta}{T}},$$

получаем значение поправки Δ , равной

$$\Delta = \frac{1}{\frac{\theta}{T}} \left[2\mu F(\mu) - 1 + e^{-v_D \frac{\theta}{T}} \right]. \quad (254)$$

Произведя подстановку в уравнение (245) из уравнений (254) и (236), получим уравнение для определения суммы состояния при простых ангармонических колебаниях в виде

$$Q_{vl} = \frac{1 - e^{-v_D \frac{\theta}{T}}}{1 - e^{-\frac{\theta}{T}}} + \frac{e^{-v_D \frac{\theta}{T}}}{\frac{\theta}{T}} + \frac{1}{\frac{\theta}{T}} [2\mu F(\mu) - 1]. \quad (255)$$

Величина $v_D \frac{\theta}{T}$ обычно очень большая, так что в пределах точности расчета можно принять

$$e^{-v_D \frac{\theta}{T}} \approx 0.$$

В том же случае, если температура очень велика и, следовательно, $\frac{\theta}{T}$ очень мало, то также в пределах точности расчета можно принять

$$\frac{e^{-v_D \frac{\theta}{T}}}{1 - e^{-\frac{\theta}{T}}} \approx \frac{e^{-v_D \frac{\theta}{T}}}{\frac{\theta}{T}}.$$

Следовательно, уравнение (255) можно записать в виде

$$Q_{vl} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\theta}{T}}} + \frac{1}{\frac{\theta}{T}} [2\mu F(\mu) - 1].$$

Имея в виду уравнение (237), получим окончательное уравнение для определения суммы состояний простых ангармонических колебаний

$$Q_{vl} = Q_v^0 + \frac{\psi(\mu)}{\frac{\theta}{T}}, \quad (256)$$

где Q_v^0 — сумма состояний гармонических колебаний.

В уравнении (256)

$$\psi(\mu) = 2\mu F(\mu) - 1. \quad (257)$$

Легко установить, что $\psi(\mu)$ является производной от $F(\mu)$ с обратным знаком, т. е.

$$\psi(\mu) = -\frac{dF(\mu)}{d\mu}. \quad (258)$$

Значение $\psi(\mu)$ при различных μ см. в табл. 21.

Точность уравнения (256) зависит от того, в какой мере справедлива замена суммы из уравнения (246) интегралом.

Легко видеть, что значение интеграла будет тем ближе к истинному значению суммы, чем больше число членов в сумме, т. е. чем меньше характеристическая температура.

Предположим, что точность наших вычислений суммы ограничена последней значащей цифрой 10^{-4} , т. е., при большом значении $\frac{\theta}{T}$, равной примерно 0,01% от значения Q_{v1} . Очевидно, что в этом случае суммирование ограничивается последним членом, равным e^{-10} .

Проведем непосредственное суммирование при $x = 0,025$ и при разных значениях $\frac{\theta}{T}$. Результаты сведем в табл. 20.

Таблица 20

$\frac{\theta}{T}$	Число членов суммы	Δ при непосредственном суммировании $\Delta = Q_{v1} - Q_v^0$	Δ по формуле (256) $\Delta = Q_{v1} - Q_v^0 = \frac{\psi(\mu)}{T}$	Δ по формуле (260)
0,5	20	$31,41 \cdot 10^{-2}$	$31,41 \cdot 10^{-2}$	$20 \cdot 10^{-2}$
1	20	$6,06 \cdot 10^{-2}$	$6,07 \cdot 10^{-2}$	$4,98 \cdot 10^{-2}$
2	6	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$
3	4	$0,49 \cdot 10^{-2}$	$0,59 \cdot 10^{-2}$	$0,47 \cdot 10^{-2}$
5	2	$0,93 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$0,87 \cdot 10^{-3}$

Как видно из данных табл. 20, расчетная формула совершенно точна при $\frac{\theta}{T} \leq 2$; при больших значениях $\frac{\theta}{T}$ формула дает преувеличение поправки, хотя при этом по абсолютному значению расхождение между истинной и расчетной величиной поправки невелико.

Однако в том случае, когда формула (256) перестает быть удовлетворительной, пользоваться какой-либо вообще интегральной формулой нет смысла, так как сумма членов очень мала и в этом случае более просто вычисление суммы может быть выполнено непосредственно по уравнению

$$Q_{v1} = 1 + e^{-\frac{\theta}{T}(1-x)} + e^{-2\frac{\theta}{T}(1-2x)} + e^{-3\frac{\theta}{T}(1-3x)}. \quad (259)$$

Таким образом, можно установить общее правило:
при

$$\frac{\theta}{T} > \frac{3}{(1-x)}$$

расчет суммы состояния следует производить по формуле (259), а при

$$\frac{\theta}{T} < \frac{3}{(1-x)}$$

— по формуле (256).

Суммирование ряда уравнения (246), т. е. определение поправки на ангармоничность, можно провести еще следующим приближенным способом.

Разложим в ряд Тейлора все члены первого слагаемого суммы уравнения (246) и ограничимся первым членом разложения

$$\sum e^{-(v-xv^2)\frac{\theta}{T}} = \sum e^{-v\frac{\theta}{T}} \left(1 + xv^2\frac{\theta}{T}\right).$$

Тогда выражение (246) можно преобразовать к виду

$$\Delta = \sum e^{-(v-xv^2)\frac{\theta}{T}} - \sum e^{-v\frac{\theta}{T}} = \sum e^{-v\frac{\theta}{T}} x v^2 \left(\frac{\theta}{T}\right).$$

Данный степенной ряд суммируется непосредственно и равен

$$\Delta = \sum e^{-v\frac{\theta}{T}} x v^2 \frac{\theta}{T} = x \frac{\theta}{T} \frac{\left(e^{-\frac{\theta}{T}} + 1\right) e^{-\frac{\theta}{T}}}{\left(1 - e^{-\frac{\theta}{T}}\right)^3}. \quad (260)$$

В табл. 20 приведены поправки, вычисленные по последней формуле. Как видим, во всех случаях применения указанного способа получается преуменьшенное значение поправок, и только при $\frac{\theta}{T} = 3 \div 5$ этот способ дает удовлетворительные результаты, но в этом случае, как легко видно из сравнения формулы (259) с формулами (256) и (260), вычисление поправок по приближенным формулам только усложняет расчет.

Определим значение первых и вторых производных по температуре от суммы состояний ангармонических колебаний.

Дифференцируя уравнение (256) по T , будем иметь

$$T \frac{dQ_{v1}}{dT} = T \frac{dQ_v^0}{dT} + \frac{1}{\theta} \xi(\mu); \quad (261)$$

$$T^2 \frac{d^2Q_{v1}}{dT^2} = T^2 \frac{d^2Q_v^0}{dT^2} - \frac{1}{\theta} \varphi(\mu); \quad (262)$$

здесь $T \frac{dQ_v^0}{dT}$ и $T^2 \frac{d^2Q_v^0}{dT^2}$ определяются уравнениями (238) и (239), а через $\xi(\mu)$ и $\varphi(\mu)$ обозначено

$$\xi(\mu) = \left(\frac{1}{2} + \mu^2\right) \psi(\mu) - \frac{1}{2} = \left(\frac{1}{2} + \mu^2\right) [2\mu F(\mu) - 1] - \frac{1}{2}, \quad (263)$$

$$\varphi(\mu) = \psi(\mu) \left[\mu^2 + \frac{1}{4} - \mu^4\right] + \frac{\mu^2}{2} + \frac{1}{4}. \quad (264)$$

Значение функций $\xi(\mu)$ и $\varphi(\mu)$ дано в табл. 21 также при разных значениях параметра μ , определяемого из выражения (249).

Все термодинамические величины для рассмотренного случая ангармонических колебаний могут быть определены по общим уравнениям (168), (170) и (174), в которых значения $T \frac{dQ_{v1}}{dT}$, $T^2 \frac{d^2Q_{v1}}{dT^2}$, Q_v , следует подставлять из уравнений (261), (262) и (256).

При применении формулы (259), когда $\frac{\theta}{T} > \frac{1}{3(1-x)}$, расчет термодинамических величин удобнее производить по формулам (197) — (199).

4. СЛОЖНЫЕ АНГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Рассмотрим ангармонические колебания, для которых энергия молекул описывается уравнением (232).

Сумма состояний таких колебаний определяется, очевидно, уравнением

$$Q_{vII} = \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-(v-xv^2+yv^3-zv^4)\frac{\theta}{T}}, \quad (265)$$

где принято

$$\theta = \omega_0 \frac{hc}{k}.$$

Так же, как и в предыдущем случае, найдем сумму ряда уравнения (265) в виде

$$Q_{v \text{ II}} = \sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\frac{(v-xv^2)\theta}{T}} + \Delta', \quad (266)$$

где Δ' — поправка к сумме состояния, равная

$$\Delta' = \sum_{v=1}^{v=v_D} \left[e^{-\frac{-(v-xv^2+yv^3-zv^4)\theta}{T}} - e^{-\frac{(v-xv^2)\theta}{T}} \right]; \quad (267)$$

v_D — предельное квантовое число — в общем случае должно определяться из уравнения

$$D_0 = \omega_0 (v_D - xv_D^2 + yv_D^3 - zv_D^4), \quad (268)$$

где D_0 — энергия диссоциации молекулы. Так как уравнение (268) является уравнением четвертой степени и в явном виде не решается, то значение определим приближенно.

Учитывая, что

$$x \gg y \gg z,$$

примем в первом приближении

$$\omega_0 [v_D - xv_D^2] = D_0; \quad (269)$$

решая это уравнение, получим

$$v_D = \frac{1}{2x} - \sqrt{\frac{1}{4x^2} - \frac{D_0}{\omega_0 x}}. \quad (270)$$

Первый член уравнения (266) определен выше и равен

$$\sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\frac{(v-xv^2)\theta}{T}} = Q_v^0 - \frac{\mu e^{-\mu^2}}{\theta} \int_{v=0}^{v=v_D} e^E \frac{dE}{\sqrt{E}} = \frac{1 - e^{-\frac{v_D \theta}{T}}}{\frac{\theta}{T}}. \quad (271)$$

Для определения в уравнении (271) пределов интегрирования переменной, подставим значение v_D из уравнения (270) в уравнение (248):

$$E = -(v_D - xv_D^2) \frac{\theta}{T} + \mu^2 = -\frac{D_0}{\omega_0} \frac{\theta}{T} + \mu^2; \quad (272)$$

следовательно,

$$\sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\frac{(v-xv^2)\theta}{T}} = Q_v^0 - \mu e^{-\mu^2} \int_{\mu^2}^{\mu^2 - \frac{D_0}{\omega_0} \frac{\theta}{T}} e^E \frac{dE}{\sqrt{E}} = \frac{1 - e^{-\frac{v_D \theta}{T}}}{\frac{\theta}{T}},$$

или в другом виде

$$\sum_{v=0}^{v=v_D} e^{-\frac{(v-xv^2)\theta}{T}} = Q_v^0 - \frac{\mu e^{-\mu^2}}{\theta} \left[\int_{\mu^2}^0 e^E \frac{dE}{\sqrt{E}} + \int_0^{\mu^2 - \frac{D_0}{\omega_0} \frac{\theta}{T}} e^E \frac{dE}{\sqrt{E}} \right] = \frac{1 - e^{-\frac{v_D \theta}{T}}}{\frac{\theta}{T}}; \quad (273)$$

имея в виду, что интеграл, приведенный в табл. 21, равен

$$F(\mu) = \frac{\frac{1}{2} \int_0^{\mu^2} e^E \frac{dE}{\sqrt{E}}}{e^{\mu^2}},$$

уравнение (273) можно написать в виде

$$\sum_{v=0}^{v=vD} e^{-(v-xv^2) \frac{\theta}{T}} = O_v^0 + \frac{1}{\theta} \left[2\mu F(\mu) - 1 + e^{-vD \frac{\theta}{T}} \right] - \frac{2\mu}{\theta} e^{-\frac{D_0}{\omega_0} \cdot \frac{\theta}{T}} F(\mu_1), \quad (274)$$

где параметр μ_1 равен

$$\mu_1 = \sqrt{\mu^2 - \frac{D_0}{\omega_0} \cdot \frac{\theta}{T}}. \quad (275)$$

Определим значение поправки Δ' . Разлагая выражение, находящееся под знаком суммы, в ряд Тейлора и пренебрегая членами второго порядка малости, уравнение (267) можно преобразовать к виду

$$\Delta' = \frac{\theta}{T} \sum (zv^4 - yv^3) e^{-v \frac{\theta}{T}}. \quad (276)$$

Сумма членов рядов степенных функций равна

$$\overline{V^3} = \sum_0^{\infty} v^3 e^{-v \frac{\theta}{T}} = \overline{V^1} (1 + 6 \overline{V^1}); \quad (277)$$

$$\overline{V^4} = \sum_0^{\infty} v^4 e^{-v \frac{\theta}{T}} = \overline{V^2} (1 + 12 \overline{V^1}), \quad (278)$$

где обозначено

$$\overline{V^1} = (Q_v^0 - 1) Q_v^0; \quad (279)$$

$$\overline{V^2} = (2Q_v^0 - 1)(Q_v^0 - 1) Q_v^0; \quad (280)$$

Q_v^0 — сумма состояний, определяемая уравнением (237).

Подставляя уравнения (276), (277) и (278) в формулу (266), получим уравнение для определения суммы состояний для ангармонических колебаний, при которых энергия молекулы описана уравнением четвертой степени, в следующем виде:

$$Q_{vII} = Q_{vI} - \frac{2\mu}{\left(\frac{\theta}{T}\right)} e^{-\frac{D_0}{\omega_0} \frac{\theta}{T}} + \frac{\theta}{T} (z\overline{V^4} - y\overline{V^3}),$$

где Q_{vI} — сумма состояний простых ангармонических колебаний, определяемая по уравнению (256), а $\overline{V^3}$ и $\overline{V^4}$ — числа, определяемые по формулам (277), (278), (279) и (280).

Обычно величина $e^{-\frac{D_0}{\omega_0} \frac{\theta}{T}}$ очень мала и без ущерба в точности расчета ею можно пренебречь. Следовательно,

$$Q_{vII} = Q_{vI} + \frac{\theta}{T} (z\overline{V^4} - y\overline{V^3}). \quad (281)$$

Определим теперь производные от Q_{vII} , необходимые для подсчета теплоемкости, энтропии и энтальпии по уравнениям (170), (174) и (168):

$$T \frac{dQ_{vII}}{dT} = T \frac{dQ_{vI}}{dT} + \left(\frac{\theta}{T}\right)^2 (z\bar{V}^5 - y\bar{V}^4) - \frac{\theta}{T} (z\bar{V}^4 - y\bar{V}^3); \quad (282)$$

$$T^2 \frac{d^2Q_{vII}}{dT^2} = T^2 \frac{d^2Q_{vI}}{dT^2} + \left(\frac{\theta}{T}\right)^3 (z\bar{V}^6 - y\bar{V}^5) - 4 \left(\frac{\theta}{T}\right)^2 (z\bar{V}^5 - y\bar{V}^4) + 2 \frac{\theta}{T} (z\bar{V}^4 - y\bar{V}^3). \quad (283)$$

Здесь $T \frac{dQ_{vI}}{dT}$ и $T^2 \frac{d^2Q_{vI}}{dT^2}$ определяются из уравнений (261) и (262), а величины \bar{V}^5 и \bar{V}^6 равны:

$$\bar{V}^5 = \bar{V}^1 [1 + 30 \bar{V}^1 + 120 (\bar{V}^1)^2]; \quad (284)$$

$$\bar{V}^6 = \bar{V}^2 [1 + 60 \bar{V}^1 + 360 (\bar{V}^1)^2]. \quad (285)$$

Обычно константы ангармоничности y и z очень малы; поправка Δ и ее произведение весьма незначительно влияют на конечный результат расчета при сравнительно высоких температурах. Однако пренебрегать этой поправкой во всех случаях нельзя, особенно при весьма высоких температурах.

5. ВРАЩАТЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ МОЛЕКУЛ

Вращательная энергия молекулы, если предполагать независимость этой энергии от колебаний, в общем виде может быть выражена уравнением (110)

$$\varepsilon_r = B_e(K+1)K + D_e K^2(K+1)^2 + F_e K^3(K+1)^3 + H_e K^4(K+1)^4.$$

Статистический вес вращательного уровня, которому соответствует квантовое число K , для несимметричных молекул равен

$$p_r = 2K + 1.$$

Для симметричных молекул статистический вес зависит от величины спина. Если спин ядра каждого из атомов молекулы равен $\frac{1}{2}$, то для четных уровней молекулы статистический вес равен

$$p_{\text{четн}} = 2K + 1; \quad (286)$$

для нечетных уровней

$$p_{\text{нечетн}} = 3(2K + 1). \quad (287)$$

В том случае, когда спин ядер равен единице, для четных уровней статистический вес равен

$$p_{\text{четн}} = 6(2K + 1); \quad (288)$$

для нечетных

$$p_{\text{нечетн}} = 3(2K + 1). \quad (289)$$

Рассмотрим сначала способ определения суммы состояния и ее производных для несимметричных молекул, статистический вес для всех уровней которых определяется по уравнению (286),

Изложенные выше приемы определения суммы состояний колебательной энергии могут быть распространены и на определения суммы состояний вращательной энергии, однако в этом случае нет нужды в особых усложнениях математических выводов.

Как известно, спектроскопические константы вращения B_e , D_e , F_e и H_e во много раз меньше соответствующих колебательных констант и, кроме того,

$$B_e \gg D_e \gg F_e \gg H_e.$$

Следовательно, при определении суммы состояний и ее производных можно ограничиться в решении уравнений меньшим порядком приближения.

Уравнение для определения суммы состояния вращательной энергии имеет вид

$$Q_r = \sum_{k=0}^{k=\infty} p_r e^{-\frac{\varepsilon_r k c}{kT}} = \sum_{k=0}^{k=\infty} (2K+1) e^{-[B_e(K+1) + D_e(K+1)^2 K^2 + F_e K^3(K+1)^3 + \dots] \frac{hc}{kT}}. \quad (290)$$

Для определения суммы воспользуемся приближенной суммарной формулой Эйлера

$$\sum_{K=0}^{K=\infty} f(x) = \int_0^{\infty} f(x) dx + \frac{1}{2} [f(0) + f(\infty)] + \sum_{m=1}^{m=\infty} A_{2m} [f_{(\infty)}^{2m-1} - f_{(0)}^{2m-1}]; \quad (291)$$

здесь

$$A_2 = \frac{1}{12}; \quad A_4 = -\frac{1}{720}; \quad A_6 = \frac{1}{30240} \text{ — постоянные ряда.}$$

Вычислим значение интеграла

$$\int_0^{\infty} f(x) dx = \int_0^{\infty} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} (2K+1) dK, \quad (292)$$

который при равенстве

$$d[K(K+1)] = (2K+1) dK$$

преобразуется к виду

$$\int_0^{\infty} f(x) dx = \int_0^{\infty} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} d[(K+1)K]. \quad (293)$$

Методом последовательных приближений решим уравнение (110) относительно $K(K+1)$:

$$K(K+1) = \frac{\varepsilon_r}{B_e} - \frac{D_e}{B_e} K^2(K+1)^2 - \frac{F_e}{B_e} K^3(K+1)^3 - \frac{H_e}{B_e} K^4(K+1)^4 \dots \quad (294)$$

Первое приближение

$$K(K+1) = \frac{\varepsilon_r}{B_e}.$$

Второе приближение:

$$K(K+1) = \frac{\varepsilon_r}{B_e} - \frac{D_e}{B_e} \left(\frac{\varepsilon_r}{B_e}\right)^2 - \frac{F_e}{B_e} \left(\frac{\varepsilon_r}{B_e}\right)^3 - \frac{H_e}{B_e} \left(\frac{\varepsilon_r}{B_e}\right)^4 \dots$$

Третье приближение:

$$K(K+1) = \frac{\varepsilon_r}{B_e} - \frac{D_e}{B_e} \left[\frac{\varepsilon_r}{B_e} - \frac{D_e}{B_e} \left(\frac{\varepsilon_r}{B_e} \right)^2 - \frac{F_e}{B_e} \left(\frac{\varepsilon_r}{B_e} \right)^3 \dots \right]^2 - \frac{F_e}{B_e} \left[\frac{\varepsilon_r}{B_e} - \left(\frac{\varepsilon_r}{B_e} \right)^2 \frac{D_e}{B_e} - \frac{F_e}{B_e} \left(\frac{\varepsilon_r}{B_e} \right)^3 - \dots \right]^3 - \frac{H_e}{B_e} \left[\frac{\varepsilon_r}{B_e} - \frac{D_e}{B_e} \left(\frac{\varepsilon_r}{B_e} \right)^2 \dots \right]^4 \dots$$

Ограничиваясь третьим приближением, после преобразований имеем

$$K(K+1) = \frac{1}{B_e} \varepsilon_r - \frac{D_e}{B_e^3} \varepsilon_r^2 + \frac{(2D_e^2 - B_e F_e)}{B_e^5} \varepsilon_r^3 + \frac{5B_e D_e F_e - B_e^2 H_e - 5D_e^3}{B_e^7} \varepsilon_r^4. \quad (295)$$

Продифференцируем данное уравнение по переменной ε_r :

$$\frac{d[K(K+1)]}{d\varepsilon_r} = \frac{1}{B_e} - 2 \frac{D_e}{B_e^3} \varepsilon_r + 3 \frac{2D_e^2 - B_e F_e}{B_e^5} \varepsilon_r^2 + 4 \frac{5B_e D_e F_e - B_e^2 H_e - 5D_e^3}{B_e^7} \varepsilon_r^3$$

и подставим значение дифференциала в уравнение (292)

$$\int_0^\infty f(x) dx = \int_0^\infty e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} d\varepsilon_r \left\{ \frac{1}{B_e} - 2 \frac{D_e}{B_e^3} \varepsilon_r + 3 \frac{2D_e^2 - B_e F_e}{B_e^5} \varepsilon_r^2 + 4 \frac{5B_e D_e F_e - B_e^2 H_e - 5D_e^3}{B_e^7} \varepsilon_r^3 \right\}.$$

После почленного интегрирования и подстановки пределов получаем следующее значение интеграла:

$$\int_0^\infty f(x) dx = \frac{kT}{hc} \cdot \frac{1}{B_e} - \frac{2D_e}{B_e^3} \left(\frac{kT}{hc} \right)^2 + \left(\frac{kT}{hc} \right)^3 \frac{12D_e^2 - 6B_e F_e}{B_e^5} + \frac{120B_e D_e F_e - 24B_e^2 H_e - 120D_e^3}{B_e^7} \left(\frac{kT}{hc} \right)^4. \quad (296)$$

Производные от подинтегральной функции

$$f(x) = (2K+1) e^{-[B_e K(K+1) + D_e(K+1)^2 K^2 + F_e K^3(K+1)^3 \dots] \frac{hc}{kT}}$$

имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} f'(x) &= 2e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} - \frac{hc}{kT} \frac{d\varepsilon_r}{dK} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} (2K+1); \\ f''(x) &= -4 \frac{hc}{kT} \cdot \frac{d\varepsilon_r}{dK} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} - \frac{hc}{kT} \cdot \frac{d^2\varepsilon_r}{dK^2} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \\ &\quad + \left(\frac{hc}{kT} \right)^2 (2K+1) \left(\frac{d\varepsilon_r}{dK} \right)^2 e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}}; \\ f'''(x) &= 6 \left(\frac{hc}{kT} \right)^2 \left(\frac{d\varepsilon_r}{dK} \right)^2 e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} - 6 \frac{hc}{kT} \cdot \frac{d^2\varepsilon_r}{dK^2} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \\ &\quad + 3 \left(\frac{hc}{kT} \right)^2 (2K+1) \frac{d^2\varepsilon_r}{dK^2} \frac{d\varepsilon_r}{dK} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} - \\ &\quad - \left(\frac{hc}{kT} \right)^3 \left(\frac{d\varepsilon_r}{dK} \right)^3 (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} - \frac{hc}{kT} (2K+1) \frac{d^3\varepsilon_r}{dK^3} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}}. \end{aligned}$$

Как легко видеть из уравнения (284), производные $\frac{d\varepsilon_r}{dK}$, $\frac{d^2\varepsilon_r}{dK^2}$, $\frac{d^3\varepsilon_r}{dK^3}$ при $\varepsilon_r = 0$ равны:

$$\begin{aligned}\frac{d\varepsilon_r}{dK} &= B_e; \\ \frac{d^2\varepsilon_r}{dK^2} &= 2B_e + 2D_e; \\ \frac{d^3\varepsilon_r}{dK^3} &= 12D_e + 6F_e.\end{aligned}$$

Следовательно, при нижнем пределе полиинтегральная функция и ее нечетные производные имеют значения

$$\left. \begin{aligned}f(0) &= 1; \\ f'(0) &= 2 - B_e \left(\frac{hc}{kT}\right); \\ f'''(0) &= 6 \left(\frac{hc}{kT}\right)^2 B_e^2 - 6 \left(\frac{hc}{kT}\right) [2B_e + 2D_e] + 3 \left(\frac{hc}{kT}\right)^2 [2B_e + 2D_e] B_e - \\ &\quad - \left(\frac{hc}{kT}\right)^3 B_e^3 - \left(\frac{hc}{kT}\right) (12D_e + 6F_e).\end{aligned}\right\} \quad (297)$$

Подставляя найденные значения отдельных составляющих в формулу (291), после преобразования будем иметь уравнение для определения суммы состояний вращательной энергии

$$\begin{aligned}Q_r &= \left(\frac{kT}{hc}\right) \frac{1}{B_e} - \frac{2D_e}{B_e^3} \left(\frac{kT}{hc}\right)^2 + \frac{12D_e^2 - 6B_e F_e}{B_e^5} \left(\frac{kT}{hc}\right)^3 + \\ &+ \frac{120B_e D_e F_e - 24B_e^2 H_e - 120D_e^3}{B_e^7} \left(\frac{kT}{hc}\right)^4 + \frac{1}{3} + \frac{1}{15} \frac{hc}{kT} \left(B_e - \frac{1}{2} D_e - \frac{1}{8} F_e\right) + \\ &\quad + \frac{1}{360} \left(\frac{hc}{kT}\right)^2 (12B_e^2 + 3B_e D_e).\end{aligned} \quad (298)$$

Определим производные от Q_r , необходимые для вычисления по уравнениям (170) (174), (168) термодинамических величин

$$\begin{aligned}T \frac{dQ_r}{dT} &= \left(\frac{kT}{hc}\right) \frac{1}{B_e} - 4 \frac{D_e}{B_e^3} \left(\frac{kT}{hc}\right)^2 + 3 \frac{12D_e^2 - 6B_e F_e}{B_e^5} \left(\frac{kT}{hc}\right)^3 + \\ &+ 96 \frac{5B_e D_e F_e - B_e^2 H_e - 5D_e^3}{B_e^7} \left(\frac{kT}{hc}\right)^4 - \frac{1}{15} \left(\frac{hc}{kT}\right) \left(B_e - \frac{1}{2} D_e - \frac{1}{8} F_e\right) - \\ &\quad - \frac{1}{180} \left(\frac{hc}{kT}\right)^2 (12B_e^2 + 3B_e D_e); \quad (299)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T^2 \frac{d^2 Q_r}{dT^2} &= -4 \frac{D_e}{B_e^3} \left(\frac{kT}{hc}\right)^2 + 6 \frac{12D_e^2 - 6B_e F_e}{B_e^5} \left(\frac{kT}{hc}\right)^3 + \\ &+ 288 \frac{5B_e D_e F_e - B_e^2 H_e - 5D_e^3}{B_e^7} \left(\frac{kT}{hc}\right)^4 + \frac{2}{15} \left(\frac{hc}{kT}\right) \times \\ &\times \left(B_e - \frac{1}{2} D_e - \frac{1}{8} F_e\right) + \frac{1}{60} \left(\frac{hc}{kT}\right)^2 (12B_e^2 + 3B_e D_e).\end{aligned} \quad (300)$$

Подставляя значения Q_r , $T \frac{dQ_r}{dT}$ и $T^2 \frac{d^2 Q_r}{dT^2}$ из уравнений (298), (299) и (300) в уравнения (170), (174) и (168), можно определить все термодинамические величины, соответствующие вращательной энергии.

Следует отметить, что для многих молекул газа, особенно при высоких температурах, величина $\left(\frac{kT}{hc}\right) \frac{1}{B_e}$ значительно больше единицы

$$\left(\frac{kT}{hc}\right) \frac{1}{B_e} \gg 1,$$

и, следовательно, в порядке первого приближения, если пренебречь величинами второго порядка малости D_e , F_e , H_e , для таких молекул можно принять сумму состояний вращательной энергии, равной

$$Q_r = \frac{kT}{B_e hc}, \quad (301)$$

и в этом случае вращательная составляющая равна

$$\frac{c_r}{R} = 1; \quad (302)$$

$$\frac{U_r}{R} = T; \quad (303)$$

$$\frac{S_r}{R} = \ln \frac{kT}{B_e hc} + 1. \quad (304)$$

6. ВРАЩАТЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СИММЕТРИЧНЫХ МОЛЕКУЛ

Определим сумму состояний для симметричных молекул, имеющих спин.

Если спин равен $S = \frac{1}{2}$, то сумма состояний в соответствии со статистическими весами должна быть вычислена по уравнению

$$Q_{r_s = \frac{1}{2}} = \sum_{K=0, 2, 4, 6} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \sum_{K=1, 3, 5} 3(2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}}. \quad (305)$$

Данное уравнение можно преобразовать следующим способом:

$$\begin{aligned} Q_{r_s = \frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \sum_{K=0, 1, 2, 3} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \frac{3}{2} \sum_{K=0, 1, 2, 3} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \\ &+ \frac{3}{2} \left[\sum_{K=1, 3, 5, 7} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} - \sum_{K=0, 2, 4, 6} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} \right] + \\ &+ \frac{1}{2} \left[\sum_{K=0, 2, 4, 6} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} - \sum_{K=1, 3, 5, 7} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} \right]. \end{aligned} \quad (306)$$

Сумма ряда, заключенного в квадратные скобки, приближенно равна

$$\begin{aligned} & - \left[\sum_{K=1, 3, 5, 7} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} - \sum_{K=0, 2, 4, 6} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} \right] \approx \\ & \approx 4 \left(\frac{kT}{B_e hc} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{3}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} \left(\frac{kT}{B_e hc} \right)}. \end{aligned} \quad (307)$$

Следовательно, уравнение (306) для суммы состояния примет вид

$$Q_{r_s = \frac{1}{2}} = 2 \sum_{K=0}^{\infty} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + 4 \left(\frac{kT}{B_e hc} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{3}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} \left(\frac{kT}{B_e hc} \right)}. \quad (308)$$

Сумма ряда уравнения (307) при обычных значениях T и B_e очень мала и без большой погрешности может быть принята равной нулю, т. е.

$$\left(\frac{kT}{B_e hc}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{3}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} \left(\frac{kT}{B_e hc}\right)} \approx 0. \quad (309)$$

Следовательно, сумма состояний симметричных молекул со спином, равным $\frac{1}{2}$, может быть принята равной

$$Q_{r_{s=\frac{1}{2}}} = 2Q_r, \quad (310)$$

где Q_r — сумма состояний вращательной энергии несимметричных молекул, определяемая уравнением (297).

Для симметричных молекул со спином, равным единице, сумма состояний должна быть вычислена по уравнению

$$Q_{r_{s=1}} = \sum_{K=0, 2, 4} 6(2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \sum_{K=1, 3, 5} 3(2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}}. \quad (311)$$

Аналогично предыдущему данное уравнение можно преобразовать к виду

$$Q_{r_{s=1}} = 4,5 \sum_{K=0}^{\infty} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + 9 \left(\frac{kT}{B_e hc}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{3}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} \left(\frac{kT}{B_e hc}\right)} \quad (312)$$

или, пренебрегая последним членом,

$$Q_{r_{s=1}} = 4,5Q_r. \quad (313)$$

И, наконец, для симметричных молекул, у которых спин равен нулю, выпадают четные или нечетные уровни энергии. Сумма состояний для таких молекул должна определяться уравнениями

$$Q_{r_{s=0}} = \sum_{K=0, 2, 4, 6} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} \quad (314)$$

или

$$Q_{r_{s=0}} = \sum_{K=1, 3, 5, 7} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}}. \quad (315)$$

Следовательно, в этом случае

$$Q_{r_{s=0}} = \frac{1}{2} \sum_{K=0}^{\infty} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \left(\frac{kT}{B_e hc}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{3}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} \left(\frac{kT}{B_e hc}\right)}, \quad (316)$$

или, также пренебрегая последним членом,

$$Q_{r_{s=0}} = \frac{1}{2} Q_r. \quad (317)$$

Так как внутренняя энергия и теплоемкость пропорциональны производной от логарифма суммы состояний (множитель при Q_r сокращается), то определение этих величин для симметричных и несимметричных молекул производится по одним и тем же уравнениям (297), (299), (300); что касается энтропии, то к ее величине необходимо добавить:

$$\begin{array}{ll} \text{при спине } S=0 & R \ln \frac{1}{2}; \\ \text{„ „ } S=\frac{1}{2} & R \ln 2; \\ \text{„ „ } S=1 & R \ln 4,5. \end{array}$$

7. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ КОЛЕБАНИЕМ И ВРАЩЕНИЕМ

При наличии взаимодействия колебаний на вращение вращательная энергия определяется уравнением (111), которое в развернутом виде может быть записано

$$\varepsilon_r = \left[B_e - \alpha_0 \left(v + \frac{1}{2} \right) \dots \right] K(K+1) + \left[D_e - \beta_0 \left(v + \frac{1}{2} \right) + \dots \right] K^2(K+1)^2 + \left[F_e - \gamma_0 \left(v + \frac{1}{2} \right) \dots \right] K^3(K+1)^3. \quad (318)$$

Уравнения (298) — (300) для определения суммы состояний вращательной энергии и ее производных сохраняют свою силу и в этом случае, только коэффициент в этом уравнении будет зависеть от колебательного квантового числа v .

Вследствие того, что сумма состояний вращательной энергии зависит от квантового числа, уравнение (200), определяющее раздельно суммы состояний вращательной и колебательной энергии, в этом случае неприменимо и должно быть заменено совместным уравнением

$$Q_{vr} = \sum_{v=0}^{v=v} Q_r e^{-\varepsilon_v \frac{hc}{kT}}, \quad (319)$$

где Q_r — сумма состояний вращательной энергии, определяемая по уравнению (298), коэффициенты B , D , F , H , в котором равны:

$$B_v = B_0 - \alpha v; \quad B_0 = B_e - \frac{1}{2} \alpha_0; \quad (320)$$

$$D_v = D_0 - \beta v; \quad D_0 = D_e - \frac{1}{2} \beta_0; \quad (321)$$

$$F_v = F_0 - \gamma v; \quad F_0 = F_e - \frac{1}{2} \gamma_0; \quad (322)$$

$$H_v = H_0 - \delta v; \quad H_0 = H_e - \frac{1}{2} \delta_0. \quad (323)$$

Для определения Q_{vr} по уравнению (319) преобразуем отдельные члены уравнения (298).

Учитывая, что α_0 , β_0 , γ_0 малы сравнительно с соответствующими им членами B_v , D_v , F_v , можно воспользоваться следующими приближенными соотношениями:

$$\frac{1}{B_v} = \frac{1}{B_0 - \alpha_0 v} \approx \frac{1}{B_0} \left(1 + \frac{\alpha_0}{B_0} v \right); \quad (324)$$

$$\frac{D_v}{(B_v)^3} = \frac{D_0 \left(1 - \frac{\beta_0}{D_0} v \right)}{B_0^3 \left(1 - \frac{\alpha_0}{B_0} v \right)^3} \approx \frac{D_0}{B_0^3} \left[1 - \left(\frac{\beta_0}{D_0} - 3 \frac{\alpha_0}{B_0} \right) v - 3 \alpha_0^2 \frac{\alpha_0^2}{B_0 D_0} \right]. \quad (325)$$

Подставляя из уравнений (324) и (325) в уравнение (298) значения B_v и D_v вместо B_e и D_e , получим уравнение для вращательной энергии в следующем виде:

$$Q_r = Q_r^0 + m_1 v + m_2 v^2; \quad (326)$$

в этом случае

$$Q_r^0 = \left(\frac{kT}{hc} \right) \frac{1}{B_0} - \frac{2D_0}{B_0^3} \left(\frac{kT}{hc} \right)^2 + \frac{12D_0^2 - 6B_0 F_0}{B_0^5} \left(\frac{kT}{hc} \right)^3 + \frac{120B_0 D_0 F_0 - 24B_0^2 H_0 - 120D_0^3}{B_0^7} \times \left(\frac{kT}{hc} \right)^4 + \frac{1}{3} + \frac{1}{15} \frac{hc}{kT} \left[B_0 - \frac{1}{2} D_0 - \frac{1}{8} F_0 \right] + \frac{1}{360} \left(\frac{hc}{kT} \right)^2 [12B_0 - 3B_0 D_0], \quad (327)$$

т. е. Q_r^0 представляет собой сумму состояний, определяемую по уравнению (298), в котором коэффициенты B_e, D_e, F_e, H_e заменены коэффициентами B_0, D_0, F_0, H_0 , вычисленными по уравнениям (320) — (323):

$$m_1 = \left(\frac{kT}{hc}\right) \frac{\alpha_0}{B_0^2} + \frac{2D_0}{B_0^3} \left(\frac{kT}{hc}\right)^2 \left(\frac{\beta_0}{\nu_0} - \frac{3\alpha_0}{B_0}\right); \quad (328)$$

$$m_2 = -2 \frac{D_0}{B_0^3} \cdot \frac{3\alpha_0\beta_0}{B_0 D_0}. \quad (329)$$

При преобразовании уравнения (298) заменяем по уравнениям (324) и (325) только два первых члена уравнения, полагая, что остальные члены уравнения (298) имеют следующий порядок малости и, следовательно, зависимостью от квантового числа в них можно пренебречь.

Подставляя найденное значение Q_r из уравнения (326) в выражение (319), будем иметь

$$Q_{vr} = \sum_{v=0}^{v=v_D} (Q_r^0 + m_1 v + m_2 v^2) e^{-\varepsilon_v \frac{hc}{kT}} = Q_v Q_r^0 + m_1 \sum_{v=0}^{v=v_D} v e^{-\varepsilon_v \frac{hc}{kT}} + m_2 \sum_{v=0}^{v=v_D} v^2 e^{-\varepsilon_v \frac{hc}{kT}}. \quad (330)$$

Найдем решение второго и третьего членов уравнения (330). При решении задачи предположим, что энергия колебаний молекулы описывается уравнением (227) ангармонических колебаний. Получим решение в виде

$$\sum_{v=0}^{v=v_D} v e^{-\varepsilon_v \frac{hc}{kT}} = \sum_{v=0}^{v=v_D} v e^{-v \frac{\theta}{T}} + \Delta'', \quad (331)$$

где Δ'' — поправка, равная

$$\Delta'' = \sum_{v=0}^{v=v_D} \left[v \left(e^{-(v-xv^2) \frac{\theta}{T}} - e^{-v \frac{\theta}{T}} \right) \right]. \quad (332)$$

Заменяв в уравнении (332) сумму интегралом и заменив переменные в соответствии с подстановкой уравнений (248), (250) и (251), получим

$$\Delta'' = - \int_0^{\nu_D} \left(\frac{1}{2x} - \frac{2\mu}{\theta} \sqrt{E} \right) \frac{\mu}{T} \cdot \frac{dE}{\sqrt{E}} e^{E-\mu^2} - \int_0^{\nu_D} v e^{-v \frac{\theta}{T}} dv. \quad (333)$$

Интегрируя и подставляя пределы, будем иметь

$$\Delta'' = \frac{1}{\left(\frac{\theta}{T}\right)^2} [2\mu^2 \psi(\mu) - 1], \quad (334)$$

где $\psi(\mu)$ и μ определяются соотношениями (257) и (249).

Значение суммы первого члена уравнения (331) определяется легко по формуле (279) суммы ряда степенных функций

$$\bar{V}^1 = \sum_{v=0}^{v=v_D} v e^{-v \frac{\theta}{T}} = \frac{e^{-\frac{\theta}{T}}}{\left(1 - e^{-\frac{\theta}{T}}\right)^2} = (Q_v^0 - 1) Q_v^0. \quad (335)$$

где Q_v^0 — сумма состояний простых гармонических колебаний, определяемая уравнением (237).

Подставляя выражения (335) и (334) в уравнение (331), получим

$$\sum_{v=0}^{v=v_D} v e^{-\frac{(v-xv^2)\theta}{T}} = \bar{V}^1 + \frac{1}{\left(\frac{\theta}{T}\right)^2} [2\mu^2\psi(\mu) - 1]. \quad (336)$$

Аналогичным способом вычислим значение третьего члена уравнения (330):

$$\sum_{v=0}^{v=v_D} v^2 e^{-\frac{(v-xv^2)\theta}{T}} = \bar{V}^2 + \frac{1}{\left(\frac{\theta}{T}\right)^3} [4\mu^4\psi(\mu) - 4\mu^3F(\mu) - 1], \quad (337)$$

где \bar{V}^2 — сумма ряда степенных функций — определяется уравнением (280).

Легко видеть, что вторые члены уравнений (336) и (337) являются поправками на ангармоничность к вращательной сумме состояний; эти члены очень малы и ими вполне можно пренебречь:

$$\left(\frac{T}{\theta}\right)^2 [2\mu^2\psi(\mu) - 1] \approx 0; \quad (338)$$

$$\left(\frac{T}{\theta}\right)^3 [4\mu^4\psi(\mu) - 4\mu^3F(\mu) - 1] \approx 0. \quad (339)$$

Тогда уравнение (330) для определения суммы состояний колебательно-вращательного движения можно записать в виде

$$Q_{vr} = Q_v \cdot Q_r^0 + m_1 \bar{V}^1 + m_2 \bar{V}^2. \quad (340)$$

Здесь Q_v — сумма состояний колебательно-вращательного движения, определяемая по одному из уравнений (237), (256) и (281).

Уравнение (340) можно также записать в виде

$$Q_{vr} = Q_v \left(Q_r^0 + m_1 \frac{\bar{V}^1}{Q_v} + m_2 \frac{\bar{V}^2}{Q_v} \right) = Q_v Q_r^1; \quad (341)$$

множитель

$$Q_r^1 = Q_r^0 + m_1 \frac{\bar{V}^1}{Q_v} + m_2 \frac{\bar{V}^2}{Q_v} \quad (342)$$

может быть назван суммой состояний вращательной энергии и вычислен по уравнению (326), в котором колебательное квантовое число заменено числами $\frac{\bar{V}^1}{Q_v}$ и $\frac{\bar{V}^2}{Q_v}$, вычисляемыми по соотношениям (279) и (280); и по одному из уравнений (237), (256) и (281).

Следовательно, при взаимодействии колебательного и вращательного движений сумма состояний может быть вычислена так же, как и без взаимодействия, в виде произведения двух множителей, один из которых Q_v сохраняет свое значение, определяемое одним из уравнений (237), (256) и (281), а сумма состояний вращательной энергии дополняется двумя членами, определяемыми из уравнений (336) и (337).

Определим производные $\frac{dQ_{vr}}{dT}$, $\frac{d^2Q_{vr}}{dT^2}$, необходимые для вычисления по уравнениям (168), (170) и (174) колебательно-вращательной составляющей термодинамических величин.

Дифференцируя уравнение (338), получим

$$\frac{T}{Q_{vr}} \frac{dQ_{vr}}{dT} = \frac{T}{Q_r^0} \cdot \frac{dQ_r^0}{dT} + \frac{T}{Q_v} \cdot \frac{dQ_v}{dT} + \frac{m_1 \left(\frac{\theta}{T}\right) \bar{V}^2}{Q_v Q_r^0} + \frac{m_2 \left(\frac{\theta}{T}\right) \bar{V}^3}{Q_v Q_r^0}, \quad (343)$$

$$\begin{aligned} \frac{T^2}{Q_{vr}} \cdot \frac{d^2 Q_{vr}}{dT^2} = & 2 \frac{T}{Q_v} \cdot \frac{dQ_v}{dT} \frac{T}{Q_r^0} \cdot \frac{dQ_r^0}{dT} + T^2 \frac{d^2 Q_v}{dT^2} + T^2 \frac{d^2 Q_r^0}{dT^2} + \frac{\theta}{T} \frac{\bar{V}^3}{Q_v \cdot Q_r^0} \left(\frac{\theta}{T} m_1 - 2m_2\right) + \\ & + \frac{m_2 \left(\frac{\theta}{T}\right)^2 \bar{V}^4}{Q_v Q_r^0} - 2 \frac{m_1 \frac{\theta}{T} \bar{V}^2}{Q_v Q_r^0}, \end{aligned} \quad (344)$$

где $T \frac{dQ_r^0}{dT}$ и $T^2 \frac{d^2 Q_r^0}{dT^2}$ определяются уравнениями (299) и (300) при подстановке в них вместо величин B_e, D_e, F_e, H_e величин B_0, D_0, F_0, H_0 , которые находятся по уравнениям (320) — (323).

8. ЭЛЕКТРОННАЯ ЭНЕРГИЯ И ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ДРУГИМИ ВИДАМИ ЭНЕРГИИ

Сумма состояний электронной энергии может быть вычислена по общему уравнению

$$Q_e = p_0 + p_1 e^{-\frac{\epsilon_1 hc}{kT}} + p_2 e^{-\frac{\epsilon_2 hc}{kT}} + \dots, \quad (345)$$

где ϵ_1, ϵ_2 — энергия соответствующих электронных состояний ($\Sigma, \Pi, \Delta, \Phi$ — состояния и их составляющие), отсчитанных от основного устойчивого уровня.

Так как обычно число уровней электронной энергии невелико, то вычисление в этом случае суммы состояний не представляет трудностей, тем более, что для низких температур обычно значение членов $\frac{\epsilon_1}{kT}, \frac{\epsilon_2}{kT} \dots$ и т. д. настолько велико, что соответствующими членами в уравнении для Q_e можно пренебречь и принимать, что сумма состояний Q_e равна статистическому весу основного невозбужденного состояния:

$$Q_e = p_0. \quad (346)$$

При высоких температурах значение электронной энергии в общей сумме состояний начинает возрастать, и пренебрежение в этом случае электронной составляющей уже недопустимо.

Обычно электронное состояние молекулы характеризуется не только величиной электронной составляющей, но и различными колебательными и вращательными константами y_{jq} , так как электронное возбуждение приводит к новому состоянию молекулы с иной последовательностью колебательных и вращательных уровней.

В этом случае сумма состояний должна быть вычислена по уравнению

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + \Sigma Q_n, \quad (347)$$

где $Q_1, Q_2, Q_3 \dots, Q_n$ — суммы состояния соответствующего электронного уровня определяемые по общему уравнению

$$Q_n = \sum_i p_i e^{-\frac{\epsilon_i hc}{kT}}, \quad (348)$$

где ϵ_i — энергия молекулы в квантовом состоянии определенного электронного уровня, равная

$$\epsilon_i = \epsilon_e + \sum_{j=1, q=0}^{j=i, q=n} y_j \left(v + \frac{1}{2}\right)^j K^q (K+1)^q. \quad (349)$$

Если, например, взаимодействие между колебательным и вращательным состоянием отсутствует, сумма состояний определенного электронного уровня равна

$$Q_i = p_e e^{-\varepsilon_e \frac{hc}{kT}} \cdot \sum_{v=0}^{v=\infty} e^{-\varepsilon_v \frac{hc}{kT}} \cdot \sum_{k=0}^{k=\infty} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} = p_e e^{-\varepsilon_e \frac{hc}{kT}} Q_v Q_r; \quad (350)$$

общая сумма состояний при наличии взаимодействия электронных состояний на вращательно-колебательное состояние определится уравнением

$$Q = p_0 (Q_v Q_r)_0 + p_1 e^{-\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)hc}{kT}} (Q_v Q_r)_1 + p_2 e^{-\frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_0)hc}{kT}} (Q_v Q_r)_2 + \dots + p_i e^{-\frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_0)hc}{kT}} (Q_v Q_r)_i; \quad (351)$$

уравнения для определения термодинамических величин будут иметь вид

$$\frac{c_p}{R} = \frac{T^2}{Q} \left(\frac{d^2 Q_1}{dT^2} + \frac{d^2 Q_2}{dT^2} + \dots + \frac{d^2 Q_i}{dT^2} \right) - \left[\frac{T}{Q} \left(\frac{dQ_1}{dT} + \frac{dQ_2}{dT} + \frac{dQ_3}{dT} + \dots + \frac{dQ_i}{dT} \right) - 1 \right]^2 + \frac{7}{2}, \quad (352)$$

$$\frac{S}{R} = \ln Q + \frac{T}{Q} \left(\frac{dQ_1}{dT} + \frac{dQ_2}{dT} + \frac{dQ_3}{dT} + \dots + \frac{dQ_i}{dT} \right), \quad (353)$$

$$\frac{U}{R} = \frac{T^2}{Q} \left(\frac{dQ_1}{dT} + \frac{dQ_2}{dT} + \frac{dQ_3}{dT} + \dots + \frac{dQ_i}{dT} \right). \quad (354)$$

Рассмотрим способы вычисления термодинамических величин при более сложном случае взаимодействия электронных движений в молекуле на вращательное движение, когда электронная энергия определяется уравнением, в которое входит квантовое число вращения K .

Так, например, молекула кислорода в электронном состоянии ${}^3\Sigma_g^-$ распадается на три составляющих F_1, F_2, F_3 , для которых при квантовом числе вращения K для каждого из этих состояний электронная энергия определяется уравнением

$$\varepsilon_{F_1} = \varepsilon_0 + (2K+3)B - \lambda - [(2K+3)^2 B^2 + 2\lambda B]^{\frac{1}{2}} + \mu(K+1); \quad (355)$$

$$\varepsilon_{F_2} = \varepsilon_0; \quad (356)$$

$$\varepsilon_{F_3} = \varepsilon_0 - (2K-1)B - \lambda + [(2K+3)^2 B^2 + \lambda^2 - 2\lambda B]^{\frac{1}{2}} - \mu(K-1), \quad (357)$$

где λ и B — константы.

В этом случае сумма состояний, соответствующая электронно-вращательному движению, будет равна

$$Q = \sum (2K+3) e^{-\frac{(\varepsilon_{F_1} + \varepsilon_r)hc}{kT}} + \sum (2K+1) e^{-\frac{(\varepsilon_{F_2} + \varepsilon_r)hc}{kT}} + \sum (2K-1) e^{-\frac{(\varepsilon_{F_3} + \varepsilon_r)hc}{kT}}, \quad (358)$$

где ε_r — вращательная энергия молекулы;

K — вращательное квантовое число, которое в данном случае может принимать только нечетные значения.

При K достаточно большом (большем некоторого числа K_1), как видно из уравнений (355) и (357), электронные энергии различных составляющих будут равны:

$$\varepsilon_{F_1} = \varepsilon_0 - \lambda + \mu (K + 1); \quad (359)$$

$$\varepsilon_{F_2} = \varepsilon_0 - \lambda - \mu (K - 1). \quad (360)$$

Преобразуем уравнение (358) суммы состояний к виду

$$\begin{aligned} Q = & \sum_0^{K_1} (2K + 3) e^{-\frac{(\varepsilon_{F_1} + \varepsilon_r)hc}{kT}} + \sum_0^{K_1} (2K + 1) e^{-\frac{(\varepsilon_{F_2} + \varepsilon_r)hc}{kT}} + \\ & + \sum_0^{K_1} (2K - 1) e^{-\frac{(\varepsilon_{F_3} + \varepsilon_r)hc}{kT}} + \sum_{K_1}^{\infty} (2K + 3) e^{-\frac{(\varepsilon_{F_1} + \varepsilon_r)hc}{kT}} + \sum_{K_1}^{\infty} (2K + 1) e^{-\frac{(\varepsilon_{F_2} + \varepsilon_r)hc}{kT}} + \\ & + \sum_{K_1}^{\infty} (2K - 1) e^{-\frac{(\varepsilon_{F_3} + \varepsilon_r)hc}{kT}}. \end{aligned} \quad (361)$$

Подставив в последние члены этого уравнения соответствующее значение энергии из уравнений (359) и (360), запишем их в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sum_K (2K + 3) e^{-\frac{(\varepsilon_0 - \lambda + \mu)hc}{kT}} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} e^{-\mu K \frac{hc}{kT}} + \sum_K (2K + 1) e^{-\frac{(\varepsilon_0 + \varepsilon_r)hc}{kT}} + \\ + \sum_K (2K - 1) e^{-\frac{(\varepsilon_0 - \lambda + \mu)hc}{kT}} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} e^{\mu K \frac{hc}{kT}}. \end{aligned}$$

Учитывая, что величина $\mu K \frac{hc}{kT}$ очень мала, разложим в ряде $e^{-\mu K \frac{hc}{kT}}$ и $e^{\mu K \frac{hc}{kT}}$, ограничившись первым членом ряда:

$$e^{-\mu K \frac{hc}{kT}} = 1 - \mu K \frac{hc}{kT};$$

$$e^{\mu (K+1) \frac{hc}{kT}} = 1 + \frac{hc}{kT} \mu (K + 1).$$

Подставив найденные значения в первый и последний члены суммы

$$\begin{aligned} \sum_{K_1}^{\infty} (2K + 1) e^{-\frac{(\varepsilon_0 + \varepsilon_r)hc}{kT}} + \sum_{K_1}^{\infty} e^{-\frac{(\varepsilon_0 - \lambda + \mu + \varepsilon_r)hc}{kT}} \left\{ (2K + 3) \left(1 - \mu K \frac{hc}{kT} \right) + \right. \\ \left. + (2K - 1) \left[1 + \frac{hc}{kT} \mu (K + 1) \right] \right\}, \end{aligned}$$

после преобразования получим

$$\sum_{K_1}^{\infty} (2K + 1) e^{-\frac{(\varepsilon_0 + \varepsilon_r)hc}{kT}} + e^{-\frac{(\varepsilon_0 - \lambda + \mu)hc}{kT}} \sum_{K_1}^{\infty} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} \left[2(2K + 1) \left(1 - \frac{hc}{kT} \cdot \frac{\mu}{2} \right) \right],$$

или в другом виде

$$\sum_{K_1}^{\infty} (2K+1) e^{-\left(\varepsilon_0 + \varepsilon_r\right) \frac{hc}{kT}} + 2e^{-\left(\varepsilon_0 - \lambda + \frac{3}{2}\mu\right) \frac{hc}{kT}} \sum_{K_1}^{\infty} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}}.$$

Будем отсчитывать электронную энергию от низшего уровня, равного

$$\varepsilon_0 = -2\lambda - \mu + 2B. \quad (362)$$

Тогда уравнение для определения суммы состояний запишется в виде

$$\begin{aligned} Q = & \sum_0^{K_1} (2K+3) e^{-\left(\varepsilon_{F_3} - \varepsilon_0\right) \frac{hc}{kT}} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \sum_0^{K_1} (2K+1) e^{-\left(\varepsilon_{F_2} - \varepsilon_0\right) \frac{hc}{kT}} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \\ & + \sum_0^{K_1} (2K-1) e^{-\left(\varepsilon_{F_1} - \varepsilon_0\right) \frac{hc}{kT}} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \left[e^{-\left(2\lambda + \mu - 2B\right) \frac{hc}{kT}} + 2e^{-\left(\lambda + \frac{5}{2}\mu - 2B\right) \frac{hc}{kT}} \right] \times \\ & \times \sum_{K_1}^{\infty} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}}, \end{aligned} \quad (363)$$

или

$$\begin{aligned} Q = & \sum_0^{K_1} (2K+3) e^{-\left(\varepsilon_{F_1} - \varepsilon_0\right) \frac{hc}{kT}} e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \sum_0^{K_1} (2K+1) \left[e^{-\left(\varepsilon_{F_2} - \varepsilon_0\right) \frac{hc}{kT}} - \right. \\ & - e^{-\left(2\lambda + \mu - 2B\right) \frac{hc}{kT}} - 2e^{-\left(\lambda + \frac{5}{2}\mu - 2B\right) \frac{hc}{kT}} \left. \right] e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}} + \sum_0^{K_1} (2K-1) e^{-\left(\varepsilon_{F_3} - \varepsilon_0\right) \frac{hc}{kT}} + \\ & + \left[e^{-\left[2\lambda + \mu - 2B\right] \frac{hc}{kT}} + 2e^{-\left(\lambda + \frac{5}{2}\mu - 2B\right) \frac{hc}{kT}} \right] \sum_{K_1}^{\infty} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}}. \end{aligned} \quad (364)$$

Если принять $K_1 = 1$, то $\varepsilon_r = 2B$, и сумма состояний определится более простым уравнением

$$Q = 5e^{-\frac{a_1}{T}} + 1 - 6e^{-\frac{a_2}{T}} + \frac{1}{2} \left(e^{-\left(2\lambda + \mu - 2B\right) \frac{hc}{kT}} + 2e^{-\left(\lambda + \frac{5}{2}\mu - 2B\right) \frac{hc}{kT}} \right) \cdot Q_r, \quad (365)$$

где

$$a_1 = \frac{hc}{k} \left[3B - (25B^2 + \lambda^2 - 2\lambda B)^{\frac{1}{2}} + \lambda + 3\mu \right]; \quad (366)$$

$$a_2 = \frac{hc}{k} \left(\lambda + 5\frac{\mu}{2} - B \right); \quad (367)$$

Q_r — вращательная сумма состояний:

$$Q_r = \sum_{K=1, 2, 3, \dots} (2K+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}}; \quad (368)$$

множитель $1/2$ учитывает, что в уравнение входит вращательная сумма состояний, суммированная только по нечетным уровням, а Q_r в соответствии с обозначением, употребляемым выше, представляет собой сумму состояний по всем четным и нечетным уровням вращения.

Последнее уравнение можно еще упростить, если воспользоваться разложением числа e^{-x} в ряд:

$$f_e = 5e^{-\frac{a_1}{T}} + 1 - 6e^{-\frac{a_2}{T}} = 5\left(1 - \frac{a_1}{T} + \frac{a_1^2}{2T^2}\right) + 1 - 6\left[1 - \frac{a_2}{T} + \frac{a_2^2}{2T^2} - \dots\right] = \frac{6a_2 - 5a_1}{T} - \frac{6a_2^2 - 5a_1^2}{2T^2} + \dots; \quad (369)$$

$$f_e = \frac{\lambda - 21B + 5\sqrt{25B^2 + \lambda^2 - 2\lambda B}}{kT} - \frac{6\left(\lambda + \frac{5\mu}{2} - 2B\right)^2 - 5\left[3B - (25B^2 + \lambda^2 - 2\lambda B)^{\frac{1}{2}} + \lambda + 3\mu\right]^2}{k^2T^2} + \dots, \quad (370)$$

$$e^{-(2\lambda + \mu - 2B)\frac{hc}{kT}} + 2e^{-\left(\lambda + \frac{5}{2}\mu - 2B\right)\frac{hc}{kT}} = 3e^{-\left(4\frac{\lambda}{3} + 2\mu - 2B\right)\frac{hc}{kT}} \left[1 + \frac{1}{9}\left(\frac{hc}{kT}\right)^2 \times \left(\lambda - \frac{3}{2}\mu\right)^2 - \frac{1}{81}\left(\frac{hc}{kT}\right)^3\left(\lambda - \frac{3}{2}\mu\right)^3 + \dots\right]. \quad (371)$$

После указанных преобразований уравнение для определения суммы состояний примет вид

$$Q = e^{-\left(\frac{4}{3}\lambda + 2\mu - 2B\right)\frac{hc}{kT}} \cdot \frac{3}{2} \left\{ \frac{2}{3} f_e \left[1 + \left(\frac{hc}{kT}\right) \left(\frac{4}{3}\lambda + 2\mu - 2B\right) + \dots\right] + Q_r \left[1 + \frac{1}{9}\left(\frac{hc}{kT}\right)^2 \left(\lambda - \frac{3}{2}\mu\right)^2 - \frac{1}{81}\left(\frac{hc}{kT}\right)^3 \left(\lambda - \frac{3}{2}\mu\right)^3 + \dots\right] \right\}; \quad (372)$$

следовательно, сумма состояний движения молекулы может быть выражена уравнением общего типа

$$Q_1 = p_1 e^{-\varepsilon_1 \frac{hc}{kT}} Q_{er} Q_v, \quad (373)$$

где $p_1 = \frac{3}{2}$ — статистический вес;
 ε_1 — электронная энергия молекулы,

$$\varepsilon_1 = \frac{4}{3}\lambda + 2\mu - 2B; \quad (374)$$

Q_{er} — сумма состояний электронно-вращательного движения, определяемая уравнением

$$Q_{er} = \frac{2}{3} f_e \left[1 + \frac{hc}{kT} \left(\frac{4}{3}\lambda + 2\mu - 2B\right) + \dots\right] + Q_r \left[1 + \frac{1}{9}\left(\frac{hc}{kT}\right)^2 \times \left(\lambda - \frac{3}{2}\mu\right)^2 - \frac{1}{81}\left(\frac{hc}{kT}\right)^3 \left(\lambda - \frac{3}{2}\mu\right)^3 + \dots\right]. \quad (375)$$

Таблица 21

Функции:

$$F(\mu) = \frac{1}{2} e^{-\mu^2} \int_0^{\mu^2} e^E \frac{dE}{\sqrt{E}};$$

$$\psi(\mu) = 2\mu F(\mu) - 1;$$

$$\xi(\mu) = \left(\frac{1}{2} + \mu^2 \right) \psi(\mu) - \frac{1}{2};$$

$$\varphi(\mu) = \psi(\mu) \cdot \left(\mu^2 + \frac{1}{4} - \mu^4 \right) + \frac{\mu^2}{2} + \frac{1}{4}.$$

μ	$F(\mu)$	$\psi(\mu)$	$\xi(\mu)$	$\varphi(\mu)$
0,00	0,000000	-1,000000	-1,000000	0,000000
0,01	0,009999	-0,9998000	-1,000000	0,000000
0,02	0,019995	-0,9992002	-1,000000	0,000000
0,03	0,029981	-0,9982011	-0,999999	0,009002
0,04	0,039957	-0,9968034	-0,999996	0,000007
0,05	0,049917	-0,9950083	-0,999992	0,000017
0,06	0,059857	-0,9928172	-0,999983	0,000035
0,07	0,069771	-0,9902321	-0,999968	0,000064
0,08	0,079660	-0,9872544	-0,999945	0,000109
0,09	0,089516	-0,9838871	-0,999913	0,000173
0,10	0,099336	-0,9801338	-0,999868	0,000263
0,11	0,109117	-0,9759943	-0,999807	0,000385
0,12	0,118854	-0,9714750	-0,999727	0,000543
0,13	0,128545	-0,9665783	-0,999624	0,000747
0,14	0,138185	-0,9613082	-0,999496	0,001001
0,15	0,147769	-0,9556693	-0,999337	0,001314
0,16	0,157297	-0,9496650	-0,999144	0,001694
0,17	0,166762	-0,9433009	-0,998912	0,002151
0,18	0,176162	-0,9365817	-0,998636	0,002693
0,19	0,185492	-0,9295130	-0,998312	0,003327
0,20	0,194751	-0,9221000	-0,997934	0,004066
0,21	0,203933	-0,9143481	-0,997497	0,004919
0,22	0,213037	-0,9062637	-0,996965	0,005894
0,23	0,222058	-0,8978533	-0,996423	0,007003
0,24	0,230993	-0,8891234	-0,995775	0,008256
0,25	0,239839	-0,8800805	-0,995045	0,009663
0,26	0,248593	-0,3707316	-0,994227	0,011235
0,27	0,257253	-0,8610834	-0,993314	0,012952
0,28	0,265814	-0,851144	-0,992302	0,014916
0,29	0,274275	-0,840920	-0,991181	0,017046
0,30	0,282631	-0,830421	-0,989948	0,019383
0,31	0,290882	-0,819653	-0,988595	0,021938
0,32	0,299023	-0,808625	-0,987116	0,024720
0,33	0,307054	-0,797344	-0,985503	0,027739
0,34	0,314970	-0,785820	-0,983751	0,0310053
0,35	0,322770	-0,774061	-0,981853	0,0345280
0,36	0,330451	-0,762075	-0,979802	0,0383162
0,37	0,338010	-0,749873	-0,977594	0,0423781
0,38	0,345447	-0,737460	-0,975219	0,0467227
0,39	0,352759	-0,724848	-0,972673	0,0513576
0,40	0,359943	-0,712046	-0,969950	0,0562897
0,41	0,366999	-0,699061	-0,967043	0,0615265
0,42	0,373924	-0,685904	-0,963945	0,0690738
0,43	0,380717	-0,672583	-0,960652	0,0729378
0,44	0,387375	-0,659110	-0,957159	0,0791229
0,45	0,393893	-0,645491	-0,953457	0,0856345
0,46	0,400285	-0,631738	-0,949545	0,0924756
0,47	0,406533	-0,617859	-0,945415	0,0997498
0,48	0,412641	-0,603865	-0,941063	0,1071591
0,49	0,418609	-0,589763	-0,936484	0,1150057
0,50	0,424436	-0,575564	-0,931673	0,1231907

Продолжение табл. 21

μ	$F(\mu)$	$\psi(\mu)$	$\xi(\mu)$	$\varphi(\mu)$
0,51	0,430120	-0,561278	-0,926627	0,1317139
0,52	0,435662	-0,546911	-0,921341	0,1405753
0,53	0,441059	-0,532477	-0,915811	0,149773
0,54	0,446311	-0,517984	-0,910036	0,159305
0,55	0,451418	-0,503440	-0,904011	0,169167
0,56	0,456380	-0,488854	-0,897732	0,179358
0,57	0,461195	-0,474238	-0,891199	0,189871
0,58	0,465864	-0,459598	-0,884408	0,200702
0,59	0,470386	-0,444944	-0,877358	0,211845
0,60	0,474763	-0,430284	-0,870044	0,223292
0,61	0,478993	-0,415629	-0,862470	0,235034
0,62	0,483076	-0,400986	-0,854632	0,247065
0,63	0,487013	-0,386364	-0,846530	0,249476
0,64	0,490 03	-0,371772	-0,838164	0,271952
0,65	0,494448	-0,357218	-0,829534	0,284786
0,66	0,497947	-0,342710	-0,820639	0,297866
0,67	0,501303	-0,328254	-0,811480	0,311180
0,68	0,504513	-0,313862	-0,802061	0,324713
0,69	0,507580	-0,29954 0	-0,792381	0,338451
0,70	0,510503	-0,285229	-0,782443	0,352380
0,71	0,513286	-0,271134	-0,772246	0,366488
0,72	0,515926	-0,257067	-0,761797	0,380754
0,73	0,518428	-0,242951	-0,751093	0,395166
0,74	0,520789	-0,229233	-0,740144	0,409703
0,75	0,523013	-0,215481	-0,728948	0,424352
0,76	0,525100	-0,201848	-0,717511	0,439092
0,77	0,527050	-0,188343	-0,705840	0,453904
0,78	0,528866	-0,184969	-0,693936	0,468772
0,79	0,530549	-0,161733	-0,681804	0,483674
0,80	0,532101	-0,148638	-0,669448	0,498594
0,81	0,533523	-0,135693	-0,65693	0,513510
0,82	0,534816	-0,122902	-0,644090	0,528402
0,83	0,535981	-0,110272	-0,631102	0,543249
0,84	0,537021	-0,097805	-0,617913	0,558032
0,85	0,537937	-0,085507	-0,604532	0,572730
0,86	0,538732	-0,073381	-0,590963	0,587322
0,87	0,539406	-0,061434	-0,577216	0,601788
0,88	0,539960	-0,049765	-0,563421	0,616064
0,89	0,540399	-0,038090	-0,549216	0,630255
0,90	0,540724	-0,026700	-0,534973	0,644217
0,91	0,540934	-0,015500	-0,520586	0,657968
0,92	0,541034	-0,004497	-0,506055	0,671491
0,93	0,541025	0,006307	-0,491392	0,684764
0,94	0,540910	0,016911	-0,476602	0,697767
0,95	0,540688	0,027307	-0,461702	0,710480
0,96	0,540363	0,037497	-0,446694	0,722884
0,97	0,539938	0,047430	-0,431586	0,734960
0,98	0,539414	0,057251	-0,416390	0,746690
0,99	0,538793	0,066810	-0,401114	0,758056
1,00	0,538180	0,076160	-0,385760	0,769040
1,01	0,537272	0,085289	-0,370352	0,779624
1,02	0,536375	0,094205	-0,354887	0,789792
1,03	0,535388	0,102899	-0,339885	0,799526
1,04	0,534317	0,111379	-0,323843	0,808815
1,05	0,533162	0,119640	-0,308277	0,817640
1,06	0,531925	0,127681	-0,292697	0,825988
1,07	0,530609	0,135503	-0,277111	0,833846

Продолжение табл. 21

μ	$F(\mu)$	$\psi(\mu)$	$\xi(\mu)$	$\varphi(\mu)$
1,08	0,529216	0,143106	-0,261526	0,841201
1,09	0,527748	0,150491	-0,245956	0,848041
1,10	0,526207	0,157655	-0,230410	0,854354
1,11	0,524595	0,164601	-0,214895	0,860129
1,12	0,522915	0,171330	-0,199419	0,865358
1,13	0,521169	0,177842	-0,183993	0,870030
1,14	0,519359	0,184139	-0,168623	0,874138
1,15	0,517487	0,190220	-0,153324	0,877675
1,16	0,515555	0,196088	-0,1381007	0,880634
1,17	0,513566	0,201744	-0,1229599	0,883008
1,18	0,511521	0,207190	-0,1079145	0,884794
1,19	0,509423	0,212427	-0,0929691	0,885992
1,20	0,507273	0,217455	-0,0781369	0,886584
1,21	0,505075	0,222281	-0,0634169	0,886582
1,22	0,502829	0,226903	-0,0488265	0,885982
1,23	0,500537	0,231321	-0,0343740	0,884783
1,24	0,498202	0,235541	-0,02006173	0,882984
1,25	0,495827	0,239568	-0,00589207	0,880585
1,26	0,493412	0,243393	+0,0081181	0,877590
1,27	0,490960	0,247038	0,0219674	0,874001
1,28	0,488472	0,250488	0,0356442	0,869823
1,29	0,485950	0,253751	0,0491425	0,865060
1,30	0,483397	0,256832	0,0624625	0,859716
1,31	0,480814	0,259733	0,0755936	0,853798
1,32	0,478203	0,262456	0,0885312	0,847311
1,33	0,475566	0,265006	0,1012711	0,840264
1,34	0,472904	0,267383	0,1138038	0,832668
1,35	0,470219	0,269591	0,1261258	0,824529
1,36	0,467513	0,271635	0,1382344	0,815856
1,37	0,464787	0,273516	0,1501211	0,806661
1,38	0,462043	0,275239	0,161785	0,796955
1,39	0,459283	0,276807	0,173222	0,786747
1,40	0,456507	0,278220	0,184421	0,776056
1,41	0,453718	0,279485	0,195387	0,765454
1,42	0,450918	0,280607	0,206119	0,753256
1,43	0,448107	0,281586	0,216608	0,741176
1,44	0,445285	0,282424	0,226846	0,728668
1,45	0,442458	0,283128	0,236841	0,715738
1,46	0,439624	0,283703	0,246590	0,702402
1,47	0,436785	0,284148	0,256089	0,688676
1,48	0,433942	0,284468	0,265333	0,674581
1,49	0,431096	0,284666	0,274320	0,660130
1,50	0,428249	0,284747	0,283054	0,645336
1,51	0,425401	0,284711	0,291525	0,630225
1,52	0,422555	0,284567	0,299747	0,614801
1,53	0,419710	0,284313	0,307705	0,599095
1,54	0,416869	0,283957	0,315408	0,583111
1,55	0,414032	0,283499	0,322856	0,566872
1,56	0,411199	0,282941	0,330036	0,550408
1,57	0,408373	0,282291	0,336965	0,533718
1,58	0,405554	0,281551	0,343639	0,516823
1,59	0,402742	0,280720	0,350048	0,499755
1,60	0,399940	0,279808	0,356213	0,482511
1,61	0,397146	0,278810	0,362108	0,465136
1,62	0,394364	0,277739	0,367768	0,447613
1,63	0,391592	0,276590	0,373167	0,429988
1,64	0,388832	0,275369	0,378317	0,412270

Продолжение табл. 21

μ	$F(\mu)$	$\psi(\mu)$	$\xi(\mu)$	$\varphi(\mu)$
1,65	0,386085	0,274081	0,383226	0,394466
1,66	0,383351	0,272725	0,387884	0,376611
1,67	0,380630	0,271304	0,392210	0,358492
1,68	0,377925	0,269825	0,396467	0,340900
1,69	0,375234	0,268291	0,400411	0,322857
1,70	0,372559	0,266701	0,404116	0,304928
1,71	0,369900	0,265058	0,407585	0,287029
1,72	0,367258	0,263368	0,410832	0,269159
1,73	0,364633	0,261631	0,413851	0,251347
1,74	0,362026	0,259850	0,416647	0,233605
1,75	0,359436	0,258026	0,419218	0,215456
1,76	0,356865	0,256165	0,421579	0,198403
1,77	0,354313	0,254268	0,423730	0,180957
1,78	0,351780	0,252337	0,425673	0,163639
1,79	0,349266	0,250372	0,427403	0,1464767
1,80	0,346773	0,248383	0,428952	0,1294313
1,81	0,344299	0,246362	0,430288	0,1125853
1,82	0,341846	0,244319	0,431442	0,0958955
1,83	0,339413	0,242252	0,432404	0,0794028
1,84	0,337001	0,240164	0,433181	0,0631115
1,85	0,334609	0,238053	0,433763	0,0470643
1,86	0,332239	0,235929	0,434185	0,0312076
1,87	0,329891	0,233792	0,434443	0,0155643
1,88	0,327563	0,231637	0,434516	0,0002015
1,89	0,325258	0,229475	0,434445	-0,0123963
1,90	0,322974	0,227301	0,434207	-0,0298275
1,91	0,320712	0,225120	0,433820	-0,0443550
1,92	0,318471	0,222929	0,433270	-0,0587660
1,93	0,316253	0,220736	0,432858	-0,0728099
1,94	0,314057	0,218541	0,431771	-0,0866283
1,95	0,311883	0,216344	0,430820	-0,1001352
1,96	0,309730	0,214141	0,429715	-0,1132901
1,97	0,307600	0,211944	0,428506	-0,1262007
1,98	0,305491	0,209744	0,427152	-0,1387516
1,99	0,303405	0,207552	0,425703	-0,1510472
2,00	0,30134039	0,20536156	0,42412702	-0,16299833
2,01	0,29929770	0,20317675	0,42244276	-0,17463523
2,02	0,29727683	0,20099839	0,42065303	-0,18595227
2,03	0,29527771	0,19882750	0,41876200	-0,19694706
2,04	0,29330025	0,19666502	0,41677366	-0,20761728
2,05	0,29134438	0,19451196	0,41469249	-0,21796243
2,06	0,28940998	0,19236912	0,41252216	-0,22798036
2,07	0,28749696	0,19023741	0,41026698	-0,23767122
2,08	0,28560519	0,18811759	0,40793074	-0,24703424
2,09	0,28373456	0,18601046	0,40551752	-0,25607003
2,10	0,28188494	0,18391675	0,40303124	-0,26477929
2,11	0,28005618	0,18183708	0,40047540	-0,27316198
2,12	0,27824815	0,17977216	0,39785408	-0,28122033
2,13	0,27646069	0,17772254	0,39517066	-0,28895505
2,14	0,27469364	0,17568878	0,39242873	-0,29636790
2,15	0,27294686	0,17367150	0,38963226	-0,30346247
2,16	0,27122016	0,17167109	0,38678418	-0,31023956
2,17	0,26951338	0,16968807	0,38388819	-0,31670184
2,18	0,26782634	0,16772284	0,38094745	-0,32285490
2,19	0,26615886	0,16577581	0,37796527	-0,32869922
2,20	0,26451076	0,16384734	0,37494480	-0,33423929
2,21	0,26288185	0,16193778	0,37188920	-0,33947895

Продолжение табл. 21

μ	$F(\mu)$	$\psi(\mu)$	$\xi(\mu)$	$\varphi(\mu)$
2,22	0,26127194	0 16004741	0,36880136	-0,34442230
2,23	0,25968084	0,15817655	0,36568444	-0,34907377
2,24	0,25810834	0,15632536	0,36254081	-0,35343623
2,25	0,25655426	0,15449417	0,35937382	-0,35751631
2,26	0,25501839	0,15238312	0,35618586	-0,36131769
2,27	0,25350053	0,15089241	0,35297970	-0,36482577
2,28	0,25200048	0,14912219	0,34975789	-0,36795655
2,29	0,25051802	0,14737253	0,34652255	-0,37110134
2,30	0,24905296	0,14564362	0,34327656	-0,373 3997
2,31	0,24760508	0,14393545	0,34002168	-0,37632489
2,32	0,24617418	0,14224819	0,33676075	-0,37856405
2,33	0 24476005	0,14058183	0,33349561	-0,38056132
2,34	0,24336247	0,13893636	0,33022811	-0,38232307
2,35	0,24198125	0,13731188	0,32696079	-0,38385574
2,36	0,24061616	0,13570828	0,32369498	-0,38516322
2,37	0,23926701	0,13412563	0,32043307	-0,38625370
2,38	0,23793358	0 13256384	0,31717653	-0,38713189
2,39	0,23661567	0,13102290	0,31392736	-0,38783487
2,40	0,23531306	0 12950269	0,31068684	-0,38722728
2,41	0,23402554	0,12300310	0,3 1745635	-0,38355427
2,42	0,23275292	0 12652413	0,30423798	-0,38964440
2,43	0,23149439	0,12506565	0,31103298	-0,38855300
2,44	0,23025154	0,12362752	0 29784256	-0,38704913
2,45	0,22902237	0,12220961	0,29466799	-0,38734742
2,46	0,22780728	0,12081182	0,29151072	-0,38724611
2,47	0,22660607	0,11943338	0,28837176	-0,38649661
2,48	0,22541854	0,11807596	0,28525236	-0,38557558
2,49	0,22424449	0,11673756	0,28215333	-0,38451762
2,50	0,22308372	0,11541860	0,27907555	-0,38331816
2,51	0,22193605	0,11411897	0,27602041	-0,38198504
2,52	0,22080128	0,11283845	0,27298852	-0,38052274
2,53	0,21967922	0,11157685	0,26990684	-0,37893676
2,54	0,21856963	0,11033397	0,26699763	-0,37723243
2,55	0,21747248	0,10910965	0,27404032	-0 37541654
2,56	0,21638743	0,10790364	0,26110911	-0,37349285
2,57	0,21531434	0,10671571	0,25820445	-0,37146574
2,58	0,21425305	0,10554574	0,25532753	-0,36934377
2,59	0,21320337	0,10439346	0,25247850	-0,36713 000
2,60	0,21 216512	0,10325862	0,24965758	-0,36482819
2,61	0,21113814	0,10214109	0,24686586	-0,36244670
2,62	0,21012225	0,10104059	0,24410332	-0,35998815
2,63	0,20911727	0,099956840	0,24136989	-0,35745496
2,64	0,20812305	0,098889704	0,23866653	-0,35485532
2,65	0,20713942	0, 97838926	0,23599332	-0,35219257
2,66	0,20616622	0,096804290	0,23335058	-0,34947164
2,67	0,20520328	0,095785515	0,22978026	-0,35069953
2,68	0,20425046	0,094782466	0,22815682	-0,343 6953
2,69	0,20330758	0,093794727	0,22560539	-0,34099243
2,70	0,20237451	0,092822354	0,22308614	-0,33810869
2,71	0,20145109	0,091864908	0,22059752	-0,33512645
2,72	0,20053716	0,090922150	0,21813951	-0,32911641
2,73	0,19963260	0,0899933996	0,21571325	-0,33213516
2,74	0,19873724	0,089080075	0 21331761	-0,32606691
2,75	0,19785095	0,088180225	0,21095336	-0,32299306
2,76	0,19697359	0,087294217	0,20861872	-0,31989798
2,77	0,19610502	0,086421811	0,20631682	-0,31678400
2,78	0,19524511	0,085562812	0,20404504	-0,31365555

Продолжение табл. 21

μ	$F(\mu)$	$\psi(\mu)$	$\xi(\mu)$	$\varphi(\mu)$
2,79	0,19439372	0,084716958	0,20179547	-0,31051343
2,80	0,19355072	0,083884032	0,19959263	-0,30736054
2,81	0,19271599	0,083063864	0,19741251	-0,30421208
2,82	0,19188940	0,082256216	0,19526244	-0,30103948
2,83	0,19107083	0,081460898	0,19314264	-0,29787654
2,84	0,19026015	0,080677652	0,19105250	-0,29471310
2,85	0,18945724	0,079906268	0,18899180	-0,29155130
2,86	0,18866198	0,079146526	0,18696019	-0,28839253
2,87	0,18787427	0,078398310	0,18495819	-0,28524402
2,88	0,18709398	0,077661325	0,18298476	-0,28205230
2,89	0,18632100	0,076935380	0,18103968	-0,27896966
2,90	0,18555523	0,076220334	0,17912318	-0,27585131
2,91	0,18479656	0,075515979	0,17723485	-0,27274816
2,92	0,18404488	0,074822099	0,17537419	-0,26966029
2,93	0,18330009	0,074138527	0,17354110	-0,26659663
2,94	0,18256208	0,073465030	0,17173485	-0,26353758
2,95	0,18183075	0,072801425	0,16995511	-0,26050248
2,96	0,18110602	0,072147638	0,16820256	-0,25749356
2,97	0,18038777	0,071503354	0,16647476	-0,25450299
2,98	0,17967592	0,070868483	0,16477472	-0,25153757
2,99	0,17897037	0,070242813	0,16309918	-0,24859561
3,00	0,17827103	0,069626180	0,16144871	-0,24567842
3,01	0,17757781	0,069018416	0,15982296	-0,24278676
3,02	0,17689063	0,068419405	0,15822204	-0,24492497
3,03	0,17620940	0,067828964	0,15664542	-0,23709227
3,04	0,17553403	0,067246902	0,15509242	-0,23428694
3,05	0,17486443	0,066673023	0,15356231	-0,23150642
3,06	0,17420054	0,066107305	0,15205601	-0,22876132
3,07	0,17354226	0,065549476	0,15057199	-0,22604274
3,08	0,17288952	0,064999443	0,149110438	-0,22335532
3,09	0,17224225	0,064457105	0,147671437	-0,22070304
3,10	0,17160036	0,063922232	0,146253766	-0,21807915
3,11	0,17096378	0,063394712	0,144857350	-0,21548610
3,12	0,17033244	0,062874426	0,143482025	-0,21292560
3,13	0,16970627	0,062361250	0,142127555	-0,21039864
3,14	0,16908519	0,061854993	0,140792985	-0,20790056
3,15	0,16846914	0,061355582	0,139478553	-0,20543590
3,16	0,16785806	0,060862939	0,138184433	-0,20300930
3,17	0,16725186	0,060376792	0,136908741	-0,20060753
3,18	0,16665050	0,059897180	0,135652833	-0,19824505
3,19	0,16605390	0,059423882	0,134415307	-0,19591258
3,20	0,16546200	0,058956800	0,133196032	-0,19361172
3,21	0,16487474	0,058495831	0,131994808	-0,19134340
3,22	0,16429206	0,058040866	0,130811348	-0,18910779
3,23	0,16371390	0,057591794	0,129645325	-0,18690462
3,24	0,16314021	0,057148561	0,128497014	-0,18473902
3,25	0,16257091	0,056710915	0,127364497	-0,18259620
3,26	0,16200597	0,056277924	0,126249355	-0,18049309
3,27	0,16144532	0,055852393	0,125150250	-0,17841990
3,28	0,16088890	0,055431184	0,124066442	-0,17637236
3,29	0,16033668	0,055015354	0,122999370	-0,17436612
3,30	0,15978858	0,054604128	0,121946713	-0,17238195
3,31	0,15924457	0,054199053	0,120909770	-0,17043440
3,32	0,15870458	0,053798411	0,119886811	-0,16850939
3,33	0,15816858	0,053402743	0,118879048	-0,16662067
3,34	0,15763651	0,053011887	0,117885350	-0,16475974
3,35	0,15710833	0,052625811	0,116906069	-0,16293215

Продолжение табл. 21

μ	$F(\mu)$	$\psi(\mu)$	$\xi(\mu)$	$\varphi(\mu)$
3,36	0,15658398	0,052244346	0,115939937	-0,16112782
3,37	0,15606343	0,051867518	0,114987976	-0,15935874
3,38	0,15554662	0,051495161	0,114048900	-0,15761444
3,39	0,15503351	0,051127198	0,113122469	-0,15589462
3,40	0,15452406	0,050763608	0,112209112	-0,15420548
3,41	0,15001822	0,050404260	0,111307910	-0,15253975
3,42	0,15351596	0,050049165	0,110419653	-0,15090749
3,43	0,15301722	0,049698129	0,109542585	-0,149292718
3,44	0,15252198	0,049351222	0,108678236	-0,147712988
3,45	0,15203019	0,049008311	0,107825577	-0,146159710
3,46	0,15154180	0,048669256	0,106983493	-0,144622947
3,47	0,15105679	0,048334123	0,106153398	-0,143119478
3,48	0,15057511	0,048002766	0,105334075	-0,141638102
3,49	0,15009672	0,047675106	0,104525106	-0,140176197
3,50	0,14962159	0,047351130	0,103725907	-0,138739821
3,51	0,14914969	0,047030824	0,102939864	-0,137335064
3,52	0,14868097	0,046741029	0,102162517	-0,135947708
3,53	0,14821539	0,046400653	0,101394229	-0,133572279
3,54	0,14775294	0,046090815	0,100637067	-0,133233225
3,55	0,14729357	0,045784347	0,099889406	-0,131914298
3,56	0,14683724	0,045481149	0,099150462	-0,130608206
3,57	0,14638393	0,045181260	0,098421273	-0,129327975
3,58	0,14593361	0,044884649	0,097701921	-0,128076408
3,59	0,14548623	0,044591131	0,096990526	-0,125833468
3,60	0,14504177	0,044300744	0,096288014	-0,125611015
3,61	0,14460020	0,044013444	0,095594325	-0,124410026
3,62	0,14416149	0,043729188	0,094909360	-0,123230816
3,63	0,14372561	0,043447929	0,094232975	-0,122073067
3,64	0,14329252	0,043169546	0,093563984	-0,120924219
3,65	0,14286221	0,042894133	0,092904153	-0,119806409
3,66	0,14243463	0,042621492	0,092251199	-0,118694156
3,67	0,14200977	0,042351712	0,091606827	-0,117608832
3,68	0,14158759	0,042084662	0,090968663	-0,116535347
3,69	0,14116807	0,041820357	0,090340336	-0,115482781
3,70	0,14075117	0,041558658	0,089717357	-0,114433911
3,71	0,14033688	0,041299650	0,089102337	-0,113409811
3,72	0,13992517	0,041043265	0,088494751	-0,112475267
3,73	0,13951601	0,040789435	0,087894048	-0,111414726
3,74	0,13910937	0,040538088	0,087299604	-0,110431585
3,75	0,13870524	0,040289300	0,086712931	-0,109475839
3,76	0,13830358	0,040042922	0,086132275	-0,108526710
3,77	0,13790437	0,039798950	0,085557971	-0,107589394
3,78	0,13750759	0,039557380	0,084990358	-0,106669367
3,79	0,13711322	0,039318208	0,084429775	-0,105772187
3,80	0,13672122	0,039081272	0,083874204	-0,104872832
3,81	0,13633158	0,038846640	0,083325031	-0,103990246
3,82	0,13594428	0,038614299	0,082782446	-0,103128058
3,83	0,13555929	0,038384161	0,082245500	-0,102274835
3,84	0,13517659	0,038156211	0,081714433	-0,101433427
3,85	0,13479616	0,037930432	0,081189044	-0,100606249
3,86	0,13441797	0,037706728	0,080668528	-0,099779372
3,87	0,13404202	0,037485235	0,080155233	-0,098986999
3,88	0,13366826	0,037265698	0,079645573	-0,098180790
3,89	0,13329669	0,037048248	0,079141917	-0,097294643
3,90	0,13292729	0,036832862	0,078644262	-0,096629263
3,91	0,13256003	0,036619434	0,078151286	-0,095867477
3,92	0,13219490	0,036408016	0,077664145	-0,095126110

Продолжение табл. 21

μ	$F(\mu)$	$\psi(\mu)$	$\xi(\mu)$	$\varphi(\mu)$
3,93	0,13183187	0,036198498	0,077181431	-0,094386582
3,94	0,13147092	0,035990850	0,076702984	-0,093647394
3,95	0,13111204	0,035785116	0,076229830	-0,092923732
3,96	0,13075521	0,035581263	0,075761765	-0,092213663
3,97	0,13040041	0,035379255	0,075298528	-0,091511407
3,98	0,13004762	0,035179055	0,074839830	-0,090722625
3,99	0,12969682	0,034980624	0,074385344	-0,090134413
4,00	0,12934800	0,034784000	0,073936000	-0,089464000
4,05	0,12763291	0,033826571	0,071753616	-0,086221544
4,10	0,12596466	0,032910212	0,069675770	-0,083191140
4,15	0,12434125	0,032032375	0,067693766	-0,080331414
4,20	0,12276082	0,031190888	0,065802708	-0,077651156
4,25	0,12122159	0,030383515	0,063993997	-0,075092328
4,30	0,11972192	0,029603512	0,062265643	-0,072697528
4,35	0,11826023	0,028864001	0,060611059	-0,070428176
4,40	0,11683504	0,028148352	0,059026271	-0,068283371
4,45	0,11544494	0,027455516	0,057415613	-0,0664577019
4,50	0,11408861	0,026797490	0,056047917	-0,064297198
4,55	0,11276478	0,026159498	0,054646756	-0,062434081
4,60	0,11147227	0,025544884	0,053302187	-0,060693447
4,65	0,11020993	0,024952349	0,052008340	-0,059014005
4,70	0,10897668	0,024380792	0,050762091	-0,057381855
4,75	0,10777151	0,023829345	0,049564269	-0,055862084
4,80	0,10659343	0,023296928	0,048409685	-0,054393081
4,85	0,10544151	0,022782647	0,047296137	-0,052970507
4,90	0,10431487	0,022285726	0,046223144	-0,051625840
4,95	0,10321266	0,021805334	0,045187863	-0,050336488
5,00	0,102134075	0,021340750	0,044367625	-0,049114812
5,05	0,101078338	0,020891213	0,043223787	-0,047924629
5,10	0,100044714	0,020456083	0,042290755	-0,046774447
5,15	0,099032499	0,020034740	0,041388754	-0,045667530
5,20	0,098041020	0,019626608	0,040516784	-0,0446611975
5,25	0,097069629	0,019231105	0,039672870	-0,043589799
5,30	0,096117708	0,018847705	0,038855880	-0,042601708
5,35	0,095184665	0,018475916	0,038064849	-0,041651898
5,40	0,094239931	0,018115255	0,037298457	-0,040732958
5,45	0,093372961	0,017765275	0,036555715	-0,039845261
5,50	0,092493232	0,017425552	0,035835724	-0,038989841
5,55	0,091630242	0,017095686	0,035137717	-0,038170868
5,60	0,090783507	0,016775278	0,034460370	-0,037374282
5,65	0,089952563	0,016463962	0,033802805	-0,036597869
5,70	0,089136935	0,016161401	0,033164619	-0,035852243
5,75	0,088336283	0,015867255	0,032541720	-0,035126701
5,80	0,087550104	0,015581206	0,031942387	-0,034418905
5,85	0,086778032	0,015302974	0,031357529	-0,033748274
5,90	0,086019682	0,015032248	0,030788663	-0,033086480
5,95	0,085274686	0,0147687634	0,030235528	-0,032444424
6,00	0,084542689	0,0145122680	0,029697782	-0,031829613
6,05	0,083823347	0,0142624987	0,029174358	-0,031224205
6,10	0,083116331	0,0140192382	0,028665473	-0,030653643
6,15	0,082421320	0,0137822360	0,028169739	-0,030086519
6,20	0,081738007	0,0135512868	0,027687108	-0,029537413
6,25	0,081066094	0,0133261750	0,027216798	-0,028994129
6,30	0,080405295	0,0131067170	0,026758956	-0,028477897
6,35	0,079755332	0,0128927164	0,026312915	-0,027979558
6,40	0,079115936	0,0126839808	0,025877844	-0,027481713
6,45	0,078486849	0,0124803521	0,025454924	-0,027010232

Продолжение табл. 21

μ	$F(\mu)$	$\psi(\mu)$	$\xi(\mu)$	$\zeta(\mu)$
6,50	0,077867819	0,0122816470	0,025040409	-0,026537500
6,55	0,077258604	0,0120877124	0,024636937	-0,026074704
6,60	0,076658970	0,0118984040	0,024244121	-0,025657049
6,65	0,076068689	0,0117135637	0,023859853	-0,025209377
6,70	0,075487541	0,0115330494	0,023485112	-0,024785546
6,75	0,074915314	0,0113567390	0,023119790	-0,024394167
6,80	0,074351800	0,0111844800	0,022762595	-0,023990749
6,85	0,073796800	0,0110161600	0,022413848	-0,023601114
6,90	0,073250120	0,0108516560	0,022073170	-0,023219704
6,95	0,072711573	0,0106908647	0,021740925	-0,022875092
7,00	0,072180975	0,0105336500	0,021415675	-0,022511388
7,05	0,071658150	0,0103799150	0,021097683	-0,022151051
7,10	0,071142997	0,0102295134	0,020787073	-0,021810507
7,15	0,070635139	0,0100824877	0,020483221	-0,021469930
7,20	0,070134625	0,0099386000	0,020186324	-0,021148850
7,25	0,069641228	0,0097978060	0,019896081	-0,020925694
7,30	0,069154795	0,0096600070	0,019611777	-0,020523910
7,35	0,068675179	0,0095251313	0,019333971	-0,020231109
7,40	0,068202235	0,0093930780	0,019061490	-0,019911511
7,45	0,067735825	0,0092637925	0,018795540	-0,019638052
7,50	0,067275812	0,0091371800	0,018534965	-0,019357924
7,60	0,066374453	0,0088916856	0,018029603	-0,018791311
7,70	0,065497146	0,0086560484	0,017545134	-0,018261309
7,80	0,064642932	0,0084297392	0,017080203	-0,017754088
7,90	0,063810903	0,0082122674	0,016633742	-0,017267367
8,00	0,063000199	0,0080031840	0,016205368	-0,016837092
8,10	0,062210002	0,0078020324	0,015792362	-0,016349342
8,20	0,061439539	0,0076084396	0,015395699	-0,015917439
8,30	0,060688074	0,0074220284	0,015014551	-0,015541584
8,40	0,059954907	0,0072424376	0,0146476158	-0,015185570
8,50	0,059239372	0,0070693240	0,0142933210	-0,0147871227
8,60	0,058540837	0,0069023964	0,0139524359	-0,014447067
8,70	0,057858698	0,0067413452	0,0136230908	-0,0140677782
8,80	0,057192381	0,0065859056	0,0133054825	-0,0137112911
8,90	0,056541338	0,0064358164	0,0129989252	-0,0133643889
9,00	0,055905047	0,0062908460	0,0127039490	-0,0131093685
9,10	0,055283008	0,0061507456	0,0124186159	-0,0128330345
9,20	0,054674744	0,0060152896	0,0121417565	-0,0124732839
9,30	0,054079801	0,0058842986	0,0118751352	-0,0122098911
9,40	0,053497743	0,0057575684	0,0116175280	-0,0119772684
9,50	0,052928153	0,0056349070	0,0113678102	-0,0117106132
9,60	0,052370632	0,0055161344	0,0111250135	-0,0113517915
9,70	0,051824800	0,0054011200	0,0108919408	-0,0111853587
9,80	0,051290290	0,0052896840	0,0106680934	-0,0110173082
9,90	0,050766751	0,0051816698	0,0104462920	-0,0107624756
10,00	0,050253847	0,0050769400	0,0102324700	-0,0104367650
10,20	0,049258670	0,0048768680	0,0098277807	-0,0101790690
10,40	0,048302328	0,0046854224	0,0094439780	-0,0096389030
10,60	0,047382583	0,0045107596	0,0090843285	-0,0093440324
10,80	0,046497363	0,0043430408	0,0087437993	-0,0089325732
11,00	0,045644752	0,0041845440	0,0084222096	-0,0085327440
11,20	0,044822974	0,0040346176	0,0081197405	-0,0083779518
11,40	0,044030378	0,0038926184	0,0078309965	-0,0079161150
11,60	0,043265432	0,0037580224	0,0075585056	-0,0076137323
11,80	0,042526708	0,0036303088	0,0072993517	-0,0072278592
12,00	0,041812876	0,0035090240	0,0070539680	-0,0069449520

VIII. МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ И ЭНТРОПИИ МНОГОАТОМНЫХ ГАЗОВ

1. КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

При гармонических колебаниях энергия многоатомной молекулы описывается уравнением

$$\bar{\varepsilon} = \omega_1 \left(v_1 + \frac{1}{2} \right) + \omega_2 \left(v_2 + \frac{1}{2} \right) + \omega_3 \left(v_3 + \frac{1}{2} \right) + \dots = \sum \omega_i \left(v_i + \frac{1}{2} \right), \quad (376)$$

где $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_i$ — классические частоты отдельных колебаний.

Суммирование должно быть распространено на все $i = 3N - 6$ колебаний при нелинейной молекуле и на $i = 3N - 5$ колебаний при линейной молекуле.

При наличии вырожденных колебаний уравнение для определения энергии колебаний может быть записано в виде

$$\bar{\varepsilon} = \sum_{i=n} \omega_i \left(1 + \frac{d_i}{2} \right); \quad (377)$$

здесь d_i — степень вырождения, равная для дважды вырожденных колебаний $d_2 = 2$, для трижды вырожденных $d_3 = 3$ и т. д. и для невырожденных колебаний, соответственно, $d_i = 1$.

Суммирование должно быть распространено на число n колебаний, равное при нелинейных молекулах

$$n = 3N - 6 - \sum (d_i - 1)$$

и при линейных

$$n = 3N - 5 - \sum (d_i - 1),$$

где $\sum (d_i - 1)$ — количество вырожденных колебаний.

Так же как и для двухатомных молекул, за начало отсчета энергии многоатомных молекул принимают энергию в самом низшем уровне $v_1 = 0, v_2 = 0, \dots, v_i = 0$, равную

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2} \omega_1 + \frac{1}{2} \omega_2 + \dots + \omega_i \frac{d_i}{2} = \sum_n \omega_i \frac{d_i}{2}.$$

Следовательно, уравнение энергии многоатомной молекулы будет иметь вид

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} - \varepsilon_0 = \omega_1 v_1 + \omega_2 v_2 + \omega_3 v_3 + \dots = \sum \omega_i v_i. \quad (378)$$

Сумма состояний колебательной энергии многоатомной молекулы равна

$$Q_v^0 = \sum p_v e^{-\frac{hc}{kT} \sum_n \omega_i v_i}; \quad (379)$$

здесь p_v — статистический вес, представляющий собой число уровней с одинаковой энергией, т. е. степень вырождения.

При квантовом числе v_i для каждого d_i вырожденного колебания степень вырождения определяется числом различных способов, которыми квантовое число v_i может быть представлено в виде суммы d_i положительных чисел.

Так, например, для дважды вырожденных колебаний

$$p_v = v_i + 1;$$

для трижды вырожденных колебаний

$$p_v = \frac{1}{2}(v_i + 1)(v_i + 2),$$

или в общем виде для d_i вырожденных колебаний статистический вес равен

$$p_v = \frac{(v_i + d_i - 1)!}{v_i!(d_i - 1)!}. \quad (380)$$

Следовательно, сумма состояний равна

$$Q_v^0 = \sum_{v_1=0}^{\infty} \sum_{v_2=0}^{\infty} \dots \sum_{v_i=0}^{\infty} \frac{(v_i + d_i - 1)!}{v_i!(d_i - 1)!} \cdot e^{-\frac{hc}{kT} \sum \omega_i v_i}. \quad (381)$$

Если колебания независимы одно от другого, то выражение (381) может быть записано в виде

$$Q_v^0 = \sum_{v_1=0}^{\infty} \frac{(v_1 + d_1 - 1)!}{v_1!(d_1 - 1)!} e^{-\frac{hc}{kT} \omega_1 v_1} \sum_{v_2=0}^{\infty} \frac{(v_2 + d_2 - 1)!}{v_2!(d_2 - 1)!} e^{-\frac{hc}{kT} \omega_2 v_2} \dots \times \\ \times \sum_{v_n=0}^{\infty} \frac{(v_n + d_n - 1)!}{v_n!(d_n - 1)!} e^{-\frac{hc}{kT} \omega_n v_n}. \quad (382)$$

Сумма членов каждого ряда, входящего в это произведение, легко суммируется

$$\sum_{v_n=0}^{\infty} \frac{(v_n + d_n - 1)!}{v_n!(d_n - 1)!} e^{-\frac{hc}{kT} \omega_n v_n} = \frac{1}{\left(1 - e^{-\frac{hc}{kT} \omega_n}\right)^{d_n}}, \quad (383)$$

или, обозначая, как и прежде, $\frac{hc}{kT} \omega_n = \theta_n$, получим

$$(Q_v^0) = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\theta_n}{T}}}. \quad (384)$$

Сумму состояний гармонических колебаний многоатомной молекулы можно выразить уравнением

$$Q_v^0 = [Q_v^0]_1^{d_1} [Q_v^0]_2^{d_2} \dots [Q_v^0]_n^{d_n} = \Pi [Q_v^0]_n^{d_n}, \quad (385)$$

где $[Q_v^0]_1^{d_1}$, $[Q_v^0]_2^{d_2} \dots [Q_v^0]_n^{d_n}$ представляют собой сумму состояний каждого из отдельных колебаний молекулы.

Так как внутренняя энергия, теплоемкость и энтропия являются функциями логарифма суммы состояний, то в соответствии с формулами (167), (170) и (174) колебательные составляющие этих величин для многоатомных газов равны:

$$U - U_0 = \sum_{i=1}^{i=n} d_i; (U - U_0)_i; \quad (386)$$

$$S - S_0 = \sum_{i=1}^{i=n} d_i (S - S_0)_i; \quad (387)$$

$$c_v = \sum_{i=1}^{i=n} c_i^0 v_i. \quad (388)$$

Иначе говоря, при гармонических колебаниях молекулы термодинамические величины многоатомных газов равны сумме составляющих из термодинамических величин для каждого отдельного колебания.

Таким образом, для вычисления колебательной составляющей термодинамических величин многоатомных газов необходимо знать все частоты нормальных колебаний и степень вырождения каждого колебания.

Вычислив по формулам (168), (170) и (174) для каждой из частот значение $(U - U_0)$, $(S - S_0)$, c_v и просуммировав по формулам уравнений (386) — (388), получим колебательные составляющие этих величин для многоатомного газа.

2. КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ АНГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

В том случае, когда колебания молекулы ангармоничны, энергия молекулы при невырожденных колебаниях определяется по уравнению

$$\varepsilon = \sum \omega_i \left(v_i + \frac{1}{2} \right) + \sum_i \sum_{k \geq 1} x_{ik} \left(v_i + \frac{1}{2} \right) \left(v_k + \frac{1}{2} \right), \quad (389)$$

где x_{ik} — коэффициент ангармоничности.

Так, например, для трехатомной молекулы энергия будет равна

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \omega_1 \left(v_1 + \frac{1}{2} \right) + \omega_2 \left(v_2 + \frac{1}{2} \right) + \omega_3 \left(v_3 + \frac{1}{2} \right) + x_{11} \left(v_1 + \frac{1}{2} \right)^2 + \\ & + x_{22} \left(v_2 + \frac{1}{2} \right)^2 + x_{33} (v_3 + 1)^2 + x_{12} \left(v_1 + \frac{1}{2} \right) \left(v_2 + \frac{1}{2} \right) + \\ & + x_{13} \left(v_1 + \frac{1}{2} \right) \left(v_3 + \frac{1}{2} \right) + x_{23} \left(v_2 + \frac{1}{2} \right) \left(v_3 + \frac{1}{2} \right). \end{aligned} \quad (390)$$

Из уравнения (389) видно, что при ангармонических колебаниях энергию многоатомной молекулы нельзя представить в виде суммы слагаемых колебаний, независимых одно от другого.

Если отнести энергию к наиболее низкому уровню колебательного состояния, равному

$$\varepsilon_0 = \sum_i \omega_i \frac{1}{2} + \sum_i \sum_{k \geq 1} x_{ik} \frac{1}{4}, \quad (391)$$

то энергия молекулы при ангармонических колебаниях может быть выражена уравнением

$$\varepsilon = \sum_i \omega_i^0 v_i + \sum_{k \geq 1} \sum_i x_{ik}^0 v_i v_k; \quad (392)$$

здесь

$$\omega_i^0 = \omega_i + x_{ii} + \frac{1}{2} \sum x_{ik}. \quad (393)$$

Сумма состояний ангармонических колебаний молекулы определится из уравнения

$$Q_{v1} = \sum_{v_1=0}^{\infty} \sum_{v_2=0}^{\infty} \dots \sum_{v_n=0}^{\infty} e^{-\frac{hc}{kT} \left(\sum_i \omega_i^0 v_i + \sum_{i, k \geq 1} x_{ik} v_i v_k \right)}. \quad (394)$$

Суммирование ряда по уравнению (394) в общем виде представляет собой задачу сложную и трудоемкую.

Однако, учитывая, что постоянные ангармоничности x сравнительно с частотами ω малы, можно с достаточной точностью просуммировать ряд уравнений (394) приближенно.

Для этого представим уравнение энергии молекулы в следующем виде:

$$\varepsilon = \sum_i (\omega_i v_i + x_{ii} v_i^2) + \sum_{k=2} x_{1k} v_1 v_k + \sum_{k=3} x_{2k} v_2 v_k + \dots + \sum_{k=n} x_{(n-1)k} v_{n-1} v_k,$$

или

$$\varepsilon = \sum_i (\omega_i v_i + x_{ii} v_i^2) + y, \quad (395)$$

где через y обозначено:

$$y = \sum_{k=2} x_{1k} v_1 v_k + \sum_{k=3} x_{2k} v_2 v_k + \dots + \sum_{k=n+1} x_{nk} v_n v_k. \quad (396)$$

Учитывая, что величина $y \frac{1}{kT}$ мала по сравнению с членом $\sum_i (\omega_i v_i + x_{ii} v_i^2)$, выражение $e^{-y \frac{hc}{kT}}$ можно разложить в ряд Тейлора. Тогда уравнение (394) может быть преобразовано к следующему виду:

$$Q_{v1} = \sum_{v_1=0}^{\infty} \sum_{v_2=0}^{\infty} \dots \sum_{v_n=0}^{\infty} e^{-\left(\sum_i \omega_i v_i + x_{ii} v_i^2 \right) \frac{hc}{kT}} \left[1 - y \frac{hc}{kT} + \frac{y^2}{2!} \left(\frac{hc}{kT} \right)^2 - \frac{y^3}{3!} \left(\frac{hc}{kT} \right)^3 + \dots \right]. \quad (397)$$

Суммируя теперь ряд уравнения (397) последовательно по отдельным членам, будем иметь

$$Q_{v1} = (Q_{v1})_1 (Q_{v1})_2 (Q_{v1})_3 \dots (Q_{v1})_n \left[1 - \bar{y} \frac{hc}{kT} + \frac{\bar{y}^2}{2!} \left(\frac{hc}{kT} \right)^2 - \frac{\bar{y}^3}{3!} \left(\frac{hc}{kT} \right)^3 + \dots \right], \quad (398)$$

где $(Q_{v1})_1, (Q_{v1})_2, (Q_{v1})_3$ — сумма состояний каждого из ангармонических колебаний в отдельности без учета динамической связанности отдельных колебаний. Эта сумма нами вычислена при рассмотрении ангармонических колебаний двухатомных молекул и равна, согласно уравнению (256),

$$(Q_{v1})_n = \sum_{v_n=0}^{\infty} e^{-\frac{hc}{kT} (\omega_n^0 v_n + x_n v_n^2)} = Q_v^0 + \frac{\psi(\mu)}{\omega_n hc / kT}, \quad (399)$$

где Q_v^0 — сумма состояний, соответствующая гармоническим колебаниям с частотой ω_n^0 :

$$Q_v^0 = \left(1 - e^{-\omega_n^0 \frac{hc}{kT}} \right)^{-1}. \quad (400)$$

Через μ в соответствии с уравнением (249) обозначено

$$\mu = \frac{\left(\omega_n^0 \frac{hc}{kT}\right)^{\frac{1}{2}}}{2 \left(\frac{x_n}{\omega_n^0}\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (401)$$

коэффициенты \bar{y} , \bar{y}^2 , $\bar{y}^3 \dots$, характеризующие динамическую связанность колебаний, в общем виде могут быть выражены в виде оператора:

$$\bar{y}^p = \left[\sum_{k=2} x_{1k} \bar{v}_1 \bar{v}_k + \sum_{k=3} x_{2k} \bar{v}_2 \bar{v}_k + \dots + \sum_{k=n+1} x_n \bar{v}_n \bar{v}_k \right]^p, \quad (402)$$

в котором операции возведения в степень чисел v_1 , v_2 и т. д. заменены суммированием по формуле

$$\bar{v}_n^m = \frac{\sum v_i^m e^{-\omega_n^0 v_i \frac{hc}{kT}}}{\sum e^{-\omega_n^0 v_i \frac{hc}{kT}} (Q_{vi})_n}, \quad (403)$$

т. е. после возведения многочлена \bar{y} в степень p отдельные члены \bar{v}^m представляют собой не число \bar{v} , возведенное в степень m , а условные обозначения операции суммирования по формуле (403).

По формуле (398) можно вычислить сумму состояния многоатомного газа с точностью, обусловливаемой числом членов y^n ряда Тейлора.

В практических расчетах с достаточной точностью можно ограничить ряд двумя или чаще всего одним членом ряда.

Определим для примера сумму состояний трехатомной молекулы, энергия которой описывается уравнением (390).

Если ограничить разложение вторым членом ряда Тейлора, то в соответствии с уравнением (398) сумма колебательного состояния трехатомного газа может быть найдена из уравнения

$$Q_{vi} = (Q_{vi})_1 \cdot (Q_{vi})_2 \cdot (Q_{vi})_3 \cdot \left[1 - \bar{y} \frac{hc}{kT} + \frac{\bar{y}^2}{2!} \left(\frac{hc}{kT} \right)^2 \right], \quad (404)$$

где $(Q_{vi})_1$, $(Q_{vi})_2$, $(Q_{vi})_3$ — суммы состояний гармонических колебаний с частотой ω_1 , ω_2 , ω_3 и постоянными ангармоничности x_{11} , x_{22} , x_{33} , соответствующими этим частотам, вычисляются по формулам (399) — (401).

Коэффициенты динамической связанности \bar{y} и \bar{y}^2 определяются из следующих уравнений:

$$\bar{y} = x_{12} \bar{v}_1 \bar{v}_2 + x_{13} \bar{v}_1 \bar{v}_3 + x_{23} \bar{v}_2 \bar{v}_3; \quad (405)$$

$$\begin{aligned} \bar{y}^2 = & x_{12}^2 \bar{v}_1^2 \bar{v}_2^2 + x_{13}^2 \bar{v}_1^2 \bar{v}_3^2 + x_{23}^2 \bar{v}_2^2 \bar{v}_3^2 + 2x_{12}x_{13} \bar{v}_1^2 \bar{v}_2 \bar{v}_3 + 2x_{12}x_{23} \bar{v}_2^2 \bar{v}_1 \bar{v}_3 + \\ & + 2x_{13}x_{23} \bar{v}_1 \bar{v}_2 \bar{v}_3^2. \end{aligned} \quad (406)$$

Числа \bar{v}_n , \bar{v}_n^2 находятся по формулам (403), (279), (280), где Q_{vi}^0 определяется формулой (400).

В том случае, когда можно ограничиться одним членом ряда Тейлора, сумма состояний определится из уравнения

$$Q_v = (Q_{v1})_1 \cdot (Q_{v1})_2 \dots (Q_{v1})_n \left(1 - \bar{y} \frac{hc}{kT}\right), \quad (407)$$

где коэффициент динамической связанности \bar{y} равен

$$\bar{y} = \sum_{k=2} x_{1k} \bar{v}_1 \bar{v}_k + \sum_{k=3} x_{2k} \bar{v}_2 \bar{v}_k + \dots + \sum_{k=n+1} x_n \bar{v}_n \bar{v}_k. \quad (408)$$

Производные $\frac{dQ_v}{dT}$ и $\frac{d^2Q_v}{dT^2}$, необходимые для вычисления термодинамических величин по формулам (168), (170) и (174), определяются дифференцированием уравнения (407) или (402). При этом производные от \bar{V}^m определяются по соотношениям

$$T \frac{d\bar{V}^m}{dT} = \left(\frac{\theta}{T}\right) \bar{V}^{m+1} \quad (409)$$

и

$$T^2 \frac{d^2\bar{V}^m}{dT^2} = \left(\frac{\theta}{T}\right) \bar{V}^{m+1} - \left(\frac{\theta}{T}\right)^2 \bar{V}^m. \quad (410)$$

3. ВРАЩАТЕЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН МНОГОАТОМНЫХ ГАЗОВ

Вращательная энергия многоатомных линейных молекул определяется по уравнению, аналогичному уравнению вращательной энергии двухатомной молекулы. Поэтому сумма состояний их определяется по уравнению (298) или (342).

Для симметричного волчка сумма состояний может быть найдена из уравнения

$$Q_r = \sum_{k=0}^{k=\infty} \sum_{y=-k}^{y=k} (2k+1) e^{-\varepsilon_r \frac{hc}{kT}}, \quad (412)$$

где ε_r — вращательная энергия симметричного волчка, равная

$$\varepsilon_r = B_e K(K+1) + (A_e - B_e) J^2 - D_e K^2(K+1)^2 - D_{ye} K(K+1) J^2 - D_y J^4.$$

Если пренебречь членами D_e , D_y и D_{ye} , определяющими нежесткость молекулы, то, применяя общие приемы приближенного суммирования, можно получить следующее выражение для суммы состояния жесткого симметричного волчка:

$$Q_r = e^{\frac{B_e hc}{4kT}} \left(\frac{\pi}{B_e^2 A_e}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{kT}{hc}\right)^{\frac{3}{2}} \left[1 + \frac{1}{12} \left(1 - \frac{B_e}{A_e}\right) B_e \frac{hc}{kT} + \frac{7}{480} \left(1 - \frac{B_e}{A_e}\right)^2 B_e^2 \left(\frac{hc}{kT}\right)^2 + \dots\right]. \quad (413)$$

При высоких температурах это выражение может быть заменено предельным:

$$Q_r^0 = \left(\frac{\pi}{B_e^2 A_e}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{kT}{hc}\right)^{\frac{3}{2}}. \quad (414)$$

Для жесткого сферического волчка сумма состояний равна

$$Q_r = \sum_{k=0}^{k=\infty} (2K+1)^2 e^{-[B_e K(K+1) + D_e K^2(K+1)^2 \dots] \frac{hc}{kT}}. \quad (415)$$

Приближенная сумма этого ряда определится из выражения

$$Q_r = e^{\frac{B_e hc}{4kT}} \pi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{kT}{hc B_e} \right)^{\frac{3}{2}} \left[1 + \frac{B_e hc}{12 kT} + \frac{7}{480} B_e^2 \left(\frac{hc}{kT} \right)^2 + \dots \right]. \quad (416)$$

Так как для асимметричного волчка уравнение (127) вращательной энергии молекулы выражено в неявном виде, то трудно определить сумму состояний, соответствующую этому виду вращения молекулы.

Непосредственным суммированием суммы состояний молекулы H_2O было показано, что для асимметричного волчка можно применять уравнение (413), заменив в этом уравнении вращательную постоянную B_e на $\sqrt{B_e C_e}$. При таком предположении сумму состояний асимметричного волчка можно определить уравнением

$$Q_r = e^{\frac{\sqrt{B_e C_e}}{4} \cdot \frac{hc}{kT}} \left(\frac{\pi}{A_e B_e C_e} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{kT}{hc} \right)^{\frac{3}{2}} \left[1 + \frac{1}{12} \left(1 - \frac{\sqrt{B_e C_e}}{A_e} \right) \times \right. \\ \left. \times \sqrt{B_e C_e} \frac{hc}{kT} + \dots \right]; \quad (417)$$

это соотношение верно, если величины B_e и C_e мало отличаются одна от другой.

В том случае, если B_e и C_e очень отличаются и B_e по своей величине ближе к A_e , то сумма состояний может быть вычислена по уравнению

$$Q_r = e^{\frac{\sqrt{B_e A_e}}{4} \cdot \frac{hc}{kT}} \left(\frac{\pi}{A_e B_e C_e} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{kT}{hc} \right)^{\frac{3}{2}} \left[1 + \frac{1}{12} \left(1 - \frac{\sqrt{A_e B_e}}{C_e} \right) \sqrt{A_e B_e} \frac{hc}{kT} + \dots \right]. \quad (418)$$

При сравнительно высоких температурах сумма состояний асимметричного волчка может быть определена по соотношению

$$Q_r^0 = \left(\frac{\pi}{A_e B_e C_e} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{kT}{hc} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (419)$$

Последнее выражение является общим для всех нелинейных молекул, оно может быть получено на основании предположения о непрерывном распределении молекул по значениям энергии.

Все приведенные выше уравнения (413), (416), (417) и (418) для определения сумм состояния нелинейных молекул, найденные на основании предположения о жесткости молекул, не учитывают влияния центробежных сил.

Влияние центробежных сил может быть учтено, если при суммировании ряда в уравнении (412) и (415) используем уравнение энергии вращения молекулы с дополнительными членами $D_e K^2 (K+1)^2 \dots$.

Однако к настоящему времени мы не располагаем достаточными данными, точно определяющими значение констант D_e для многоатомных молекул. Поэтому это точное суммирование не может быть использовано.

Исследование вопроса о влиянии центробежных сил на величину суммы состояния вращательного движения показало, что это влияние имеет лишь некоторое значение для легких молекул; для молекул тяжелых, вращающихся с малыми скоростями, влияние центробежных сил на величину суммы состояний ничтожно мало.

Приближенно влияние центробежных сил на величину суммы состояния может быть определено из следующего уравнения:

$$Q_{r1} = Q_r (1 + \rho T), \quad (420)$$

где Q_r — сумма состояний, найденная по одному из уравнений (413), (416) и (417);

ρ — поправочный коэффициент, зависящий от величины момента инерции молекулы. Для разных молекул значения ρ следующие:

	H ₂ O	H ₂ S	NH ₃	CH ₄	C ₂ H ₄
$\rho \cdot 10^5$	2,33	1,62	1,45	1,72	0,79

Взаимодействие колебаний и вращений было подробно рассмотрено в разделе двухатомных молекул. Это взаимодействие для многоатомных молекул может быть учтено тем, что в уравнения (413), (416) и (417) для суммы состояний вращательные постоянные должны быть вычислены по уравнениям

$$A_v^0 = A_0 - \sum \alpha_{iA} \bar{\nu}_c; \quad (421)$$

$$B_v^0 = B_0 - \sum \alpha_{iB} \bar{\nu}_c; \quad (422)$$

$$C_v^0 = B_0 - \sum \alpha_{iC} \bar{\nu}_c, \quad (423)$$

где $\bar{\nu}$ — числа, определяемые по уравнению (403).

Так как вращательная сумма состояния найдена в явном виде, то все термодинамические величины легко определить по значению $\ln Q$ и $\frac{d \ln Q}{dT}$, причем при определении производной по T следует помнить, что вращательные константы зависят от температуры по уравнениям (421) — (423) в связи с изменением числа $\bar{\nu}$.

4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВРАЩЕНИИ

Если внутреннее вращение свободно, т. е. потенциальный барьер V_0 , тормозящий вращение, мал, то сумма состояний, соответствующая в этом случае внутреннему вращению, может быть найдена из уравнения

$$Q_f^0 = \sum p_f e^{-\epsilon_f \frac{hc}{kT}}, \quad (424)$$

где ϵ_f определяется уравнением (139).

Для молекул, состоящих из нескольких симметричных волчков, связанных с остовом жестким скелетом молекулы, суммирование ряда в уравнении (424) приводит к следующей формуле для определения суммы состояния при свободном вращении:

$$Q_f^0 = \frac{(8\pi^3 I_{np} kT)^{\frac{1}{2}}}{hm}; \quad (425)$$

здесь I_{np} — приведенный момент инерции всей молекулы, определяемый по уравнению (138);

m — число тождественных минимумов потенциальной функции.

Из уравнения (425) следует, что доля энтальпии и теплоемкости, относящаяся к свободному внутреннему вращению, равна

$$I_f = \frac{1}{2} RT; \quad (426)$$

$$c_{pf} = \frac{1}{2} R. \quad (427)$$

Для общего случая заторможенного вращения сумма состояния должна быть вычислена из уравнения

$$Q_f = \Omega \frac{1}{m} \sum_K e^{-y_{mr^2}} + \sum_v e^{-y_{mv}}, \quad (428)$$

где Ω определяется уравнением (136), а

$$y_m = \left(\frac{h\nu^2}{32\pi^2 A_m \Omega_m RT} \right) a_{mr}; \quad (429)$$

здесь $A_m \Omega_m$ — приведенный момент инерции одного из волчков;

a_{mr} — параметр, значения которого определяются собственными значениями решения уравнения (134) движения волчка.

Суммирование должно быть проведено по всем уровням как относящимся к крутильным колебаниям y_{mv} , так и к заторможенному вращению.

Для случая внутреннего вращения молекулы, представляющей собой симметричный волчок, уравнение (134) было численно решено, а результаты решения были использованы при суммировании ряда в уравнении (428).

Сумма состояний при заторможенном вращении может быть представлена в виде произведения

$$Q_f = Q_f^0 Q_{\text{зат. вр}}. \quad (430)$$

Термодинамические величины в этом случае будут равны сумме составляющих, относящихся к свободному вращению и к вращению заторможенному.

В табл. 22—23 даны величины энтропии и термидала в виде разности значений между свободным и заторможенным вращением:

$$\Delta S_f = S_f - S_{\text{зат. вр}};$$

$$\Delta \tau_f = \tau_f - \tau_{\text{зат. вр}},$$

а в табл. 24 и 25 — величины энтальпии, отнесенной к абсолютной температуре $\frac{I_{\text{зат. вр}}}{T}$ и теплоемкости $(c_p)_{\text{зат. вр}}$ заторможенного вращения.

Для других, более сложных случаев строения молекулы, найти точное решение задачи о внутреннем вращении не представляется возможным; однако эту задачу можно решить приближенно, если для классического определения суммы состояния применить фазовый интеграл:

$$Q_f = \frac{1}{n} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\alpha}^{\beta} e^{-\frac{1}{kT} [V(\varphi) + T(p)]} d\varphi dp. \quad (431)$$

Исследование вопроса показало, что эта статистическая сумма при малых значениях потенциальных барьеров V_0 может быть представлена в виде

$$Q_f = Q_f^0 \int_0^{2\pi} e^{-\frac{V_0}{kT} (1 - \cos \alpha)} d\alpha, \quad (432)$$

где Q_f^0 — сумма состояний свободного вращения, определяемая уравнением (425).

Уравнение (432) может быть проинтегрировано:

$$Q_f = Q_f^0 [e^{-x} I_0(x)], \quad (433)$$

где I_0 — функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента (ix);

$$I_0(x) = i^{-n} J(ix);$$

$$x = \frac{1}{2} \frac{V_0}{RT}.$$

Таблица 22

Поправки на заторможенное вращение к значениям терминала
 $\Delta\tau_f = \tau_f - \tau_{\text{зат. вращ}}$ ккал/моль град

V/RT \ $1/Q_f$	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,2	0,1936	0,154	0,117	0,085	0,061	0,044	0,033	0,025	0,018	0,013	0,009	0,005
0,4	0,3774	0,326	0,274	0,225	0,176	0,131	0,096	0,072	0,056	0,044	0,035	0,026
0,6	0,5513	0,489	0,424	0,361	0,298	0,236	0,184	0,142	0,113	0,089	0,068	0,054
0,8	0,7157	0,640	0,566	0,493	0,420	0,348	0,286	0,230	0,185	0,145	0,111	0,088
1,0	0,8706	0,784	0,699	0,617	0,537	0,461	0,389	0,322	0,262	0,208	0,163	0,129
1,5	1,2193	1,113	1,009	0,909	0,809	0,714	0,622	0,538	0,451	0,375	0,308	0,250
2,0	1,5174	1,394	1,275	1,158	1,044	0,934	0,829	0,726	0,628	0,535	0,450	0,371
2,5	1,7714	1,634	1,500	1,370	1,245	1,123	1,003	0,889	0,778	0,675	0,575	0,479
3,0	1,9882	1,838	1,692	1,551	1,414	1,281	1,151	1,026	0,907	0,794	0,682	0,576
3,5	2,1744	2,012	1,855	1,703	1,556	1,413	1,274	1,142	1,018	0,893	0,774	0,660
4,0	2,3353	2,162	1,995	1,832	1,675	1,524	1,378	1,238	1,107	0,973	0,850	0,732
4,5	2,4758	2,292	2,116	1,944	1,779	1,620	1,466	1,321	1,183	1,043	0,914	0,791
5,0	2,5998	2,407	2,220	2,041	1,867	1,702	1,542	1,391	1,243	1,103	0,968	0,841
6,0	2,8093	2,598	2,395	2,201	2,014	1,835	1,663	1,499	1,343	1,193	1,051	0,915
7,0	2,9817	2,753	2,536	2,327	2,128	1,935	1,756	1,582	1,417	1,261	1,110	0,970
8,0	3,1277	2,884	2,652	2,431	2,219	2,019	1,827	1,645	1,473	1,311	1,156	1,010
9,0	3,2545	2,996	2,751	2,519	2,297	2,086	1,887	1,697	1,519	1,350	1,191	1,038
10,0	3,3668	3,095	2,837	2,593	2,361	2,143	1,935	1,740	1,556	1,382	1,218	1,062
12,0	3,5583	3,261	2,980	2,717	2,467	2,232	2,012	1,805	1,611	1,428	1,257	1,095
14,0	3,7185	3,398	3,097	2,814	2,550	2,302	2,070	1,853	1,650	1,461	1,284	1,118
16,0	3,8563	3,515	3,195	2,895	2,617	2,357	2,115	1,890	1,681	1,485	1,304	1,134
18,0	3,9771	3,616	3,278	2,963	2,673	2,402	2,151	1,919	1,703	1,504	1,318	1,145
20,0	4,0850	3,705	3,351	3,022	2,719	2,439	2,180	1,941	1,721	1,518	1,330	1,154

Таблица 23

Поправки на заторможенное вращение к значениям энтропии
 $\Delta S_f = S_f - S_{\text{зат. вр}}$ ккал/моль град

V/RT \ $1/Q_f$	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,2	0,0049	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002
0,4	0,0198	0,020	0,018	0,018	0,018	0,018	0,016	0,014	0,013	0,012	0,012	0,010
0,6	0,0440	0,044	0,043	0,043	0,040	0,039	0,039	0,036	0,034	0,033	0,031	0,028
0,8	0,0771	0,077	0,077	0,075	0,072	0,069	0,068	0,066	0,064	0,061	0,056	0,053
1,0	0,1184	0,118	0,117	0,114	0,112	0,110	0,107	0,105	0,100	0,095	0,092	0,086
1,5	0,2526	0,252	0,250	0,248	0,242	0,236	0,230	0,225	0,214	0,204	0,198	0,189
2,0	0,4180	0,417	0,415	0,410	0,402	0,393	0,382	0,370	0,356	0,339	0,323	0,308
2,5	0,5998	0,599	0,594	0,585	0,577	0,568	0,550	0,531	0,511	0,489	0,464	0,440
3,0	0,7852	0,783	0,777	0,768	0,757	0,740	0,719	0,699	0,676	0,647	0,615	0,581
3,5	0,9655	0,963	0,956	0,943	0,928	0,910	0,886	0,861	0,836	0,798	0,761	0,722
4,0	1,1350	1,132	1,125	1,110	1,093	1,069	1,042	1,010	0,979	0,936	0,896	0,855
4,5	1,2911	1,288	1,279	1,264	1,243	1,219	1,186	1,152	1,115	1,068	1,022	0,976
5,0	1,4331	1,430	1,420	1,403	1,379	1,351	1,317	1,280	1,234	1,187	1,137	1,085
6,0	1,6772	1,673	1,661	1,642	1,615	1,581	1,541	1,493	1,443	1,387	1,330	1,267
7,0	1,8773	1,873	1,859	1,836	1,806	1,764	1,720	1,667	1,609	1,546	1,479	1,410
8,0	2,0436	2,039	2,023	1,997	1,961	1,917	1,866	1,806	1,742	1,673	1,600	1,524
9,0	2,1852	2,179	2,162	2,133	2,094	2,044	1,988	1,922	1,851	1,775	1,696	1,611
10,0	2,3082	2,302	2,283	2,251	2,207	2,154	2,090	2,018	1,941	1,860	1,774	1,685
12,0	2,5141	2,507	2,484	2,446	2,393	2,330	2,260	2,174	2,085	1,991	1,894	1,792
14,0	2,6832	2,675	2,649	2,606	2,546	2,472	2,391	2,295	2,193	2,087	1,982	1,871
16,0	2,8274	2,817	2,786	2,739	2,673	2,590	2,495	2,390	2,280	2,165	2,048	1,929
18,0	2,9529	2,941	2,908	2,853	2,779	2,689	2,584	2,469	2,349	2,226	2,100	1,975
20,0	3,0642	3,052	3,015	2,954	2,870	2,771	2,658	2,536	2,408	2,276	2,142	2,010

Таблица 24

Энтальпия заторможенного вращения, отнесенная к абсолютной температуре $\frac{I_{\text{зат. вр}}}{T}$ ккал/моль град

$V/RT \backslash I/Q_f$	0,0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
0,0	0,9929	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992					
0,2	1,1816	1,141	1,105	1,073	1,049	1,031	1,021	1,014	1,007	1,003	0,999	0,996					
0,4	1,3506	1,299	1,248	1,199	1,150	1,105	1,072	1,050	1,035	1,024	1,014	1,008					
0,6	1,5003	1,436	1,373	1,310	1,250	1,189	1,137	1,098	1,071	1,048	1,029	1,018					
0,8	1,6315	1,555	1,481	1,410	1,339	1,271	1,210	1,156	1,113	1,076	1,047	1,027					
1,0	1,7450	1,659	1,575	1,494	1,418	1,343	1,274	1,210	1,154	1,105	1,064	1,036					
1,5	1,9596	1,855	1,752	1,653	1,560	1,471	1,384	1,305	1,229	1,163	1,102	1,053					
2,0	2,0923	1,970	1,853	1,741	1,635	1,535	1,439	1,349	1,264	1,189	1,119	1,055					
2,5	2,1645	2,030	1,899	1,778	1,661	1,549	1,447	1,350	1,259	1,178	1,103	1,031					
3,0	2,1959	2,048	1,908	1,776	1,650	1,534	1,425	1,320	1,223	1,139	1,059	0,987	0,92				
3,5	2,2018	2,042	1,892	1,752	1,620	1,496	1,381	1,274	1,175	1,087	1,005	0,930	0,88				
4,0	2,1932	2,023	1,863	1,714	1,576	1,447	1,328	1,220	1,120	1,029	0,946	0,870	0,82	0,77			
4,5	2,1776	1,997	1,828	1,672	1,528	1,393	1,272	1,161	1,060	0,967	0,884	0,807	0,75	0,71			
5,0	2,1595	1,970	1,793	1,630	1,480	1,343	1,217	1,103	1,001	0,909	0,824	0,748	0,67	0,63	0,59		
6,0	2,1249	1,917	1,726	1,551	1,391	1,246	1,114	0,998	0,893	0,799	0,714	0,641	0,56	0,51	0,47	0,42	
7,0	2,0973	1,874	1,669	1,483	1,314	1,163	1,028	0,908	0,802	0,708	0,624	0,553	0,482	0,42	0,38	0,34	0,31
8,0	2,0770	1,839	1,622	1,426	1,250	1,094	0,954	0,833	0,725	0,631	0,549	0,479	0,418	0,363	0,31	0,28	0,25
9,0	2,0623	1,810	1,582	1,378	1,195	1,034	0,892	0,768	0,661	0,569	0,488	0,420	0,363	0,315	0,269	0,23	0,20
10,0	2,0515	1,786	1,547	1,334	1,146	0,981	0,838	0,715	0,608	0,515	0,437	0,371	0,319	0,273	0,231	0,194	0,17
12,0	2,0371	1,748	1,491	1,263	1,066	0,896	0,745	0,624	0,519	0,431	0,356	0,296	0,244	0,203	0,169	0,140	0,116
14,0	2,0281	1,716	1,440	1,201	0,996	0,823	0,672	0,551	0,450	0,367	0,295	0,240	0,195	0,158	0,128	0,104	0,084
16,0	2,0218	1,689	1,400	1,149	0,936	0,760	0,613	0,493	0,394	0,314	0,249	0,198	0,157	0,127	0,099	0,078	0,063
18,0	2,0171	1,665	1,362	1,101	0,886	0,707	0,561	0,443	0,347	0,271	0,211	0,164	0,128	0,099	0,077	0,060	0,047
20,0	2,0136	1,645	1,328	1,060	0,841	0,660	0,515	0,399	0,307	0,236	0,181	0,138	0,105	0,080	0,061	0,047	0,036

Термодинамические функции при внутреннем вращении

Таблица 25

Теплоемкость заторможенного вращения (c_p)_{зат.} в ккал/моль град

V/RT \ $1/Q_f$	0,0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
0,0	0,9929	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,99	0,99						
0,2	1,0028	1,002	1,002	1,001	1,000	0,999	0,998	0,997	0,997	0,997	1,00	1,00						
0,4	1,0320	1,032	1,031	1,029	1,027	1,024	1,023	1,020	1,018	1,016	1,02	1,01						
0,6	1,0793	1,079	1,078	1,075	1,072	1,067	1,064	1,059	1,055	1,050	1,05	1,04						
0,8	1,1427	1,142	1,140	1,137	1,132	1,127	1,120	1,113	1,105	1,098	1,09	1,08						
1,0	1,2194	1,218	1,216	1,211	1,205	1,198	1,189	1,179	1,168	1,156	1,14	1,13						
1,5	1,4498	1,448	1,443	1,434	1,422	1,407	1,390	1,369	1,347	1,323	1,30	1,27						
2,0	1,6966	1,694	1,686	1,672	1,654	1,631	1,605	1,573	1,540	1,504	1,468	1,43						
2,5	1,9200	1,916	1,907	1,887	1,865	1,889	1,800	1,755	1,716	1,669	1,622	1,58						
3,0	2,0975	2,094	2,081	2,061	2,032	1,995	1,951	1,899	1,845	1,793	1,737	1,68	1,7					
3,5	2,2211	2,217	2,203	2,179	2,145	2,105	2,053	1,994	1,933	1,868	1,802	1,74	1,7					
4,0	2,2972	2,293	2,275	2,248	2,212	2,167	2,109	2,047	1,979	1,906	1,833	1,76	1,69	1,6				
4,5	2,3341	2,329	2,311	2,279	2,237	2,189	2,128	2,061	1,989	1,910	1,831	1,75	1,67	1,6				
5,0	2,3430	2,337	2,317	2,284	2,240	2,185	2,119	2,055	1,971	1,889	1,807	1,718	1,62	1,55	1,4			
6,0	2,3142	2,306	2,282	2,244	2,191	2,129	2,058	1,978	1,892	1,802	1,710	1,615	1,51	1,43	1,33	1,2		
7,0	2,2635	2,255	2,227	2,184	2,125	2,054	1,972	1,882	1,786	1,687	1,587	1,490	1,393	1,30	1,21	1,12	1,0	
8,0	2,2145	2,204	2,173	2,124	2,057	1,978	1,887	1,787	1,683	1,575	1,467	1,361	1,259	1,158	1,07	0,99	0,91	
9,0	2,1747	2,163	2,129	2,073	1,998	1,908	1,807	1,698	1,586	1,473	1,361	1,251	1,148	1,048	0,954	0,86	0,79	
10,0	2,1442	2,132	2,093	2,032	1,950	1,853	1,744	1,629	1,506	1,381	1,261	1,150	1,046	0,948	0,853	0,762	0,68	
12,0	2,1038	2,088	2,042	1,971	1,876	1,762	1,635	1,501	1,364	1,232	1,106	0,988	0,877	0,774	0,682	0,600	0,518	
14,0	2,0799	2,062	2,008	1,922	1,813	1,685	1,545	1,399	1,253	1,111	0,977	0,855	0,744	0,644	0,55	0,476	0,408	
16,0	2,0643	2,043	1,982	1,886	1,763	1,621	1,467	1,310	1,155	1,008	0,873	0,749	0,639	0,542	0,457	0,384	0,321	
18,0	2,0533	2,030	1,960	1,852	1,716	1,561	1,396	1,231	1,069	0,918	0,780	0,657	0,549	0,456	0,378	0,312	0,256	
20,0	2,0451	2,019	1,943	1,826	1,677	1,509	1,332	1,157	0,990	0,837	0,701	0,580	0,477	0,389	0,316	0,256	0,207	

Из уравнения (433) можно легко получить все термодинамические величины

$$\Delta S_f = R \left[\ln I_0(x) - \frac{xI_1(x)}{I_0(x)} \right], \quad (434)$$

$$\Delta J_f = RT \left[x - \frac{xI_1(x)}{I_0(x)} \right], \quad (435)$$

$$\Delta c_{pf} = R \left[x^2 - \frac{xI_1(x)}{I_0(x)} - \left(\frac{xI_1(x)}{I_0(x)} \right)^2 \right]. \quad (436)$$

В том случае, когда уравнение потенциальной функции имеет вид

$$V = \frac{1}{2} V_0 (1 - \sin 3\varphi),$$

причем

$$-120^\circ < \varphi < 120^\circ,$$

сумма состояний может быть найдена также из уравнения

$$Q = Q_f^0 \int_0^{2\pi} e^{-\frac{V_0}{2kT} (1 - \sin 3\varphi)} d\varphi; \quad (437)$$

интегрирование этого уравнения приводит к следующим формулам для поправок к термодинамическим величинам на заторможенное вращение:

$$\Delta S = R \left[2x - \frac{x [2I_1(x) - e^{-x}]}{2I_0(x) + e^{-x}} - \ln \left(\frac{2}{3} I_0(x) + \frac{1}{3} e^{-x} \right) \right]; \quad (438)$$

$$\Delta J_f = RT \left[x - \frac{x [2I_1(x) - e^{-x}]}{2I_0(x) + e^{-x}} \right]; \quad (439)$$

$$\Delta C_{pf} = R \left[x^2 - \frac{2xI_1(x)}{2I_0(x) + e^{-x}} - x^2 \left(\frac{2I_1(x) - e^{-x}}{2I_0(x) + e^{-x}} \right)^2 \right]. \quad (440)$$

5. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Наряду с уравнениями, позволяющими возможно более точно определить термодинамические величины, существуют приближенные способы расчета. Эти приближения основаны главным образом на том, что пренебрегают влиянием ангармоничности при колебаниях и центробежными силами при вращении.

При таком допущении расчетные формулы упрощаются и сводятся, например, для двухатомных молекул к формулам (240) — (242) для вычисления термодинамических величин при гармонических колебаниях.

Для многоатомных молекул при вычислении теплоемкости применялась следующая распространенная формула:

$$c_v = \frac{6}{2} R + \sum q_i c_{vi} + (3n - 6 - \sum q_i) \frac{\sum q_i c_{\delta i}}{\sum q_i}, \quad (441)$$

где n — число атомов в молекуле;

$\sum q_i$ — число валентных связей;

c_{vi} , $c_{\delta i}$ — теплоемкости, соответствующие характеристическим частотам валентных и деформационных колебаний.

В уравнении (441) все характеристические частоты сведены к четырем типовым связям С = С, С = О, С — Н, О — Н для обоих видов колебаний.

Как видим, указанная формула основана на допущениях полной характеристичности частот простых связей (что, как мы указывали выше, не наблюдается), на

пренебрежении ангармоничностью колебаний и на пренебрежении внутренним вращением.

На свободное внутреннее вращение к формуле (441) была введена поправка. Формула с такой поправкой имеет вид

$$c_p = 4R + \frac{aR}{2} + \sum c_{pi} q_i + \frac{3n-6-a-\sum q_i}{\sum q_i} \sum q_i c_{p_i}, \quad (442)$$

где a — число связей, допускающих свободное вращение.

Последняя формула также не дает удовлетворительных результатов, так как не учитывает заторможенности вращения и ангармоничности колебания и, кроме того, неполностью описывает структуру действительных колебаний характеристическими частотами.

Когда настоящая работа была закончена, появились в печати работы П. Г. Маслова¹ (Д. А. Н., т. XXXIV, № 4, 5 и 6, 1952; Ж. Ф. Х., т. XXVII, I, 1953), посвященные определению общей формулы зависимости теплоемкости для углеводородов.

Пользуясь способом разложения термодинамических функций молекулы по ее параметрам τ , П. Г. Маслов вычислил теплоемкости ряда тяжелых углеводородов и обобщил значения теплоемкостей следующими формулами.

Для n -алканов (метановый ряд) и n -алкенов:

$$\mu_{c_p} = \mu_{c_p}' + 12,283025 (m + 4 - 2n) n^{-1} (n + 1)^{-2} e^{-0,007T} + \Delta(\mu_{c_p})'',$$

где

$$\mu_{c_p}' = -1,8413 + 8,272 \cdot 10^{-3}T - 15,97 \cdot 10^{-7}T^2 - 0,116 \cdot 10^{-9}T^3 + \\ + (0,4303 + 21,14 \cdot 10^{-3}T - 116,95 \cdot 10^{-7}T^2 + 25,018 \cdot 10^{-9}T^3) n;$$

$\Delta(\mu_{c_p})''$ для n -алканов равна нулю, а для n -алкенов

$$\Delta(\mu_{c_p})'' = \frac{(2n+2)-m}{2} [(1,434269 - 12,3618 \cdot 10^{-3}T + \\ + 44,832665 \cdot 10^{-7}T^2 - 0,4624 \cdot 10^{-9}T^3) - (0,041467 - 0,1309 \cdot 10^{-3}T + \\ + 1,264667 \cdot 10^{-7}T^2 - 0,0352 \cdot 10^{-9}T^3) n],$$

m — число атомов водорода в молекуле;

n — общее число атомов углерода в молекуле.

П. Г. Маслов приводит также формулу для алкилциклоалканов (ряд циклогексанов):

$$\mu_{c_p} = -16,555 + 0,14n_0 + 167,82 \cdot 10^{-3}T - 963,81 \cdot 10^{-7}T^2 + \\ + 20,653 \cdot 10^{-9}T^3 + (0,4303 + 21,14 \cdot 10^{-3}T - 116,95 \cdot 10^{-7}T^2 + \\ + 2,502 \cdot 10^{-9}T^3) z + 18,954 n \cdot e^{-0,001n^2T},$$

здесь n_0 — число атомов углерода в кольце молекулы;

z — число углеродных атомов в неразветвленной углеродной цепочке молекулы.

Теплоемкость циклоалканов меньше приведенных значений на величину $0,0234 \cdot n_0^{-1} (n_0 - 2) T^{\frac{2}{3}}$.

¹ Д. А. Н., т. XXXIV, № 4, 5 и 6, 1952; Журнал физической химии, т. XXVII, I, 1953.

VIII. ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ

1. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ТЕПЛОЕМКОСТЬ И МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ЧЛЕНА

В предыдущих главах был подробно рассмотрен вопрос о методах вычисления термодинамических функций и, в частности, теплоемкостей идеальных газов. Все эти величины для идеальных газов являются функцией только температуры. Однако для реальных газов при достаточно высоких давлениях эти данные не могут быть применены, так как становится весьма ощутимой зависимость термодинамических функций от давления. Следовательно, для реальных газов термодинамические величины являются функцией двух параметров состояния.

При вычислении теплоемкостей для реальных газов в качестве независимых переменных могут быть избраны любые параметры, но особенно удобно использовать для этой цели температуру и давление. Целесообразность выбора в качестве независимых переменных T и P объясняется двумя соображениями: во-первых, удобством измерения температуры и давления и, во-вторых, тем обстоятельством, что для предельного случая — идеального газа — теплоемкость зависит только от температуры, а зависимость теплоемкости от давления определяет степень отклонения свойств данного газа или пара от свойств идеального газа. Поэтому уравнение для теплоемкости реального газа или пара при постоянном давлении c_p и уравнение для теплоемкости реального газа или пара при постоянном объеме c_v удобнее всего писать в следующем виде:

$$c_p = f_1(T, P) \quad (443)$$

и

$$c_v = f_2(T, P). \quad (444)$$

Для того чтобы иметь ясное представление о практической необходимости учета влияния давления на величину теплоемкости, необходимо знать, каков порядок величины изменения теплоемкости в зависимости от изменения давления.

Теплоемкость реального газа или пара можно представить как сумму теплоемкости этого же газа при той же температуре, но для идеального состояния $c_{ид}$ и корректирующего члена Δc , учитывающего отличие свойств действительного реального газа от газа идеального, т. е.

$$c_p = c_{p_0} + \Delta c_p \quad (445)$$

и

$$c_v = c_{v\infty} + \Delta c_v. \quad (446)$$

Так как любой газ становится по своим свойствам тем ближе к идеальному газу, чем ниже давление, то c_{p_0} и $c_{v\infty}$ представляют собой теплоемкости газов, экстраполированные на нулевое давление¹, а корректирующие члены Δc_p и Δc_v учитывают зависимость теплоемкостей реальных газов от давления.

¹ Индексы 0 и ∞ учитывают то обстоятельство, что для газа, приведенного к идеальному состоянию, давление должно быть в пределе равно нулю, а удельный объем — бесконечности.

Как известно, c_{p0} и $c_{v\infty}$ являются функциями только температуры и от других параметров не зависят.

В табл. 26 приведены значения Δc_p для азота N_2 в процентах по отношению к c_{p0} при различных значениях p и t .

Таблица 26

Значения Δc_p в % по отношению к c_{p0} для азота при различных p и t

p кг/см ²					
$t^\circ C$	1	20	100	500	1000
0	0,2	4,1	21,8	31,8	30,4
50	0,15	2,7	12,3	27,2	25,4
100	0,1	1,7	8,00	23,3	25,3
200	0,0	1,0	4,7	15,0	20,2
300	0,0	0,7	3,1	10,1	13,6
400	0,0	0,4	2,2	7,0	9,2
500	0,0	0,3	1,2	4,5	6,4
600	0,0	0,1	0,8	3,0	4,3

Из табл. 26 видно, что значения Δc_p , как и следовало ожидать, возрастают с повышением давления (в области относительно умеренных давлений) и уменьшаются с ростом температуры. Значения Δc_p , приведенные в табл. 26 для азота, являются характерными для всех так называемых постоянных газов (H_2 , N_2 , O_2 , воздуха и др.), т. е. для газов, состояние которых при обычных условиях далеко от состояния конденсации.

Из табл. 26 видно также, что для постоянных газов, находящихся при давлении, близком к атмосферному, величиной Δc_p в большинстве случаев можно пренебречь. Если же температура газа является относительно высокой ($500^\circ C$ и выше), то значением Δc_p можно пренебречь при давлении 100 атм и более. Наоборот, определение Δc_p является обязательным в случае, когда рассматривается газ, находящийся при относительно высоком давлении и сравнительно низкой температуре (например, $0^\circ C$ и 100 кг/см²).

Таким образом, во многих практически важных случаях в определении Δc_p нет необходимости. Поэтому приводимые в настоящей книге значения c_{p0} и $c_{v\infty}$ имеют большое практическое значение.

Однако в ряде случаев даже для постоянных газов во избежание существенной ошибки необходимо учитывать Δc_p . Последнее в еще большей мере справедливо в отношении паров, т. е. газов, находящихся в состоянии, сравнительно близком к состоянию конденсации.

В табл. 27 приведены значения Δc_p в процентах по отношению к c_{p0} для водяного пара H_2O .

Таблица 27

Значения Δc_p в % по отношению к c_{p0} для водяного пара при различных p и t

p кг/см ²						
$t^\circ C$	1	10	50	100	200	300
100	8,2	—	—	—	—	—
200	1,9	21,6	—	—	—	—
300	0,6	7,5	61,1	—	—	—
400	0,4	3,6	20,3	50,8	198	—
500	0,2	2,0	10,2	22,0	53,8	100
600	0,0	1,1	5,7	11,8	26,2	43,2
700	0,0	0,7	4,2	8,7	19,2	31,8

Из табл. 27 видно, что для водяного пара, так же как и для постоянных газов, значение корректирующего члена Δc_p увеличивается с повышением давления и понижением температуры, достигая особо больших величин около кривой насыщения. Влияние корректирующего члена на теплоемкость водяного пара очень велико, и пренебрегать значением Δc_p можно только при низких давлениях и тогда, когда точки, характеризующие состояние газа, удалены от кривой насыщения.

Однако приведенные ниже значения c_{p_0} и c_{v_0} для H_2O также имеют большое практическое значение, так как многие газы и газовые смеси являются влажными, т. е. содержат в своем составе водяной пар. При этом пар воды имеет обычно весьма малое парциальное давление и является перегретым даже при комнатной температуре. В этих условиях водяной пар весьма близок по своим свойствам к идеальному газу, и величиной Δc_p можно пренебречь.

Определение корректирующего члена Δc_p или Δc_v (а также и теплоемкости реального газа c_p или c_v) связано с большими трудностями. Если теплоемкость газа в идеальном состоянии может быть определена с помощью квантовой теории и данных спектрального анализа сравнительно просто и при этом с высокой степенью точности, то определение величин Δc_p и Δc_v (или c_p и c_v) в настоящее время затруднительно. В теории не имеется пока еще достаточно точных уравнений для определения этих величин, так как нет достаточных опытных данных, а проведение калориметрического эксперимента весьма сложно и требует, как правило, значительного времени.

Значения Δc_p и Δc_v (или c_p и c_v) определяют обычно одним из двух способов: или непосредственно по экспериментальным данным (этот способ бесспорно является наиболее надежным и точным), или при помощи термического уравнения состояния.

Об определении величин Δc_p и Δc_v (или c_p и c_v) непосредственно по данным калориметрического эксперимента подробнее сказано ниже. Необходимо сказать несколько слов о втором способе.

Для определения величин Δc_p и Δc_v при помощи термического уравнения состояния используют известные термодинамические зависимости

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial P}\right)_T = -AT \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p \quad (447)$$

и

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial P}\right)_T = AT \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T, \quad (448)$$

откуда получаем

$$\Delta c_p = - \int_0^P AT \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p dP \quad (449)$$

и

$$\Delta c_v = \int_0^P AT \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T dP. \quad (450)$$

Производные $\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p$, $\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T$ и $\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v$ должны быть определены на основе термического уравнения состояния. Но определение этих производных с высокой степенью точности, и особенно производных второго порядка, является очень трудным, а иногда просто невозможным.

Последнее заключение основано на следующих соображениях. Для того чтобы термическое уравнение состояния обладало высокой степенью точности, требуемой для вычисления Δc_p и Δc_v , недостаточно еще хорошей сходимости значений

удельных объемов, вычисленных по этому уравнению и найденных опытным путем. Кроме этого обязательного условия, необходимо также, чтобы значения производных (в том числе вторых производных), вычисленных по данному уравнению состояния, достаточно точно соответствовали истинным значениям этих производных. Иными словами, если незначительное отклонение теоретической изобары или изохоры данного вещества от его истинных изобары или изохоры не приводит к существенным ошибкам в определении удельного объема, то это же незначительное отклонение может привести к весьма грубым ошибкам в определении Δc_p или Δc_v . Следовательно, многие уравнения состояния, дающие зависимость между параметрами P , v и T с высокой степенью точности, оказываются не пригодными для вычисления Δc_p и Δc_v .

Таким образом, к термическому уравнению состояния, которое должно точно отражать свойства реального вещества, предъявляются весьма высокие требования. Вычисление удельного объема, основанное на установленной эмпирической зависимости $\Delta c_p = f(T, P)$, например, на соотношении (447), практически всегда является более точным, чем определение Δc_p по известным P , v ; T , так как при проведении двойного интегрирования не может быть таких значительных ошибок в исходном уравнении, как при проведении двойного дифференцирования.

Прежде чем перейти к рассмотрению различных термических уравнений состояния, целесообразно остановиться еще на одном вопросе. Для практических расчетов из числа калорических величин значительный интерес представляют энтальпия, энтропия и средняя теплоемкость при постоянном давлении. Последняя может быть легко определена, если известна температурная зависимость энтальпии. Но для определения энтальпии и энтропии по известному термическому уравнению состояния (или по известным из опыта данным зависимости P , v , T) нет необходимости определять вторую производную, что могло бы значительно ухудшить точность вычисления.

Воспользовавшись дифференциальными уравнениями

$$\left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_T = A \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \right] \quad (451)$$

и

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -A \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P, \quad (452)$$

можно определить

$$i = \int_0^P A \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \right] dP + i_0 \quad (453)$$

и

$$S = - \int_0^P A \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dP + S_0. \quad (454)$$

В уравнениях (453) и (454) i_0 и S_0 представляют собой соответственно энтальпию и энтропию газа, приведенного к идеальному состоянию. Используя уравнения (453) и (454) для вычисления энтальпии и энтропии, необходимо на основании известного термического уравнения состояния (или известных P , v , T) определить значения первой производной $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$. Конечно, определение первой производной должно снизить точность вычисления, хотя и в значительно меньшей мере, чем при определении второй производной, например $\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_P$.

Следует иметь в виду, что при вычислении калорических параметров по термическим или наоборот, используя общие термодинамические соотношения, почти

всегда необходимо определять значения производных по крайней мере первого порядка.

Действительно, при вычислении удельного объема по известной зависимости $c_p = f(T, P)$, согласно уравнению (447), также необходимо определять значения производной $\left(\frac{\partial c_p}{\partial P}\right)_T$. Следовательно, определение энтальпии или энтропии по известному уравнению состояния (или опытным данным для P, v, T) не менее точно, чем определение удельного объема по известной зависимости теплоемкости от температуры и давления. На этих вопросах мы также остановимся ниже более подробно.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ЧЛЕНА

Для определения зависимости теплоемкости реального газа от давления необходимо вычислить корректирующие члены Δc_p и Δc_v , которые, согласно уравнениям (449) и (450), могут быть представлены в виде

$$\Delta c_p = - \int_0^p AT \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p dP$$

и

$$\Delta c_v = \int_0^p AT \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T dP.$$

Для определения входящих в эти уравнения производных $\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p$, $\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right)_v$ и $\left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T$ может быть использовано термическое уравнение состояния.

Вследствие весьма большого технического значения термического уравнения состояния для установления зависимости $f(P, v, T) = 0$ было проведено много теоретических и экспериментальных исследований. В настоящее время накопился весьма большой материал, являющийся результатом многочисленных теоретических и экспериментальных работ, и предложено различными авторами большое количество уравнений состояния. Многие из этих уравнений оказываются весьма полезными в практических расчетах.

Однако сразу же мы наталкиваемся на известную трудность. Очень точные измерения со всей очевидностью показали, что свойства какого-либо газа или пара не могут быть выражены простым уравнением состояния. Следовательно, нельзя с высокой степенью точности свойства всех газов и паров выразить одним уравнением состояния.

Все существующие уравнения состояния можно разделить на две группы.

К первой группе относятся простые по форме уравнения состояния, обладающие известной степенью универсальности, т. е. если и не удовлетворяющие всем без исключения газам и парам, то выражающие, по крайней мере, свойства некоторых технически важных газов и паров. Эти уравнения не могут, конечно, обладать высокой степенью точности в широкой области температур и давлений, но зато правильно выражают с качественной стороны свойства газов и паров.

Ко второй весьма многочисленной группе относятся различные эмпирические и полуэмпирические уравнения состояния, обладающие высокой степенью точности, но, как правило, сложные по форме и пригодные для одного какого-либо газа или пара в относительно узком диапазоне температуры и давления.

Определение величин Δc_p и Δc_v при помощи уравнений второй группы равнозначно определению Δc_p и Δc_v непосредственно по данным термического эксперимента хотя, конечно, представляет большой практический интерес, но затруд-

няется отсутствием точных уравнений состояния для большинства газов и паров, важных в практическом отношении. По этой причине мы ограничим наше исследование термическими уравнениями состояния первой группы.

Прежде всего необходимо решить, каким уравнением состояния следует воспользоваться для этой цели.

Простейшее уравнение состояния реального газа — уравнение

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (455)$$

оказывается непригодным, так как не дает правильной зависимости калорических величин от давления (объема). Известно, что

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = AT \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v \quad (456)$$

Тогда, согласно уравнению (455), выраженному в виде

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2},$$

правая часть уравнения (456) будет равна

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v = 0 \quad \text{и} \quad \left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = 0,$$

т. е. теплоемкость при постоянном объеме по уравнению (455) является функцией только температуры, что, конечно, находится в противоречии с опытом. Теплоемкость при постоянном давлении c_p , согласно уравнению (455), является функцией не только температуры, но и давления, так как

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = -AT \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T}\right)_p \neq 0,$$

но количественно уравнение (455) выражает зависимость c_p от давления совершенно неудовлетворительно.

Большой интерес представляет уравнение состояния¹

$$\left(P + \frac{a^2}{Tv^2}\right)(v - b) = RT, \quad (457)$$

внешне очень похожее на уравнение (455). Значимость уравнения (457) заключается в том, что для многих газов и паров, важных в техническом отношении, в области невысоких давлений оно количественно правильно отражает не только взаимосвязь термических параметров, но и зависимость калорических величин от давления. Последнее обстоятельство проверено на многочисленных экспериментальных данных. Все это указывает на целесообразность определения величин Δc_p и Δc_v при помощи уравнения (457).

Проверка уравнения (457) по данным эксперимента выявила два основных положения, объясняющих недостаточность этого уравнения.

Первое положение состоит в следующем. Если написать уравнение (455) в вириальной форме

$$Pv = RT + BP, \quad (458)$$

то второй вириальный коэффициент получается следующим:

$$B = b - \frac{a}{RT};$$

при таком значении B зависимость теплоемкости от давления расходится с опытными данными.

¹ Уравнение Бертло.

Еще до появления уравнения (457) рядом исследователей указывалось, что коэффициент a изменяется обратно пропорционально температуре T и его было бы целесообразно заменить в уравнении (455) частным $\frac{a'}{T}$.

Второе положение, объясняющее недостаточность уравнения (455), заключается в том, что критический коэффициент получается из этого уравнения заниженным даже для нормальных веществ ($k_{кр} = \frac{RT_{кр}}{P_{кр}v_{кр}} = \frac{8}{3}$).

В уравнении (457) первый недостаток уравнения (455) исправлен введением множителя T в знаменатель выражения, представляющего кохезионное давление. Чтобы исправить второй недостаток и получить количественно правильное уравнение состояния в приведенной форме, был принят коэффициент b , равный не $\frac{v_{кр}}{3}$, а $\frac{v_{кр}}{4}$, и в соответствии с опытными данными был выбран множитель при члене, выражающем кохезионное давление, равный не 3, а $\frac{16}{3}$. Кроме того, был принят критический коэффициент $k_{кр} = \frac{32}{9} = 3,555$ соответственно действительному значению его для нормальных веществ.

Согласно сказанному, коэффициенты уравнения (457), выраженные через параметры критической точки, получаются равными:

$$a = \frac{16}{3} P_{кр} v_{кр}^2; \quad b = \frac{v_{кр}}{4}; \quad R = \frac{32}{9} \cdot \frac{P_{кр} v_{кр}}{T_{кр}}, \quad (459)$$

а само уравнение в приведенной форме имеет следующий вид:

$$\left(\pi + \frac{16}{3} \cdot \frac{1}{\tau \omega^2} \right) \left(\omega - \frac{1}{4} \right) = \frac{32}{9} \tau, \quad (460)$$

где π , ω , τ — приведенные параметры; $\pi = \frac{P}{P_{кр}}$, $\omega = \frac{v}{v_{кр}}$, $\tau = \frac{T}{T_{кр}}$.

Последнее выражение должно быть справедливо только для умеренных давлений, значительно более низких, чем критическое давление данного вещества. Действительно, для критической точки приведенные параметры получаются равными единице, $\pi = 1$, $\omega = 1$, $\tau = 1$ и в левой части уравнения в этом случае получается 4,747, в то время как правая часть уравнения равна 3,555.

Умножив обе части уравнения (460) на $P_{кр} v_{кр}$ и используя соотношение

$$\frac{9}{32} RT_{кр} = P_{кр} v_{кр},$$

получаем

$$\left(P + \frac{16}{3} \cdot \frac{P_{кр}}{\tau \omega^2} \right) \left(v - \frac{v_{кр}}{4} \right) = RT. \quad (461)$$

Ограничиваясь относительно малыми давлениями и плотностями и пренебрегая членом второго порядка, можно последнее уравнение написать в виде

$$Pv = RT \left(1 + \frac{v_{кр}}{4v} - 16 \frac{P_{кр}}{3P\tau\omega^2} \right). \quad (462)$$

Преобразовывая второй и третий члены, стоящие в скобках, при помощи соотношения $\pi\omega = \frac{32}{9}\tau$, мы допускаем ошибку вследствие предполагаемой малости давления, а следовательно, и малости самих корректирующих членов высшего порядка. Получаем

$$Pv = RT \left[1 + \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{9}{128} \left(1 - \frac{6}{\tau^2} \right) \right]. \quad (463)$$

Последнее уравнение превращается в уравнение состояния идеального газа при $1 - \frac{6}{\tau^2} = 0$. Очевидно, в этом случае

$$\tau = \frac{T_B}{T_{кр}},$$

где T_B — температура, при достижении которой реальный газ обладает свойствами газа идеального.

Из уравнения (463) следует, что $T_B = \sqrt{6} \cdot T_{кр} = 2,45T_{кр}$.

Из опытных данных, например для воздуха, следует, что $T_B = 2,62T_{кр}$. Таким образом, уравнение (457) и в этом отношении не плохо соответствует опытным данным.

Уравнение (463) можно написать в наиболее удобной вириальной форме:

$$Pv = RT + BP,$$

где

$$B = \frac{9RT_{кр}}{128P_{кр}} - \frac{54RT_{кр}^3}{128P_{кр}T^2}. \quad (464)$$

Воспользовавшись последним уравнением, можно определить зависимость теплоемкостей c_v и c_p от давления. Из соотношений

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial P} \right)_T = AT \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T$$

и

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial P} \right)_T = -AT \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_P$$

можно получить уже известные уравнения (450) и (449)

$$\Delta c_v = \int_0^P AT \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T dP$$

и

$$\Delta c_p = - \int_0^P AT \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_P dP.$$

Используя уравнение (457) в вириальной форме, определяем

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v = \frac{2R}{(vB)^2} \left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_v + \frac{RT}{(v-B)^2} \left(\frac{\partial^2 B}{\partial T^2}\right)_v \quad (465)$$

и

$$\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T = \frac{(v-B)^2}{RT}. \quad (466)$$

Из уравнения (464) находим

$$\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_v = \frac{2 \cdot 54 \cdot R \cdot T_{кр}^3}{128 P_{кр} T^3} \quad (467)$$

и

$$\left(\frac{\partial^2 B}{\partial T^2}\right)_v = - \frac{6 \cdot 54 \cdot R \cdot T_{кр}^3}{128 P_{кр} T^4}. \quad (468)$$

Из уравнений (450), (465), (466), (467) и (468) определяем

$$\Delta c_v = 3v_{кр} T_{кр}^2 P_{кр} T^{-3}. \quad (469)$$

Аналогичным образом можно вычислить и Δc_p .

Из уравнения

$$Pv = RT + BP$$

следует

$$\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p = \left(\frac{\partial^2 B}{\partial T^2}\right)_p. \quad (470)$$

Тогда из уравнений (449), (470) и (468) получаем

$$\Delta c_p = 9v_{кр} T_{кр}^2 P_{кр} T^{-3}. \quad (471)$$

Так как уравнения (469) и (471) при умеренных давлениях хорошо удовлетворяют экспериментальным данным, то уравнение (457) представляет значительный технический интерес.

При вычислении значений Δc_v или Δc_p при помощи уравнений (469) и (471) для постоянных газов (водорода, кислорода, азота, воздуха и др.) результат получается достаточно точным в широкой области давлений и температур. При температурах выше 0°С ошибка в определении Δc_p в большинстве случаев не превышает 5% до давления, равного 100 *ата*, что для технических расчетов можно считать приемлемым.

Применительно к парам вопрос о границах применимости уравнений (469) и (471) приходится решать для каждого частного случая. В качестве общей рекомендации можно сказать следующее. В большинстве случаев точность является достаточной для практических расчетов тогда, когда температура T° абс. превышает критическую температуру данного вещества $T_{кр}^\circ$ абс. не менее, чем в 1,15 раза, а давление не превышает критического. В случае, когда температура значительно выше критической, $\frac{T}{T_{кр}} \geq 2$, давление также может быть увеличено; без сколько-нибудь заметной потери в точности расчеты могут производиться до $P \approx 5P_{кр}$. В табл. 28 приведены значения критических параметров для основных газов.

Таблица 28

Критические значения параметров состояния различных неорганических и органических веществ

Наименование веществ	Химическая формула	$P_{кр}$	$t_{кр}$	Наименование веществ	Химическая формула	$P_{кр}$	$t_{кр}$
		кг/см ²	°C			кг/см ²	°C
Неорганические вещества							
Азот	N ₂	34,6	-147,2	Метиловый спирт . .	CH ₃ OH	81,3	240,0
Азота окись	NO	66,7	- 92,9	Углерода окись . . .	CO	35,7	-138,7
Азота закись	N ₂ O	74,1	36,5	Углерода двуокись . .	CO ₂	75,4	31,1
Азота четырехокись	N ₂ O ₄	102	158	Сероуглерод	CS ₂	75,3	273,0
Аммиак	NH ₃	115,2	132,4	Фосген	CCl ₂ O	57,9	181,7
Аргон	Ar	49,6	-122,0	Углерод четыреххло-			
Бор треххлористый .	BCl ₃	39,5	178,8	ристый	CCl ₄	46,5	283,1
Бор трехфтористый .	BF ₃	50,8	- 12,2	Ацетилен	C ₂ H ₂	64,1	36,0
Бром	Br ₂	125,0	302,2	Этилен	C ₂ H ₄	52,4	9,6
Водород	H ₂	13,2	-240,0	Уксусная кислота . .	C ₂ H ₄ O ₂	59,1	321,6
Водород бромистый .	HBr	87,2	90,0	Этан	C ₂ H ₆	49,8	32,3
Водород иодистый . .	HI	84,7	151,0	Этиловый спирт . . .	C ₂ H ₅ OH	65,2	243,5
Водород хлористый .	HCl	84,3	51,4	Дициан	C ₂ N ₂	60,1	126,6
Водород цианистый .	HCN	51,7	183,5	Пропадиен	C ₃ H ₄	53,5	120,7
Водяной пар	H ₂ O	225,65	374,2	Пропин	C ₃ H ₄	54,6	128
Гелий	He	2,34	-267,9	Пропилен	C ₃ H ₆	46,9	91,4
Кислород	O ₂	51,4	-118,9	Ацетон	C ₃ H ₆ O	48,6	235,0
Кремний четырехфто-	SiF ₄	37,9	- 14,2	Пропан	C ₃ H ₈	43,4	96,8
ристый				1,3- бутадиеи	C ₄ H ₆	44,0	161,8
Криптон	Kr	56	- 63	Бутан	C ₄ H ₁₀	37,2	152,8
Неон	Ne	27,8	-228,3	2- метилпропан . . .	C ₄ H ₁₀	38,2	134,0
Олово четыреххло-	SnCl ₄	39,2	383,7	Бутиловый спирт . .	C ₄ H ₉ OH	50,0	287
ристое				Пентан	C ₅ H ₁₂	34,1	197,2
Серы двуокись	SO ₂	80,3	157,2	2- метилбутан	C ₅ H ₁₂	33,9	187,8
Серы трюокись	SO ₃	86,4	218,3	Бензол	C ₆ H ₆	51,8	290,5
Сероводород	H ₂ S	91,9	100,3	Фенол	C ₆ H ₆ O	62,5	419
Хлор	Cl ₂	78,6	144,0	Анилин	C ₆ H ₇ N	54,1	426
Углеродистые соединения							
Метан	CH ₄	47,3	- 82,1	Циклогексан	C ₆ H ₁₂	41,1	279,9
Цианистоводородная				Гексан	C ₆ H ₁₄	30,6	234,8
кислота	CNH	51,7	183,5	Гептан	C ₇ H ₁₆	27,8	266,8
				Октан	C ₈ H ₁₈	25,5	296,2

Примечание. Неорганические вещества приведены в алфавитном порядке. Углеродистые соединения даны в порядке возрастания количества атомов углерода в молекуле.

Существенный интерес для определения Δc_v и Δc_p представляет также уравнение идеального ассоциированного газа, полученное М. П. Вукаловичем и И. И. Новиковым:

$$Pv = RT \left[1 - \frac{CP}{T \frac{5+2m}{2}} \right]. \quad (472)$$

Это уравнение, учитывающее так называемую кажущуюся ассоциацию газовых молекул и полученное по закону действующих масс, содержит, так же как и уравнение (455), три константы: R , C , m . Константа m , учитывающая число потерянных вращений простых молекул при образовании пары молекул, может быть ориентировочно определена на основании структуры одиночных молекул. Так, для одноатомных газов, где энергия вращения может не учитываться вовсе, $m \approx 0$; для двухатомных, а также трех- и многоатомных палочкообразных молекул (например, для CO₂) $m \approx 1$. Для наиболее симметричных молекул (например, для CH₄) $m \approx 3$ и для молекул промежуточного типа (к которым принадлежит водяной пар) $m \approx 2$. Однако при более точном рассмотрении оказывается, что числу m следует давать не целые (1, 2, 3), а дробные значения, всегда несколько меньшие, чем это следует по теории. При этом величину m приходится корректировать на основании экспериментальных данных. Так, например, для водяного пара $m = 1,968$.

Постоянная C также определяется из опытных данных, и для водяного пара, например, она составляет: $C = 405\,000$. Газовая постоянная R берется как обычно, без учета ассоциации.

На основании уравнения (472) можно определить Δc_v и Δc_p .
Согласно уравнению (448),

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial P}\right)_T = AT \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T.$$

Уравнение (472)

$$Pv = RT \left[1 - \frac{CP}{T^{\frac{5+2m}{2}}} \right]$$

может быть представлено в виде

$$P \left(v + RCT^{-\frac{3+2m}{2}} \right) = RT,$$

откуда следует

$$P = \frac{RT}{v + RCT^{-\frac{3+2m}{2}}}.$$

Дифференцируя выражение 2 раза, находим

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v = \frac{\frac{3+2m}{2} \cdot \frac{5 \cdot 2m}{2} \cdot \frac{C^2 R^3}{T^{\frac{3+4m}{2}}} \cdot \frac{1+2m}{2} \cdot \frac{3 \cdot 2m}{2} \cdot \frac{CR}{T^{\frac{5+2m}{2}}} v}{\left(v + \frac{CR}{T^{\frac{3+2m}{2}}} \right)^3}$$

Знаменатель последнего выражения может быть преобразован:

$$\left(v + \frac{CR}{T^{\frac{3+2m}{2}}} \right)^3 = v^3 \left(1 + \frac{CR}{vT^{\frac{3+2m}{2}}} \right)^3.$$

Полагая, что $v = \frac{RT}{P}$ и пренебрегая членами высшего порядка относительно $\frac{CP}{T^{\frac{5+2m}{2}}}$, получим

$$v^3 \left(1 + \frac{CR}{vT^{\frac{3+2m}{2}}} \right)^3 = v^3 \left(1 + \frac{3CP}{T^{\frac{5+2m}{2}}} \right).$$

Тогда

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v = \frac{\frac{3+2m}{2} \cdot \frac{5+2m}{2} \cdot \frac{C^2 R^3}{T^{\frac{3+4m}{2}}} - \frac{1+2m}{2} \cdot \frac{3+2m}{2} \cdot \frac{RC}{T^{\frac{5+2m}{2}}} v}{v^3 \left(1 + \frac{3CP}{T^{\frac{5+2m}{2}}} \right)}.$$

Снова пренебрегая вследствие малой величины членами высшего порядка, получим

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v = \frac{\frac{1+2m}{2} \cdot \frac{3+2m}{2} R^2 C}{T^{\frac{5+2m}{2}} v^2}. \quad (473)$$

Уравнение (472) можно также представить в виде

$$v = \frac{RT}{P} - RCT^{-\frac{3+2m}{2}},$$

откуда

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = -RTp^{-2}. \quad (474)$$

Таким образом, согласно уравнениям (473) и (474),

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial P}\right)_T = AT\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T = AT \frac{\frac{1+2m}{2} \cdot \frac{3+2m}{2} R^2 C}{T^{\frac{5+2m}{2}} v^2} \cdot \frac{RT}{P^2}.$$

Заменяя в знаменателе $v^2 = \left(\frac{RT}{P}\right)^2$, получим

$$\left(\frac{\partial C_v}{\partial P}\right)_T = \frac{\frac{1+2m}{2} \cdot \frac{3+2m}{2} ARC}{T^{\frac{5+2m}{2}}},$$

откуда, интегрируя, находим

$$\Delta c_v = \frac{1+2m}{2} \cdot \frac{3+2m}{2} ARCPT^{-\frac{5+2m}{2}}. \quad (475)$$

Согласно уравнению (447),

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial P}\right)_T = -AT\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p.$$

Дифференцируя уравнение (472)

$$v = \frac{R}{P} \left[T - CPT^{-\frac{3+2m}{2}} \right],$$

получим

$$\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p = -\frac{3+2m}{2} \cdot \frac{5 \cdot 2m}{2} RCT^{-\frac{7+2m}{2}}.$$

Следовательно, используя уравнение (447) и интегрируя его, получим

$$\Delta c_p = \frac{3+2m}{2} \cdot \frac{5+2m}{2} ARCPT^{-\frac{5+2m}{2}}. \quad (476)$$

Пользуясь уравнениями (475) и (476), можно определить значения Δc_v и Δc_p . Подсчет значений Δc_p показывает удовлетворительное совпадение с экспериментом, лучшее для водяного пара, чем получающееся по уравнению (457). Однако оказывается, что подсчет Δc_v и Δc_p , основанный на уравнении состояния идеального ассоциированного газа, может быть проведен, так же как и по уравнению (457), лишь в области относительно низких давлений. Правда, принимая в основу уравнение М. П. Вукаловича и И. И. Новикова, мы получаем несколько более точные данные по сравнению с уравнением (457), и граница давлений может быть несколько раздвинута, но нельзя забывать, что для определения констант уравнения в данном случае недостаточно знания только критических параметров, как это получается в уравнении (457), а необходим соответствующий экспериментальный материал.

Сопоставляя уравнение (457) с уравнением Вукаловича и Новикова, можно констатировать следующее. В тех случаях, когда для данного вещества имеется экспериментальный материал, позволяющий с достаточной степенью точности определить константы C и m в уравнении Вукаловича и Новикова, предпочтение следует отдать именно этому уравнению. В случаях же, когда такой экспериментальный материал отсутствует и, следовательно, константы C и m уравнения Вукаловича и Новикова не могут быть вычислены достаточно точно, предпочтение следует отдать уравнению (457), для определения констант которого должны быть известны только лишь параметры критической точки.

Мы не приводим здесь других уравнений состояния не потому, конечно, что исчерпали их все. Наоборот, уравнений состояния как универсальных, так и рассчитанных на одно какое-либо вещество имеется чрезвычайно много. Мы сочли возможным привести только те из них, которые, во-первых, достаточно просты по своему виду и, во-вторых, не требуют обширных экспериментальных данных для определения констант.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНТАЛЬПИИ И ЭНТРОПИИ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

Для практических расчетов из калорических величин особое значение имеют энтальпия, энтропия и средняя теплоемкость при постоянном давлении.

Энтальпию и энтропию реального газа I и S подобно тому, как это было сделано в отношении теплоемкостей, можно рассматривать как сумму энтальпии или энтропии газа в идеальном состоянии и соответствующего корректирующего члена ΔI или ΔS , учитывающего отклонение свойств реального газа от свойств газа идеального, или (что равнозначно) зависимость энтальпии (энтропии) реального газа от давления.

Таким образом, можно написать

$$I = I_0 + \Delta I \quad (477)$$

и

$$S = S_0 + \Delta S. \quad (478)$$

Значения корректирующих членов ΔI и ΔS можно определить при помощи дифференциальных уравнений (452) и (453)

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -A \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

и

$$\left(\frac{\partial I}{\partial P}\right)_T = A \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \right],$$

согласно которым

$$\Delta S = - \int_0^P A \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dP \quad (479)$$

и

$$\Delta I = \int_0^P A \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \right] dP. \quad (480)$$

Уравнения (479) и (480) можно решить, располагая данными термического эксперимента или уравнением состояния. Как видно из уравнений (479) и (480), при этом необходимо определить частную производную $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$.

Если взять за исходное выражение уравнение состояния по формуле (458)

$$v = \frac{RT}{P} + B,$$

которое после подстановки значения

$$B = \frac{9}{128} \cdot \frac{RT_{кр}}{P_{кр}} - \frac{54}{128} \cdot \frac{RT_{кр}^3}{P_{кр}T^2}$$

принимает вид

$$v = \frac{RT}{P} + \frac{9}{128} \cdot \frac{RT_{кр}}{P_{кр}} - \frac{54}{128} \cdot \frac{RT_{кр}^3}{P_{кр}T^2},$$

то, воспользовавшись соотношением (479), получим

$$\Delta S = R \ln P - \frac{2 \cdot 54}{128} \cdot \frac{RT_{кр}^3}{P_{кр}T^3} P; \quad (481)$$

здесь член $R \ln P$ учитывает зависимость энтропии идеального газа от давления, так как в таблицах значения энтропии идеального газа приводятся для давления 1 *ата*.

Воспользовавшись соотношением (480), получим

$$\Delta I = \frac{9}{128} \cdot \frac{RT_{кр}}{P_{кр}} P - \frac{3 \cdot 54}{128} \cdot \frac{RT_{кр}^3}{P_{кр}T^2} P. \quad (482)$$

По уравнениям (481) и (482) можно вычислить ΔS и ΔI для умеренных давлений.

4. ВЫЧИСЛЕНИЕ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ЧЛЕНА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Экспериментальное определение теплоемкости с высокой степенью точности весьма трудоемко и требует сооружения сложных дорогостоящих установок и, как правило, длительного времени. Поэтому весьма существенным вопросом является выбор интерполяционного уравнения для подсчета Δc_p и Δc_p , которое обеспечивало бы высокую точность при ограниченном количестве экспериментальных данных.

Многочисленные вычисления, проделанные авторами, показали, что в области средних и особенно высоких давлений можно пользоваться уравнением следующего вида:

$$\Delta c_p = m_t e^{n_t P}, \quad (483)$$

где m_t и n_t — коэффициенты, определяемые на основании экспериментальных данных и являющиеся функциями температуры.

То положение, что коэффициенты m_t и n_t являются величинами переменными, на первый взгляд, значительно осложняет положение и затрудняет пользование уравнением (483). Практически же это оказывается не так. Приведенное уравнение необходимо использовать в первую очередь для составления таблиц теплоемкостей, а не для непосредственного определения c_p . Для определения m_t и n_t достаточно наличия нескольких точек (трех, четырех) для каждого значения температуры. Температурный же интервал может быть взят в большинстве случаев порядка 100° С. Таким образом, для определения значений Δc_p в широком диапазоне давлений, при температурах, например, от 100 до 500° С, необходимо иметь всего лишь около 20 экспериментальных точек. Безусловным достоинством этого уравнения является его простота. Значения Δc_p для всех промежуточных температур также можно определить с высокой точностью. Для этого удобнее всего графически представить две функции $m_t = f_1(t)$ и $n_t = f_2(t)$, согласно которым и определять значения коэффициентов m_t и n_t .

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ТАБЛИЦЫ

ЗНАЧЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН ОДНО-, ДВУХ-, ТРЕХ-
И МНОГОАТОМНЫХ ГАЗОВ,
ГОРЮЧИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ
И ИХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

I. ОПИСАНИЕ ТАБЛИЦ

1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В этом разделе даны описания таблиц теплоемкостей, энтальпий и энтропий одноатомных, двухатомных, трехатомных газов неорганического состава, большого количества углеводородов, ряда горючих газовых смесей и их продуктов сгорания. Кроме того, даны описания таблиц вязкостей и теплопроводностей различных газов.

Указанные термодинамические величины рассчитаны по изложенному в первой части методу с учетом новейших спектроскопических констант и поэтому являются наиболее совершенными и точными.

Все значения термодинамических величин даны для газов, приведенных к идеальному состоянию, причем теплоемкости и энтальпии — для давления $p = 0$, а энтропии — для давления $p = 1 \text{ ата}$.

Интервал температур в таблицах выбран 100°C . Величина его вполне достаточна для того, чтобы можно было осуществлять линейную интерполяцию.

В таблицах теплоемкостей приведены мольные, весовые и объемные (отнесенные к 1 н.м^3) теплоемкости с делением, в свою очередь, на истинные и средние теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме.

Истинные мольные теплоемкости при постоянном давлении μc_p вычислены по спектроскопическим данным.

Истинные теплоемкости при постоянном объеме определены по уравнению

$$\mu c_v = \mu c_p - \mu R, \quad (484)$$

где μR — мольная газовая постоянная, выраженная в больших калориях. При этом принято $\mu R = 1,985814 \text{ ккал/моль град}$.

Средние мольные теплоемкости при постоянном давлении вычислены по известным энтальпиям:

$$\mu c_{pm} = \frac{\mu I_t - \mu I_{t=0}}{t} \text{ ккал/моль град}. \quad (485)$$

Средние мольные теплоемкости при постоянном объеме вычислены по уравнению (484).

Весовые теплоемкости получены делением мольных теплоемкостей на молекулярный вес газа (молекулярный вес каждого газа принят по химической шкале), т. е.

$$c = \frac{\mu c}{\mu} \text{ ккал/кг град}. \quad (486)$$

Объемные теплоемкости вычислены по формуле

$$c' = \frac{\mu c}{22,4143} \text{ ккал/н.м}^3 \text{ град}, \quad (487)$$

где $22,4143$ — объем моля идеального газа при нормальных условиях.

В таблицах энтальпии и энтропии эти величины, так же как и теплоемкости, отнесены к молю, килограмму и нормальному кубическому метру газа.

Расчетными величинами являются молярные энтальпии и энтропии. Весовые и объемные значения энтальпии и энтропии вычислены по формулам, аналогичным уравнениям (486) и (487).

Отсчет энтальпий и энтропий произведен от 0°C ; следовательно, при этой температуре их значения равны нулю.

Для возможности получения значений энтальпий и энтропий, отсчитанных от 0° абсолютной шкалы, в тексте приводятся таблицы (табл. 29—36, 38, 39, 41), в которых даны абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ\text{C}$.

В этих же таблицах приведены молекулярные веса газов и их удельные веса при нормальных условиях, подсчитанные по формуле

$$\gamma_0 = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu}{22,4143} \text{ кг/л.м}^3.$$

В табл. 37 и 40 приведены объемные составы газообразных топлив и продуктов сгорания бензина.

В табл. 42 и 43 даны значения констант, входящих в приближенные формулы для подсчетов коэффициентов динамической вязкости и коэффициентов теплопроводности газов.

Все значения термодинамических величин, приведенные в таблицах, даны для недиссоциированных газов.

2. ТАБЛИЦЫ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ, ЭНТАЛЬПИЙ И ЭНТРОПИЙ ГАЗОВ НЕОРГАНИЧЕСКОГО СОСТАВА

В табл. 44—79 приведены значения теплоемкостей, энтальпий и энтропий восемнадцати различных одно-, двух- и трехатомных газов неорганического состава.

Все эти газы, каждый в отдельности или в составе газовой смеси, наиболее часто применяются в различных теплотехнических установках и аппаратах, а также в тепловых машинах.

Расчеты теплоемкостей, энтальпий и энтропий произведены для нормальных изотопических смесей газов.

При вычислении теплоемкостей, энтальпий и энтропий воздуха был принят следующий его объемный состав:

$$\begin{aligned} r_{\text{N}_2} &= 78,026\%_0; \\ r_{\text{O}_2} &= 21,000\%_0; \\ r_{\text{CO}_2} &= 0,030\%_0; \\ r_{\text{H}_2} &= 0,014\%_0; \\ r_{\text{одноат}} &= 0,930\%_0^*. \end{aligned}$$

Теплоемкость, теплосодержание и энтропия воздуха вычислены по формулам типа:

$$\mu c_{p_{\text{воз}}} = \mu c_{p_{\text{N}_2}} \cdot r_{\text{N}_2} + \mu c_{p_{\text{O}_2}} \cdot r_{\text{O}_2} + \mu c_{p_{\text{CO}_2}} \cdot r_{\text{CO}_2} + \mu c_{p_{\text{H}_2}} \cdot r_{\text{H}_2} + \sum \mu c_{p_{\text{одноат}}} \cdot r_{\text{одноат}}. \quad (488)$$

Эти же величины для атмосферного азота (совокупность химически чистого азота и других газов, кроме кислорода) вычислены по формулам следующего вида:

$$(\mu c_{p_{\text{N}_2}})_{\text{атм}} = \frac{\mu c_{p_{\text{воз}}} - 0,21 \mu c_{p_{\text{O}_2}}}{0,79}. \quad (489)$$

В табл. 29 даны величины абсолютных энтальпий и энтропий при $t = 0^\circ\text{C}$, молекулярные веса газов и их удельные веса при нормальных условиях.

* В качестве одноатомных газов принята смесь аргона, ксенона, неона, криптона и гелия.

Таблица 29

Молекулярные (атомные) веса, удельные веса, абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ\text{C}$ для одно-, двух- и трехатомных неорганических газов

Наименование вещества	Химическая формула	Молекулярный (атомный) вес	Удельный вес	Абсолютные значения при $t = 0^\circ\text{C}$	
		μ	γ_0 кг/л.м ³	Энтальпия $\mu_{273,16}$ ккал/моль	Энтропия $\mu_{273,16}$ ккал/моль град
Азот атомарный	N	14,008	0,625	1356	36,154
Кислород атомарный	O	16,000	0,714	1475	37,981
Углерод атомарный	C	12,010	0,536	1437	37,297
Кислород	O ₂	32,000	1,428	1900	48,40
Азот	N ₂	28,016	1,250	1897	44,121
Азот атмосферный	N _{2atm}	28,16	1,256	1893	44,92
Воздух	—	28,97	1,292	1891	45,65
Водород	H ₂	2,016	0,090	1850	30,63
Оксид углерода	CO	28,010	1,250	1897	46,573
Оксид азота	NO	30,008	1,339	2020	49,696
Гидроксильная группа	OH	17,008	0,759	1927	43,26
Двуокись углерода	CO ₂	44,010	1,963	2016	50,256
Закись азота	N ₂ O	44,02	1,964	2060	51,71
Сернистый ангидрид	SO ₂	64,066	2,858	2280	58,57
Сероводород	H ₂ S	34,082	1,521	2180	48,46
Сероуглерод	CS ₂	76,14	3,397	2280	55,89
Сероокись углерода	COS	60,08	2,680	2120	54,46
Водяной пар	H ₂ O	18,016	0,804	2160	44,395

3. ТАБЛИЦЫ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ, ЭНТАЛЬПИЙ И ЭНТРОПИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

В табл. 80—290 приведены значения теплоемкостей, энтальпий и энтропий для следующих групп углеводородов, наиболее распространенных в технике:

- метанового ряда (предельные углеводороды, типа C_mH_{2m+2});
- этиленового ряда C_mH_{2m} ;
- группы ацетиленов C_mH_{2m-2} ;
- группы диолефинов;
- бензольных соединений (бензол, группа стиролов и метилстиролов);
- ряда нормальных циклопентанов;
- ряда нормальных циклогексанов.

Истинные молярные теплоемкости при постоянном давлении, молярные энтальпии и энтропии вычислены на основании новейших спектроскопических констант с учетом внутренних вращений и поправки на заторможенные вращения.

Содержание таблиц и их построение описано в I разделе второй части „Общие замечания“.

Ниже приведены табл. 30—36, в которых даны абсолютные значения энтальпии и энтропии при 0°C , молекулярные веса и удельные веса газов при нормальных условиях.

Таблица 30

Молекулярные веса, удельные веса, абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ\text{C}$ для углеводородов метанового ряда C_mH_{2m+2}

Наименование вещества	Химическая формула	Молекулярный вес	Удельный вес	Абсолютные значения при $t = 0^\circ\text{C}$	
		μ	γ_0 кг/л.м ³	Энтальпия $\mu_{273,16}$ ккал/моль	Энтропия $\mu_{273,16}$ ккал/моль град
Метан	CH ₄	16,04	0,716	2190	43,76
Этан	C ₂ H ₆	30,07	1,342	2550	53,73
Пропан	C ₃ H ₈	44,09	1,967	3080	63,00
Бутан	C ₄ H ₁₀	58,12	2,593	4070	72,09
Пентан	C ₅ H ₁₂	72,15	3,219	4950	80,77
Гексан	C ₆ H ₁₄	86,17	3,844	5830	89,46
Гептан	C ₇ H ₁₆	100,20	4,470	6710	98,15
Октан	C ₈ H ₁₈	114,22	5,096	7600	106,84

Таблица 31

Молекулярные веса, удельные веса, абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ\text{C}$ для углеводородов этиленового ряда C_mH_{2m}

Наименование вещества	Химическая формула	Молекулярный вес	Удельный вес	Абсолютные значения при $t = 0^\circ\text{C}$	
		μ	γ_0 кг/л.м ³	Энтальпия $\mu_{273,15}$ ккал/моль	Энтропия $\mu_{273,15}$ ккал/моль град
Этилен (этен)	C_2H_4	28,05	1,251	2 270	51,52
Пропилен (пропен)	C_3H_6	42,08	1,877	2 860	62,46
1 — бутен	C_4H_8	56,10	2,503	3 700	71,60
cis — 2 — бутен	C_4H_8	56,10	2,503	3 490	70,24
trans — 2 — бутен	C_4H_8	56,10	2,503	3 680	69,01
2 — метилпропен (изо- бутен)	C_4H_8	56,10	2,503	3 560	68,29
1 — пентен	C_5H_{10}	70,13	3,129	4 670	80,71
cis — 2 — пентен	C_5H_{10}	70,13	3,129	4 200	80,61
trans — 2 — пентен	C_5H_{10}	70,13	3,129	4 500	79,47
2 — метил — 1 — бутен	C_5H_{10}	70,13	3,129	4 340	79,39
3 — метил — 1 — бутен	C_5H_{10}	70,13	3,129	4 450	77,31
2 — метил — 2 — бутен	C_5H_{10}	70,13	3,129	4 260	78,67
1 — гексен	C_6H_{12}	84,16	3,755	5 550	89,3
cis — 2 — гексен	C_6H_{12}	84,16	3,755	5 160	89,7
trans — 2 — гексен	C_6H_{12}	84,16	3,755	5 520	88,5
cis — 3 — гексен	C_6H_{12}	84,16	3,755	4 950	87,9
trans — 3 — гексен	C_6H_{12}	84,16	3,755	5 300	87,1
2 — метил — 1 — пентен	C_6H_{12}	84,16	3,755	5 300	88,4
3 — метил — 1 — пентен	C_6H_{12}	84,16	3,755	5 160	87,4
4 — метил — 1 — пентен	C_6H_{12}	84,16	3,755	5 000	87,8
2 — метил — 2 — пентен	C_6H_{12}	84,16	3,755	4 860	87,8
cis — 3 — метил — 2 — пентен	C_6H_{12}	84,16	3,755	4 860	87,8
trans — 3 — метил — 2 — пентен	C_6H_{12}	84,16	3,755	4 860	88,6
cis — 4 — метил — 2 — пентен	C_6H_{12}	84,16	3,755	5 090	86,4
trans — 4 — метил — 2 — пентен	C_6H_{12}	84,16	3,755	5 210	85,0
2 — этил — 1 — бутен	C_6H_{12}	84,16	3,755	5 140	87,1
2,3 — диметил — 1 — бу- тен	C_6H_{12}	84,16	3,755	5 160	84,4
3 — 3 — диметил — 1 — бутен	C_6H_{12}	84,16	3,755	4 750	80,8
2 — 3 — диметил — 2 — бутен	C_6H_{12}	84,16	3,755	4 890	84,0
1 — гептен	C_7H_{14}	98,18	4,380	6 440	98,10
1 — октен	C_8H_{16}	112,21	5,006	7 320	106,8
1 — нонен	C_9H_{18}	126,23	5,632	8 220	115,4
1 — декен	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}$	140,26	6,258	9 090	124,1
1 — ундекен	$\text{C}_{11}\text{H}_{22}$	154,29	6,883	9 960	132,8
1 — додекен	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}$	168,31	7,509	10 870	141,6
1 — тридекен	$\text{C}_{13}\text{H}_{26}$	182,34	8,135	11 740	150,2
1 — тетрадекен	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}$	196,36	8,760	12 640	158,9
1 — пентадекен	$\text{C}_{15}\text{H}_{30}$	210,39	9,386	13 510	167,5
1 — гексадекен	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}$	224,42	10,012	14 390	176,3
1 — гептадекен	$\text{C}_{17}\text{H}_{34}$	238,44	10,638	15 290	185,0
1 — октадекен	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}$	252,47	11,264	16 160	193,7
1 — нонадекен	$\text{C}_{19}\text{H}_{38}$	266,49	11 889	17 060	202,3
1 — эйкозен	$\text{C}_{20}\text{H}_{40}$	280,52	12,512	17 940	211,1

Таблица 32

Молекулярные веса, удельные веса, абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ \text{C}$ для углеводородов ацетиленового ряда $\text{C}_m\text{H}_{2m-2}$

Наименование вещества	Химическая формула	Молекулярный вес	Удельный вес	Абсолютные значения при $t = 0^\circ \text{C}$	
		μ	$\gamma_0 \text{ кг/лм}^3$	Энтальпия $\mu H_{273,16}$ ккал/моль	Энтропия $\mu S_{273,16}$ ккал/моль град
Ацетилен (этин)	C_2H_2	26,04	1,162	2130	47,07
Аллилен (пропин, метил-ацетилен)	C_3H_4	40,06	1,787	2740	58,04
1 — бутин (этилацетилен)	C_4H_6	54,09	2,413	3320	67,80
2 — бутин (диметилацетилен)	C_4H_6	54,09	2,413	3490	66,12
1 — пентин (пропилацетилен)	C_5H_8	68,11	3,039	4300	76,8
2 — пентин (метилэтилацетилен)	C_5H_8	68,11	3,039	4070	77,2
3 — метил — 1 — бутин (изопропилацетилен) . . .	C_5H_8	68,11	3,039	3990	74,0

Таблица 33

Молекулярные веса, удельные веса, абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ \text{C}$ для углеводородов группы диолефинов

Наименование вещества	Химическая формула	Молекулярный вес	Удельный вес	Абсолютные значения при $t = 0^\circ \text{C}$	
		μ	$\gamma_0 \text{ кг/лм}^3$	Энтальпия $\mu H_{273,16}$ ккал/моль	Энтропия $\mu S_{273,16}$ ккал/моль град
Пропадиен (аллен)	C_3H_4	40,06	1,787	2680	57,08
1,2 — бутадиен	C_4H_6	54,09	2,413	3390	68,37
1,3 — бутадиен	C_4H_6	54,09	2,413	3140	64,96
1,2 — пентадиен	C_5H_8	68,11	3,039	4180	77,6
cis — 1,3 — пентадиен . . .	C_5H_8	68,11	3,039	3690	75,4
trans — 1,3 — пентадиен . .	C_5H_8	68,11	3,039	3960	74,0
1,4 — пентадиен	C_5H_8	68,11	3,039	4290	77,5
2,3 — пентадиен	C_5H_8	68,11	3,039	4070	75,5
3 — метил — 1,2 — бутадиен	C_5H_8	68,11	3,039	4100	74,1
2 — метил — 1,3 — бутадиен	C_5H_8	68,11	3,039	3820	73,3

Таблица 34

Молекулярные веса, удельные веса, абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ \text{C}$ для этилового спирта, бензола и углеводородов группы стирола и метилстиролов

Наименование вещества	Химическая формула	Молекулярный вес	Удельный вес	Абсолютные значения при $t = 0^\circ \text{C}$	
		μ	$\gamma_0 \text{ кг/л.м}^3$	Энтальпия $\mu\text{J}_{273,16}$ ккал/моль	Энтропия $\mu S_{273,16}$ ккал/моль град
Этиловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	46,07	2,155	3200	64,94
Бензол	C_6H_6	78,11	3,485	2930	62,66
Этенилбензол (стирол, винилбензол, фенилэтилен)	C_8H_8	104,14	4,646	4260	79,95
Изопропенилбензол	C_9H_{10}	118,17	5,272	5190	88,5
cis — 1 — пропенилбензол	C_9H_{10}	118,17	5,272	5190	88,5
trans — 1 — пропенил- бензол	C_9H_{10}	118,17	5,272	5080	87,8
1 — метил — 2 — этенил- бензол	C_9H_{10}	118,17	5,272	5190	88,5
1 — метил — 3 — этенил- бензол	C_9H_{10}	118,17	5,272	5190	89,9
1 — метил — 4 — этенил- бензол	C_9H_{10}	118,17	5,272	5190	88,5

Таблица 35

Молекулярные веса, удельные веса, абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ \text{C}$ для углеводородов ряда циклопентанов

Наименование вещества	Химическая формула	Молекулярный вес	Удельный вес	Абсолютные значения при $t = 0^\circ \text{C}$	
		μ	$\gamma_0 \text{ кг/л.м}^3$	Энтальпия $\mu\text{J}_{273,16}$ ккал/моль	Энтропия $\mu S_{273,16}$ ккал/моль град
Циклопентан	C_5H_{10}	70,13	3,129	3 120	68,21
Метилциклопентан	C_6H_{12}	84,16	3,755	4 150	78,93
Этилциклопентан	C_7H_{14}	98,18	4,381	4 870	87,87
n — пропилциклопентан	C_8H_{16}	112,21	5,006	5 760	96,6
n — бутилциклопентан	C_9H_{18}	126,23	5,632	6 640	105,3
n — пентилциклопентан	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}$	140,25	6,258	7 520	114,0
n — гексилциклопентан	$\text{C}_{11}\text{H}_{22}$	154,29	6,833	8 410	122,7
n — гептилциклопентан	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}$	168,31	7,09	9 290	131,4
n — октилциклопентан	$\text{C}_{13}\text{H}_{26}$	182,34	8,135	10 170	140,1
n — понилциклопентан	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}$	196,36	8,761	11 060	148,9
n — декилциклопентан	$\text{C}_{15}\text{H}_{30}$	210,39	9,386	11 940	157,5
n — ундекилциклопентан	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}$	224,42	10,012	12 820	166,2
n — додекилциклопентан	$\text{C}_{17}\text{H}_{34}$	238,44	10,638	13 700	174,9
n — тридекилциклопентан	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}$	252,47	11,264	14 590	183,6
n — тетрадекилциклопентан	$\text{C}_{19}\text{H}_{38}$	266,49	11,889	15 470	192,2
n — пентадекилциклопентан	$\text{C}_{20}\text{H}_{40}$	280,52	12,515	16 350	201,0
n — гексадекилциклопентан	$\text{C}_{21}\text{H}_{42}$	294,55	13,141	17 240	209,7

Молекулярные веса, удельные веса, абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ\text{C}$ для углеводородов ряда циклогексанов

Наименование вещества	Химическая формула	Молекулярный вес	Удельный вес γ_0 кг/лм ³	Абсолютные значения при $t = 0^\circ\text{C}$	
				Энтальпия $\mu_{273,16}^H$ ккал/моль	Энтропия $\mu_{273,16}^S$ ккал/моль град
Циклогексан	C_6H_{12}	84,16	3,755	3 630	69,04
Метилциклогексан	C_7H_{14}	98,18	4,380	4 470	79,26
Этилциклогексан	C_8H_{16}	112,21	5,006	5 190	88,2
<i>n</i> — пропилциклогексан	C_9H_{18}	126,23	5,632	6 070	96,4
<i>n</i> — бутилциклогексан	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}$	140,26	6,258	6 960	105,1
<i>n</i> — пентилциклогексан	$\text{C}_{11}\text{H}_{22}$	154,29	6,883	7 840	113,8
<i>n</i> — гексилциклогексан	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}$	168,31	7,509	8 720	122,6
<i>n</i> — гептилциклогексан	$\text{C}_{13}\text{H}_{26}$	182,34	8,135	9 610	131,2
<i>n</i> — октилциклогексан	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}$	196,36	8,760	10 490	140,0
<i>n</i> — нонилциклогексан	$\text{C}_{15}\text{H}_{30}$	210,39	9,386	11 370	148,6
<i>n</i> — декилциклогексан	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}$	224,42	10,012	12 260	157,4
<i>n</i> — ундецилциклогексан	$\text{C}_{17}\text{H}_{34}$	238,44	10,638	13 140	166,1
<i>n</i> — додецилциклогексан	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}$	252,47	11,264	14 020	174,7
<i>n</i> — тридецилциклогексан	$\text{C}_{19}\text{H}_{38}$	266,49	11,889	14 900	183,5
<i>n</i> — тетрадецилциклогексан	$\text{C}_{20}\text{H}_{40}$	280,52	12,515	15 790	192,2
<i>n</i> — пентадецилциклогексан	$\text{C}_{21}\text{H}_{42}$	294,55	13,141	16 670	200,9
<i>n</i> — гексадецилциклогексан	$\text{C}_{22}\text{H}_{44}$	308,57	13,767	17 550	209,6

4. ТАБЛИЦЫ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ, ЭНТАЛЬПИЙ И ЭНТРОПИЙ ГАЗООБРАЗНЫХ ТОПЛИВ И ИХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

В табл. 291—304 приведены значения теплоемкостей, энтальпий и энтропий для следующих газообразных топлив: доменного газа коксовых печей, естественного газа Саратовского месторождения, естественного газа Дагестанского месторождения, газов подземной газификации подмосковного и каменного (донецкого) углей.

Для газа подземной газификации подмосковного угля приняты три различных состава смеси.

Для всех перечисленных газов подсчитаны теплоемкости, энтальпии и энтропии продуктов их полного сгорания для различных избытков воздуха.

Таблицы для горючих газов построены так, как описано выше (см. п. 1 „Общие замечания“).

Мольные теплоемкости, энтальпии и энтропии подсчитаны по формулам, аналогичным формуле (488).

При расчете термодинамических величин естественных газов принят химически чистый азот, а для газов подземной газификации и доменного газа — атмосферный азот.

Табл. 305—318 для термодинамических величин продуктов сгорания газообразных топлив построены по иному принципу, так как в данном случае появляется дополнительная зависимость от избытка воздуха.

В этих таблицах приведены значения истинных и средних теплоемкостей, энтальпий и энтропий продуктов сгорания газообразных топлив, отнесенных к 1 н.м.³

горючего газа, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$. Эти величины вычислены по формулам следующего вида:

$$(c'_p)_{np. c_2 (mon)} = \sum V_2 (c'_p)_2 = V_{CO_2} (c'_p)_{CO_2} + V_{N_2} (c'_p)_{N_2 ат.м} + V_{вп} (c'_p)_{H_2O} \text{ ккал/н.м}^3 \text{ топ. град}, \quad (490)$$

где V_{CO_2} , V_{N_2} , $V_{вп}$ — соответственно объемы углекислого газа, азота и водяного пара в продуктах сгорания при $\alpha = 1$, отнесенные к 1 н.м³ газообразного топлива;

c'_p — объемные теплоемкости газов.

В этих же таблицах приведены значения указанных выше величин для воздуха, также отнесенных к 1 н.м³ горючего газа.

В табл. 37 даны составы горючих газов, а также значения объемов газов в продуктах сгорания (при $\alpha = 1$) для различных газообразных топлив.

Значения термодинамических величин продуктов сгорания газообразных топлив, отнесенных к 1 н.м³ продуктов сгорания при различных избытках воздуха, следует определять по формулам следующего вида:

$$i'_{np. c_2} = \frac{i'_{np. c_2 (mon)} + (\alpha - 1) i'_в (mon)}{\sum V_2 + (\alpha - 1) V_0}, \quad (491)$$

где V_0 — теоретически необходимый объем воздуха в н.м³ для сжигания 1 н.м³ горючего газа;

$\sum V_2$ — сумма объемов азота, углекислого газа и водяных паров в продуктах сгорания при $\alpha = 1$ на 1 н.м³ газообразного топлива;

$i'_{np. c_2 (mon)}$ и $i'_в (mon)$ — энтальпии продуктов сгорания и воздуха, отнесенные к 1 н.м³ горючего газа.

В другом написании:

$$i'_{np. c_2} = p \cdot i'_{np. c_2 (mon)} + (\alpha - 1) p \cdot i'_в (mon), \quad (492)$$

где

$$p = \frac{1}{\sum V_2 + (\alpha - 1) V_0}.$$

Для вычисления этих же величин, отнесенных к одному молю продуктов сгорания, нужно пользоваться формулами следующего вида:

$$\mu i_{np. c_2} = 22,4143 i'_{np. c_2} \quad (493)$$

или, иначе, учитывая формулу (492),

$$\mu i_{np. c_2} = p_1 i'_{np. c_2 (mon)} + (\alpha - 1) p_1 i'_в (mon), \quad (494)$$

где $p_1 = 22,4143 p$.

Значения теплоемкостей, энтальпий и энтропий продуктов сгорания газообразных топлив, отнесенные к 1 кг продуктов сгорания, следует подсчитывать по формулам вида:

$$i_{np. c_2} = \frac{i_{np. c_2 (mon)} + i_{в (mon)} (\alpha - 1)}{\gamma_0 (mon) + 1,306 \alpha V_0} \text{ ккал/кг}, \quad (495)$$

где $\gamma_0 (mon)$ кг/н.м³ — удельный вес газообразного топлива при нормальных условиях.

По аналогии с формулами (492) и (494)

$$i_{np. c_2} = p_2 i'_{np. c_2 (mon)} + (\alpha - 1) p_2 i'_в (mon). \quad (496)$$

Характеристика горючих газов и их продуктов сгорания при $\alpha = 1$

Наименование газа	Состав газов в процентах (по объему)												Удельный вес газа	Объем воздуха и дымовых газов на 1 н.м ³ горючего газа				Примечание	
	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ S	H ₂ O	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀		C ₅ H ₁₂	V ₀	V _{CO₂}	V _{N₂}		V _{вл}
	%												г/н.м ³	н.м ³ /н.м ³					
Доменный (коксовых печей)	—	53,5	2,7	28,0	10,5	—	—	0,3	—	—	—	—	—	1,296	0,76	0,39	1,18	0,05	
Газ подземной газификации подмосковного угля:																			
I состав	—	63,6	14,5	10,0	9,5	0,6	—	1,8	—	—	—	—	—	1,146	0,80	0,22	1,27	0,20	
II состав	0,2	54,0	18,7	9,4	16,0	0,5	—	1,0	0,2	—	—	—	—	1,149	0,82	0,27	1,19	0,23	V ₀ — объем воздуха, теоретически необходимый для сгорания 1 н.м ³ газа
III состав	0,2	53,2	14,6	4,8	16,0	2,0	5,0	1,0	0,2	—	—	—	—	1,179	0,72	0,24	1,13	0,25	
Газ подземной газификации каменного (донецкого) угля .	0,2	57,6	11,1	18,4	10,3	0,6	—	1,8	—	—	—	—	—	1,191	0,91	0,31	1,29	0,17	
Саратовский (Елшанка) . .	—	3,3	—	—	0,2	—	—	94,0	—	1,2	0,7	0,4	0,2	0,765	9,51	1,01	7,55	2,13	
Дагестанский (Изербаш) . .	—	4,0	—	—	2,0	—	—	75,0	—	6,8	6,0	6,0	0,2	0,998	11,63	1,34	9,23	2,44	

Для удобства подсчета термодинамических величин продуктов сгорания газообразных топлив, отнесенных к молю, килограмму и нормальному кубическому метру продуктов сгорания, в табл. 319—325 приведены значения p , p_1 , p_2 , $(\alpha - 1)p$, $(\alpha - 1)p_1$ и $(\alpha - 1)p_2$ для широкого диапазона изменения коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 0 \div 10$).

Абсолютные значения энтальпии и энтропии при 0°C , а также кажущиеся молекулярные веса и удельные веса при нормальных условиях для горючих газов даны в табл. 38. Абсолютные значения энтальпии и энтропии, отнесенные к 1 н.м^3 топлива при $\alpha = 1$ для продуктов сгорания горючих газов, приведены в табл. 39.

Таблица 38

Кажущиеся молекулярные веса, удельные веса, абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ\text{C}$ для горючих газов

Наименование газа	Кажущийся молекулярный вес	Удельный вес то кг/н.м ³	Абсолютные значения при $t = 0^\circ\text{C}$	
	μ		Энтальпия $H_{273,16}^{\circ}$ ккал/моль	Энтропия $S_{273,16}^{\circ}$ ккал/мольград
Доменный (коксовых печей)	29,05	1,296	1910	45,52
Газ подземной газификации подмосковного угля:				
I состав	25,68	1,146	1910	43,50
II состав	25,71	1,147	1910	43,26
III состав	26,37	1,176	1930	43,80
Газ подземной газификации каменного (донецкого) угля	26,69	1,191	1910	44,17
Саратовский (Елшанка)	17,14	0,765	2200	42,91
Дагестанский (Изербаш)	22,35	0,997	2330	47,54

Таблица 39

Абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ\text{C}$ для продуктов сгорания горючих газов, отнесенные к 1 н.м^3 топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Наименование газа	Энтальпия		Энтропия	
	$(H'_{273,16})_{\text{нр. сг}} \text{ (тон)}$	$(H'_{273,16})_{\text{в}} \text{ (тон)}$	$(S'_{273,16})_{\text{нр. сг}} \text{ (тон)}$	$(S'_{273,16})_{\text{в}} \text{ (тон)}$
	ккал/н.м ³ топ		ккал/н.м ³ топ град	
Доменный (коксовых печей)	140	64	3,338	1,548
Газ подземной газификации угля:				
I состав	146	68	3,435	1,630
II состав	147	69	3,444	1,668
III состав	141	61	3,506	1,465
Газ подземной газификации каменного (донецкого) угля	153	77	3,617	1,854
Саратовский (Елшанка)	934	802	21,614	19,372
Дагестанский (Изербаш)	1135	981	26,335	23,690

5. ТАБЛИЦЫ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ, ЭНТАЛЬПИЙ И ЭНТРОПИЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ БЕНЗИНА

В качестве исходного топлива принято жидкое топливо состава (по весу) $C = 85,5\%$, $H = 14,5\%$.

Для этого топлива вычислены теплоемкость, энтальпия и энтропия при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1 \div 5$. Значения термодинамических величин приведены как для продуктов полного сгорания (степень неполноты $\varphi = 1$), так и для продуктов неполного сгорания ($\varphi = 0,80$).

Объемный состав продуктов сгорания для полного и неполного сгорания при различных коэффициентах избытка воздуха приведен в табл. 40.

Таблица 40

Объемный состав продуктов полного и неполного сгорания бензина (в %)

r_i	r_{O_2}	r_{N_2}	r_{CO_2}	r_{H_2}	r_{CO}	r_{CH_4}	r_{H_2O}
α							
$\varphi = 1$							
1	—	73,70	13,00	—	—	—	13,30
2	9,75	76,17	6,98	—	—	—	7,10
3	13,30	76,95	4,75	—	—	—	5,00
4	15,20	77,58	3,62	—	—	—	3,60
5	16,30	77,79	2,91	—	—	—	3,00
$\varphi = 0,8$							
1	3,04	71,93	3,86	1,69	3,57	0,18	10,73
2	11,50	75,21	4,68	0,94	1,89	0,10	5,68
3	14,56	76,62	3,04	0,58	1,20	0,06	3,94
4	16,10	76,97	2,41	0,49	0,97	0,05	3,01
5	17,07	77,47	1,95	0,39	0,78	0,04	2,30

Теплоемкости, энтальпии и энтропии в этом случае вычислены тем же методом, что и для газообразных топлив, т. е. по формуле (488). Наряду с энтропией при $p = 1$ атм для продуктов сгорания бензина приведены также значения энтропии при постоянном объеме. Эти величины были вычислены (при отнесении их к 1 молю продуктов сгорания) по формуле

$$\mu S_v = \mu S_{p=1 \text{ атм}} - 2,303 A \mu R \lg \frac{T}{273,16} \text{ ккал/моль град.} \quad (497)$$

Для одного килограмма

$$S_v = S_{p=1 \text{ атм}} - 2,303 A \frac{\mu R}{\mu} \lg \frac{T}{273,16} \text{ ккал/кг град.} \quad (498)$$

где μ — кажущийся молекулярный вес смеси газов, входящих в продукты сгорания ($\mu = \sum r_i \mu_i$).

Для одного нормального кубического метра

$$S'_v = S'_{p=1 \text{ атм}} - 2,303 \frac{A \mu R}{22,4143} \lg \frac{T}{273,16} \text{ ккал/нм}^3 \text{ град.} \quad (499)$$

В табл. 41 приведены значения абсолютных значений (отсчитанных от 0° абсолютной шкалы) энтропий и энтальпий, а также величины кажущихся молекулярных весов и удельных весов продуктов полного и неполного сгорания при нормальных условиях для различных избытков воздуха.

Таблица 41

Кажущийся молекулярный вес, удельный вес при нормальных условиях, абсолютные значения энтальпии и энтропии при $t = 0^\circ\text{C}$ для продуктов полного и неполного сгорания бензина

α	$\varphi = 1$				$\varphi = 0,8$			
	μ	γ_0	$\mu_{273,16}$	$\mu_{S_{273,16}}$	μ	γ_0	$\mu_{273,16}$	$\mu_{S_{273,16}}$
	—	кг/м ³	ккал/моль	ккал/моль град	—	кг/м ³	ккал/моль	ккал/моль град
1,0	28,77	1,284	1949	45,73	28,02	1,250	1936	45,45
2,0	28,81	1,285	1925	45,78	28,40	1,267	1918	45,62
3,0	28,81	1,285	1916	45,80	28,53	1,273	1911	45,69
4,0	28,84	1,287	1911	45,81	28,61	1,276	1908	45,73
5,0	28,83	1,286	1909	45,82	28,67	1,279	1906	45,75

Значения теплоемкостей, энтальпий и энтропий продуктов полного и неполного сгорания бензина при различных избытках воздуха, вычисленные по описанному выше методу, сведены в табл. 326—337. Энтальпии и энтропии в этих таблицах, так же как и для всех других газов, отсчитаны от 0°C .

6. ТАБЛИЦЫ ВЯЗКОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГАЗОВ

В табл. 338 и 339 приведены значения динамической и кинематической вязкости для пятнадцати наиболее важных газов.

Динамическая вязкость газа рассчитана по уравнению

$$\eta = \gamma_0 \frac{1 + \frac{C}{273}}{1 + \frac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}} \text{ кг}_2/\text{м сек.}, \quad (500)$$

где T — температура газа по абсолютной шкале;

γ_0 — динамическая вязкость газа при $t = 0^\circ\text{C}$;

C — постоянный для данного газа коэффициент.

Формулу (500) можно представить в другом виде:

$$\eta = k \frac{T^{\frac{3}{2}}}{T + C'}; \quad (501)$$

здесь k и C' — новые коэффициенты.

В табл. 42 приведены их значения для наиболее часто встречающихся газов.

Таблица 42

Наименование газа	$k \cdot 10^7$	C'
Воздух	15,06	122
Азот	13,85	102
Двуокись углерода	15,52	233
Водяной пар	22,36	961
Кислород	16,49	110

Кинематическая вязкость определена из соотношения

$$\nu = \frac{\eta}{\gamma} \text{ м}^2/\text{сек}, \quad (502)$$

где γ — удельный вес газа в $\text{кг}/\text{м}^3$.

В тех случаях, когда требуется подсчитать вязкость газа при отсутствии надежных или вообще каких-либо опытных данных по вязкости газа, можно рекомендовать следующий приближенный метод расчета.

Как показывает эксперимент, константа C в уравнении (500) связана с критической температурой газа соотношением

$$C = C_r T_{кр}, \quad (503)$$

где $T_{кр}$ — критическая температура газа в град. абс.;

C_r — коэффициент пропорциональности.

Значение C_r для ряда газов и, в частности, для тяжелых углеводородов колеблется в пределах 0,6—0,85 или в среднем равно 0,7.

Следовательно, для приближенных расчетов можно принимать

$$C = 0,7 T_{кр}. \quad (504)$$

Величину вязкости при $t = 0^\circ \text{C}$ для углеводородов можно определить по приближенному соотношению

$$\eta_0 = 3,5 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\mu \cdot p_{кр}^4}{T_{кр}} \right)^{\frac{1}{6}}, \quad (505)$$

где μ — молекулярный вес газа;

$p_{кр}$ — критическое давление газа в $\text{кг}/\text{см}^2$.

Вычисленные значения вязкостей газов по данным уравнений (504) и (505) имеют точность 5—10%.

При отсутствии каких-либо данных по вязкости газа подобная точность может считаться достаточно высокой.

В табл. 340 и 341 приведены значения теплопроводности газов, полученные на основании проверенных опытных данных.

Теплопроводность газов также может быть подсчитана на основании кинетической теории газа, которая дает зависимость между вязкостью и теплопроводностью газов следующего вида:

$$\lambda = \eta (K_v c_v + K_r c_r + K_t c_t) \text{ ккал/м час град}, \quad (506)$$

где η — динамическая вязкость газа;

c_v , c_r и c_t — составляющие мольной теплоемкости газа, обусловленные колебательным, вращательным и поступательным движениями;

K_v , K_r и K_t — соответствующие этим составляющим опытные коэффициенты пропорциональности.

Для двухатомных газов эти коэффициенты равны

$$K_v = 1; \quad K_r = 0,94; \quad K_t = 2,5.$$

Для трехатомных газов

$$K_v = 1,8; \quad K_r = 0,6; \quad K_t = 2,13.$$

Так как для относительно высоких температур вращательная составляющая теплоемкости для большинства газов становится постоянной, уравнение (506) можно преобразовать к виду:

$$\lambda = \eta (a c_p - b),$$

где a и b — опытные коэффициенты;

c_p — истинная мольная теплоемкость газа при постоянном давлении в ккал/моль град .

Для основных газов значения коэффициентов a и b приведены в табл. 43.

Таблица 43

Наименование газа	a	b
Воздух	155	—167
Азот	215	205
Двуокись углерода	147,2	357
Водяной пар	400	1500
Кислород	195	257

Эти коэффициенты вычислены по опытным данным Всесоюзного теплотехнического института.

Для указанных газов значения теплопроводности были вычислены по данным табл. 43 до температуры 1200°С.

Для других газов, по которым отсутствуют подробные опытные данные, в табл. 340 и 341 приведены лишь те из них, которые могут считаться надежными и главным образом для низких температур.

В тех случаях, когда отсутствуют какие-либо данные по теплопроводности газов, она может быть вычислена ориентировочно по уравнению (506).

II. ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ
И ЭНТРОПИИ ОДНОАТОМНЫХ,
ДВУХАТОМНЫХ
И ТРЕХАТОМНЫХ ГАЗОВ

(таблицы 44—79)

Теплоемкость атомарного азота N

Таблица 44

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
100	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
200	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
300	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
400	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
500	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
600	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
700	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
800	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
900	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
1000	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
1100	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
1200	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
1300	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
1400	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
1500	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3544	0,2126	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
1600	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3545	0,2127	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
1700	4,965	2,979	4,965	2,979	0,3545	0,2127	0,3544	0,2126	0,2215	0,1329	0,2215	0,1329
1800	4,966	2,980	4,965	2,979	0,3545	0,2127	0,3544	0,2126	0,2216	0,1330	0,2215	0,1329
1900	4,967	2,981	4,965	2,979	0,3546	0,2128	0,3544	0,2126	0,2216	0,1330	0,2215	0,1329
2000	4,968	2,982	4,965	2,979	0,3547	0,2129	0,3544	0,2127	0,2217	0,1331	0,2215	0,1329
2100	4,970	2,984	4,965	2,979	0,3548	0,2131	0,3545	0,2127	0,2218	0,1331	0,2215	0,1329
2200	4,973	2,987	4,965	2,979	0,3550	0,2133	0,3545	0,2127	0,2219	0,1333	0,2215	0,1329
2300	4,977	2,991	4,965	2,980	0,3553	0,2135	0,3545	0,2127	0,2221	0,1334	0,2215	0,1329
2400	4,982	2,996	4,966	2,980	0,3556	0,2139	0,3546	0,2128	0,2223	0,1335	0,2215	0,1330
2500	4,988	3,002	4,967	2,981	0,3561	0,2143	0,3546	0,2128	0,2225	0,1339	0,2216	0,1330
2600	4,995	3,009	4,968	2,982	0,3566	0,2148	0,3547	0,2129	0,2229	0,1343	0,2216	0,1330
2700	5,004	3,018	4,969	2,983	0,3573	0,2155	0,3548	0,2130	0,2233	0,1347	0,2217	0,1331
2800	5,015	3,029	4,971	2,985	0,3580	0,2162	0,3549	0,2131	0,2237	0,1351	0,2218	0,1332
2900	5,027	3,041	4,972	2,986	0,3589	0,2171	0,3550	0,2132	0,2243	0,1357	0,2218	0,1332
3000	5,042	3,056	4,974	2,988	0,3599	0,2181	0,3551	0,2133	0,2249	0,1363	0,2219	0,1333

Энтальпия и энтропия атомарного азота N

Таблица 45

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия			Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μ	<i>h</i>	<i>h'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>		μ	<i>h</i>	<i>h'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град	°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0	1600	7 943	567,1	354,4	9,558	0,6824	0,4264
100	496,5	35,45	22,15	1,550	0,1107	0,06915	1700	8 440	602,5	376,5	9,816	0,7003	0,4379
200	992,9	70,88	44,30	2,727	0,1947	0,1216	1800	8 936	638,0	398,7	10,063	0,7184	0,4489
300	1489	106,3	66,45	3,680	0,2627	0,1642	1900	9 433	673,4	420,8	10,297	0,7351	0,4594
400	1986	141,8	88,60	4,477	0,3196	0,1997	2000	9 930	708,9	443,0	10,519	0,7500	0,4693
500	2482	177,2	110,7	5,166	0,3688	0,2305	2100	10 430	744,4	465,2	10,734	0,7663	0,4789
600	2979	212,6	132,9	5,769	0,4119	0,2574	2200	10 920	779,9	487,4	10,938	0,7809	0,4880
700	3475	248,1	155,0	6,308	0,4503	0,2814	2300	11 420	815,4	509,6	11,135	0,7949	0,4968
800	3972	283,5	177,2	6,794	0,4850	0,3031	2400	11 920	850,9	531,8	11,326	0,8086	0,5053
900	4468	319,0	199,3	7,235	0,5165	0,3228	2500	12 420	886,5	554,0	11,508	0,8216	0,5134
1000	4965	354,4	221,5	7,642	0,5456	0,3409	2600	12 920	922,1	576,3	11,684	0,8341	0,5213
1100	5461	389,9	243,6	8,017	0,5723	0,3577	2700	13 420	957,8	598,6	11,858	0,8466	0,5290
1200	5958	425,3	265,8	8,367	0,5973	0,3733	2800	13 920	993,6	620,9	12,023	0,8583	0,5364
1300	6454	460,7	287,9	8,692	0,6205	0,3878	2900	14 420	1029	643,3	12,184	0,8698	0,5436
1400	6950	496,2	310,1	8,998	0,6424	0,4014	3000	14 920	1065	665,8	12,338	0,8808	0,5504
1500	7447	531,6	332,2	9,286	0,6629	0,4143							

Теплоемкость атомарного кислорода O

Таблица 46

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	5,272	3,283	5,272	3,286	0,3295	0,2053	0,3295	0,2053	0,2352	0,1466	0,2352	0,1466
100	5,152	3,166	5,215	3,219	0,3220	0,1979	0,3253	0,2112	0,2293	0,1412	0,2322	0,1436
200	5,089	3,103	5,163	3,180	0,3180	0,1939	0,3229	0,1938	0,2270	0,1334	0,2305	0,1419
300	5,052	3,066	5,130	3,144	0,3158	0,1917	0,3215	0,1965	0,2254	0,1368	0,2289	0,1403
400	5,030	3,044	5,108	3,122	0,3144	0,1912	0,3192	0,1951	0,2244	0,1358	0,2279	0,1393
500	5,015	3,029	5,091	3,105	0,3134	0,1893	0,3182	0,1940	0,2237	0,1351	0,2271	0,1385
600	5,005	3,019	5,077	3,091	0,3123	0,1837	0,3173	0,1932	0,2233	0,1347	0,2265	0,1379
700	4,997	3,011	5,066	3,080	0,3123	0,1832	0,3166	0,1925	0,2229	0,1343	0,2260	0,1374
800	4,991	3,005	5,057	3,070	0,3120	0,1828	0,3161	0,1919	0,2227	0,1341	0,2256	0,1370
900	4,987	3,001	5,050	3,064	0,3117	0,1826	0,3156	0,1915	0,2225	0,1339	0,2253	0,1367
1000	4,984	2,998	5,043	3,057	0,3115	0,1824	0,3152	0,1911	0,2224	0,1337	0,2250	0,1364
1100	4,981	2,995	5,038	3,052	0,3113	0,1822	0,3149	0,1907	0,2222	0,1336	0,2248	0,1361
1200	4,979	2,993	5,033	3,047	0,3112	0,1821	0,3146	0,1904	0,2221	0,1335	0,2245	0,1359
1300	4,977	2,991	5,029	3,043	0,3111	0,1820	0,3143	0,1902	0,2221	0,1335	0,2244	0,1357
1400	4,976	2,990	5,025	3,039	0,3110	0,1869	0,3141	0,1899	0,2220	0,1334	0,2242	0,1356
1500	4,975	2,989	5,022	3,036	0,3109	0,1868	0,3139	0,1897	0,2220	0,1334	0,2240	0,1354
1600	4,975	2,989	5,019	3,033	0,3109	0,1868	0,3137	0,1895	0,2219	0,1333	0,2239	0,1353
1700	4,974	2,988	5,016	3,030	0,3109	0,1868	0,3135	0,1894	0,2219	0,1333	0,2238	0,1352
1800	4,974	2,988	5,014	3,028	0,3109	0,1868	0,3134	0,1892	0,2219	0,1333	0,2237	0,1351
1900	4,975	2,989	5,012	3,026	0,3109	0,1868	0,3132	0,1891	0,2220	0,1333	0,2236	0,1350
2000	4,976	2,990	5,010	3,024	0,3110	0,1869	0,3131	0,1890	0,2220	0,1334	0,2235	0,1349
2100	4,977	2,991	5,008	3,022	0,3111	0,1870	0,3130	0,1889	0,2221	0,1335	0,2234	0,1348
2200	4,979	2,993	5,007	3,021	0,3112	0,1871	0,3129	0,1883	0,2222	0,1335	0,2234	0,1348
2300	4,982	2,996	5,006	3,020	0,3114	0,1874	0,3129	0,1887	0,2223	0,1337	0,2233	0,1347
2400	4,985	2,999	5,005	3,019	0,3116	0,1875	0,3123	0,1887	0,2224	0,1338	0,2233	0,1347
2500	4,989	3,003	5,004	3,018	0,3118	0,1877	0,3128	0,1885	0,2226	0,1340	0,2233	0,1347
2600	4,994	3,008	5,004	3,018	0,3121	0,1880	0,3127	0,1886	0,2228	0,1342	0,2232	0,1346
2700	4,999	3,013	5,003	3,017	0,3124	0,1883	0,3127	0,1886	0,2230	0,1344	0,2232	0,1346
2800	5,005	3,019	5,003	3,017	0,3128	0,1887	0,3127	0,1886	0,2233	0,1347	0,2232	0,1346
2900	5,012	3,026	5,004	3,018	0,3132	0,1891	0,3127	0,1886	0,2236	0,1350	0,2232	0,1346
3000	5,019	3,033	5,044	3,018	0,3137	0,1896	0,3127	0,1886	0,2239	0,1353	0,2232	0,1346

Энтальпия и энтропия атомарного кислорода O

Таблица 47

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия			Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'		μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град	°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0	1600	8 030	501,9	358,2	9,733	0,6183	0,4342
100	520,5	32,53	23,22	1,624	0,1015	0,0724	1700	8 527	533,0	380,4	9 991	0,6244	0,4457
200	1032	64,51	46,05	2,840	0,1775	0,1267	1800	9 025	564,0	402,6	10,237	0,6398	0,4567
300	1539	96,20	68,67	3,812	0,2333	0,1700	1900	9 522	595,1	424,3	10,471	0,6544	0,4671
400	2043	127,7	91,15	4,622	0,2889	0,2062	2000	10 020	626,2	447,0	10,695	0,6684	0,4771
500	2545	159,1	113,6	5,318	0,3324	0,2372	2100	10 520	657,3	469,2	10,910	0,6819	0,4867
600	3046	190,4	135,9	5,927	0,3704	0,2644	2200	11 020	688,4	491,4	11,115	0,6947	0,4958
700	3546	221,6	158,2	6,470	0,4144	0,2886	2300	11 510	719,6	513,7	11,312	0,7070	0,5046
800	4046	252,9	180,5	6,958	0,4349	0,3104	2400	12 010	750,7	535,9	11,502	0,7189	0,5131
900	4545	284,0	202,8	7,402	0,4526	0,3312	2500	12 510	781,9	558,1	11,686	0,7304	0,5213
1000	5043	315,2	225,0	7,810	0,4881	0,3484	2600	13 010	813,1	580,4	11,862	0,7414	0,5292
1100	5541	346,3	247,7	8,187	0,5117	0,3652	2700	13 510	844,3	602,7	12,033	0,7521	0,5368
1200	6039	377,5	269,4	8,537	0,5333	0,3818	2800	14 010	875,6	625,0	12,199	0,7624	0,5442
1300	6537	408,6	291,6	8,864	0,5540	0,3954	2900	14 510	906,9	647,4	12,359	0,7724	0,5513
1400	7035	439,7	313,9	9,171	0,5732	0,4091	3000	15 010	938,2	669,7	12,515	0,7822	0,5583
1500	7532	470,8	336,0	9,460	0,5913	0,4220							

Теплоемкость атомарного углерода С

Таблица 48

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μ_{c_p}	μ_{c_v}	$\mu_{c_{pm}}$	$\mu_{c_{vm}}$	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/мм ³ град			
0	5,068	3,082	5,068	3,082	0,4222	0,2566	0,4222	0,2566	0,2261	0,1375	0,2261	0,1375
100	5,021	3,035	4,975	2,989	0,4183	0,2527	0,4142	0,2489	0,2240	0,1354	0,2220	0,1334
200	5,000	3,014	4,973	2,987	0,4165	0,2510	0,4141	0,2487	0,2231	0,1345	0,2219	0,1333
300	4,989	3,003	4,971	2,985	0,4156	0,2500	0,4139	0,2486	0,2226	0,1340	0,2218	0,1332
400	4,982	2,996	4,971	2,985	0,4151	0,2495	0,4139	0,2485	0,2223	0,1337	0,2218	0,1332
500	4,978	2,992	4,970	2,984	0,4147	0,2491	0,4138	0,2484	0,2221	0,1335	0,2217	0,1331
600	4,975	2,989	4,969	2,983	0,4145	0,2489	0,4137	0,2484	0,2220	0,1334	0,2217	0,1331
700	4,973	2,987	4,969	2,983	0,4143	0,2487	0,4137	0,2483	0,2219	0,1333	0,2217	0,1331
800	4,972	2,986	4,968	2,982	0,4142	0,2486	0,4137	0,2483	0,2219	0,1333	0,2217	0,1331
900	4,971	2,985	4,968	2,982	0,4141	0,2486	0,4137	0,2483	0,2218	0,1332	0,2216	0,1330
1000	4,971	2,985	4,968	2,982	0,4141	0,2486	0,4136	0,2483	0,2218	0,1332	0,2216	0,1330
1100	4,972	2,986	4,968	2,982	0,4142	0,2486	0,4136	0,2483	0,2218	0,1332	0,2216	0,1330
1200	4,974	2,988	4,968	2,982	0,4143	0,2488	0,4136	0,2483	0,2219	0,1333	0,2216	0,1330
1300	4,977	2,991	4,968	2,982	0,4146	0,2490	0,4137	0,2483	0,2220	0,1334	0,2217	0,1330
1400	4,981	2,995	4,969	2,983	0,4150	0,2494	0,4137	0,2484	0,2222	0,1336	0,2217	0,1331
1500	4,987	3,001	4,970	2,984	0,4155	0,2499	0,4138	0,2484	0,2225	0,1339	0,2217	0,1331
1600	4,995	3,009	4,971	2,985	0,4161	0,2505	0,4139	0,2485	0,2228	0,1342	0,2218	0,1332
1700	5,004	3,018	4,972	2,986	0,4168	0,2513	0,4140	0,2487	0,2232	0,1346	0,2218	0,1332
1800	5,015	3,029	4,976	2,990	0,4177	0,2522	0,4143	0,2490	0,2237	0,1351	0,2220	0,1334
1900	5,027	3,041	4,977	2,991	0,4188	0,2532	0,4144	0,2490	0,2243	0,1357	0,2220	0,1334
2000	5,041	3,055	4,979	2,993	0,4199	0,2543	0,4146	0,2492	0,2249	0,1363	0,2221	0,1335
2100	5,055	3,069	4,982	2,996	0,4212	0,2556	0,4149	0,2495	0,2255	0,1369	0,2223	0,1337
2200	5,072	3,086	4,986	3,000	0,4225	0,2569	0,4152	0,2498	0,2263	0,1377	0,2224	0,1338
2300	5,089	3,103	4,990	3,004	0,4239	0,2583	0,4155	0,2501	0,2270	0,1384	0,2226	0,1340
2400	5,107	3,121	4,994	3,008	0,4254	0,2598	0,4158	0,2505	0,2278	0,1392	0,2228	0,1342
2500	5,125	3,139	4,999	3,013	0,4270	0,2614	0,4162	0,2509	0,2287	0,1401	0,2230	0,1344
2600	5,144	3,158	5,004	3,018	0,4286	0,2630	0,4167	0,2513	0,2295	0,1409	0,2233	0,1346
2700	5,164	3,178	5,009	3,023	0,4302	0,2646	0,4171	0,2517	0,2304	0,1418	0,2235	0,1349
2800	5,183	3,197	5,015	3,029	0,4318	0,2662	0,4176	0,2522	0,2312	0,1426	0,2238	0,1351
2900	5,203	3,217	5,021	3,035	0,4334	0,2679	0,4181	0,2527	0,2321	0,1435	0,2240	0,1354
3000	5,223	3,237	5,027	3,041	0,4351	0,2695	0,4186	0,2532	0,2330	0,1444	0,2243	0,1357

Энтальпия и энтропия атомарного углерода С

Таблица 49

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия			Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μ_i	<i>i</i>	<i>i'</i>	μ_S	<i>S</i>	<i>S'</i>		μ_i	<i>i</i>	<i>i'</i>	μ_S	<i>S</i>	<i>S'</i>
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/мм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/мм ³ град	°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/мм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/мм ³ град
0	0	0	0	0	0	0	1600	7 953	662,5	354,8	9,569	0,7972	0,4269
100	497,5	41,45	22,20	1,552	0,1293	0,0693	1700	8 453	704,2	377,1	9,829	0,8188	0,4385
200	994,6	82,86	44,37	2,732	0,2276	0,1219	1800	8 954	745,9	399,5	10,076	0,8394	0,4495
300	1491	124,2	66,54	3,685	0,3070	0,1644	1900	9 455	787,7	421,8	10,313	0,8591	0,4601
400	1988	165,6	88,70	4,483	0,3735	0,2000	2000	9 958	829,6	444,3	10,539	0,8780	0,4702
500	2485	207,0	110,9	5,171	0,4308	0,2307	2100	10 460	871,6	466,8	10,756	0,8960	0,4799
600	2982	248,4	133,0	5,775	0,4811	0,2577	2200	10 970	913,8	489,4	10,965	0,9135	0,4892
700	3478	289,7	155,2	6,314	0,5260	0,2817	2300	11 480	956,1	512,0	11,166	0,9302	0,4982
800	3975	331,1	177,3	6,799	0,5664	0,3033	2400	11 990	998,5	534,8	11,361	0,9464	0,5069
900	4471	372,5	199,5	7,242	0,6033	0,3231	2500	12 500	1041	557,1	11,549	0,9621	0,5153
1000	4968	413,8	221,6	7,648	0,6371	0,3412	2600	13 010	1084	580,5	11,730	0,9772	0,5233
1100	5465	455,2	243,8	8,024	0,6685	0,3580	2700	13 530	1127	603,4	11,907	0,9919	0,5312
1200	5961	496,6	266,0	8,373	0,6975	0,3736	2800	14 040	1170	626,5	12,077	1,006	0,5388
1300	6459	538,0	288,1	8,700	0,7248	0,3882	2900	14 560	1213	649,6	12,244	1,020	0,5463
1400	6956	579,5	310,3	9,006	0,7503	0,4018	3000	15 080	1256	672,9	12,405	1,033	0,5535
1500	7454	621,0	332,6	9,295	0,7743	0,4147							

Теплоемкость кислорода O₂

Таблица 50

Температура <i>t</i> °C	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	6,992	5,006	6,992	5,006	0,2185	0,1564	0,2185	0,1564	0,3119	0,2233	0,3119	0,2233
100	7,136	5,150	7,055	5,069	0,2230	0,1609	0,2205	0,1584	0,3184	0,2298	0,3147	0,2261
200	7,360	5,374	7,149	5,163	0,2300	0,1679	0,2234	0,1613	0,3284	0,2397	0,3189	0,2303
300	7,603	5,617	7,261	5,275	0,2376	0,1755	0,2269	0,1648	0,3392	0,2506	0,3239	0,2353
400	7,824	5,838	7,375	5,389	0,2445	0,1824	0,2305	0,1684	0,3491	0,2605	0,3290	0,2404
500	8,013	6,027	7,484	5,498	0,2504	0,1833	0,2339	0,1718	0,3575	0,2689	0,3339	0,2453
600	8,169	6,183	7,586	5,600	0,2553	0,1932	0,2371	0,1750	0,3644	0,2758	0,3384	0,2498
700	8,299	6,313	7,679	5,693	0,2593	0,1973	0,2400	0,1779	0,3702	0,2816	0,3426	0,2540
800	8,408	6,422	7,763	5,777	0,2627	0,2007	0,2426	0,1805	0,3751	0,2865	0,3463	0,2577
900	8,499	6,513	7,840	5,854	0,2656	0,2035	0,2450	0,1829	0,3792	0,2906	0,3498	0,2612
1000	8,578	6,592	7,910	5,924	0,2682	0,2060	0,2472	0,1851	0,3827	0,2941	0,3529	0,2643
1100	8,650	6,664	7,974	5,988	0,2703	0,2082	0,2492	0,1871	0,3859	0,2973	0,3557	0,2671
1200	8,715	6,729	8,033	6,047	0,2723	0,2103	0,2510	0,1890	0,3888	0,3002	0,3584	0,2698
1300	8,778	6,792	8,088	6,102	0,2743	0,2122	0,2527	0,1907	0,3916	0,3030	0,3608	0,2722
1400	8,837	6,851	8,139	6,153	0,2762	0,2141	0,2543	0,1923	0,3942	0,3056	0,3631	0,2745
1500	8,895	6,909	8,188	6,202	0,2780	0,2159	0,2559	0,1938	0,3968	0,3082	0,3653	0,2767
1600	8,952	6,966	8,234	6,248	0,2797	0,2177	0,2573	0,1952	0,3994	0,3108	0,3673	0,2787
1700	9,008	7,022	8,278	6,292	0,2815	0,2194	0,2587	0,1966	0,4019	0,3133	0,3693	0,2807
1800	9,063	7,077	8,320	6,334	0,2832	0,2212	0,2600	0,1979	0,4043	0,3157	0,3712	0,2826
1900	9,118	7,132	8,361	6,375	0,2849	0,2229	0,2613	0,1992	0,4068	0,3182	0,3730	0,2844
2000	9,173	7,187	8,400	6,414	0,2867	0,2246	0,2625	0,2004	0,4092	0,3206	0,3748	0,2861
2100	9,228	7,242	8,438	6,452	0,2884	0,2263	0,2637	0,2016	0,4117	0,3231	0,3764	0,2878
2200	9,281	7,295	8,475	6,489	0,2900	0,2280	0,2648	0,2028	0,4141	0,3255	0,3781	0,2895
2300	9,334	7,348	8,511	6,525	0,2917	0,2296	0,2660	0,2039	0,4164	0,3278	0,3797	0,2911
2400	9,385	7,399	8,547	6,561	0,2933	0,2312	0,2671	0,2050	0,4197	0,3301	0,3813	0,2927
2500	9,435	7,449	8,581	6,595	0,2948	0,2326	0,2682	0,2061	0,4209	0,3328	0,3828	0,2942
2600	9,484	7,498	8,615	6,629	0,2964	0,2343	0,2692	0,2072	0,4231	0,3345	0,3843	0,2957
2700	9,532	7,546	8,648	6,662	0,2979	0,2358	0,2702	0,2082	0,4253	0,3367	0,3858	0,2972

Энтальпия и энтропия кислорода O₂

Таблица 51

Температура <i>t</i> °C	Энтальпия						Температура <i>t</i> °C	Энтропия					
	μi	i	i'	μS	S	S'		μi	i	i'	μS	S	S'
	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град		ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0	1400	11 390	356,0	508,3	14,181	0,4432	0,6326
100	705,5	22,05	31,47	2,161	0,0675	0,0964	1500	12 280	383,8	547,9	14,695	0,4592	0,6555
200	1 430	44,68	63,78	3,884	0,1214	0,1732	1600	13 170	411,7	587,7	15,185	0,4745	0,6774
300	2 178	68,07	97,17	5,318	0,1662	0,2372	1700	14 070	439,8	627,8	15,652	0,4891	0,6982
400	2 950	92,20	131,6	6,560	0,2050	0,2926	1800	14 980	468,0	668,2	16,098	0,5031	0,7181
500	3 742	116,9	166,9	7,656	0,2393	0,3415	1900	15 890	496,5	708,7	16,527	0,5165	0,7373
600	4 552	142,3	203,0	8,640	0,2700	0,3854	2000	16 800	525,0	749,6	16,939	0,5293	0,7557
700	5 375	168,0	239,8	9,534	0,2979	0,4253	2100	17 720	553,8	790,4	17,335	0,5417	0,7733
800	6 210	194,1	277,0	10,350	0,3234	0,4617	2200	18 640	582,6	831,8	17,716	0,5536	0,7903
900	7 056	220,5	314,8	11,103	0,3470	0,4953	2300	19 570	611,8	873,3	18,085	0,5652	0,8068
1000	7 910	247,2	352,9	11,802	0,3688	0,5265	2400	20 510	641,0	915,1	18,442	0,5763	0,8227
1100	8 771	274,1	391,3	12,453	0,3892	0,5555	2500	21 450	670,5	957,0	18,788	0,5871	0,8382
1200	9 640	301,2	430,1	13,063	0,4082	0,5827	2600	22 400	699,9	999,2	19,122	0,5976	0,8531
1300	10 510	328,5	469,0	13,638	0,4262	0,6084	2700	23 350	729,5	1042	19,448	0,6078	0,8676

Таблица 52

Теплоемкость азота N₂

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pT}	μc_{vT}	c_p	c_v	c_{pT}	c_{vT}	c'_p	c'_v	c'_{pT}	c'_{vT}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	6,954	4,968	6,954	4,968	0,2482	0,1773	0,2482	0,1773	0,3102	0,2216	0,3102	0,2216
100	6,974	4,983	6,961	4,975	0,2489	0,1780	0,2485	0,1776	0,3111	0,2225	0,3106	0,2220
200	7,039	5,053	6,931	4,995	0,2512	0,1804	0,2492	0,1783	0,3140	0,2254	0,3114	0,2228
300	7,154	5,168	7,018	5,032	0,2554	0,1845	0,2505	0,1796	0,3192	0,2306	0,3131	0,2245
400	7,303	5,317	7,070	5,084	0,2607	0,1898	0,2524	0,1815	0,3258	0,2372	0,3154	0,2268
500	7,464	5,478	7,133	5,147	0,2664	0,1955	0,2546	0,1837	0,3330	0,2444	0,3182	0,2296
600	7,624	5,638	7,201	5,215	0,2721	0,2012	0,2570	0,1861	0,3401	0,2515	0,3213	0,2327
700	7,772	5,786	7,273	5,287	0,2774	0,2065	0,2596	0,1887	0,3467	0,2581	0,3245	0,2359
800	7,906	5,920	7,344	5,358	0,2822	0,2113	0,2621	0,1912	0,3527	0,2641	0,3276	0,2390
900	8,025	6,039	7,413	5,427	0,2864	0,2156	0,2646	0,1937	0,3583	0,2694	0,3307	0,2421
1000	8,130	6,144	7,479	5,493	0,2902	0,2193	0,2670	0,1961	0,3627	0,2741	0,3337	0,2451
1100	8,222	6,236	7,542	5,556	0,2935	0,2226	0,2692	0,1933	0,3668	0,2782	0,3365	0,2479
1200	8,303	6,317	7,602	5,616	0,2964	0,2255	0,2713	0,2005	0,3704	0,2818	0,3392	0,2506
1300	8,374	6,388	7,659	5,673	0,2989	0,2280	0,2734	0,2025	0,3736	0,2850	0,3417	0,2531
1400	8,436	6,450	7,713	5,727	0,3011	0,2302	0,2753	0,2044	0,3764	0,2378	0,3441	0,2555
1500	8,490	6,504	7,763	5,777	0,3030	0,2322	0,2771	0,2062	0,3788	0,2392	0,3463	0,2577
1600	8,538	6,552	7,810	5,824	0,3048	0,2339	0,2788	0,2079	0,3809	0,2923	0,3484	0,2598
1700	8,581	6,595	7,854	5,868	0,3063	0,2354	0,2803	0,2095	0,3828	0,2942	0,3504	0,2618
1800	8,620	6,634	7,895	5,909	0,3077	0,2368	0,2818	0,2109	0,3846	0,2960	0,3522	0,2636
1900	8,655	6,669	7,934	5,948	0,3089	0,2380	0,2832	0,2123	0,3861	0,2975	0,3540	0,2654
2000	8,686	6,700	7,971	5,985	0,3100	0,2391	0,2845	0,2136	0,3375	0,2989	0,3556	0,2670
2100	8,714	6,728	8,006	6,020	0,3110	0,2401	0,2858	0,2149	0,3888	0,3002	0,3572	0,2686
2200	8,740	6,754	8,039	6,053	0,3120	0,2411	0,2869	0,2161	0,3899	0,3013	0,3587	0,2700
2300	8,764	6,778	8,070	6,084	0,3128	0,2419	0,2880	0,2172	0,3910	0,3024	0,3600	0,2714
2400	8,786	6,800	8,099	6,113	0,3136	0,2427	0,2891	0,2182	0,3920	0,3034	0,3613	0,2727
2500	8,806	6,820	8,126	6,140	0,3143	0,2434	0,2900	0,2192	0,3929	0,3043	0,3625	0,2739

Таблица 53

Энтальпия и энтропия азота N₂

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия			Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'		μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль			ккал/моль град			°C	ккал/моль			ккал/моль град		
0	0	0	0	0	0	0	1300	9 957	355,4	444,2	13,013	0,4645	0,5806
100	696,1	24,85	31,06	2,171	0,0775	0,0969	1400	10 800	385,4	481,7	13,531	0,4830	0,6037
200	1 396	49,84	62,28	3,833	0,1368	0,1710	1500	11 640	415,7	519,5	14,022	0,5005	0,6256
300	2 105	75,15	93,93	5,193	0,1854	0,2317	1600	12 500	446,1	557,4	14,489	0,5172	0,6464
400	2 828	100,1	126,2	6,355	0,2268	0,2835	1700	13 350	476,5	595,7	14,935	0,5331	0,6663
500	3 567	127,3	159,1	7,377	0,2633	0,3291	1800	14 210	507,2	634,0	15,360	0,5483	0,6853
600	4 321	154,2	192,8	8,294	0,2961	0,3700	1900	15 070	538,1	672,6	15,767	0,5628	0,7034
700	5 091	181,7	227,2	9,129	0,3259	0,4073	2000	15 940	569,0	711,2	16,157	0,5767	0,7208
800	5 875	209,7	262,1	9,896	0,3532	0,4415	2100	16 810	600,2	750,1	16,531	0,5901	0,7375
900	6 672	238,1	297,6	10,606	0,3786	0,4732	2200	17 690	631,2	789,1	16,892	0,6029	0,7536
1000	7 479	267,0	333,7	11,266	0,4021	0,5026	2300	18 560	662,4	828,0	17,239	0,6153	0,7691
1100	8 296	296,1	370,2	11,885	0,4242	0,5302	2400	19 440	693,8	867,1	17,573	0,6273	0,7840
1200	9 122	325,6	407,0	12,466	0,4449	0,5561	2500	20 320	725,0	906,3	17,899	0,6388	0,7984

Таблица 54

Теплоемкость атмосферного азота $N_2 атм$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	6,931	4,945	6,931	4,945	0,2461	0,1756	0,2461	0,1756	0,3092	0,2206	0,3092	0,2206
100	6,951	4,965	6,938	4,952	0,2469	0,1763	0,2464	0,1759	0,3101	0,2215	0,3095	0,2209
200	7,016	5,030	6,958	4,968	0,2491	0,1786	0,2471	0,1766	0,3130	0,2244	0,3104	0,2218
300	7,130	5,144	6,995	5,009	0,2532	0,1827	0,2484	0,1779	0,3181	0,2295	0,3121	0,2235
400	7,277	5,231	7,046	5,060	0,2584	0,1879	0,2502	0,1797	0,3247	0,2361	0,3144	0,2258
500	7,435	5,450	7,109	5,123	0,2641	0,1935	0,2524	0,1819	0,3318	0,2432	0,3171	0,2285
600	7,594	5,608	7,176	5,190	0,2677	0,1932	0,2548	0,1843	0,3333	0,2502	0,3201	0,2315
700	7,741	5,755	7,247	5,261	0,2749	0,2044	0,2574	0,1868	0,3453	0,2567	0,3233	0,2347
800	7,873	5,887	7,317	5,331	0,2796	0,2091	0,2599	0,1893	0,3513	0,2627	0,3265	0,2379
900	7,991	6,005	7,386	5,400	0,2838	0,2132	0,2623	0,1918	0,3555	0,2679	0,3295	0,2409
1000	8,095	6,109	7,451	5,465	0,2874	0,2169	0,2646	0,1941	0,3611	0,2725	0,3324	0,2438
1100	8,186	6,200	7,513	5,527	0,2907	0,2202	0,2668	0,1963	0,3652	0,2766	0,3352	0,2466
1200	8,266	6,280	7,573	5,587	0,2935	0,2230	0,2689	0,1984	0,3688	0,2802	0,3378	0,2492
1300	8,336	6,350	7,629	5,643	0,2960	0,2255	0,2709	0,2004	0,3719	0,2833	0,3404	0,2518
1400	8,397	6,411	7,682	5,696	0,2982	0,2277	0,2728	0,2023	0,3746	0,2860	0,3427	0,2541
1500	8,451	6,465	7,732	5,746	0,3001	0,2296	0,2746	0,2040	0,3770	0,2884	0,3449	0,2563
1600	8,498	6,512	7,778	5,792	0,3018	0,2313	0,2762	0,2057	0,3791	0,2905	0,3470	0,2584
1700	8,541	6,555	7,822	5,836	0,3033	0,2328	0,2778	0,2072	0,3810	0,2924	0,3490	0,2604
1800	8,579	6,593	7,862	5,876	0,3047	0,2341	0,2792	0,2087	0,3827	0,2941	0,3508	0,2622
1900	8,614	6,628	7,901	5,915	0,3059	0,2354	0,2806	0,2100	0,3843	0,2957	0,3525	0,2639
2000	8,644	6,658	7,937	5,951	0,3070	0,2364	0,2819	0,2113	0,3857	0,2971	0,3541	0,2655
2100	8,672	6,686	7,972	5,986	0,3080	0,2374	0,2831	0,2126	0,3869	0,2983	0,3557	0,2671
2200	8,698	6,712	8,005	6,019	0,3089	0,2383	0,2843	0,2137	0,3880	0,2994	0,3571	0,2685
2300	8,721	6,735	8,035	6,049	0,3097	0,2392	0,2853	0,2148	0,3891	0,3005	0,3585	0,2699
2400	8,743	6,757	8,044	6,078	0,3105	0,2400	0,2864	0,2158	0,3901	0,3015	0,3598	0,2712
2500	8,763	6,777	8,091	6,105	0,3112	0,2407	0,2873	0,2168	0,3909	0,3023	0,3610	0,2723

Таблица 55

Энтальпия и энтропия атмосферного азота $N_2 атм$

Температура t	Энтальпия			Энтропия			Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'		μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град	°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0	1300	9 918	352,2	442,5	12,958	0,4602	0,5781
100	693,8	24,64	30,95	2,164	0,0768	0,0965	1400	10 750	381,9	479,8	13,480	0,4787	0,6014
200	1 392	49,42	62,08	3,821	0,1357	0,1705	1500	11 598	411,9	517,4	13,969	0,4961	0,6232
300	2 099	74,52	93,63	5,176	0,1838	0,2309	1600	12 440	441,9	555,2	14,434	0,5126	0,6440
400	2 818	100,1	125,8	6,333	0,2249	0,2825	1700	13 300	472,3	593,3	14,877	0,5283	0,6637
500	3 555	126,2	158,6	7,352	0,2611	0,3280	1800	14 150	502,6	631,4	15,300	0,5433	0,6826
600	4 306	152,9	192,1	8,266	0,2935	0,3688	1900	15 010	533,1	669,8	15,705	0,5577	0,7007
700	5 073	180,2	226,3	9,097	0,3230	0,4059	2000	15 870	563,8	708,2	16,093	0,5715	0,7180
800	5 854	207,9	261,2	9,861	0,3502	0,4399	2100	16 740	594,5	747,0	16,466	0,5847	0,7346
900	6 647	236,1	296,6	10,568	0,3753	0,4715	2200	17 610	625,5	785,6	16,825	0,5975	0,7506
1000	7 451	264,6	332,4	11,226	0,3992	0,5008	2300	18 480	656,2	824,6	17,170	0,6097	0,7660
1100	8 264	293,5	368,7	11,841	0,4205	0,5283	2400	19 350	687,4	863,5	17,503	0,6216	0,7809
1200	9 088	322,7	405,4	12,419	0,4410	0,5541	2500	20 230	718,3	902,5	17,824	0,6330	0,7952

Таблица 56

Теплоемкость воздуха

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	ϵ_p	ϵ_v	ϵ_{pt}	ϵ_{vt}	ϵ'_p	ϵ'_v	ϵ'_{pt}	ϵ'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	6,944	4,958	6,944	4,958	0,2397	0,1711	0,2397	0,1711	0,3098	0,2212	0,3098	0,2212
100	6,990	5,004	6,963	4,977	0,2413	0,1727	0,2403	0,1718	0,3119	0,2233	0,3106	0,2220
200	7,088	5,102	6,998	5,012	0,2447	0,1761	0,2416	0,1730	0,3162	0,2276	0,3122	0,2236
300	7,229	5,243	7,051	5,065	0,2495	0,1810	0,2434	0,1748	0,3225	0,2339	0,3146	0,2260
400	7,392	5,406	7,115	5,129	0,2552	0,1866	0,2456	0,1771	0,3298	0,2412	0,3174	0,2288
500	7,557	5,571	7,188	5,202	0,2609	0,1923	0,2481	0,1796	0,3372	0,2486	0,3207	0,2321
600	7,715	5,729	7,262	5,276	0,2663	0,1978	0,2507	0,1821	0,3442	0,2556	0,3240	0,2354
700	7,858	5,872	7,338	5,352	0,2712	0,2027	0,2533	0,1847	0,3506	0,2620	0,3274	0,2388
800	7,985	5,999	7,411	5,425	0,2756	0,2071	0,2558	0,1873	0,3563	0,2677	0,3306	0,2420
900	8,098	6,112	7,481	5,495	0,2795	0,2110	0,2583	0,1897	0,3613	0,2727	0,3338	0,2451
1000	8,196	6,210	7,547	5,561	0,2829	0,2144	0,2605	0,1920	0,3657	0,2771	0,3367	0,2481
1100	8,283	6,297	7,610	5,624	0,2859	0,2174	0,2627	0,1941	0,3695	0,2809	0,3395	0,2509
1200	8,360	6,374	7,669	5,683	0,2886	0,2200	0,2647	0,1962	0,3730	0,2844	0,3422	0,2536
1300	8,429	6,443	7,725	5,739	0,2909	0,2224	0,2667	0,1981	0,3760	0,2874	0,3447	0,2561
1400	8,490	6,504	7,778	5,792	0,2930	0,2245	0,2685	0,1999	0,3788	0,2901	0,3470	0,2584
1500	8,544	6,558	7,828	5,842	0,2949	0,2264	0,2702	0,2016	0,3812	0,2926	0,3492	0,2606
1600	8,593	6,607	7,874	5,888	0,2966	0,2281	0,2718	0,2032	0,3834	0,2948	0,3513	0,2627
1700	8,639	6,653	7,918	5,932	0,2982	0,2296	0,2733	0,2047	0,3854	0,2968	0,3532	0,2646
1800	8,681	6,695	7,958	5,972	0,2996	0,2311	0,2747	0,2062	0,3873	0,2987	0,3551	0,2665
1900	8,720	6,734	7,997	6,011	0,3010	0,2324	0,2761	0,2075	0,3890	0,3004	0,3568	0,2682
2000	8,755	6,769	8,035	6,049	0,3022	0,2337	0,2773	0,2088	0,3906	0,3020	0,3585	0,2698
2100	8,789	6,803	8,070	6,084	0,3034	0,2348	0,2786	0,2100	0,3921	0,3035	0,3600	0,2714
2200	8,820	6,834	8,103	6,117	0,3045	0,2359	0,2797	0,2112	0,3935	0,3049	0,3615	0,2729
2300	8,850	6,864	8,135	6,149	0,3055	0,2369	0,2808	0,2123	0,3948	0,3062	0,3629	0,2743
2400	8,878	6,892	8,165	6,179	0,3065	0,2379	0,2819	0,2133	0,3961	0,3075	0,3643	0,2757
2500	8,904	6,918	8,194	6,208	0,3074	0,2388	0,2828	0,2143	0,3972	0,3086	0,3655	0,2769

Таблица 57

Энтальпия и энтропия воздуха

Температура t	Энтальпия			Энтропия			Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'		μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град	°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0	1300	10 040	346,7	448,1	13,101	0,4522	0,5845
100	696,3	24,03	31,06	2,164	0,0746	0,0965	1400	10 890	375,9	485,8	13,628	0,4704	0,6080
200	1 400	48,32	62,44	3,834	0,1324	0,1711	1500	11 740	405,3	523,8	14,122	0,4875	0,6300
300	2 115	73,02	94,38	5,206	0,1797	0,2323	1600	12 600	434,9	562,1	14,592	0,5037	0,6510
400	2 846	98,24	127,0	6,381	0,2203	0,2847	1700	13 460	464,6	600,4	15,040	0,5224	0,6710
500	3 594	124,1	160,4	7,416	0,2560	0,3309	1800	14 320	494,5	639,2	15,468	0,5339	0,6901
600	4 357	150,4	194,4	8,345	0,2880	0,3723	1900	15 190	524,6	677,9	15,878	0,5481	0,7084
700	5 137	177,3	229,2	9,189	0,3172	0,4100	2000	16 070	554,6	717,0	16,271	0,5617	0,7259
800	5 929	204,6	264,5	9,964	0,3439	0,4445	2100	16 950	585,1	756,0	16,649	0,5747	0,7428
900	6 733	232,5	300,4	10,680	0,3687	0,4765	2200	17 830	615,3	795,3	17,012	0,5872	0,7590
1000	7 547	260,5	336,7	11,347	0,3917	0,5062	2300	18 710	645,8	834,7	17,363	0,6031	0,7746
1100	8 371	289,0	373,5	11,970	0,4132	0,5340	2400	19 600	676,6	874,3	17,700	0,6110	0,7897
1200	9 203	317,6	410,6	12,555	0,4334	0,5601	2500	20 490	707,0	913,8	18,027	0,6223	0,8043

Теплоемкость водорода H₂

Таблица 58

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	6,835	4,849	6,835	4,849	3,3904	2,4053	3,3904	2,4053	0,3049	0,2163	0,3049	0,2163
100	6,957	4,971	6,911	4,925	3,4509	2,4658	3,4281	2,4430	0,3104	0,2218	0,3083	0,2197
200	6,984	4,998	6,944	4,958	3,4643	2,4792	3,4444	2,4593	0,3116	0,2230	0,3098	0,2212
300	6,998	5,012	6,956	4,970	3,4712	2,4861	3,4504	2,4653	0,3122	0,2236	0,3103	0,2217
400	7,021	5,035	6,971	4,985	3,4826	2,4975	3,4578	2,4727	0,3132	0,2246	0,3110	0,2224
500	7,060	5,074	6,986	5,000	3,5020	2,5169	3,4653	2,4802	0,3150	0,2264	0,3117	0,2231
600	7,116	5,130	7,002	5,016	3,5298	2,5446	3,4732	2,4881	0,3175	0,2289	0,3124	0,2238
700	7,189	5,203	7,024	5,038	3,5660	2,5808	3,4841	2,4990	0,3207	0,2321	0,3134	0,2248
800	7,278	5,292	7,050	5,064	3,6101	2,6250	3,4970	2,5119	0,3247	0,2361	0,3145	0,2259
900	7,373	5,387	7,081	5,095	3,6572	2,6721	3,5124	2,5273	0,3289	0,2403	0,3159	0,2273
1000	7,472	5,486	7,115	5,129	3,7063	2,7212	3,5293	2,5441	0,3333	0,2447	0,3174	0,2288
1100	7,577	5,591	7,152	5,166	3,7584	2,7733	3,5476	2,5625	0,3380	0,2494	0,3191	0,2305
1200	7,680	5,694	7,191	5,205	3,8095	2,8244	3,5670	2,5818	0,3426	0,2540	0,3208	0,2322
1300	7,784	5,798	7,234	5,248	3,8611	2,8760	3,5883	2,6032	0,3473	0,2587	0,3227	0,2341
1400	7,882	5,896	7,277	5,291	3,9097	2,9246	3,6096	2,6245	0,3516	0,2630	0,3246	0,2360
1500	7,976	5,990	7,320	5,334	3,9563	2,9712	3,6309	2,6458	0,3558	0,2672	0,3266	0,2380
1600	8,064	6,078	7,364	5,378	4,0000	3,0149	3,6528	2,6677	0,3598	0,2712	0,3285	0,2399
1700	8,148	6,162	7,407	5,421	4,0417	3,0565	3,6741	2,6890	0,3635	0,2749	0,3304	0,2418
1800	8,227	6,241	7,450	5,464	4,0808	3,0957	3,6954	2,7103	0,3670	0,2784	0,3324	0,2438
1900	8,303	6,317	7,493	5,507	4,1185	3,1334	3,7168	2,7316	0,3704	0,2818	0,3343	0,2457
2000	8,373	6,387	7,535	5,549	4,1533	3,1681	3,7376	2,7525	0,3735	0,2849	0,3362	0,2476
2100	8,439	6,453	7,577	5,591	4,1860	3,2009	3,7584	2,7733	0,3765	0,2879	0,3380	0,2494
2200	8,504	6,518	7,617	5,631	4,2182	3,2331	3,7783	2,7931	0,3794	0,2908	0,3398	0,2512
2300	8,563	6,577	7,657	5,671	4,2475	3,2624	3,7981	2,8180	0,3820	0,2934	0,3416	0,2530
2400	8,620	6,634	7,696	5,710	4,2758	3,2907	3,8175	2,8323	0,3846	0,2960	0,3433	0,2547
2500	8,674	6,688	7,735	5,749	4,3026	3,3175	3,8368	2,8517	0,3870	0,2984	0,3451	0,2565
2600	8,725	6,739	7,772	5,786	4,3279	3,3428	3,8552	2,8700	0,3893	0,3006	0,3467	0,2581
2700	8,773	6,787	7,808	5,822	4,3517	3,3666	3,8730	2,8879	0,3914	0,3028	0,3483	0,2597

Энтальпия и энтропия водорода H₂

Таблица 59

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия			Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия			
	μi	i	i'	μS	S	S'		μi	i	i'	μS	S	S'	
	ккал/моль			ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			ккал/моль град			ккал/кг град
0	0	0	0	0	0	0	1400	10 190	5 053	454,4	12,917	6,407	0,5763	
100	691,1	342,8	30,83	2,112	1,048	0,0942	1500	10 980	5 446	439,9	13,377	6,635	0,5968	
200	1389	688,9	61,96	3,775	1,872	0,1684	1600	11 780	5 844	525,6	13,817	6,854	0,6164	
300	2087	1035	93,09	5,114	2,537	0,2281	1700	12 590	6 246	561,7	14,239	7,063	0,6352	
400	2788	1383	124,4	6,242	3,096	0,2785	1800	13 410	6 652	598,3	14,643	7,263	0,6533	
500	3493	1733	155,8	7,216	3,579	0,3219	1900	14 240	7 062	635,2	15,032	7,456	0,6706	
600	4201	2084	187,4	8,078	4,007	0,3604	2000	15 070	7 475	672,4	15,407	7,642	0,6873	
700	4917	2439	219,4	8,855	4,392	0,3950	2100	15 910	7 893	709,8	15,769	7,822	0,7035	
800	5640	2798	251,6	9,562	4,743	0,4266	2200	16 760	8 312	747,6	16,118	7,995	0,7191	
900	6373	3161	284,3	10,214	5,066	0,4557	2300	17 610	8 736	785,7	16,457	8,163	0,7342	
1000	7115	3529	317,4	10,822	5,368	0,4828	2400	18 470	9 162	823,9	16,785	8,326	0,7488	
1100	7867	3902	351,0	11,389	5,649	0,5081	2500	19 340	9 592	862,7	17,103	8,484	0,7630	
1200	8629	4280	385,0	11,925	5,915	0,5320	2600	20 210	10 020	901,4	17,411	8,636	0,7768	
1300	9404	4665	419,5	12,434	6,168	0,5547	2700	21 080	10 460	940,4	17,710	8,785	0,7901	

Таблица 60

Теплоемкость окиси углерода CO

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	6,956	4,970	6,956	4,970	0,2483	0,1774	0,2483	0,1774	0,3103	0,2217	0,3103	0,2217
100	6,989	5,003	6,969	4,983	0,2495	0,1786	0,2488	0,1779	0,3118	0,2232	0,3109	0,2223
200	7,081	5,095	6,999	5,013	0,2528	0,1819	0,2499	0,1790	0,3159	0,2273	0,3122	0,2236
300	7,221	5,240	7,050	5,064	0,2580	0,1871	0,2517	0,1808	0,3224	0,2338	0,3145	0,2259
400	7,398	5,412	7,115	5,129	0,2641	0,1932	0,2540	0,1831	0,3300	0,2414	0,3174	0,2288
500	7,573	5,587	7,189	5,203	0,2704	0,1995	0,2567	0,1857	0,3379	0,2492	0,3207	0,2321
600	7,739	5,753	7,267	5,281	0,2763	0,2054	0,2594	0,1885	0,3453	0,2567	0,3242	0,2356
700	7,888	5,902	7,345	5,359	0,2816	0,2107	0,2622	0,1913	0,3519	0,2633	0,3277	0,2391
800	8,019	6,033	7,421	5,435	0,2863	0,2154	0,2649	0,1940	0,3577	0,2691	0,3311	0,2425
900	8,134	6,14	7,494	5,508	0,2904	0,2195	0,2675	0,1966	0,3629	0,2743	0,3343	0,2457
1000	8,233	6,247	7,563	5,577	0,2939	0,2230	0,2700	0,1991	0,3673	0,2787	0,3374	0,2488
1100	8,318	6,332	7,628	5,642	0,2970	0,2261	0,2723	0,2014	0,3711	0,2825	0,3403	0,2517
1200	8,393	6,407	7,689	5,703	0,2996	0,2287	0,2745	0,2046	0,3744	0,2858	0,3430	0,2544
1300	8,458	6,472	7,745	5,759	0,3020	0,2311	0,2765	0,2056	0,3773	0,2887	0,3455	0,2569
1400	8,514	6,528	7,799	5,813	0,3040	0,2330	0,2784	0,2075	0,3798	0,2912	0,3479	0,2593
1500	8,564	6,578	7,848	5,862	0,3057	0,2348	0,2802	0,2093	0,3821	0,2935	0,3501	0,2615
1600	8,608	6,622	7,894	5,908	0,3073	0,2364	0,2818	0,2109	0,3841	0,2954	0,3522	0,2636
1700	8,647	6,661	7,937	5,951	0,3087	0,2378	0,2834	0,2124	0,3858	0,2972	0,3541	0,2655
1800	8,682	6,696	7,978	5,992	0,3100	0,2390	0,2848	0,2139	0,3873	0,2987	0,3559	0,2673
1900	8,713	6,727	8,016	6,030	0,3111	0,2402	0,2862	0,2153	0,3887	0,3001	0,3576	0,2690
2000	8,741	6,755	8,051	6,065	0,3121	0,2412	0,2874	0,2165	0,3900	0,3014	0,3592	0,2706
2100	8,767	6,781	8,085	6,099	0,3130	0,2421	0,2886	0,2177	0,3911	0,3025	0,3607	0,2721
2200	8,790	6,804	8,116	6,130	0,3138	0,2429	0,2897	0,2188	0,3921	0,3035	0,3621	0,2735
2300	8,812	6,826	8,146	6,160	0,3146	0,2437	0,2906	0,2199	0,3931	0,3045	0,3634	0,2748
2400	8,832	6,846	8,174	6,188	0,3153	0,2444	0,2918	0,2209	0,3940	0,3054	0,3647	0,2761
2500	8,850	6,864	8,201	6,215	0,3160	0,2450	0,2928	0,2219	0,3948	0,3062	0,3659	0,2773

Таблица 61

Энтальпия и энтропия окиси углерода CO

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия			Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'		μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль			ккал/моль град			°C	ккал/моль			ккал/моль град		
0	0	0	0	0	0	0	1300	10 070	359,5	449,2	13,137	0,4690	0,5861
100	696,9	24,88	31,09	2,174	0,0776	0,0970	1400	10 920	389,8	487,1	13,660	0,4877	0,6094
200	1400	49,98	62,44	3,842	0,1372	0,1714	1500	11 770	421,3	525,2	14,155	0,5054	0,6315
300	2115	75,51	94,35	5,213	0,1861	0,2326	1600	12 630	450,9	563,5	14,626	0,5222	0,6525
400	2846	101,6	127,0	6,388	0,2281	0,2850	1700	13 490	481,8	602,0	15,075	0,5382	0,6726
500	3595	128,4	160,4	7,425	0,2651	0,3312	1800	14 360	512,6	640,6	15,503	0,5535	0,6917
600	4360	155,6	194,5	8,356	0,2983	0,3728	1900	15 230	543,8	679,4	15,913	0,5681	0,7099
700	5142	183,5	229,4	9,203	0,3286	0,4108	2000	16 100	574,8	718,4	16,306	0,5821	0,7275
800	5937	211,9	264,9	9,981	0,3563	0,4453	2100	16 980	606,1	757,5	16,683	0,5956	0,7443
900	6745	241,8	300,9	10,701	0,3820	0,4774	2200	17 860	637,3	796,6	17,045	0,6085	0,7604
1000	7563	270,0	337,4	11,370	0,4059	0,5073	2300	18 740	668,8	835,8	17,394	0,6210	0,7760
1100	8391	299,5	374,3	11,996	0,4283	0,5352	2400	19 620	700,3	875,8	17,730	0,6333	0,7910
1200	9227	329,4	411,6	12,583	0,4491	0,5614	2500	20 500	732,0	914,8	18,055	0,6446	0,8055

Теплоемкость окиси азота NO

Таблица 62

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p				μc_v				$\mu c_{рт}$			
	μc_p	μc_v	$\mu c_{рт}$	$\mu c_{вт}$	c_p	c_v	$c_{рт}$	$c_{вт}$	c'_p	c'_v	$c'_{рт}$	$c'_{вт}$
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм³ град			
0	7,160	5,174	7,160	5,174	0,2386	0,1724	0,2386	0,1724	0,3194	0,2308	0,3194	0,2308
100	7,146	5,160	7,143	5,157	0,2381	0,1719	0,2381	0,1718	0,3188	0,2302	0,3187	0,2301
200	7,145	5,259	7,165	5,179	0,2414	0,1752	0,2388	0,1726	0,3232	0,2346	0,3197	0,2310
300	7,418	5,432	7,220	5,234	0,2472	0,1810	0,2406	0,1744	0,3309	0,2423	0,3221	0,2335
400	7,603	5,617	7,292	5,306	0,2534	0,1872	0,2430	0,1768	0,3392	0,2500	0,3253	0,2367
500	7,784	5,798	7,373	5,387	0,2594	0,1932	0,2457	0,1795	0,3473	0,2587	0,3289	0,2403
600	7,946	5,960	7,455	5,469	0,2648	0,1986	0,2484	0,1822	0,3545	0,2659	0,3326	0,2440
700	8,087	6,101	7,536	5,550	0,2695	0,2033	0,2511	0,1849	0,3618	0,2722	0,3362	0,2476
800	8,209	6,223	7,613	5,627	0,2736	0,2074	0,2537	0,1875	0,3662	0,2776	0,3396	0,2510
900	8,311	6,325	7,684	5,698	0,2770	0,2108	0,2561	0,1899	0,3708	0,2822	0,3438	0,2542
1000	8,399	6,413	7,752	5,766	0,2799	0,2137	0,2583	0,1921	0,3747	0,2861	0,3458	0,2572
1100	8,473	6,497	7,814	5,828	0,2824	0,2165	0,2604	0,1942	0,3780	0,2899	0,3486	0,2600
1200	8,537	6,551	7,872	5,886	0,2845	0,2183	0,2623	0,1961	0,3809	0,2923	0,3512	0,2626
1300	8,584	6,608	7,925	5,939	0,2864	0,2202	0,2641	0,1979	0,3834	0,2948	0,3536	0,2650
1400	8,644	6,658	7,975	5,989	0,2881	0,2219	0,2658	0,1996	0,3856	0,2970	0,3558	0,2672
1500	8,687	6,701	8,021	6,035	0,2895	0,2233	0,2673	0,2011	0,3876	0,2990	0,3578	0,2692
1600	8,724	6,738	8,065	6,079	0,2907	0,2245	0,2688	0,2026	0,3892	0,3006	0,3598	0,2712
1700	8,757	6,771	8,105	6,119	0,2918	0,2256	0,2701	0,2039	0,3917	0,3021	0,3616	0,2730
1800	8,788	6,802	8,142	6,156	0,2928	0,2267	0,2713	0,2051	0,3921	0,3035	0,3632	0,2746
1900	8,816	6,830	8,176	6,190	0,2938	0,2276	0,2725	0,2063	0,3933	0,3047	0,3648	0,2762
2000	8,843	6,857	8,209	6,223	0,2947	0,2285	0,2736	0,2074	0,3945	0,3059	0,3662	0,2776
2100	8,865	6,879	8,240	6,254	0,2954	0,2292	0,2746	0,2084	0,3955	0,3069	0,3676	0,2790
2200	8,884	6,898	8,269	6,283	0,2960	0,2299	0,2756	0,2094	0,3963	0,3077	0,3689	0,2803
2300	8,903	6,917	8,296	6,310	0,2966	0,2305	0,2765	0,2103	0,3972	0,3086	0,3701	0,2815
2400	8,921	6,935	8,319	6,335	0,2973	0,2311	0,2773	0,2111	0,3980	0,3094	0,3712	0,2826
2500	8,938	6,952	8,346	6,360	0,2978	0,2317	0,2781	0,2119	0,3988	0,3101	0,3723	0,2837
2600	8,955	6,969	8,369	6,383	0,2984	0,2322	0,2789	0,2127	0,3995	0,3109	0,3734	0,2848
2700	8,971	6,985	8,391	6,405	0,2989	0,2328	0,2796	0,2134	0,4002	0,3116	0,3743	0,2857
2800	8,986	7,000	8,412	6,426	0,2994	0,2333	0,2803	0,2141	0,4009	0,3123	0,3753	0,2867
2900	9,001	7,015	8,432	6,446	0,2999	0,2338	0,2810	0,2148	0,4016	0,3130	0,3762	0,2876
3000	9,015	7,029	8,451	6,465	0,3004	0,2342	0,2816	0,2154	0,4022	0,3136	0,3770	0,2884

Энтальпия и энтропия окиси азота NO

Таблица 63

Температура <i>t</i>	Энтальпия						Температура <i>t</i>	Энтропия					
	μi			μS				i			S		
	μi	i	i'	μS	S	S'		i	i'	i''	S	S'	S''
°C	ккал/моль			ккал/кг град			°C	ккал/моль			ккал/кг град		
	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм³ град	°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм³ град
0	0	0	0	0	0	0	1600	12 900	430,1	575,7	14 973	0,4990	0,6680
100	714,3	23,80	31,87	2,229	0,0742	0,0994	1700	13 780	459,2	614,7	15,427	0,5141	0,6883
200	1 433	47,76	63,94	3,936	0,1311	0,1756	1800	14 660	488,3	653,8	15,890	0,5285	0,7076
300	2 166	72,18	96,63	5,343	0,1780	0,2384	1900	15 530	517,8	693,1	16,273	0,5423	0,7261
400	2 917	97,20	130,1	6,549	0,2182	0,2922	2000	16 420	547,2	732,4	16,669	0,5555	0,7437
500	3 686	122,8	164,4	7,614	0,2537	0,2397	2100	17 300	576,7	772,0	17,051	0,5682	0,7607
600	4 473	149,0	199,6	8,571	0,2856	0,3824	2200	18 190	606,3	811,6	17,419	0,5805	0,7771
700	5 275	175,8	235,3	9,43	0,3146	0,4213	2300	19 080	636,0	851,2	17,772	0,5923	0,7929
800	6 090	203,0	271,7	10,243	0,3413	0,4569	2400	19 970	665,5	890,9	18,113	0,6036	0,8081
900	6 916	230,5	308,5	10,979	0,3658	0,4898	2500	20 860	695,3	930,8	18,442	0,6146	0,8228
1000	7 752	258,3	345,8	11,662	0,3885	0,5203	2600	21 760	725,1	970,8	18,759	0,6251	0,8369
1100	8 595	286,4	383,5	12,298	0,4098	0,5486	2700	22 660	754,9	1011	19,065	0,6353	0,8506
1200	9 446	314,8	421,4	12,897	0,4298	0,5753	2800	23 550	784,9	1051	19,361	0,6452	0,8638
1300	10 300	343,3	459,7	13,460	0,4486	0,6004	2900	24 450	814,9	1091	19,648	0,6548	0,8766
1400	11 160	372,1	498,1	13,991	0,4663	0,6242	3000	25 350	844,8	1131	19,928	0,6641	0,8891
1500	12 030	401,0	536,7	14,495	0,4831	0,6466							

Теплоемкость гидроксильной группы OH

Таблица 64

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μ_{c_p}	μ_{c_v}	$\mu_{c_{pT}}$	$\mu_{c_{vT}}$	c_p	c_v	c_{pT}	c_{vT}	c'_p	c'_v	c'_{pT}	c'_{vT}
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
°C												
0	7,163	5,177	7,163	5,177	0,4212	0,3044	0,4212	0,3044	0,3196	0,2310	0,3196	0,2310
100	7,081	5,095	7,108	5,122	0,4163	0,2995	0,4179	0,3011	0,3159	0,2273	0,3171	0,2287
200	7,046	5,060	7,090	5,094	0,4143	0,2975	0,4163	0,2995	0,3143	0,2257	0,3159	0,2273
300	7,045	5,059	7,070	5,084	0,4142	0,2974	0,4157	0,2989	0,3143	0,2257	0,3154	0,2268
400	7,071	5,085	7,066	5,080	0,4157	0,2989	0,4155	0,2987	0,3155	0,2269	0,3152	0,2266
500	7,128	5,142	7,071	5,085	0,4191	0,3023	0,4157	0,2989	0,3180	0,2294	0,3155	0,2269
600	7,206	5,220	7,087	5,101	0,4237	0,3069	0,4167	0,2999	0,3215	0,2329	0,3162	0,2276
700	7,304	5,318	7,111	5,125	0,4294	0,3126	0,4181	0,3013	0,3259	0,2373	0,3172	0,2286
800	7,412	5,426	7,141	5,155	0,4358	0,3190	0,4199	0,3031	0,3307	0,2421	0,3186	0,2300
900	7,524	5,538	7,177	5,191	0,4424	0,3256	0,4220	0,3052	0,3357	0,2471	0,3202	0,2316
1000	7,635	5,649	7,218	5,232	0,4489	0,3321	0,4244	0,3076	0,3406	0,2520	0,3220	0,2334
1100	7,744	5,758	7,263	5,277	0,4553	0,3385	0,4270	0,3102	0,3455	0,2569	0,3240	0,2354
1200	7,849	5,863	7,309	5,323	0,4615	0,3447	0,4297	0,3129	0,3502	0,2616	0,3261	0,2375
1300	7,949	5,963	7,354	5,368	0,4674	0,3506	0,4324	0,3156	0,3546	0,2660	0,3281	0,2395
1400	8,041	6,055	7,398	5,412	0,4728	0,3560	0,4350	0,3182	0,3587	0,2701	0,3301	0,2415
1500	8,128	6,142	7,443	5,457	0,4779	0,3611	0,4376	0,3208	0,3626	0,2740	0,3321	0,2435
1600	8,210	6,224	7,489	5,503	0,4827	0,3659	0,4403	0,3235	0,3663	0,2777	0,3341	0,2455
1700	8,286	6,300	7,534	5,548	0,4872	0,3704	0,4430	0,3262	0,3697	0,2811	0,3361	0,2475
1800	8,356	6,370	7,577	5,591	0,4913	0,3745	0,4455	0,3287	0,3728	0,2842	0,3380	0,2494
1900	8,421	6,435	7,619	5,633	0,4951	0,3783	0,4480	0,3312	0,3757	0,2871	0,3399	0,2513
2000	8,481	6,495	7,661	5,675	0,4986	0,3818	0,4504	0,3336	0,3784	0,2898	0,3418	0,2532
2100	8,538	6,552	7,702	5,716	0,5020	0,3852	0,4528	0,3360	0,3809	0,2923	0,3436	0,2550
2200	8,591	6,605	7,742	5,756	0,5051	0,3883	0,4552	0,3384	0,3833	0,2947	0,3454	0,2568
2300	8,641	6,655	7,781	5,795	0,5081	0,3913	0,4575	0,3407	0,3855	0,2969	0,3471	0,2585
2400	8,689	6,703	7,819	5,833	0,5109	0,3941	0,4597	0,3429	0,3876	0,2990	0,3488	0,2602
2500	8,737	6,751	7,855	5,869	0,5137	0,3969	0,4618	0,3450	0,3898	0,3012	0,3504	0,2618
2600	8,783	6,797	7,890	5,904	0,5194	0,3996	0,4639	0,3471	0,3918	0,3032	0,3520	0,2634
2700	8,827	6,841	7,924	5,938	0,5190	0,4022	0,4659	0,3491	0,3938	0,3052	0,3535	0,2649
2800	8,870	6,884	7,957	5,971	0,5215	0,4047	0,4678	0,3510	0,3957	0,3071	0,3550	0,2664
2900	8,911	6,925	7,989	6,003	0,5239	0,4071	0,4697	0,3529	0,3976	0,3090	0,3564	0,2678
3000	8,951	6,965	8,020	6,034	0,5263	0,4095	0,4715	0,3547	0,3993	0,3107	0,3578	0,2692

Энтальпия и энтропия гидроксильной группы OH

Таблица 65

Температура <i>t</i>	Энтальпия						Температура <i>t</i>	Энтальпия					
	Энтальпия			Энтропия				Энтальпия			Энтропия		
	μ_i	i	i'	μ_S	S	S'		μ_i	i	i'	μ_S	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град	°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0	1600	11 980	704,5	534,6	14,06	0,827	0,627
100	710,8	41,79	31,71	2,21	0,130	0,099	1700	12 810	753,1	571,4	14,49	0,852	0,646
200	1 416	83,26	63,18	3,85	0,226	0,172	1800	13 640	801,9	603,4	14,90	0,876	0,665
300	2 121	124,7	94,62	5,22	0,307	0,233	1900	14 480	851,2	645,8	15,30	0,900	0,683
400	2 826	166,2	126,1	6,36	0,374	0,284	2000	15 320	900,8	683,6	15,69	0,923	0,700
500	3 536	207,9	157,8	7,36	0,433	0,328	2100	16 170	950,9	721,6	16,07	0,945	0,717
600	4 252	250,0	189,7	8,25	0,485	0,368	2200	17 030	1001	759,9	16,43	0,966	0,733
700	4 978	292,7	222,0	9,05	0,532	0,404	2300	17 900	1052	798,3	16,77	0,986	0,748
800	5 713	335,9	254,9	9,78	0,575	0,436	2400	18 770	1103	837,1	17,10	1,005	0,763
900	6 459	379,8	288,2	10,45	0,614	0,466	2500	19 640	1155	876,0	17,42	1,024	0,777
1000	7 218	424,4	322,0	11,06	0,650	0,493	2600	20 510	1206	915,2	17,72	1,042	0,791
1100	7 989	469,7	356,4	11,63	0,684	0,519	2700	21 390	1258	954,5	18,01	1,059	0,803
1200	8 771	515,6	391,3	12,17	0,716	0,543	2800	22 280	1310	994,0	18,29	1,075	0,816
1300	9 560	562,1	426,5	12,68	0,746	0,566	2900	23 170	1362	1034	18,56	1,091	0,828
1400	10 360	609,0	462,1	13,16	0,774	0,587	3000	24 060	1415	1073	18,82	1,107	0,840
1500	11 160	656,4	498,2	13,62	0,801	0,608							

Таблица 66

Теплоемкость двуокиси углерода CO₂

Температура <i>t</i> °C	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pT}	μc_{vT}	c_p	c_v	c_{pT}	c_{vT}	c'_p	c'_v	c'_{pT}	c'_{vT}
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	8,565	6,579	8,565	6,579	0,1946	0,1495	0,1946	0,1495	0,3821	0,2935	0,3821	0,2935
100	9,603	7,617	9,103	7,117	0,2182	0,1731	0,2068	0,1617	0,4284	0,3398	0,4061	0,3175
200	10,435	8,449	9,568	7,582	0,2371	0,1920	0,2174	0,1723	0,4655	0,3769	0,4269	0,3383
300	11,110	9,124	9,973	7,987	0,2524	0,2073	0,2266	0,1815	0,4957	0,4071	0,4449	0,3563
400	11,670	9,684	10,330	8,344	0,2652	0,2200	0,2347	0,1896	0,5206	0,4320	0,4609	0,3723
500	12,137	10,151	10,646	8,660	0,2758	0,2307	0,2419	0,1968	0,5415	0,4529	0,4750	0,3864
600	12,528	10,542	10,928	8,942	0,2847	0,2395	0,2483	0,2032	0,5589	0,4703	0,4875	0,3989
700	12,856	10,870	11,181	9,195	0,2921	0,2470	0,2541	0,2089	0,5736	0,4850	0,4988	0,4102
800	13,131	11,145	11,408	9,422	0,2984	0,2532	0,2592	0,2141	0,5858	0,4972	0,5090	0,4204
900	13,364	11,378	11,612	9,626	0,3037	0,2585	0,2638	0,2187	0,5962	0,5076	0,5181	0,4295
1000	13,560	11,574	11,797	9,811	0,3081	0,2630	0,2681	0,2229	0,6050	0,5164	0,5263	0,4377
1100	13,727	11,741	11,966	9,980	0,3119	0,2668	0,2719	0,2268	0,6124	0,5238	0,5338	0,4452
1200	13,870	11,884	12,119	10,133	0,3152	0,2700	0,2754	0,2302	0,6188	0,5302	0,5407	0,4521
1300	13,993	12,007	12,258	10,272	0,3180	0,2728	0,2785	0,2334	0,6243	0,5357	0,5469	0,4583
1400	14,099	12,113	12,386	10,400	0,3204	0,2752	0,2814	0,2363	0,6290	0,5404	0,5526	0,4640
1500	14,190	12,204	12,503	10,517	0,3224	0,2773	0,2841	0,2390	0,6331	0,5445	0,5578	0,4692
1600	14,268	12,282	12,611	10,625	0,3242	0,2791	0,2865	0,2414	0,6365	0,5479	0,5626	0,4740
1700	14,336	12,350	12,711	10,725	0,3257	0,2806	0,2888	0,2437	0,6396	0,5510	0,5671	0,4785
1800	14,395	12,409	12,803	10,817	0,3271	0,2820	0,2909	0,2458	0,6422	0,5536	0,5712	0,4826
1900	14,445	12,459	12,888	10,902	0,3282	0,2831	0,2928	0,2477	0,6444	0,5558	0,5750	0,4864
2000	14,487	12,501	12,967	10,981	0,3292	0,2840	0,2946	0,2495	0,6463	0,5577	0,5785	0,4899
2100	14,522	12,536	13,040	11,054	0,3300	0,2848	0,2963	0,2512	0,6479	0,5592	0,5818	0,4932
2200	14,550	12,564	13,108	11,122	0,3306	0,2855	0,2978	0,2527	0,6491	0,5605	0,5848	0,4962
2300	14,571	12,585	13,171	11,185	0,3311	0,2860	0,2993	0,2541	0,6501	0,5615	0,5876	0,4990
2400	14,584	12,598	13,230	11,244	0,3314	0,2863	0,3006	0,2555	0,6506	0,5620	0,5902	0,5016
2500	14,590	12,604	13,284	11,298	0,3315	0,2864	0,3018	0,2567	0,6509	0,5623	0,5926	0,5040

Таблица 67

Энтальпия и энтропия двуокиси углерода CO₂

Температура <i>t</i> °C	Энтальпия			Энтропия			Температура <i>t</i> °C	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'		μi	i	i'	μS	S	S'
	ккал/моль			ккал/моль град				ккал/моль			ккал/моль град		
	ккал/кг	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/кг град	ккал/кг град	ккал/м ³ град		ккал/кг	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0	1300	15 940	362,1	711,0	20,102	0,4568	0,8968
100	910,3	20,68	40,61	2,831	0,0643	0,1263	1400	17 340	394,0	773,6	20,968	0,4764	0,9354
200	1 914	43,48	85,38	5,210	0,1184	0,2324	1500	18 750	426,2	836,7	21,789	0,4951	0,9721
300	2 992	67,98	133,5	7,275	0,1653	0,3246	1600	20 180	458,4	900,1	22,569	0,5128	1,0069
400	4 132	93,88	184,4	9,107	0,2069	0,4063	1700	21 610	491,0	964,1	23,313	0,5297	1,0401
500	5 323	121,0	237,5	10,756	0,2444	0,4799	1800	23 050	523,6	1028	24,026	0,5459	1,0719
600	6 557	149,0	292,5	12,256	0,2785	0,5468	1900	24 490	556,3	1093	24,703	0,5613	1,1021
700	7 827	177,9	349,2	13,632	0,3098	0,6082	2000	25 930	589,2	1157	25,354	0,5761	1,1311
800	9 126	207,4	407,2	14,903	0,3386	0,6649	2100	27 380	622,2	1222	25,978	0,5903	1,1590
900	10 450	237,4	466,3	16,084	0,3655	0,7176	2200	28 840	655,2	1287	26,578	0,6039	1,1858
1000	11 800	268,1	526,3	17,185	0,3905	0,7667	2300	30 290	688,4	1351	27,155	0,6170	1,2115
1100	13 160	299,1	587,2	18,127	0,4139	0,8127	2400	31 750	721,4	1416	27,711	0,6297	1,2363
1200	14 540	330,5	648,8	19,187	0,4360	0,8560	2500	33 210	754,5	1482	28,247	0,6418	1,2602

Таблица 68

Теплоемкость закиси азота N_2O

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	8,945	6,959	8,945	6,959	0,2032	0,1581	0,2032	0,1581	0,3991	0,3105	0,3991	0,3105
50	9,499	7,513	9,221	7,235	0,2158	0,1707	0,2095	0,1644	0,4238	0,3352	0,4114	0,3228
100	9,986	8,000	9,485	7,499	0,2269	0,1817	0,2155	0,1704	0,4455	0,3569	0,4232	0,3346
150	10,419	8,433	9,729	7,743	0,2367	0,1916	0,2210	0,1759	0,4648	0,3762	0,4340	0,3454
200	10,811	8,825	9,954	7,968	0,2456	0,2005	0,2261	0,1810	0,4823	0,3937	0,4441	0,3555
250	11,167	9,181	10,163	8,177	0,2537	0,2086	0,2309	0,1858	0,4982	0,4096	0,4534	0,3648
300	11,493	9,507	10,359	8,373	0,2611	0,2160	0,2353	0,1902	0,5127	0,4241	0,4621	0,3735
350	11,789	9,803	10,543	8,557	0,2678	0,2227	0,2395	0,1944	0,5259	0,4373	0,4704	0,3818
400	12,062	10,076	10,715	8,729	0,2740	0,2289	0,2434	0,1983	0,5381	0,4495	0,4780	0,3894
450	12,311	10,325	10,877	8,891	0,2797	0,2346	0,2471	0,2020	0,5492	0,4606	0,4853	0,3967
500	12,542	10,556	11,031	9,045	0,2849	0,2398	0,2506	0,2055	0,5595	0,4709	0,4921	0,4035
550	12,752	10,766	11,179	9,193	0,2897	0,2446	0,2540	0,2089	0,5689	0,4803	0,4987	0,4101
600	12,946	10,960	11,319	9,333	0,2941	0,2490	0,2572	0,2120	0,5776	0,4890	0,5050	0,4164
650	13,122	11,136	11,452	9,466	0,2981	0,2530	0,2602	0,2151	0,5854	0,4968	0,5109	0,4223
700	13,282	11,296	11,578	9,592	0,3017	0,2566	0,2630	0,2179	0,5926	0,5040	0,5165	0,4279
750	13,432	11,446	11,698	9,712	0,3052	0,2600	0,2658	0,2206	0,5992	0,5106	0,5219	0,4333
800	13,573	11,587	11,812	9,826	0,3084	0,2632	0,2684	0,2232	0,6055	0,5169	0,5270	0,4384
850	13,704	11,718	11,919	9,933	0,3113	0,2662	0,2708	0,2257	0,6114	0,5228	0,5317	0,4431
900	13,824	11,838	12,022	10,036	0,3141	0,2689	0,2731	0,2280	0,6167	0,5281	0,5363	0,4477
950	13,935	11,949	12,120	10,134	0,3166	0,2715	0,2753	0,2302	0,6217	0,5331	0,5407	0,4521
1000	14,038	12,052	12,213	10,227	0,3189	0,2738	0,2775	0,2323	0,6263	0,5377	0,5449	0,4563
1050	14,135	12,149	12,302	10,316	0,3211	0,2760	0,2795	0,2344	0,6306	0,5420	0,5488	0,4602
1100	14,226	12,240	12,388	10,402	0,3232	0,2789	0,2814	0,2363	0,6347	0,5461	0,5527	0,4641
1150	14,312	12,326	12,470	10,484	0,3251	0,2800	0,2833	0,2382	0,6385	0,5499	0,5563	0,4677

Таблица 69

Энтальпия и энтропия закиси азота N_2O

Температура t	Энтальпия			Энтропия			Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'		μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град	$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0	600	6 791	154,3	303,0	12,85	0,2918	0,5731
50	461,2	10,48	20,57	1,596	0,0363	0,0712	650	7 444	169,1	332,1	13,50	0,3066	0,6020
100	948,5	21,55	42,32	2,999	0,0681	0,1338	700	8 111	184,1	361,6	14,19	0,3224	0,6331
150	1 459	33,15	65,10	4,283	0,0973	0,1911	750	8 774	199,3	391,4	14,86	0,3376	0,6730
200	1 991	45,22	88,82	5,472	0,1243	0,2441	800	9 450	214,7	421,6	15,51	0,3523	0,6918
250	2 541	57,72	113,4	6,577	0,1494	0,2934	850	10 130	230,2	452,0	16,13	0,3665	0,7196
300	3 108	70,61	138,7	7,614	0,1730	0,3397	900	10 820	245,8	482,7	16,73	0,3801	0,7464
350	3 690	83,84	164,6	8,530	0,1938	0,3805	950	11 510	261,6	513,7	17,31	0,3932	0,7722
400	4 286	97,37	191,2	9,510	0,2161	0,4243	1000	12 210	277,5	544,9	17,87	0,4060	0,7973
450	4 895	111,7	218,4	10,38	0,2132	0,4632	1050	12 920	293,5	576,3	18,41	0,4183	0,8215
500	5 516	125,3	246,1	11,22	0,2548	0,5003	1100	13 630	309,6	607,9	18,94	0,4303	0,8449
550	6 148	139,7	274,3	12,01	0,2728	0,5357	1150	14 340	325,8	639,8	19,45	0,4419	0,8677

Таблица 70

Теплоемкость сернистого ангидрида SO₂

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	9,28	7,29	9,28	7,29	0,145	0,114	0,145	0,114	0,414	0,325	0,414	0,325
100	10,13	8,14	9,71	7,72	0,158	0,127	0,152	0,121	0,452	0,363	0,433	0,344
200	10,88	8,89	10,11	8,12	0,170	0,139	0,158	0,127	0,485	0,397	0,451	0,362
300	11,52	9,53	10,48	8,49	0,180	0,149	0,164	0,133	0,514	0,425	0,467	0,379
400	12,00	10,01	10,80	8,81	0,187	0,156	0,169	0,138	0,535	0,447	0,482	0,393
500	12,35	10,36	11,08	9,09	0,193	0,162	0,173	0,142	0,551	0,462	0,494	0,406
600	12,63	10,64	11,31	9,32	0,197	0,166	0,176	0,145	0,563	0,475	0,505	0,416
700	12,84	10,85	11,52	9,53	0,200	0,169	0,180	0,149	0,573	0,484	0,514	0,425
800	13,00	11,01	11,69	9,70	0,203	0,172	0,182	0,151	0,580	0,491	0,521	0,433
900	13,14	11,15	11,85	9,86	0,205	0,174	0,185	0,154	0,586	0,497	0,529	0,440
1000	13,24	11,25	11,98	9,99	0,207	0,176	0,187	0,156	0,591	0,502	0,534	0,446
1100	13,32	11,33	12,10	10,11	0,208	0,177	0,189	0,158	0,594	0,505	0,540	0,451
1200	13,39	11,40	12,20	10,21	0,209	0,178	0,190	0,159	0,597	0,509	0,544	0,455

Таблица 71

Энтальпия и энтропия сернистого ангидрида SO₂

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	971	15,16	43,32	3,00	0,0468	0,134
200	2 022	31,56	90,21	5,51	0,0860	0,246
300	3 144	49,07	140,3	7,65	0,1194	0,341
400	4 320	67,43	192,7	9,54	0,1489	0,426
500	5 540	86,47	247,2	11,23	0,1753	0,501
600	6 786	105,9	302,7	12,75	0,1990	0,569
700	8 064	125,9	359,8	14,14	0,2206	0,630
800	9 352	146,0	417,2	15,40	0,2404	0,687
900	10 665	166,5	475,8	16,56	0,2585	0,739
1000	11 980	187,0	534,5	17,64	0,2754	0,787
1100	13 310	207,8	594	18,65	0,2911	0,832
1200	14 640	228,5	653	19,59	0,3058	0,874

Таблица 72

Теплоемкость сероводорода H_2S

Температура t °C	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	8,07	6,08	8,07	6,08	0,237	0,178	0,237	0,178	0,360	0,271	0,360	0,271
100	8,34	6,35	8,20	6,21	0,245	0,186	0,241	0,182	0,372	0,283	0,366	0,277
200	8,70	6,71	8,36	6,37	0,255	0,197	0,245	0,187	0,388	0,299	0,373	0,283
300	9,12	7,13	8,54	6,55	0,268	0,209	0,251	0,192	0,407	0,318	0,381	0,292
400	9,55	7,56	8,74	6,75	0,280	0,222	0,258	0,198	0,426	0,337	0,390	0,301
500	9,97	7,98	8,94	6,95	0,293	0,234	0,262	0,204	0,445	0,356	0,399	0,310
600	10,37	8,38	9,15	7,16	0,304	0,246	0,268	0,210	0,463	0,374	0,408	0,319
700	10,75	8,76	9,35	7,36	0,315	0,257	0,274	0,216	0,480	0,391	0,417	0,328
800	11,08	9,09	9,55	7,56	0,325	0,267	0,280	0,222	0,494	0,406	0,426	0,337
900	11,38	9,39	9,73	7,74	0,334	0,276	0,285	0,227	0,508	0,419	0,434	0,345
1000	11,65	9,66	9,91	7,92	0,342	0,283	0,291	0,232	0,520	0,431	0,442	0,353
1100	11,88	9,89	10,08	8,09	0,349	0,290	0,296	0,237	0,530	0,441	0,450	0,361
1200	12,08	10,09	10,23	8,24	0,354	0,296	0,300	0,242	0,531	0,450	0,456	0,368

Таблица 73

Энтальпия и энтропия сероводорода H_2S

Температура t °C	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	820	24,1	36,6	2,51	0,074	0,112
200	1 672	49,0	74,6	4,53	0,133	0,202
300	2 562	75,3	114,3	6,23	0,183	0,278
400	3 496	103,2	156,0	7,73	0,227	0,345
500	4 470	131,0	199,5	9,09	0,267	0,406
600	5 490	160,8	244,8	10,33	0,303	0,461
700	6 545	191,8	291,9	11,47	0,336	0,512
800	7 640	224,0	340,8	12,54	0,368	0,559
900	8 757	256,5	390,6	13,54	0,397	0,604
1000	9 910	291,0	442,0	14,48	0,425	0,646
1100	11 088	325,6	494,7	15,37	0,451	0,686
1200	12 276	360,0	547,7	16,21	0,475	0,723

Таблица 74

Теплоемкость сероуглерода CS₂

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	10,63	8,64	10,63	8,64	0,140	0,113	0,140	0,113	0,474	0,385	0,474	0,385
100	11,62	9,63	11,15	9,16	0,153	0,126	0,146	0,120	0,518	0,430	0,497	0,409
200	12,35	10,36	11,58	9,59	0,162	0,136	0,152	0,126	0,551	0,462	0,517	0,428
300	12,87	10,88	11,92	9,93	0,169	0,143	0,157	0,130	0,574	0,485	0,532	0,443
400	13,27	11,28	12,21	10,22	0,174	0,148	0,160	0,134	0,592	0,503	0,545	0,456
500	13,57	11,58	12,45	10,46	0,178	0,152	0,163	0,137	0,605	0,517	0,555	0,467
600	13,80	11,81	12,66	10,67	0,181	0,155	0,166	0,140	0,616	0,527	0,565	0,476
700	13,97	11,98	12,84	10,85	0,183	0,157	0,169	0,142	0,623	0,534	0,573	0,484
800	14,11	12,12	12,99	11,00	0,185	0,159	0,171	0,144	0,629	0,541	0,579	0,491
900	14,22	12,23	13,12	11,13	0,187	0,161	0,172	0,146	0,634	0,546	0,585	0,496
1000	14,32	12,33	13,23	11,24	0,188	0,162	0,174	0,148	0,639	0,550	0,590	0,501
1100	14,40	12,41	13,34	11,35	0,189	0,163	0,175	0,149	0,642	0,554	0,595	0,506
1200	14,46	12,47	13,43	11,44	0,190	0,164	0,176	0,150	0,645	0,556	0,599	0,510

Таблица 75

Энтальпия и энтропия сероуглерода CS₂

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	1 115	14,64	49,74	3,45	0,0453	0,154
200	2 316	30,42	103,3	6,31	0,0829	0,282
300	3 576	46,98	159,5	8,73	0,1147	0,389
400	4 884	64,16	217,9	10,82	0,1421	0,483
500	6 225	81,75	277,7	12,69	0,1667	0,567
600	7 596	99,78	338,9	14,35	0,1885	0,641
700	8 988	118,0	401,0	15,85	0,2082	0,708
800	10 390	136,5	463,6	17,22	0,2262	0,769
900	11 810	155,1	526,8	18,49	0,2429	0,825
1000	13 230	173,8	590,2	19,66	0,2582	0,878
1100	14 670	192,7	655	20,75	0,2725	0,926
1200	16 120	211,7	719	21,77	0,2859	0,972

Таблица 76

Теплоемкость сероокиси углерода COS

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	9,62	7,63	9,62	7,63	0,160	0,127	0,160	0,127	0,429	0,340	0,429	0,340
100	10,70	8,71	10,18	8,19	0,178	0,145	0,169	0,136	0,477	0,389	0,454	0,365
200	11,49	9,50	10,65	8,66	0,191	0,158	0,177	0,144	0,513	0,424	0,475	0,386
300	12,06	10,07	11,03	9,04	0,201	0,168	0,184	0,150	0,538	0,449	0,492	0,403
400	12,53	10,54	11,35	9,36	0,209	0,175	0,189	0,156	0,559	0,470	0,506	0,418
500	12,87	10,88	11,62	9,63	0,214	0,181	0,193	0,160	0,574	0,485	0,518	0,430
600	13,17	11,18	11,85	9,86	0,219	0,186	0,197	0,164	0,588	0,499	0,529	0,440
700	13,42	11,43	12,06	10,07	0,223	0,190	0,201	0,168	0,599	0,510	0,538	0,449
800	13,62	11,63	12,24	10,25	0,227	0,194	0,204	0,171	0,608	0,519	0,546	0,457
900	13,79	11,80	12,40	10,41	0,229	0,196	0,206	0,173	0,615	0,526	0,553	0,464
1000	13,93	11,94	12,55	10,56	0,232	0,199	0,209	0,176	0,621	0,533	0,560	0,471
1100	14,05	12,06	12,68	10,69	0,234	0,201	0,211	0,178	0,627	0,538	0,566	0,477
1200	14,14	12,15	12,80	10,81	0,235	0,202	0,213	0,180	0,631	0,542	0,571	0,482

Таблица 77

Энтальпия и энтропия сероокиси углерода COS

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	1 018	16,95	45,42	3,17	0,0528	0,141
200	2 130	35,45	95,03	5,80	0,0966	0,258
300	3 309	55,08	147,6	8,06	0,1342	0,359
400	4 540	75,57	202,5	10,05	0,1673	0,448
500	5 810	96,71	259,2	11,81	0,1964	0,526
600	7 110	118,4	317,2	13,39	0,2227	0,597
700	8 442	140,5	376,6	14,82	0,2467	0,661
800	9 792	163,0	436,9	16,14	0,2687	0,720
900	11 160	185,8	497,9	17,37	0,2892	0,775
1000	12 550	208,9	569,9	18,51	0,3081	0,825
1100	13 950	232,2	622	19,57	0,3258	0,873
1200	15 360	255,7	685	20,56	0,3423	0,917

Теплоемкость водяного пара H₂O

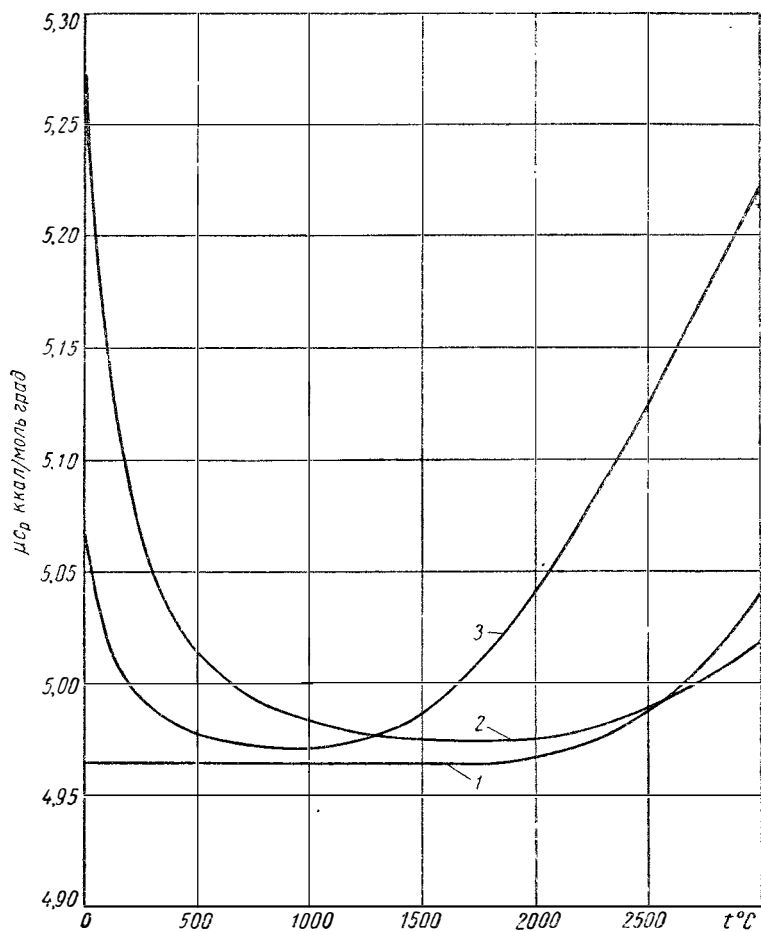
Таблица 78

Температура <i>t</i> °С	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	8,001	6,015	8,001	6,015	0,4441	0,3339	0,4441	0,3339	0,3569	0,2684	0,3569	0,2684
100	8,134	6,148	8,059	6,073	0,4515	0,3413	0,4473	0,3371	0,3629	0,2743	0,3595	0,2709
200	8,351	6,365	8,149	6,163	0,4635	0,3533	0,4523	0,3421	0,3726	0,2840	0,3636	0,2750
300	8,607	6,621	8,258	6,272	0,4778	0,3675	0,4584	0,3481	0,3840	0,2954	0,3684	0,2798
400	8,883	6,897	8,381	6,395	0,4931	0,3828	0,4652	0,3550	0,3963	0,3077	0,3739	0,2853
500	9,173	7,187	8,510	6,524	0,5092	0,3989	0,4724	0,3621	0,4092	0,3206	0,3797	0,2911
600	9,473	7,487	8,645	6,659	0,5258	0,4156	0,4799	0,3696	0,4226	0,3340	0,3857	0,2971
700	9,781	7,795	8,787	6,801	0,5429	0,4327	0,4877	0,3775	0,4364	0,3478	0,3920	0,3034
800	10,091	8,105	8,931	6,945	0,5601	0,4499	0,4957	0,3855	0,4502	0,3616	0,3984	0,3098
900	10,393	8,407	9,078	7,092	0,5769	0,4666	0,5039	0,3937	0,4637	0,3751	0,4050	0,3164
1000	10,682	8,696	9,224	7,238	0,5929	0,4827	0,5120	0,4018	0,4766	0,3880	0,4115	0,3229
1100	10,953	8,967	9,369	7,383	0,6080	0,4977	0,5200	0,4098	0,4886	0,4000	0,4180	0,3294
1200	11,205	9,219	9,512	7,526	0,6220	0,5113	0,5280	0,4177	0,4999	0,4113	0,4244	0,3358
1300	11,440	9,454	9,651	7,665	0,6350	0,5248	0,5357	0,4255	0,5104	0,4218	0,4306	0,3420
1400	11,656	9,670	9,787	7,801	0,6470	0,5368	0,5432	0,4330	0,5200	0,4314	0,4366	0,3480
1500	11,856	9,870	9,918	7,932	0,6581	0,5479	0,5505	0,4403	0,5289	0,4403	0,4425	0,3539
1600	12,040	10,054	10,045	8,059	0,6683	0,5581	0,5576	0,4473	0,5371	0,4485	0,4481	0,3595
1700	12,213	10,227	10,169	8,183	0,6779	0,5677	0,5644	0,4542	0,5449	0,4563	0,4537	0,3651
1800	12,368	10,382	10,287	8,301	0,6865	0,5763	0,5710	0,4608	0,5518	0,4632	0,4589	0,3703
1900	12,510	10,524	10,399	8,413	0,6944	0,5842	0,5772	0,4670	0,5581	0,4695	0,4639	0,3753
2000	12,642	10,656	10,508	8,522	0,7017	0,5915	0,5833	0,4730	0,5640	0,4754	0,4688	0,3802
2100	12,766	10,780	10,613	8,627	0,7086	0,5984	0,5891	0,4789	0,5695	0,4809	0,4735	0,3849
2200	12,881	10,895	10,713	8,727	0,7150	0,6047	0,5946	0,4844	0,5747	0,4861	0,4779	0,3893
2300	12,986	11,000	10,809	8,823	0,7208	0,6106	0,6000	0,4897	0,5793	0,4907	0,4822	0,3936
2400	13,084	11,098	10,902	8,916	0,7263	0,6160	0,6051	0,4949	0,5837	0,4951	0,4864	0,3978
2500	13,175	11,189	10,991	9,005	0,7313	0,6211	0,6101	0,4998	0,5878	0,4922	0,4903	0,4017
2600	13,262	11,276	11,078	9,092	0,7361	0,6259	0,6149	0,5047	0,5917	0,5031	0,4942	0,4056
2700	13,343	11,357	11,161	9,175	0,7406	0,6304	0,6195	0,5093	0,5953	0,5067	0,4979	0,4093
2800	13,420	11,434	11,240	9,254	0,7449	0,6347	0,6239	0,5137	0,5987	0,5101	0,5015	0,4129
2900	13,492	11,506	11,316	9,330	0,7489	0,6387	0,6281	0,5179	0,6019	0,5133	0,5048	0,4162

Энтальпия и энтропия водяного пара H₂O

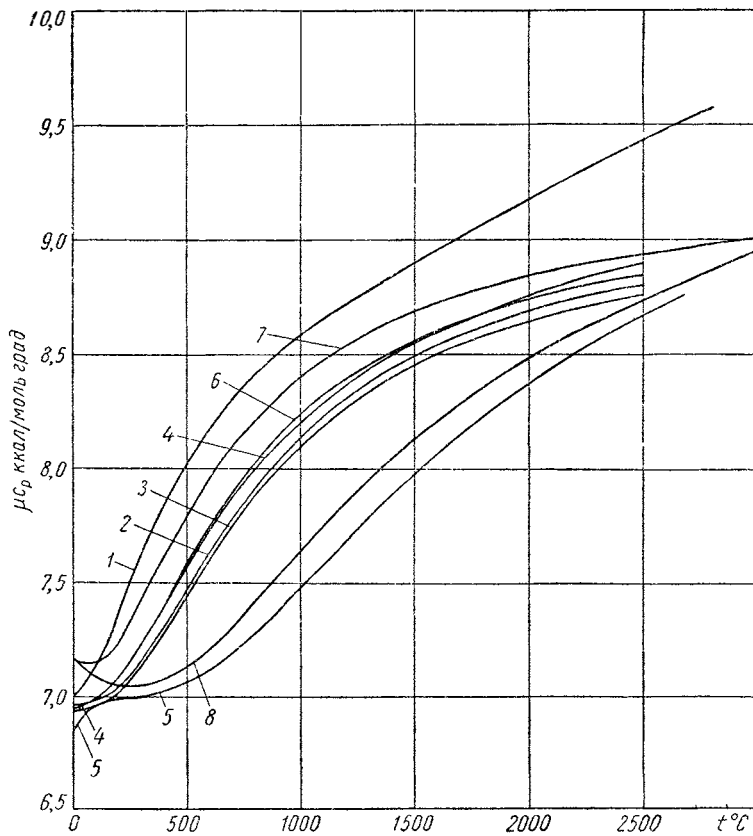
Таблица 79

Температура <i>t</i> °С	Энтальпия			Энтропия			Температура <i>t</i> °С	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'		μi	i	i'	μS	S	S'
	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град		ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0	1400	13 700	760,5	611,2	16,69	0,926	0,744
100	805,9	44,73	35,95	2,481	0,1377	0,1107	1500	14 880	825,8	663,8	17,37	0,964	0,774
200	1 630	90,46	72,72	4,446	0,2468	0,1984	1600	16 070	892,1	717,0	18,03	1,001	0,804
300	2 477	137,5	110,5	6,066	0,3367	0,2707	1700	17 290	959,6	771,3	18,66	1,036	0,832
400	3 352	186,1	149,6	7,471	0,415	0,333	1800	18 520	1027,8	826,1	19,27	1,069	0,859
500	4 255	236,2	189,9	8,720	0,484	0,389	1900	19 760	1096,7	881,5	19,86	1,102	0,885
600	5 187	287,9	231,4	9,854	0,547	0,440	2000	21 020	1168,5	937,6	20,43	1,134	0,911
700	6 151	341,4	274,4	10,899	0,605	0,486	2100	22 290	1237,1	994,3	20,97	1,164	0,935
800	7 145	396,6	318,7	11,870	0,659	0,530	2200	23 570	1308,2	1051,5	21,50	1,193	0,958
900	8 170	453,5	364,5	12,781	0,709	0,570	2300	24 860	1380,0	1109,1	22,01	1,221	0,981
1000	9 224	512,0	411,5	13,642	0,757	0,609	2400	26 165	1452,3	1167,3	22,51	1,249	1,003
1100	10 310	572,0	459,8	14,459	0,803	0,645	2500	27 480	1525,2	1225,9	22,99	1,276	1,025
1200	11 410	633,6	509,3	15,237	0,846	0,680	2600	28 810	1598,8	1285,0	23,45	1,301	1,045
1300	12 550	696,4	559,8	15,98	0,887	0,712	2700	30 140	1672,7	1344,4	23,89	1,326	1,065



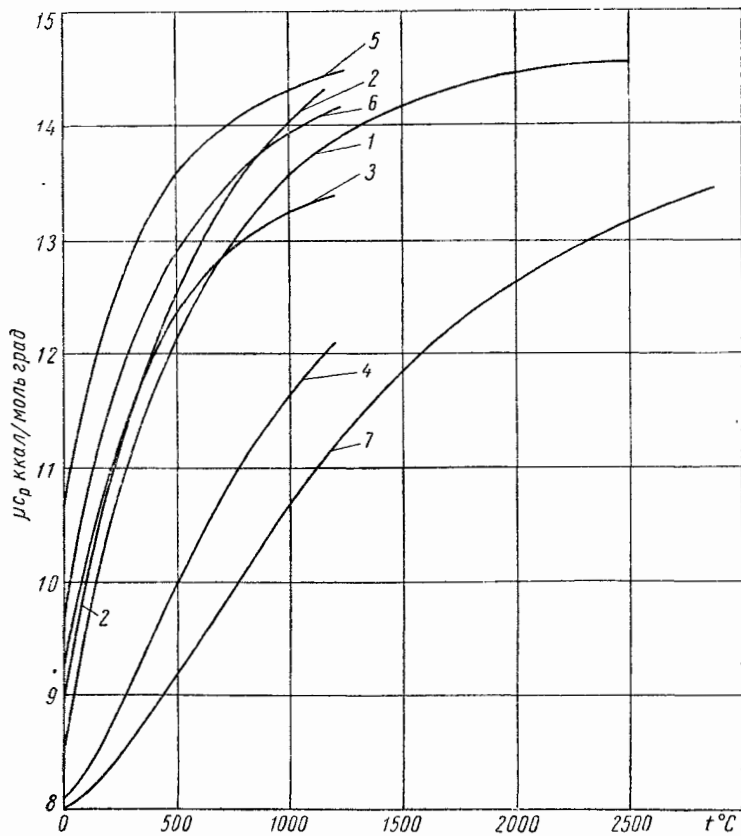
Фиг. 1. Истинные молярные теплоемкости при постоянном давлении для одноатомных газов $\mu_{ср} = f(t)$:

1 — атомарный азот N; 2 — атомарный кислород O; 3 — атомарный углерод C.



Фиг. 2. Истинные молярные теплоемкости при постоянном давлении для двухатомных газов $\mu_{ср} = f(t)$:

1 — кислород O₂; 2 — азот N₂; 3 — азот атмосферный N_{2atm}; 4 — воздух; 5 — водород H₂; 6 — окись углерода CO; 7 — окись азота NO; 8 — гидроксильная группа OH.



Фиг. 3. Истинные молярные теплоемкости при постоянном давлении для трехатомных газов $\mu_{ср} = f(t)$:

1 — двуокись углерода CO_2 ; 2 — закись азота N_2O ; 3 — сернистый ангидрид SO_2 ;
4 — сероводород H_2S ; 5 — сероуглерод CS_2 ; 6 — сероокись углерода COS ; 7 — водяной пар H_2O .

III. ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ
И ЭНТРОПИИ УГЛЕВОДОРОДОВ
МЕТАНОВОГО РЯДА C_mH_{2m+2}

(таблицы 80—95)

Таблица 80

Теплоемкость метана CH_4

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
°С												
0	8,297	6,311	8,297	6,311	0,5172	0,3934	0,5172	0,3934	0,3702	0,2816	0,3702	0,2816
100	9,382	7,396	8,791	6,805	0,5848	0,4610	0,5480	0,4242	0,4186	0,3300	0,3922	0,3036
200	10,755	8,769	9,417	7,431	0,6704	0,5466	0,5870	0,4632	0,4798	0,3912	0,4201	0,3315
300	12,167	10,181	10,097	8,111	0,7584	0,6346	0,6294	0,5056	0,5428	0,4542	0,4505	0,3619
400	13,524	11,538	10,791	8,805	0,8430	0,7192	0,6727	0,5489	0,6034	0,5147	0,4814	0,3928
500	14,774	12,788	11,459	9,473	0,9210	0,7972	0,7143	0,5905	0,6591	0,5705	0,5112	0,4226
600	15,912	13,926	12,103	10,117	0,9919	0,8681	0,7545	0,6307	0,7099	0,6213	0,5400	0,4514
700	16,941	14,955	12,725	10,739	1,0560	0,9322	0,7932	0,6694	0,7558	0,6672	0,5677	0,4791
800	17,853	15,867	13,352	11,366	1,1129	0,9891	0,8323	0,7085	0,7965	0,7079	0,5957	0,5071
900	18,670	16,684	13,932	11,946	1,1638	1,0400	0,8685	0,7447	0,8329	0,7443	0,6216	0,5330
1000	19,393	17,407	14,451	12,465	1,2089	1,0851	0,9008	0,7770	0,8652	0,7766	0,6447	0,5561
1100	20,026	18,040	14,917	12,931	1,2483	1,1245	0,9299	0,8061	0,8934	0,8048	0,6655	0,5769
1200	20,566	18,580	15,328	13,342	1,2820	1,1582	0,9555	0,8317	0,9175	0,8289	0,6838	0,5952

Таблица 81

Энтальпия и энтропия метана CH_4

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/моль град		
°С						
0	0	0	0	0	0	0
100	879,1	54,80	39,22	2,70	0,168	0,121
200	1 883	117,4	84,02	5,08	0,317	0,227
300	3 029	188,8	135,1	7,28	0,454	0,325
400	4 316	269,1	192,6	9,35	0,583	0,417
500	5 729	357,1	255,6	11,30	0,704	0,504
600	7 262	452,7	324,0	13,17	0,821	0,588
700	8 907	555,2	397,4	14,95	0,932	0,667
800	10 680	665,8	476,6	16,62	1,036	0,742
900	12 540	781,6	559,4	18,24	1,137	0,814
1000	14 450	900,8	644,7	19,79	1,233	0,883
1100	16 410	1023	732,0	21,30	1,328	0,951
1200	18 390	1147	820,6	22,75	1,418	1,015

Таблица 82

Теплоемкость этана C_2H_6

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	11,830	9,844	11,830	9,844	0,3934	0,3274	0,3934	0,3274	0,5278	0,4392	0,5278	0,4392
100	14,849	12,863	13,356	11,370	0,4938	0,4278	0,4442	0,3781	0,6625	0,5739	0,5959	0,5073
200	17,883	15,897	14,855	12,869	0,5947	0,5287	0,4940	0,4280	0,7978	0,7092	0,6627	0,5741
300	20,610	18,624	16,297	14,311	0,6854	0,6194	0,5420	0,4759	0,9195	0,8309	0,7271	0,6385
400	23,081	21,095	17,713	15,727	0,7676	0,7016	0,5891	0,5230	1,0297	0,9411	0,7902	0,7016
500	25,271	23,285	19,019	17,033	0,8405	0,7744	0,6325	0,5665	1,1274	1,0388	0,8485	0,7599
600	27,197	25,211	20,224	18,238	0,9045	0,8385	0,6726	0,6066	1,2134	1,1248	0,9023	0,8137
700	28,885	26,899	21,342	19,356	0,9607	0,8946	0,7098	0,6437	1,2887	1,2001	0,9521	0,8635
800	30,275	28,289	22,383	20,397	1,0069	0,9408	0,7444	0,6784	1,3507	1,2621	0,9986	0,9100
900	31,519	29,533	23,351	21,365	1,0483	0,9822	0,7765	0,7106	1,4062	1,3176	1,0418	0,9532
1000	32,663	30,677	24,249	22,263	1,0863	1,0202	0,8065	0,7404	1,4572	1,3686	1,0818	0,9932
1100	33,703	31,717	25,075	23,089	1,1209	1,0548	0,8339	0,7679	1,5036	1,4150	1,1187	1,0301
1200	34,642	32,656	25,834	23,848	1,1521	1,0861	0,8592	0,7931	1,5455	1,4569	1,1525	1,0639

Таблица 83

Энтальпия и энтропия этана C_2H_6

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	1 336	44,42	59,59	4,15	0,138	0,185
200	2 971	98,80	132,5	8,02	0,267	0,358
300	4 889	162,6	218,1	11,69	0,389	0,522
400	7 085	235,6	316,1	15,21	0,506	0,679
500	9 509	316,2	424,2	18,58	0,618	0,829
600	12 130	403,6	541,4	21,77	0,724	0,971
700	14 940	496,9	666,5	24,82	0,825	1,107
800	17 910	595,5	798,9	27,69	0,921	1,235
900	21 020	698,8	937,6	30,44	1,012	1,358
1000	24 250	806,5	1082	33,09	1,100	1,476
1100	27 580	917,3	1231	35,63	1,185	1,590
1200	31 000	1031	1383	38,07	1,266	1,699

Таблица 84

Теплоемкость пропана C_3H_8

Температура	Теплоемкость											
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	16,32	14,33	16,32	14,33	0,3701	0,3250	0,3701	0,3250	0,7281	0,6393	0,7281	0,6393
100	21,24	19,25	18,79	16,80	0,4817	0,4366	0,4261	0,3810	0,9476	0,8588	0,8383	0,7495
200	25,89	23,90	21,23	19,24	0,5871	0,5420	0,4815	0,4363	1,1550	1,0663	0,9471	0,8584
300	29,85	27,86	23,39	21,40	0,6770	0,6318	0,5305	0,4853	1,3317	1,2429	1,0435	0,9547
400	33,29	31,30	25,48	23,49	0,7550	0,7098	0,5779	0,5327	1,4852	1,3964	1,1368	1,0480
500	36,32	34,33	27,27	25,28	0,8237	0,7786	0,6184	0,5733	1,6204	1,5316	1,2166	1,1278
600	38,94	36,95	29,08	27,09	0,8831	0,8380	0,6595	0,6144	1,7373	1,6485	1,2974	1,2086
700	41,24	39,25	30,64	28,65	0,9353	0,8901	0,6949	0,6497	1,8399	1,7511	1,3670	1,2782
800	43,10	41,11	32,06	30,07	0,9775	0,9323	0,7271	0,6819	1,9228	1,8341	1,4303	1,3415
900	44,76	42,77	33,86	31,37	1,0151	0,9700	0,7566	0,7114	1,9969	1,9081	1,4883	1,3995
1000	46,28	44,29	34,59	32,60	1,0496	1,0044	0,7845	0,7393	2,0647	1,9759	1,5432	1,4544
1100	47,67	45,68	35,75	33,76	1,0811	1,0360	0,8108	0,7656	2,1267	2,0380	1,5949	1,5062
1200	48,92	46,93	36,84	34,85	1,1094	1,0643	0,8355	0,7904	2,1825	2,0937	1,6436	1,5548

Таблица 85

Энтальпия и энтропия пропана C_3H_8

Температура	Энтальпия			Энтропия		
t	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	1 879	42,61	83,83	5,80	0,131	0,258
200	4 246	96,30	189,4	11,39	0,258	0,508
300	7 017	159,1	313,0	16,69	0,378	0,744
400	10 190	231,2	454,7	21,79	0,494	0,972
500	13 630	309,2	608,3	26,61	0,603	1,287
600	17 450	395,7	778,4	30,22	0,685	1,448
700	21 450	486,4	956,9	35,58	0,807	1,687
800	25 650	581,7	1144	39,65	0,899	1,869
900	30 020	680,9	1339	43,55	0,987	2,043
1000	34 590	784,5	1543	47,29	1,072	2,209
1100	39 320	891,9	1754	50,88	1,154	2,370
1200	44 210	1003	1972	54,31	1,231	2,523

Теплоемкость бутана C_4H_{10}

Таблица 86

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	22,10	20,11	22,10	20,11	0,3802	0,3460	0,3802	0,3460	0,9860	0,8972	0,9860	0,8972
100	28,14	26,15	25,19	23,20	0,4842	0,4499	0,4334	0,3992	1,2554	1,1666	1,1238	1,0350
200	34,09	32,10	28,14	26,15	0,5865	0,5523	0,4842	0,4499	1,5209	1,4321	1,2554	1,1666
300	39,06	37,07	30,90	28,91	0,6721	0,6378	0,5317	0,4974	1,7426	1,6538	1,3786	1,2898
400	43,44	41,45	33,55	31,56	0,7474	0,7132	0,5772	0,5430	1,9380	1,8492	1,4968	1,4080
500	47,26	45,27	35,81	33,82	0,8131	0,7789	0,6161	0,5819	2,1084	2,0197	1,5976	1,5088
600	50,59	48,60	38,09	36,10	0,8704	0,8362	0,6554	0,6211	2,2570	2,1682	1,6993	1,6106
700	53,46	51,47	40,07	38,08	0,9198	0,8856	0,6894	0,6552	2,3850	2,2963	1,7877	1,6989
800	55,77	53,78	41,80	39,81	0,9596	0,9253	0,7192	0,6850	2,4881	2,3993	1,8649	1,7761
900	57,83	55,84	43,44	41,45	0,9950	0,9608	0,7474	0,7132	2,5800	2,4912	1,9380	1,8492
1000	59,73	57,74	44,99	43,00	1,0277	0,9935	0,7741	0,7398	2,6648	2,5760	2,0072	1,9184
1100	61,48	59,49	46,46	44,47	1,0578	1,0236	0,7994	0,7651	2,7428	2,6541	2,0728	1,9840
1200	63,07	61,08	47,85	45,86	1,0852	1,0509	0,8233	0,7891	2,8138	2,7250	2,1348	2,0460

Энтальпия и энтропия бутана C_4H_{10}

Таблица 87

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 519	43,34	112,4	7,74	0,134	0,346
200	5 628	96,84	251,1	15,15	0,261	0,676
300	9 270	159,5	413,6	22,05	0,380	0,984
400	13 420	230,9	598,7	28 57	0,492	1,175
500	17 900	308,0	798,8	35,07	0,604	1,465
600	22 850	393,2	1020	41,05	0,707	1,732
700	28 050	482,6	1251	46,68	0,804	1,983
800	38 440	575,4	1492	51,92	0,894	2,217
900	39 100	672,7	1744	56,93	0,980	2,440
1000	44 990	774,1	2007	61,75	1,063	2,655
1100	51 110	879,3	2280	66,40	1,143	2,863
1200	57 420	988,0	2562	70,87	1,220	3,062

Таблица 88

Теплоемкость пентана C_5H_{12}

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/мм ³ град			
0	27,45	25,46	27,45	25,46	0,3805	0,3529	0,3805	0,3529	1,2246	1,1359	1,2246	1,1359
100	34,89	32,90	31,24	29,25	0,4836	0,4560	0,4330	0,4054	1,5566	1,4678	1,3937	1,3049
200	42,18	40,19	34,88	32,89	0,5846	0,5571	0,4835	0,4559	1,8818	1,7930	1,5561	1,4673
300	48,24	46,25	38,20	36,21	0,6686	0,6411	0,5295	0,5019	2,1522	2,0634	1,7042	1,6155
400	53,55	51,56	41,44	39,45	0,7422	0,7147	0,5744	0,5468	2,3391	2,3003	1,8488	1,7600
500	58,19	56,20	44,20	42,21	0,8066	0,7790	0,6126	0,5851	2,5961	2,5073	1,9719	1,8331
600	62,21	60,22	47,02	45,03	0,8623	0,8347	0,6517	0,6241	2,7754	2,6866	2,0977	2,0090
700	65,68	63,69	49,42	47,43	0,9104	0,8828	0,6850	0,6574	2,9302	2,8414	2,2048	2,1160
800	68,43	66,44	51,53	49,54	0,9485	0,9209	0,7142	0,6867	3,0529	2,9641	2,2939	2,2102
900	70,89	68,90	53,49	51,50	0,9826	0,9550	0,7414	0,7138	3,1627	3,0739	2,3864	2,2976
1000	73,18	71,19	55,38	53,39	1,0143	0,9867	0,7676	0,7400	3,2648	3,1760	2,4707	2,3819
1100	75,29	73,30	57,17	55,18	1,0436	1,0160	0,7924	0,7648	3,3590	3,2702	2,5506	2,4618
1200	77,22	75,23	58,87	56,88	1,0703	1,0427	0,8160	0,7884	3,4451	3,3563	2,6264	2,5376

Таблица 89

Энтальпия и энтропия пентана C_5H_{12}

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	<i>i</i>	<i>i'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/мм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/мм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 124	43,30	139,4	9,62	0,133	0,430
200	6 976	96,70	311,2	18,74	0,259	0,837
300	11 460	158,8	511,3	27,26	0,377	1,217
400	16 580	229,8	739,5	35,52	0,498	1,585
500	22 100	306,3	985,9	43,34	0,600	1,934
600	28 210	391,0	1259	50,69	0,702	2,262
700	34 590	479,5	1543	57,62	0,798	2,571
800	41 220	571,4	1839	64,03	0,887	2,857
900	48 140	667,3	2148	70,15	0,972	3,130
1000	55 380	767,6	2471	76,07	1,054	3,394
1100	62 890	871,6	2806	81,77	1,133	3,649
1200	70 640	979,2	3152	87,27	1,209	3,894

Таблица 90

Теплоемкость гексана C_6H_{14}

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
°С												
0	32,98	30,99	32,98	30,99	0,3827	0,3596	0,3827	0,3596	1,471	1,383	1,471	1,383
100	41,64	39,65	37,37	35,38	0,4832	0,4601	0,4337	0,4106	1,858	1,769	1,667	1,578
200	50,30	48,31	41,66	39,67	0,5837	0,5606	0,4835	0,4604	2,244	2,155	1,859	1,770
300	57,44	55,45	45,60	43,61	0,6666	0,6435	0,5292	0,5061	2,563	2,474	2,034	1,946
400	63,67	61,68	49,41	47,42	0,7389	0,7158	0,5734	0,5503	2,841	2,752	2,204	2,116
500	69,13	67,14	52,69	50,70	0,8022	0,7791	0,6115	0,5884	3,034	2,995	2,351	2,262
600	73,82	71,83	55,96	53,97	0,8567	0,8336	0,6494	0,6263	3,293	3,205	2,497	2,408
700	77,90	75,91	58,79	56,80	0,9040	0,8809	0,6822	0,6591	3,475	3,387	2,623	2,534
800	81,16	79,17	61,28	59,29	0,9418	0,9187	0,7111	0,6880	3,621	3,532	2,734	2,645
900	84,06	82,07	63,61	61,62	0,9755	0,9524	0,7382	0,7151	3,750	3,661	2,838	2,749
1000	86,75	84,76	65,83	63,84	1,0067	0,9836	0,7639	0,7408	3,870	3,781	2,937	2,848
1100	89,19	87,20	67,93	65,94	1,0350	1,0119	0,7883	0,7652	3,979	3,890	3,031	2,942
1200	91,39	89,40	69,89	67,90	1,0606	1,0375	0,8111	0,7880	4,077	3,988	3,118	3,029

Таблица 91

Энтальпия и энтропия гексана C_6H_{14}

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 737	43,37	166,7	11,52	0,134	0,514
200	8 332	96,70	371,7	22,40	0,260	0,999
300	13 680	158,8	610,3	32,57	0,378	1,453
400	19 760	229,4	881,8	42,39	0,492	1,891
500	26 350	305,8	1175	51,67	0,600	2,305
600	33 580	389,6	1498	60,39	0,701	2,694
700	41 150	477,5	1836	68,61	0,796	3,061
800	49 020	568,9	2187	76,25	0,885	3,402
900	57 250	664,4	2554	83,53	0,969	3,727
1000	65 830	763,9	2937	90,55	1,051	4,040
1100	74 720	867,1	3334	97,28	1,129	4,340
1200	83 870	973,3	3742	103,74	1,204	4,628

Таблица 92

Теплоемкость гептана C_7H_{16}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	38,51	36,52	38,51	36,52	0,3843	0,3645	0,3843	0,3645	1,718	1,629	1,718	1,629
100	48,39	46,40	43,50	41,51	0,4824	0,4631	0,4341	0,4143	2,159	2,070	1,941	1,852
200	58,42	56,43	48,44	46,45	0,5830	0,5632	0,4834	0,4636	2,606	2,518	2,161	2,072
300	66,64	64,65	53,00	51,01	0,6651	0,6452	0,5290	0,5091	2,973	2,884	2,365	2,276
400	73,79	71,80	57,38	55,39	0,7364	0,7166	0,5727	0,5528	3,292	3,203	2,560	2,471
500	80,07	78,08	61,18	59,19	0,7991	0,7793	0,6106	0,5907	3,572	3,483	2,729	2,641
600	85,43	83,44	64,90	62,91	0,8526	0,8328	0,6477	0,6279	3,811	3,723	2,895	2,807
700	90,12	88,13	68,16	66,17	0,8994	0,8796	0,6803	0,6604	4,021	3,932	3,041	2,952
800	93,89	91,90	71,03	69,04	0,9370	0,9172	0,7089	0,6890	4,189	4,100	3,169	3,080
900	97,23	95,24	73,73	71,74	0,9704	0,9505	0,7358	0,7160	4,338	4,249	3,289	3,201
1000	100,32	98,33	76,28	74,29	1,0012	0,9814	0,7613	0,7414	4,476	4,387	3,403	3,314
1100	103,09	101,10	78,69	76,70	1,0289	1,0090	0,7853	0,7655	4,599	4,510	3,511	3,422
1200	105,56	103,57	80,91	78,92	1,0535	1,0337	0,8075	0,7876	4,709	4,621	3,610	3,521

Энтальпия и энтропия гептана C_7H_{16}

Таблица 93

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	4 350	43,41	194,1	13,42	0,133	0,599
200	9 688	96,68	432,2	26,06	0,260	1,162
300	15 900	158,7	709,5	37,88	0,378	1,690
400	22 950	229,1	1024	49,26	0,491	2,198
500	30 590	305,3	1365	60,00	0,598	2,677
600	38 940	388,6	1737	70,09	0,699	3,127
700	47 710	476,2	2129	79,60	0,794	3,551
800	56 820	567,1	2535	88,47	0,883	3,947
900	66 360	662,2	2960	96,91	0,967	4,323
1000	76 280	761,3	3403	105,03	1,048	4,686
1100	86 560	863,8	3862	112,79	1,125	5,032
1200	97 090	969,0	4332	120,21	1,199	5,363

Теплоемкость октана C_8H_{18}

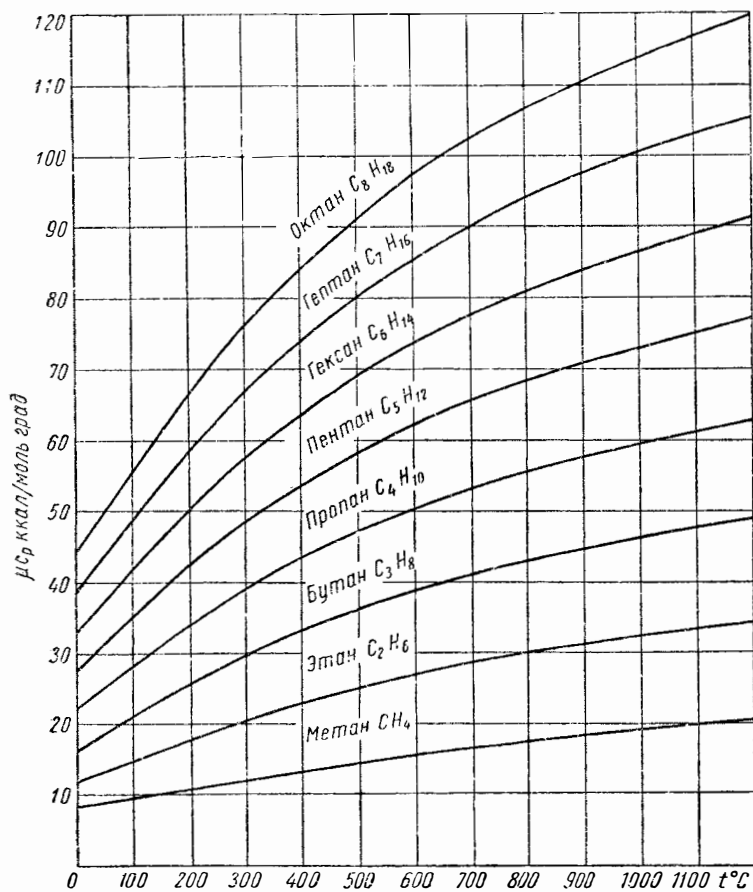
Таблица 94

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	44,04	42,05	44,04	42,05	0,3856	0,3681	0,3856	0,3681	1,965	1,876	1,965	1,876
100	55,14	53,15	49,63	47,64	0,4827	0,4653	0,4345	0,4171	2,460	2,371	2,214	2,125
200	66,54	64,55	55,22	53,23	0,5825	0,5651	0,4834	0,4660	2,969	2,880	2,464	2,375
300	75,84	73,85	60,40	58,41	0,6640	0,6465	0,5288	0,5114	3,384	3,295	2,695	2,606
400	83,91	81,92	65,35	63,36	0,7346	0,7172	0,5721	0,5547	3,744	3,655	2,916	3,827
500	91,01	89,02	69,67	67,68	0,7968	0,7793	0,6099	0,5925	4,060	3,972	3,108	3,019
600	97,04	95,05	73,84	71,85	0,8496	0,8321	0,6494	0,6290	4,329	4,241	3,294	3,206
700	102,34	100,35	77,53	75,54	0,8960	0,8785	0,6788	0,6613	4,566	4,477	3,459	3,370
800	106,62	104,63	80,78	78,79	0,9334	0,9160	0,7072	0,6898	4,757	4,668	3,604	3,515
900	110,40	108,41	83,85	81,86	0,9665	0,9491	0,7341	0,7167	4,925	4,827	3,741	3,652
1000	113,89	111,90	86,73	84,74	0,9971	0,9797	0,7593	0,7419	5,081	4,992	3,869	3,781
1100	116,99	115,00	89,45	87,46	1,0248	1,0068	0,7831	0,7657	5,219	5,131	3,991	3,902
1200	119,73	117,74	91,93	89,94	1,0482	1,0308	0,8048	0,7874	5,342	5,253	4,101	4,013

Энтальпия и энтропия октана C_8H_{18}

Таблица 95

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	4 963	43,45	221,4	15,32	0,134	0,683
200	11 040	96,68	492,8	29,72	0,261	1,325
300	18 120	158,6	808,5	43,19	0,378	1,926
400	26 140	228,8	1166	56,13	0,492	2,504
500	34 840	305,0	1554	68,33	0,599	3,048
600	44 300	387,8	1976	79,79	0,699	3,559
700	54 270	475,2	2421	90,59	0,793	4,041
800	64 620	565,8	2883	100,69	0,882	4,492
900	75 470	660,7	3367	110,29	0,966	4,920
1000	86 730	759,3	3869	119,51	1,047	5,066
1100	98 400	861,4	4390	128,30	1,124	5,723
1200	110 320	965,8	4921	136,68	1,197	6,097



Фиг. 4. Истинные молярные теплоемкости при постоянном давлении для углеводородов метанового ряда C_mH_{2m+2}
 $\mu_{sp} = f(t)$.

IV. ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ
И ЭНТРОПИИ УГЛЕВОДОРОДОВ
ЭТИЛЕНОВОГО РЯДА C_mH_{2m}

(таблицы 96—178)

Таблица 96

Теплоемкость этилена (этена) C_2H_4

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	νc_v	μc_{pt}	νc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/мм ³ град			
0	9,78	7,79	9,78	7,79	0,3486	0,2777	0,3486	0,2777	0,4363	0,3475	0,4363	0,3475
100	12,24	10,25	11,04	9,05	0,4363	0,3654	0,3936	0,3226	0,5461	0,4573	0,4925	0,4037
200	14,58	12,59	12,22	10,23	0,5197	0,4488	0,4356	0,3647	0,6505	0,5617	0,5452	0,4564
300	16,60	14,61	13,36	11,37	0,5918	0,5208	0,4763	0,4053	0,7406	0,6518	0,5960	0,5073
400	18,33	16,34	14,38	12,39	0,6534	0,5825	0,5126	0,4417	0,8178	0,7290	0,6415	0,5528
500	19,82	17,83	15,33	13,34	0,7065	0,6356	0,5465	0,4755	0,8842	0,7955	0,6839	0,5951
600	21,13	19,14	16,20	14,21	0,7532	0,6823	0,5775	0,5066	0,9427	0,8539	0,7227	0,6340
700	22,28	20,29	16,97	14,98	0,7942	0,7233	0,6049	0,5340	0,9940	0,9052	0,7571	0,6683
800	23,27	21,28	17,71	15,72	0,8295	0,7586	0,6313	0,5604	1,0382	0,9494	0,7901	0,7013
900	24,15	22,16	18,37	16,38	0,8609	0,7900	0,6549	0,5839	1,0774	0,9886	0,8196	0,7308
1000	24,93	22,94	18,99	17,00	0,8887	0,8178	0,6770	0,6060	1,1122	1,0234	0,8472	0,7584
1100	25,60	23,61	19,57	17,58	0,9126	0,8416	0,6976	0,6267	1,1421	1,0533	0,8731	0,7843
1200	26,19	24,20	20,09	18,10	0,9336	0,8627	0,7162	0,6452	1,1684	1,0795	0,8963	0,8075

Таблица 97

Энтальпия и энтропия этилена (этена) C_2H_4

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/мм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/мм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	1 104	39,36	49,25	3,45	0,123	0,153
200	2 444	87,12	109,0	6,61	0,235	0,294
300	4 008	142,9	178,0	9,58	0,341	0,427
400	5 752	205,0	256,6	12,39	0,441	0,552
500	7 665	273,2	341,9	15,04	0,536	0,670
600	9 720	346,5	433,6	17,52	0,624	0,781
700	11 880	423,4	530,0	19,88	0,708	0,886
800	14 170	505,0	632,1	22,11	0,788	0,986
900	16 530	589,4	737,6	24,22	0,863	1,080
1000	18 990	677,0	847,2	26,23	0,935	1,170
1100	21 530	767,4	960,4	28,14	1,003	1,255
1200	24 110	859,4	1075,6	29,97	1,068	1,337

Теплоемкость пропилена (пропена) C_3H_6

Таблица 98

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	14,33	12,34	14,33	12,34	0,3406	0,2933	0,3406	0,2933	0,6393	0,5505	0,6393	0,5505
100	18,09	16,10	16,32	14,33	0,4299	0,3826	0,3878	0,3406	0,8071	0,7183	0,7281	0,6393
200	21,71	19,72	18,09	16,10	0,5159	0,4686	0,4299	0,3826	0,9686	0,8798	0,8071	0,7183
300	24,89	22,90	19,84	17,85	0,5915	0,5442	0,4715	0,4242	1,1104	1,0217	0,8851	0,7964
400	27,67	25,68	21,44	19,45	0,6576	0,6103	0,5095	0,4622	1,2345	1,1457	0,9565	0,8677
500	30,07	28,08	22,93	20,94	0,7146	0,6673	0,5449	0,4976	1,3415	1,2527	1,0230	0,9342
600	32,16	30,17	24,30	22,31	0,7643	0,7170	0,5775	0,5302	1,4348	1,3460	1,0841	0,9953
700	33,99	32,00	25,57	23,58	0,8078	0,7605	0,6077	0,5604	1,5164	1,4276	1,1408	1,0520
800	35,58	33,59	26,72	24,73	0,8456	0,7983	0,6350	0,5877	1,5874	1,4986	1,1921	1,1033
900	36,96	34,97	27,79	25,80	0,8784	0,8311	0,6604	0,6131	1,6489	1,5601	1,2398	1,1510
1000	38,17	36,18	28,76	26,77	0,9071	0,8598	0,6835	0,6362	1,7029	1,6141	1,2831	1,1943
1100	39,22	37,23	29,66	27,67	0,9321	0,8848	0,7049	0,6576	1,7497	1,6610	1,3232	1,2345
1200	40,12	38,13	30,50	28,51	0,9535	0,9062	0,7248	0,6775	1,7899	1,7011	1,3607	1,2719

Энтальпия и энтропия пропилена (пропена) C_3H_6

Таблица 99

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	1 632	38,78	72,81	5,04	0,121	0,225
200	3 618	85,98	161,4	9,75	0,232	0,435
300	5 952	141,4	265,5	14,20	0,338	0,633
400	8 576	203,8	382,6	18,43	0,438	0,822
500	11 460	272,4	511,5	22,42	0,533	1,000
600	14 580	346,5	650,5	26,22	0,624	1,169
700	17 900	425,4	798,6	29,81	0,709	1,329
800	21 380	508,0	953,7	33,21	0,790	1,481
900	25 010	594,4	1116	36,43	0,866	1,625
1000	28 760	683,5	1283	39,51	0,929	1,762
1100	32 630	775,4	1455	42,44	1,009	1,893
1200	36 600	869,8	1633	45,23	1,075	2,017

Таблица 100

Теплоемкость этилэтилена (1 — бутена) C_4H_8

Температура		Теплоемкость											
t	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}	
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м. ³ град				
0	19,88	17,89	19,88	17,89	0,3543	0,3189	0,3543	0,3189	0,8869	0,7981	0,8874	0,7981	
100	25,51	23,52	22,76	20,77	0,4547	0,4192	0,4057	0,3702	1,1381	1,0493	1,0154	0,9266	
200	30,52	28,53	25,42	23,43	0,5440	0,5085	0,4531	0,4276	1,3616	1,2728	1,1341	1,0453	
300	34,77	32,78	27,85	25,86	0,6197	0,5843	0,4964	0,4609	1,5512	1,4624	1,2425	1,1537	
400	38,39	36,40	30,04	28,05	0,6843	0,6488	0,5354	0,5000	1,7127	1,6239	1,3402	1,2514	
500	41,53	39,54	32,03	30,04	0,7402	0,7048	0,5709	0,5354	1,8528	1,7640	1,4290	1,3402	
600	44,25	42,26	33,84	31,85	0,7887	0,7532	0,6032	0,5677	1,9742	1,8854	1,5097	1,4209	
700	46,63	44,64	35,50	33,51	0,8311	0,7957	0,6327	0,5973	2,0803	1,9916	1,5838	1,4950	
800	48,69	46,70	37,03	35,04	0,8678	0,8324	0,6600	0,6245	2,1722	2,0835	1,6520	1,5633	
900	50,49	48,50	38,42	36,43	0,8999	0,8645	0,6848	0,6493	2,2525	2,1638	1,7141	1,6253	
1000	52,05	50,06	39,70	37,71	0,9277	0,8923	0,7076	0,6721	2,3221	2,2334	1,7712	1,6824	
1100	53,42	51,43	40,88	38,89	0,9522	0,9167	0,7286	0,6932	2,3833	2,2945	1,8238	1,7350	
1200	54,58	52,59	41,97	39,98	0,9728	0,9374	0,7481	0,7126	2,4350	2,3462	1,8724	1,7837	

Таблица 101

Энтальпия и энтропия 1 — бутена C_4H_8

Температура		Энтальпия			Энтропия		
t	μi	i	i'	μS	S	S'	
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м. ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м. ³ град	
0	0	0	0	0	0	0	
100	2 276	40,57	101,5	7,11	0,127	0,317	
200	5 084	90,62	226,8	13,72	0,245	0,612	
300	8 355	148,9	372,7	19,97	0,356	0,891	
400	12 020	214,2	536,1	25,87	0,461	1,154	
500	16 010	285,4	714,5	31,40	0,560	1,401	
600	20 300	361,9	905,8	36,61	0,653	1,634	
700	24 850	442,9	1109	41,54	0,741	1,854	
800	29 620	528,0	1322	46,20	0,824	2,062	
900	34 580	616,3	1543	50,62	0,902	2,259	
1000	39 700	707,6	1771	54,82	0,977	2,446	
1100	44 970	801,5	2006	58,79	1,048	2,623	
1200	50 360	897,7	2247	62,59	1,116	2,793	

Таблица 102

Теплоемкость *cis* — 2 — бутена C_4H_8

Температура	Теплоемкость											
t	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	17,54	15,55	17,54	15,55	0,3126	0,2772	0,3126	0,2772	0,7825	0,6937	0,7825	0,6937
100	22,89	20,90	20,15	18,16	0,4080	0,3725	0,3591	0,3237	1,0212	0,9324	0,8990	0,8102
200	28,08	26,09	22,86	20,87	0,5005	0,4650	0,4075	0,3720	1,2527	1,1640	1,0199	0,9311
300	32,66	30,67	25,38	23,39	0,5821	0,5467	0,4524	0,4169	1,4571	1,3683	1,1323	1,0435
400	36,62	34,63	27,71	25,72	0,6527	0,6172	0,4939	0,4584	1,6338	1,5450	1,2362	1,1475
500	40,01	38,02	29,84	27,85	0,7131	0,6777	0,5319	0,4964	1,7850	1,6962	1,3313	1,2425
600	42,95	40,96	31,79	29,80	0,7655	0,7301	0,5666	0,5312	1,9162	1,8274	1,4183	1,3295
700	45,50	43,51	33,56	31,57	0,8110	0,7755	0,5982	0,5627	2,0299	1,9411	1,4972	1,4085
800	47,71	45,72	35,19	33,20	0,8504	0,8149	0,6272	0,5918	2,1285	2,0397	1,5700	1,4812
900	49,63	47,64	36,70	34,71	0,8846	0,8491	0,6541	0,6187	2,2142	2,1254	1,6373	1,5485
1000	51,30	49,31	38,07	36,08	0,9144	0,8789	0,6786	0,6431	2,2887	2,1999	1,6984	1,6097
1100	52,73	50,74	39,34	37,35	0,9399	0,9044	0,7012	0,6657	2,3525	2,2637	1,7551	1,6663
1200	53,98	51,99	40,51	38,52	0,9621	0,9267	0,7220	0,6866	2,4082	2,3195	1,8073	1,7185

Таблица 103

Энтальпия и энтропия *cis* — 2 — бутена C_4H_8

Температура	Энтальпия			Энтропия		
t	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 015	35,91	89,90	6,32	0,113	0,282
200	4 572	81,50	204,0	12,33	0,220	0,550
300	7 614	135,7	339,7	18,13	0,323	0,809
400	11 080	197,6	494,5	23,70	0,422	1,057
500	14 920	265,9	665,6	29,00	0,517	1,293
600	19 070	340,0	851,0	34,05	0,607	1,518
700	23 490	418,7	1048	38,84	0,692	1,732
800	28 150	501,8	1256	43,40	0,774	1,936
900	33 030	588,7	1474	47,74	0,851	2,130
1000	38 070	678,6	1698	51,87	0,924	2,314
1100	43 270	771,3	1931	55,80	0,995	2,489
1200	43 610	866,4	2169	59,55	1,061	2,656

Теплоемкость *trans*—2—бутена C₄H₈

Таблица 104

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	19,76	17,77	19,76	17,77	0,3522	0,3167	0,3522	0,3167	0,8816	0,7928	0,8816	0,7928
100	24,68	22,69	22,18	20,19	0,4399	0,4044	0,3953	0,3599	1,1011	1,0123	0,9895	0,9007
200	29,46	27,47	24,63	22,64	0,5251	0,4896	0,4390	0,4035	1,3143	1,2255	1,0988	1,0101
300	33,73	31,74	26,95	24,96	0,6012	0,5657	0,4804	0,4449	1,5048	1,4160	1,2023	1,1136
400	37,44	35,45	29,13	27,14	0,6673	0,6319	0,5192	0,4837	1,6703	1,5816	1,2996	1,2108
500	40,68	38,69	31,09	29,10	0,7251	0,6896	0,5541	0,5187	1,8149	1,7261	1,3870	1,2983
600	43,48	41,49	32,94	30,95	0,7750	0,7395	0,5871	0,5516	1,9401	1,8513	1,4696	1,3808
700	45,94	43,95	34,64	32,65	0,8188	0,7834	0,6174	0,5819	2,0499	1,9611	1,5454	1,4566
800	48,09	46,10	36,20	34,21	0,8572	0,8217	0,6452	0,6098	2,1455	2,0567	1,6150	1,5262
900	49,95	47,96	37,63	35,64	0,8903	0,8548	0,6707	0,6352	2,2285	2,1397	1,6788	1,5900
1000	51,57	49,58	38,94	36,95	0,9192	0,8837	0,6941	0,6586	2,3007	2,2119	1,7373	1,6485
1100	52,97	50,98	40,15	38,16	0,9441	0,9087	0,7156	0,6802	2,3632	2,2744	1,7912	1,7025
1200	54,19	52,20	41,26	39,27	0,9659	0,9304	0,7354	0,6999	2,4176	2,3288	1,8408	1,7520

Энтальпия и энтропия *trans*—2—бутена C₄H₈

Таблица 105

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 218	39,53	98,95	6,93	0,124	0,309
200	4 926	87,80	219,8	13,33	0,238	0,595
300	8 085	144,1	360,7	19,36	0,345	0,864
400	11 650	207,7	519,8	25,09	0,447	1,119
500	15 540	277,0	693,5	30,49	0,544	1,360
600	19 760	352,3	881,8	35,61	0,635	1,589
700	24 250	432,2	1082	40,47	0,721	1,805
800	28 960	516,2	1292	45,06	0,803	2,010
900	33 870	603,6	1511	49,43	0,881	2,205
1000	38 940	694,1	1737	53,58	0,955	2,390
1100	44 160	787,2	1970	57,54	1,026	2,566
1200	49 510	882,5	2209	61,30	1,093	2,735

Таблица 106

Теплоемкость изобутена (2 — метилпропена) C_4H_8

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/мм ³ град			
0	19,93	17,94	19,93	17,94	0,3552	0,3198	0,3552	0,3198	0,8891	0,8004	0,8891	0,8004
100	25,20	23,21	22,57	20,58	0,4492	0,4137	0,4023	0,3368	1,1243	1,0355	1,0069	0,9181
200	30,03	28,04	25,10	23,11	0,5353	0,4998	0,4474	0,4119	1,3397	1,2510	1,1198	1,0310
300	34,25	32,26	27,48	25,49	0,6105	0,5750	0,4898	0,4543	1,5280	1,4392	1,2260	1,1372
400	37,90	35,91	29,61	27,62	0,6755	0,6401	0,5278	0,4923	1,6909	1,6021	1,3210	1,2322
500	41,05	39,06	31,61	29,62	0,7317	0,6962	0,5634	0,5279	1,8314	1,7426	1,4102	1,3215
600	43,82	41,83	33,40	31,41	0,7810	0,7456	0,5953	0,5598	1,9550	1,8662	1,4901	1,4013
700	46,22	44,23	35,06	33,07	0,8238	0,7884	0,6249	0,5894	2,0620	1,9733	1,5642	1,4754
800	48,34	46,35	36,59	34,60	0,8616	0,8261	0,6522	0,6167	2,1566	2,0678	1,6324	1,5436
900	50,15	48,16	38,02	36,03	0,8939	0,8584	0,6777	0,6422	2,2374	2,1486	1,6962	1,6074
1000	51,75	49,76	39,31	37,32	0,9224	0,8869	0,7007	0,6652	2,3088	2,2200	1,7538	1,6650
1100	53,14	51,15	40,50	38,51	0,9472	0,9117	0,7219	0,6864	2,3708	2,2820	1,8069	1,7181
1200	54,33	52,34	41,60	39,61	0,9684	0,9329	0,7415	0,7060	2,4239	2,3351	1,8559	1,7671

Таблица 107

Энтальпия и энтропия изобутена (2 — метилпропена) C_4H_8

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/мм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/мм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 257	40,23	100,7	7,07	0,126	0,315
200	5 020	89,48	224,0	13,59	0,242	0,606
300	8 244	146,9	367,8	19,73	0,352	0,880
400	11 840	211,1	528,4	25,53	0,455	1,138
500	15 800	281,7	705,1	30,99	0,553	1,382
600	20 040	357,2	894,1	36,16	0,645	1,613
700	24 540	437,4	1095	41,04	0,732	1,831
800	29 270	521,8	1306	45,66	0,814	2,037
900	34 220	609,9	1527	50,05	0,892	2,233
1000	39 310	700,7	1754	54,22	0,967	2,419
1100	44 550	794,1	1988	58,19	1,037	2,596
1200	49 920	889,8	2227	61,96	1,105	2,764

Таблица 108

Теплоемкость I — пентена C_5H_{10}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	25,7	23,7	25,7	23,7	0,3665	0,3379	0,3665	0,3379	1,147	1,057	1,147	1,057
100	32,19	30,20	29,36	27,37	0,4590	0,4306	0,4186	0,3903	1,436	1,347	1,310	1,221
200	38,67	36,68	32,48	30,49	0,5514	0,5230	0,4631	0,4348	1,725	1,636	1,449	1,360
300	44,04	42,05	35,46	33,47	0,6280	0,5996	0,5056	0,4772	1,965	1,876	1,582	1,493
400	48,58	46,59	38,20	36,21	0,6927	0,6643	0,5447	0,5163	2,168	2,079	1,704	1,615
500	52,49	50,50	40,67	38,68	0,7484	0,7201	0,5799	0,5515	2,342	2,253	1,814	1,726
600	55,90	53,91	42,90	40,91	0,7971	0,7687	0,6117	0,5833	2,495	2,406	1,914	1,825
700	58,85	56,86	44,94	42,95	0,8391	0,8108	0,6408	0,6124	2,626	2,537	2,005	1,916
800	61,41	59,42	46,84	44,85	0,8756	0,8473	0,6679	0,6395	2,740	2,651	2,090	2,001
900	63,67	61,68	48,58	46,59	0,9079	0,8795	0,6927	0,6643	2,841	2,752	2,167	2,079
1000	65,61	63,62	50,20	48,21	0,9355	0,9072	0,7158	0,6874	2,927	2,838	2,240	2,151
1100	67,32	65,33	51,68	49,69	0,9599	0,9315	0,7369	0,7085	3,003	2,915	2,306	2,217
1200	68,77	66,78	53,05	51,06	0,9806	0,9522	0,7564	0,7281	3,068	2,979	2,367	2,278

Таблица 109

Энтальпия и энтропия I — пентена C_5H_{10}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 936	41,86	131,0	9,04	0,129	0,403
200	6 496	92,62	289,8	17,47	0,249	0,779
300	10 638	151,7	474,6	25,38	0,362	1,132
400	15 280	217,9	681,6	32,83	0,468	1,465
500	20 330	289,9	907,0	39,82	0,568	1,777
600	25 740	367,0	1148	46,41	0,662	2,071
700	31 460	448,6	1403	52,62	0,750	2,348
800	37 470	534,3	1672	58,50	0,834	2,610
900	43 720	623,4	1950	64,05	0,913	2,858
1000	50 200	715,8	2240	69,32	0,988	3,093
1100	56 850	810,6	2537	74,34	1,060	3,317
1200	63 660	907,7	2840	79,13	1,128	3,530

Таблица 110

Теплоемкость *cis* — 2 — пентена C_5H_{10}

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	23,5	21,5	23,5	21,5	0,3351	0,3066	0,3351	0,3066	1,048	0,959	1,048	0,959
100	29,70	27,71	26,61	24,62	0,4235	0,3951	0,3794	0,3511	1,325	1,236	1,187	1,098
200	36,37	34,38	29,80	27,81	0,5186	0,4902	0,4249	0,3965	1,623	1,534	1,329	1,241
300	42,19	40,20	33,05	31,06	0,6016	0,5732	0,4713	0,4429	1,882	1,793	1,474	1,386
400	47,05	45,06	35,98	33,99	0,6709	0,6425	0,5130	0,4847	2,099	2,010	1,605	1,516
500	51,23	49,24	38,61	36,62	0,7305	0,7021	0,5505	0,5222	2,286	2,197	1,722	1,634
600	54,84	52,85	41,01	39,02	0,7820	0,7536	0,5848	0,5564	2,447	2,358	1,830	1,741
700	57,97	55,98	43,22	41,23	0,8266	0,7982	0,6163	0,5879	2,586	2,497	1,928	1,839
800	60,68	58,69	45,23	43,24	0,8652	0,8369	0,6449	0,6166	2,707	2,618	2,018	1,929
900	63,04	61,05	47,06	45,07	0,8989	0,8705	0,6710	0,6426	2,812	2,724	2,099	2,011
1000	65,08	63,09	48,77	46,78	0,9280	0,8996	0,6954	0,6670	2,903	2,815	2,176	2,087
1100	66,85	64,86	50,33	48,34	0,9532	0,9248	0,7177	0,6893	2,982	2,894	2,245	2,157
1200	68,39	66,40	51,78	49,79	0,9752	0,9468	0,7383	0,7100	3,051	2,962	2,310	2,221

Таблица 111

Энтальпия и энтропия *cis* — 2 — пентена C_5H_{10}

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	<i>i</i>	<i>i'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 661	37,94	118,7	8,17	0,117	0,364
200	5 960	84,98	265,8	15,99	0,228	0,714
300	9 915	140,8	442,2	23,48	0,335	1,048
400	14 390	205,2	642,0	30,64	0,437	1,367
500	19 300	275,2	861,0	37,44	0,534	1,670
600	24 610	350,9	1098	43,90	0,626	1,959
700	30 250	431,4	1350	50,03	0,713	2,232
800	36 180	515,9	1614	55,84	0,796	2,491
900	42 350	603,9	1889	61,33	0,875	2,736
1000	48 770	695,4	2176	66,55	0,949	2,969
1100	55 360	789,5	2469	71,55	1,020	3,192
1200	62 140	886,0	2772	76,33	1,088	3,405

Таблица 112

Теплоемкость *trans* — 2 — пентена C₅H₁₀

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	$c_{p,m}$	$\mu c_{v,m}$	c_p	c_v	$c_{p,m}$	$c_{v,m}$	c'_p	c'_v	$c'_{p,m}$	$c'_{v,m}$
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/мм ³ град			
0	24,9	22,9	24,9	22,9	0,3550	0,3265	0,3550	0,3265	1,111	1,022	1,111	1,022
100	31,83	29,84	28,36	26,37	0,4539	0,4255	0,4044	0,3760	1,420	1,331	1,265	1,176
200	38,02	36,03	31,58	29,59	0,5421	0,5137	0,4503	0,4219	1,696	1,607	1,409	1,320
300	43,37	41,38	34,71	32,72	0,6184	0,5900	0,4949	0,4665	1,935	1,846	1,548	1,460
400	47,98	45,99	37,45	35,46	0,6841	0,6558	0,5340	0,5056	2,141	2,052	1,671	1,582
500	51,97	49,98	39,96	37,97	0,7410	0,7127	0,5698	0,5414	2,319	2,230	1,783	1,694
600	55,42	53,43	42,26	40,27	0,7902	0,7619	0,6026	0,5742	2,472	2,384	1,885	1,797
700	58,45	56,46	44,36	42,37	0,8334	0,8051	0,6325	0,6041	2,608	2,519	1,979	1,890
800	61,07	59,08	46,29	44,30	0,8708	0,8424	0,6600	0,6317	2,725	2,636	2,065	1,976
900	63,36	61,37	48,05	46,06	0,9034	0,8751	0,6851	0,6568	2,827	2,738	2,144	2,055
1000	65,34	63,35	49,69	47,70	0,9317	0,9033	0,7085	0,6801	2,915	2,826	2,217	2,128
1100	67,08	65,09	51,18	49,19	0,9565	0,9281	0,7298	0,7014	2,983	2,904	2,283	2,195
1200	68,58	66,59	52,59	50,60	0,9779	0,9495	0,7499	0,7215	3,060	2,971	2,346	2,257

Таблица 113

Энтальпия и энтропия *trans* — 2 — пентена C₅H₁₀

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
	ккал/моль	ккал/кг	ккал/мм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/мм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 836	40,44	126,5	8,87	0,127	0,396
200	6 316	90,06	281,8	17,12	0,244	0,764
300	10 410	148,5	464,4	24,89	0,355	1,111
400	14 980	213,6	668,4	32,24	0,460	1,438
500	19 980	284,9	891,5	39,17	0,559	1,748
600	25 360	361,6	1131	45,69	0,652	2,039
700	31 050	442,7	1385	51,86	0,740	2,314
800	37 030	528,0	1652	57,71	0,823	2,575
900	43 240	616,6	1930	63,26	0,902	2,822
1000	49 690	708,5	2217	68,51	0,977	3,057
1100	56 300	802,8	2511	73,52	1,048	3,280
1200	63 110	899,9	2815	78,30	1,117	3,493

Таблица 114

Теплоемкость 2 — метил — 1 — бутена C_5H_{10}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	24,8	22,8	24,8	22,8	0,3536	0,3251	0,3536	0,3251	1,106	1,017	1,106	1,017
100	31,92	29,93	28,58	26,59	0,4551	0,4268	0,4075	0,3791	1,424	1,335	1,275	1,186
200	38,23	36,24	31,93	29,94	0,5451	0,5167	0,4553	0,4269	1,706	1,617	1,424	1,335
300	43,64	41,65	34,91	32,92	0,6223	0,5939	0,4978	0,4694	1,947	1,858	1,557	1,469
400	48,25	46,26	37,69	35,70	0,6880	0,6596	0,5374	0,5090	2,153	2,064	1,681	1,593
500	52,23	50,24	40,21	38,22	0,7447	0,7164	0,5733	0,5450	2,330	2,241	1,794	1,705
600	55,66	53,67	42,47	40,48	0,7937	0,7653	0,6056	0,5772	2,483	2,394	1,895	1,806
700	58,66	56,67	44,56	42,57	0,8364	0,8081	0,6354	0,6070	2,617	2,528	1,988	1,899
800	61,26	59,27	46,51	44,52	0,8735	0,8451	0,6632	0,6348	2,733	2,644	2,075	1,986
900	63,53	61,54	48,27	46,28	0,9059	0,8775	0,6883	0,6599	2,834	2,745	2,153	2,065
1000	65,50	63,51	49,90	47,91	0,9340	0,9056	0,7115	0,6831	2,922	2,833	2,226	2,137
1100	67,21	65,22	51,41	49,42	0,9583	0,9300	0,7331	0,7047	2,998	2,910	2,294	2,205
1200	68,76	66,77	52,80	50,81	0,9804	0,9521	0,7529	0,7245	3,068	2,979	2,356	2,267

Таблица 115

Энтальпия и энтропия 2 — метил — 1 — бутена C_5H_{10}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2858	40,75	127,5	8,88	0,127	0,396
200	6386	91,06	284,8	17,18	0,245	0,767
300	10470	149,3	467,1	25,00	0,357	1,115
400	15070	215,0	672,4	32,40	0,462	1,446
500	20100	286,6	897,0	39,35	0,561	1,756
600	25480	363,4	1137	45,90	0,655	2,048
700	31190	444,8	1392	52,10	0,743	2,324
800	37210	530,6	1660	57,98	0,827	2,587
900	43440	619,5	1938	63,54	0,906	2,835
1000	49900	711,5	2226	68,80	0,981	3,069
1100	56550	806,4	2523	73,82	1,053	3,293
1200	63360	903,5	2827	78,61	1,1210	3,507

Таблица 116

Теплоемкость 3 — метил — 1 — бутена C_5H_{10}

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
°С												
0	26,6	24,6	26,6	24,6	0,3793	0,3508	0,3793	0,3508	1,187	1,097	1,187	1,097
100	33,53	31,54	30,07	28,08	0,4781	0,4497	0,4288	0,4004	1,496	1,407	1,341	1,253
200	39,50	37,51	33,29	31,30	0,5632	0,5349	0,4747	0,4463	1,762	1,673	1,485	1,396
300	44,62	42,63	36,30	34,31	0,6362	0,6079	0,5176	0,4892	1,991	1,902	1,619	1,531
400	49,04	47,05	38,94	36,95	0,6993	0,6709	0,5552	0,5269	2,188	2,099	1,737	1,648
500	52,88	50,89	41,32	39,33	0,7540	0,7256	0,5892	0,5608	2,359	2,270	1,843	1,755
600	56,18	54,19	43,51	41,52	0,8011	0,7727	0,6204	0,5920	2,506	2,418	1,941	1,852
700	59,07	57,08	45,53	43,54	0,8423	0,8139	0,6492	0,6208	2,635	2,547	2,031	1,942
800	61,61	59,62	47,38	45,39	0,8785	0,8501	0,6756	0,6472	2,749	2,660	2,114	2,025
900	63,84	61,85	49,09	47,10	0,9103	0,8819	0,7000	0,6716	2,848	2,759	2,190	2,101
1000	65,77	63,78	50,67	48,68	0,9378	0,9094	0,7225	0,6941	2,934	2,845	2,261	2,172
1100	67,44	65,45	52,11	50,12	0,9616	0,9332	0,7430	0,7147	3,009	2,920	2,325	2,236
1200	68,90	66,91	53,43	51,44	0,9824	0,9541	0,7619	0,7335	3,074	2,985	2,384	2,295

Таблица 117

Энтальпия и энтропия 3 — метил — 1 — бутена C_5H_{10}

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
°С						
0	0	0	0	0	0	0
100	3 007	42,88	134,1	9,18	0,131	0,410
200	6 658	94,94	297,0	17,92	0,256	0,800
300	10 890	155,3	485,7	26,02	0,371	1,161
400	15 580	222,1	694,8	33,56	0,479	1,497
500	20 660	294,6	921,5	40,59	0,579	1,811
600	26 110	372,2	1165	47,21	0,673	2,106
700	31 870	454,4	1422	53,44	0,762	2,384
800	37 900	540,5	1691	59,34	0,847	2,647
900	44 180	630,0	1971	64,92	0,926	2,896
1000	50 670	722,5	2261	70,20	1,001	3,132
1100	57 320	817,3	2557	75,23	1,073	3,356
1200	64 120	914,3	2861	80,04	1,141	3,571

Таблица 118

Теплоемкость 2 — метил — 2 — бутена C_5H_{10}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
•	23,7	21,7	23,7	21,7	0,3379	0,3094	0,3379	0,3094	1,057	0,968	1,057	0,968
100	30,48	28,49	27,19	25,20	0,4346	0,4062	0,3877	0,3593	1,360	1,271	1,213	1,124
200	36,74	34,75	30,44	28,45	0,5239	0,4955	0,4340	0,4057	1,639	1,550	1,358	1,269
300	42,26	40,27	33,46	31,47	0,6026	0,5742	0,4771	0,4487	1,885	1,797	1,493	1,404
400	47,03	45,04	36,28	34,29	0,6706	0,6422	0,5173	0,4889	2,098	2,009	1,619	1,530
500	51,18	49,19	38,86	36,87	0,7298	0,7014	0,5541	0,5257	2,283	2,195	1,734	1,645
600	54,75	52,76	41,21	39,22	0,7807	0,7523	0,5876	0,5592	2,443	2,354	1,838	1,750
700	57,87	55,88	43,36	41,37	0,8252	0,7968	0,6183	0,5899	2,582	2,493	1,934	1,846
800	60,58	58,59	45,35	43,36	0,8633	0,8354	0,6466	0,6183	2,703	2,614	2,023	1,934
900	62,94	60,95	47,18	45,19	0,8975	0,8691	0,6727	0,6444	2,808	2,719	2,105	2,016
1000	64,98	62,99	48,86	46,87	0,9265	0,8982	0,6967	0,6683	2,899	2,810	2,180	2,091
1100	66,76	64,77	50,41	48,42	0,9519	0,9236	0,7188	0,6904	2,978	2,890	2,249	2,160
1200	68,30	66,31	51,85	49,86	0,9739	0,9455	0,7393	0,7109	3,047	2,958	2,313	2,224

Таблица 119

Энтальпия и энтропия 2 — метил — 2 — бутена C_5H_{10}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 719	38,77	121,3	8,48	0,121	0 378
200	6 088	86,80	271,6	16,40	0,234	0,732
300	10 040	143,1	447,9	23,94	0,341	1,068
400	14 510	206,9	647,6	31,14	0,444	1,389
500	19 420	277,0	867,0	37,95	0,541	1,693
600	24 730	352,6	1103	44,38	0,633	1,980
700	30 350	432,8	1354	50,47	0,720	2,252
800	36 280	517,3	1618	56,27	0,802	2,510
900	42 460	605,4	1894	61,78	0,881	2,756
1000	48 860	696,7	2180	67,01	0,956	2,990
1100	55 450	790,7	2474	7 99	1,027	3,212
1200	62 220	887,2	2776	76,75	1,094	3,424

Таблица 120

Теплоемкость 1 — гексена C_6H_{12}

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	31,23	29,24	31,23	29,24	0,3711	0,3474	0,3711	0,3474	1,394	1,305	1,394	1,305
100	38,94	36,95	35,49	33,50	0,4627	0,4391	0,4217	0,3981	1,738	1,648	1,583	1,495
200	46,79	44,80	39,26	37,27	0,5560	0,5323	0,4665	0,4429	2,088	2,000	1,752	1,663
300	53,24	51,25	42,86	40,87	0,6326	0,6090	0,5093	0,4856	2,376	2,286	1,912	1,823
400	58,70	56,71	46,17	44,18	0,6975	0,6739	0,5486	0,5250	2,620	2,530	2,060	1,971
500	63,43	61,44	49,16	47,17	0,7537	0,7301	0,5842	0,5605	2,831	2,741	2,193	2,104
600	67,51	65,52	51,84	49,85	0,8022	0,7786	0,6160	0,5924	3,013	2,923	2,313	2,224
700	71,07	69,08	54,31	52,32	0,8445	0,8209	0,6454	0,6217	3,172	3,082	2,423	2,334
800	74,14	72,15	56,59	54,60	0,8810	0,8573	0,6724	0,6488	3,309	3,219	2,525	2,436
900	76,84	74,85	58,70	56,71	0,9131	0,8894	0,6975	0,6739	3,429	3,339	2,619	2,530
1000	79,18	77,19	60,65	58,66	0,9409	0,9172	0,7207	0,6970	3,534	3,444	2,706	2,617
1100	81,22	79,23	62,44	60,45	0,9651	0,9415	0,7420	0,7183	3,625	3,535	2,786	2,697
1200	82,94	80,95	64,07	62,08	0,9956	0,9619	0,7613	0,7377	3,701	3,611	2,858	2,774

Таблица 121

Энтальпия и энтропия 1 — гексена C_6H_{12}

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	<i>i</i>	<i>i'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 550	42,17	158,6	11,0	0,131	0,491
200	7 850	93,30	350,4	21,2	0,252	0,946
300	12 860	152,8	573,6	30,7	0,365	1,370
400	18 470	219,4	824,0	39,7	0,472	1,771
500	24 580	292,1	1097	48,1	0,572	2,146
600	31 100	369,6	1388	56,1	0,667	2,503
700	38 020	451,8	1696	63,6	0,756	2,837
800	45 270	537,9	2020	70,7	0,840	3,154
900	52 830	627,8	2357	77,4	0,920	3,453
1000	60 650	720,7	2706	83,8	0,996	3,739
1100	68 680	816,2	3065	89,9	1,068	4,011
1200	76 880	913,6	3430	95,7	1,137	4,270

Таблица 122

Теплоемкость *cis* — 2 — гексена C_6H_{12}

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	27,6	25,6	27,6	25,6	0,328	0,304	0,328	0,304	1,23	1,14	1,23	1,14
100	36,6	34,6	33,4	31,4	0,435	0,411	0,397	0,373	1,63	1,54	1,49	1,40
200	44,6	42,6	37,1	35,1	0,530	0,506	0,441	0,417	1,99	1,90	1,66	1,57
300	51,5	49,5	40,7	38,7	0,612	0,538	0,484	0,460	2,30	2,21	1,82	1,73
400	57,3	55,3	44,1	42,1	0,681	0,657	0,524	0,500	2,56	2,47	1,97	1,88
500	62,2	60,2	47,2	45,2	0,739	0,715	0,561	0,537	2,77	2,69	2,11	2,02
600	66,5	64,5	50,0	48,0	0,790	0,766	0,594	0,570	2,97	2,88	2,23	2,14
700	70,2	68,2	52,7	50,7	0,834	0,810	0,626	0,602	3,14	3,05	2,35	2,26

Таблица 123

Энтальпия и энтропия *cis* — 2 — гексена C_6H_{12}

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 340	39,7	149	10,1	0,120	0,450
200	7 420	88,2	332	19,7	0,234	0,879
300	12 200	145	546	28,9	0,343	1,289
400	17 600	210	788	37,6	0,447	1,677
500	23 600	281	1060	45,9	0,545	2,048
600	30 000	356	1340	53,7	0,638	2,396
700	36 900	438	1650	61,1	0,726	2,726

Таблица 124

Теплоемкость *trans*—2—гексена C₆H₁₂

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
°С												
0	30,6	28,6	30,6	28,6	0,364	0,340	0,364	0,340	1,36	1,28	1,36	1,28
100	38,8	36,8	34,4	32,4	0,461	0,437	0,409	0,385	1,73	1,64	1,53	1,44
200	46,2	44,2	38,4	36,4	0,549	0,525	0,456	0,432	2,06	1,97	1,71	1,62
300	52,7	50,7	42,2	40,2	0,626	0,602	0,501	0,478	2,35	2,26	1,88	1,79
400	58,2	56,2	45,6	43,6	0,692	0,668	0,542	0,518	2,60	2,51	2,03	1,94
500	63,0	61,0	48,6	46,6	0,749	0,725	0,577	0,554	2,81	2,72	2,17	2,08
600	67,1	65,1	51,2	49,2	0,797	0,774	0,608	0,585	2,99	2,90	2,28	2,19
700	70,6	68,6	53,8	51,8	0,839	0,815	0,639	0,616	3,15	3,06	2,40	2,31

Таблица 125

Энтальпия и энтропия *trans*—2—гексена C₆H₁₂

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/моль град		
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 440	40,9	153	10,8	0,128	0,482
200	7 680	91,2	342	20,9	0,248	0,933
300	12 700	150	564	30,4	0,351	1,357
400	18 200	217	812	39,3	0,467	1,754
500	24 300	289	1080	47,7	0,566	2,128
600	30 700	365	1370	55,6	0,660	2,481
700	37 700	447	1680	63,1	0,749	2,815

Таблица 126

Теплоемкость *cis* — 3 — гексена C_6H_{12}

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	26,6	24,6	26,6	24,6	0,316	0,292	0,316	0,292	1,19	1,10	1,19	1,10
100	36,1	34,1	33,0	31,0	0,429	0,405	0,392	0,368	1,61	1,52	1,47	1,38
200	44,4	42,4	36,8	34,8	0,528	0,504	0,437	0,414	1,98	1,89	1,64	1,55
300	51,5	49,5	40,4	38,4	0,612	0,588	0,480	0,456	2,30	2,21	1,80	1,71
400	57,3	55,3	43,8	41,8	0,681	0,657	0,520	0,497	2,56	2,47	1,95	1,86
500	62,3	60,3	47,0	45,0	0,740	0,716	0,558	0,535	2,78	2,69	2,10	2,01
600	66,6	64,6	50,0	48,0	0,791	0,768	0,594	0,570	2,97	2,88	2,23	2,14
700	70,2	68,2	52,6	50,6	0,834	0,810	0,625	0,601	3,14	3,05	2,35	2,26

Таблица 127

Энтальпия и энтропия *cis* — 3 — гексена C_6H_{12}

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	<i>i</i>	<i>i'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 300	39,2	147	10,1	0,120	0,451
200	7 360	87,4	328	19,7	0,235	0,879
300	12 100	144	540	28,8	0,343	1,285
400	17 500	208	780	37,5	0,446	1,674
500	23 500	279	1050	45,8	0,545	2,044
600	30 000	356	1340	53,7	0,639	2,395
700	36 800	438	1640	61,1	0,727	2,726

Таблица 128

Теплоемкость *trans* — 3 — гексена C₆H₁₂

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	$\mu c_p \cdot t$	$\mu c_v \cdot t$	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	30,5	28,5	30,5	28,5	0,362	0,339	0,362	0,339	1,36	1,27	1,36	1,27
100	39,0	37,0	35,1	33,1	0,463	0,440	0,417	0,393	1,74	1,65	1,57	1,48
200	46,5	44,5	38,8	36,8	0,552	0,529	0,461	0,437	2,07	1,98	1,73	1,64
300	53,0	51,0	42,5	40,5	0,630	0,606	0,505	0,481	2,33	2,27	1,90	1,81
400	58,6	56,6	46,0	44,0	0,696	0,673	0,547	0,523	2,61	2,52	2,05	1,96
500	63,2	61,2	48,9	46,9	0,751	0,727	0,581	0,557	2,82	2,73	2,18	2,09
600	67,3	65,3	51,6	49,6	0,800	0,776	0,613	0,589	3,00	2,91	2,30	2,21
700	70,8	68,8	54,2	52,2	0,841	0,817	0,644	0,620	3,16	3,07	2,42	2,33

Таблица 129

Энтальпия и энтропия *trans* — 3 — гексена C₆H₁₂

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 510	41,7	157	10,9	0,130	0,486
200	7 760	92,2	346	21,0	0,250	0,937
300	12 800	152	570	30,5	0,362	1,361
400	18 400	219	820	39,5	0,469	1,762
500	24 400	290	1090	47,9	0,569	2,137
600	31 000	368	1380	55,9	0,664	2,494
700	37 900	451	1690	63,4	0,753	2,828

Таблица 130

Теплоемкость 2 — метил — 1 — пентена C_6H_{12}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	30,4	28,4	30,4	28,4	0,361	0,337	0,361	0,337	1,36	1,27	1,36	1,27
100	38,9	36,9	35,1	33,1	0,462	0,438	0,417	0,393	1,73	1,65	1,57	1,40
200	46,4	44,4	38,8	36,8	0,551	0,528	0,461	0,437	2,07	1,98	1,73	1,64
300	52,9	50,9	42,5	40,5	0,629	0,605	0,505	0,481	2,36	2,27	1,90	1,81
400	58,5	56,5	46,0	44,0	0,695	0,671	0,547	0,523	2,61	2,52	2,05	1,96
500	63,2	61,2	48,9	46,9	0,751	0,727	0,581	0,557	2,82	2,73	2,18	2,09
600	67,4	65,4	51,6	49,6	0,801	0,777	0,613	0,589	3,01	2,92	2,30	2,21
700	70,9	68,9	54,2	52,2	0,842	0,819	0,644	0,620	3,17	3,08	2,42	2,33

Таблица 131

Энтальпия и энтропия 2 — метил — 1 — пентена C_6H_{12}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 510	41,7	157	10,8	0,129	0,482
200	7 760	92,2	346	20,9	0,249	0,932
300	12 800	152	570	30,5	0,363	1,361
400	18 400	219	820	39,5	0,470	1,762
500	24 400	290	1090	47,9	0,570	2,137
600	31 000	368	1330	55,8	0,663	2,489
700	37 900	451	1690	63,3	0,753	2,824

Таблица 132

Теплоемкость 3-метил-1-пентена C_6H_{12}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	32,0	30,0	32,0	30,0	0,380	0,356	0,380	0,356	1,43	1,34	1,43	1,34
100	40,4	38,4	36,4	34,4	0,480	0,456	0,432	0,409	1,80	1,71	1,62	1,53
200	47,8	45,8	40,4	38,4	0,568	0,544	0,480	0,456	2,13	2,04	1,80	1,71
300	54,1	52,1	43,9	41,9	0,643	0,619	0,522	0,498	2,41	2,32	1,96	1,87
400	59,4	57,4	47,2	45,2	0,706	0,682	0,561	0,537	2,65	2,56	2,11	2,02
500	64,1	62,1	50,0	48,0	0,762	0,738	0,594	0,570	2,86	2,77	2,23	2,14
600	68,0	66,0	52,7	50,7	0,808	0,784	0,626	0,602	3,03	2,94	2,35	2,26
700	71,4	69,4	55,2	53,2	0,848	0,825	0,656	0,632	3,19	3,10	2,46	2,37

Таблица 133

Энтальпия и энтропия 3-метил-1-пентена C_6H_{12}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 640	43,2	162	11,3	0,134	0,504
200	8 080	96,0	360	21,7	0,257	0,968
300	13 200	157	588	31,5	0,374	1,406
400	18 900	224	844	40,6	0,482	1,812
500	25 000	297	1120	49,2	0,584	2,195
600	31 600	376	1410	57,2	0,679	2,552
700	38 600	456	1720	64,8	0,770	2,831

Таблица 134

Теплоемкость 4 — метил — 1 — пентена C_6H_{12}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	30,4	28,4	30,4	28,4	0,361	0,337	0,361	0,337	1,36	1,27	1,36	1,27
100	39,3	37,3	35,5	33,5	0,467	0,443	0,422	0,358	1,75	1,66	1,58	1,49
200	47,0	45,0	39,4	37,4	0,558	0,535	0,468	0,444	2,10	2,01	1,76	1,67
300	53,6	51,6	42,9	40,9	0,637	0,613	0,510	0,486	2,39	2,30	1,91	1,82
400	59,2	57,2	46,4	44,4	0,703	0,680	0,551	0,528	2,64	2,55	2,07	1,98
500	63,9	61,9	49,4	47,4	0,759	0,735	0,587	0,563	2,85	2,76	2,20	2,11
600	67,9	65,9	52,2	50,2	0,807	0,783	0,620	0,596	3,03	2,94	2,33	2,24
700	71,3	69,3	54,7	52,7	0,847	0,823	0,650	0,626	3,18	3,09	2,44	2,35

Таблица 135

Энтальпия и энтропия 4 — метил — 1 — пентена C_6H_{12}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μs	s	s'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 550	42,2	158	10,9	0,130	0,486
200	7 880	93,6	352	21,1	0,251	0,941
300	12 900	153	573	30,7	0,365	1,370
400	18 600	220	828	39,8	0,473	1,776
500	24 700	294	1100	48,3	0,574	2,155
600	31 300	372	1400	56,3	0,669	2,512
700	38 300	455	1710	63,8	0,758	2,846

Таблица 136

Теплоемкость 2 — метил — 2 — пентена C_6H_{12} ;
 cis — 3 — метил — 2 — пентена C_6H_{12} ;
 trans — 3 — метил — 2 — пентена C_6H_{12} .

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	27,9	25,9	27,9	25,9	0,331	0,308	0,331	0,308	1,24	1,15	1,24	1,15
100	36,8	34,8	33,5	31,5	0,437	0,414	0,398	0,374	1,64	1,55	1,49	1,40
200	44,7	42,7	37,2	35,2	0,531	0,507	0,442	0,418	1,99	1,90	1,65	1,57
300	51,5	49,5	40,7	38,7	0,612	0,588	0,484	0,460	2,30	2,21	1,82	1,73
400	57,2	55,2	44,2	42,2	0,680	0,656	0,525	0,501	2,55	2,46	1,97	1,88
500	62,2	60,2	47,3	45,3	0,739	0,715	0,562	0,538	2,77	2,69	2,11	2,02
600	66,5	64,5	50,1	48,1	0,790	0,765	0,595	0,572	2,97	2,88	2,23	2,15
700	70,1	68,1	52,7	50,7	0,833	0,809	0,626	0,602	3,13	3,04	2,35	2,25

Таблица 137

Энтальпия и энтропия
 2 — метил — 2 — пентена C_6H_{12} и cis — 3 — метил — 2 — пентена C_6H_{12}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 350	39,8	149	10,1	0,120	0,451
200	7 040	88,4	332	19,7	0,234	0,879
300	12 200	145	546	28,9	0,344	1,289
400	17 700	210	788	37,6	0,447	1,678
500	23 650	281	1060	45,9	0,546	2,048
600	30 100	357	1340	53,7	0,638	2,396
700	36 900	438	1640	61,1	0,726	2,726

Таблица 138

Энтальпия и энтропия *trans* — 3 — метил — 2 — пентена C_6H_{12}

Температура °C	Энтальпия			Энтропия		
	μi ккал/моль	i ккал/кг	i' ккал/н.м. ³	μS ккал/моль град	S ккал/кг град	S' ккал/н.м. ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 350	39,8	149	10,1	0,120	0,450
200	7 040	88,4	332	19,7	0,234	0,879
300	12 200	145	546	28,9	0,343	1,289
400	17 700	210	788	37,6	0,447	1,677
500	23 650	281	1060	45,9	0,545	2,048
600	30 100	357	1340	53,8	0,639	2,400
700	36 900	438	1640	61,2	0,727	2,730

Таблица 139

Теплоемкость *cis* — 4 — метил — 2 — пентена C_6H_{12}

Температура °C	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ал/н.м. ³ град			
0	29,7	27,7	29,7	27,7	0,353	0,329	0,353	0,329	1,32	1,24	1,32	1,24
100	38,3	36,3	33,9	31,9	0,455	0,431	0,403	0,379	1,71	1,62	1,51	1,42
200	45,9	43,9	38,0	36,0	0,545	0,522	0,452	0,428	2,05	1,96	1,69	1,61
300	52,5	50,5	41,9	39,9	0,624	0,600	0,498	0,474	2,34	2,25	1,87	1,78
400	58,1	56,1	45,2	43,2	0,690	0,667	0,537	0,513	2,59	2,50	2,02	1,93
500	62,8	60,8	48,1	46,1	0,746	0,722	0,572	0,548	2,80	2,71	2,15	2,06
600	67,0	65,0	50,9	48,9	0,796	0,772	0,605	0,581	2,99	2,90	2,27	2,18
700	70,5	68,5	53,5	51,5	0,838	0,814	0,635	0,612	3,14	3,06	2,39	2,30

Таблица 140

Энтальпия и энтропия *cis* — 4 — метил — 2 — пентена C_6H_{12}

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	<i>i</i>	<i>i'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 390	40,3	151	10,6	0,126	0,473
200	7 600	90,4	338	20,6	0,244	0,919
300	12 600	149	561	30,1	0,357	1,342
400	18 100	215	808	38,9	0,462	1,735
500	24 000	286	1080	47,2	0,561	2,105
600	30 500	363	1360	55,1	0,654	2,458
700	37 400	445	1670	62,6	0,744	2,792

Таблица 141

Теплоемкость *trans* — 4 — метил — 2 — пентена C_6H_{12}

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	<i>c_p</i>	<i>c_v</i>	<i>c_{pt}</i>	<i>c_{vt}</i>	<i>c'_p</i>	<i>c'_v</i>	<i>c'_{pt}</i>	<i>c'_{vt}</i>
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	31,9	29,9	31,9	29,9	0,379	0,355	0,379	0,355	1,42	1,33	1,42	1,33
100	39,9	37,9	35,9	33,9	0,474	0,450	0,427	0,403	1,78	1,69	1,60	1,51
200	47,0	45,0	39,7	37,7	0,558	0,535	0,472	0,448	2,10	2,01	1,77	1,68
300	53,3	51,3	43,4	41,4	0,633	0,610	0,516	0,492	2,38	2,29	1,94	1,85
400	58,7	56,7	46,5	44,5	0,698	0,674	0,553	0,529	2,62	2,53	2,07	1,98
500	63,4	61,4	49,4	47,4	0,753	0,730	0,587	0,563	2,83	2,74	2,20	2,11
600	67,4	65,4	52,0	50,0	0,801	0,777	0,618	0,594	3,01	2,92	2,32	2,23
700	70,8	68,8	54,6	52,6	0,841	0,817	0,649	0,625	3,16	3,07	2,44	2,35

Таблица 142

Энтальпия и энтропия *trans*-4-метил-2-пентена C₆H₁₂

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	<i>i</i>	<i>i'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 590	42,7	160	11,2	0,133	0,500
200	7 940	94,4	354	21,5	0,256	0,959
300	13 000	155	582	31,1	0,370	1,388
400	18 600	221	828	40,1	0,477	1,789
500	24 700	294	1100	48,5	0,576	2,164
600	31 200	371	1390	56,5	0,671	2,521
700	38 200	454	1710	64,1	0,762	2,860

Таблица 143

Теплоемкость 2-этил-1-бутена C₆H₁₂

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	<i>c_p</i>	<i>c_v</i>	<i>c_{pt}</i>	<i>c_{vt}</i>	<i>c'_p</i>	<i>c'_v</i>	<i>c'_{pt}</i>	<i>c'_{vt}</i>
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	29,3	27,3	29,3	27,3	0,348	0,324	0,348	0,324	1,31	1,22	1,31	1,22
100	38,5	36,5	34,1	32,1	0,457	0,434	0,405	0,381	1,72	1,63	1,52	1,43
200	46,3	44,3	38,2	36,2	0,550	0,526	0,454	0,430	2,07	1,98	1,70	1,61
300	52,9	50,9	42,1	40,1	0,629	0,605	0,500	0,476	2,36	2,27	1,88	1,79
400	58,5	56,5	45,6	43,6	0,695	0,671	0,542	0,518	2,61	2,52	2,03	1,94
500	63,2	61,2	48,5	46,5	0,751	0,727	0,576	0,552	2,82	2,73	2,16	2,07
600	67,4	65,4	51,4	49,4	0,801	0,777	0,611	0,587	3,01	2,92	2,29	2,20
700	70,9	68,9	54,0	52,0	0,842	0,819	0,642	0,618	3,17	3,08	2,41	2,32

Таблица 142

Энтальпия и энтропия 2 — этил — 1 — бутена C_6H_{12}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	H_i	i	i'	ΔS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 410	40,5	152	10,7	0,127	0,474
200	7 640	90,8	340	20,7	0,246	0,920
300	12 600	150	564	30,2	0,359	1,344
400	18 200	217	812	39,2	0,466	1,746
500	24 200	288	1080	47,6	0,565	2,120
600	30 800	367	1370	55,6	0,661	2,477
700	37 800	449	1690	63,1	0,750	2,812

Таблица 145

Теплоемкость 2,3 — диметил — 1 — бутена C_6H_{12}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	31,7	29,7	31,7	29,7	0,377	0,353	0,377	0,353	1,41	1,32	1,41	1,32
100	40,5	38,5	36,1	34,1	0,481	0,457	0,429	0,405	1,81	1,72	1,61	1,52
200	47,8	45,8	40,2	38,2	0,568	0,544	0,478	0,454	2,13	2,04	1,79	1,70
300	53,9	51,9	43,9	41,9	0,640	0,617	0,522	0,498	2,40	2,31	1,96	1,87
400	59,2	57,2	47,2	45,2	0,703	0,680	0,561	0,537	2,64	2,55	2,11	2,02
500	63,9	61,9	50,0	48,0	0,759	0,736	0,594	0,570	2,85	2,76	2,23	2,14
600	67,8	65,8	52,5	50,5	0,806	0,782	0,624	0,600	3,02	2,94	2,34	2,25
700	71,2	69,2	55,0	53,0	0,846	0,822	0,654	0,630	3,18	3,09	2,45	2,36

Таблица 146

Энтальпия и энтропия 2,3-диметил-1-бутена C_6H_{12}

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
°С						
0	0	0	0	0	0	0
100	3 610	42,9	161	11,2	0,133	0,500
200	8 040	95,6	358	21,7	0,258	0,968
300	13 200	157	588	31,6	0,375	1,410
400	18 900	224	844	40,7	0,484	1,816
500	25 000	297	1120	49,1	0,583	2,191
600	31 500	374	1400	57,1	0,678	2,548
700	38 500	458	1720	64,7	0,769	2,887

Таблица 147

Теплоемкость 2,3-диметил-1-бутена C_6H_{12}

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
°С												
0	28,9	26,9	28,9	26,9	0,343	0,320	0,343	0,320	1,29	1,20	1,29	1,20
100	38,3	36,3	34,6	32,6	0,455	0,431	0,411	0,387	1,71	1,62	1,54	1,45
200	46,4	44,4	38,7	36,7	0,551	0,528	0,460	0,436	2,07	1,98	1,73	1,64
300	53,3	51,3	42,6	40,6	0,633	0,610	0,506	0,482	2,38	2,29	1,90	1,81
400	59,2	57,2	46,3	44,3	0,703	0,680	0,550	0,526	2,64	2,55	2,07	1,98
500	64,1	62,1	49,6	47,6	0,762	0,738	0,589	0,566	2,86	2,77	2,21	2,12
600	68,2	66,2	52,3	50,3	0,810	0,787	0,621	0,598	3,04	2,95	2,33	2,24
700	71,7	69,7	54,8	52,8	0,852	0,828	0,651	0,627	3,20	3,11	2,44	2,36

Таблица 148

Энтальпия и энтропия 3,3 — диметил — 1 — бутена C_6H_{12}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μl	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 460	41,1	154	11,0	0,131	0,491
200	7 740	92,0	346	21,1	0,251	0,941
300	12 800	152	570	30,7	0,365	1,369
400	18 500	220	828	39,8	0,473	1,775
500	24 800	294	1110	48,4	0,575	2,159
600	31 400	373	1400	56,5	0,671	2,520
700	38 400	456	1710	64,1	0,762	2,860

Таблица 149

Теплоемкость 2,3 — диметил — 2 — бутена C_6H_{12}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	28	26	28	26	0,333	0,309	0,333	0,309	1,25	1,16	1,25	1,16
100	36,5	34,5	33,2	31,2	0,434	0,410	0,394	0,371	1,63	1,54	1,48	1,39
200	44,2	42,2	36,8	34,8	0,525	0,501	0,437	0,413	1,97	1,88	1,64	1,55
300	50,8	48,8	40,4	38,4	0,604	0,580	0,480	0,456	2,27	2,18	1,80	1,71
400	56,6	54,6	43,8	41,8	0,673	0,649	0,520	0,497	2,52	2,44	1,95	1,86
500	61,6	59,6	46,8	44,8	0,732	0,708	0,556	0,532	2,75	2,66	2,09	2,00
600	66,0	64,0	49,6	47,6	0,784	0,760	0,589	0,566	2,94	2,86	2,21	2,12
700	69,8	67,8	52,2	50,2	0,829	0,806	0,620	0,596	3,11	3,02	2,33	2,24

Таблица 150

Энтальпия и энтропия 2,3 — диметил — 2 — бутена C_6H_{12}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 320	39,4	148	10,1	0,120	0,443
200	7 360	87,4	328	19,6	0,233	0,867
300	12 100	144	540	28,7	0,341	1,273
400	17 500	208	780	37,3	0,443	1,657
500	23 400	278	1040	45,5	0,541	2,022
600	29 800	353	1330	53,3	0,633	2,370
700	36 500	434	1630	60,7	0,721	2,701

Таблица 151

Теплоемкость 1 — гептена C_7H_{14}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	36,76	34,77	36,76	34,77	0,3744	0,3541	0,3744	0,3541	1 640	1,551	1,640	1,551
100	45,69	43,70	41,62	39,63	0,4654	0,4451	0,4239	0,4036	2,038	1,950	1,857	1,768
200	54,91	52,92	46,04	44,05	0,5593	0,5390	0,4689	0,4487	2,450	2,361	2,054	1,965
300	62,44	60,45	50,26	48,27	0,6360	0,6157	0,5119	0,4916	2,785	2,697	2,242	2,154
400	68,82	66,83	54,14	52,15	0,7009	0,6807	0,5514	0,5312	3,070	2,982	2,415	2,327
500	74,37	72,38	57,65	55,66	0,7575	0,7372	0,5872	0,5669	3,318	3,229	2,572	2,483
600	79,12	77,13	60,78	58,79	0,8058	0,7856	0,6191	0,5988	3,530	3,441	2,712	2,623
700	83,29	81,30	63,68	61,69	0,8483	0,8281	0,6486	0,6283	3,716	3,627	2,841	2,752
800	86,87	84,88	66,34	64,35	0,8848	0,8645	0,6757	0,6554	3,876	3,787	2,960	2,871
900	90,01	88,02	68,82	66,83	0,9166	0,8965	0,7009	0,6807	4,016	3,927	3,070	2,982
1000	92,75	90,76	71,00	69,01	0,9447	0,9244	0,7231	0,7029	4,138	4,049	3,168	3,079
1100	95,12	93,13	73,20	71,21	0,9688	0,9485	0,7456	0,7253	4,244	4,155	3,266	3,177
1200	97,11	95,12	75,09	73,10	0,9891	0,9688	0,7648	0,7445	4,332	4,244	3,350	3,261

Таблица 152

Энтальпия и энтропия 1 — гептена C_7H_{14}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	4 162	42,39	185,7	12,80	0,130	0,571
200	9 210	93,78	410,8	24,7	0,252	1,101
300	15 080	153,6	672,6	35,9	0,366	1,601
400	21 660	220,6	966,0	46,5	0,474	2,074
500	28 830	293,6	1286	56,4	0,574	2,516
600	36 470	371,5	1627	65,7	0,669	2,931
700	44 580	454,0	1989	74,5	0,759	3,323
800	53 070	540,6	2368	82,8	0,844	3,698
900	61 940	630,8	2763	90,7	0,924	4,046
1000	71 000	723,1	3168	98,2	1,000	4,381
1100	80 520	820,2	3593	105,3	1,072	4,697
1200	90 110	917,8	4020	112,0	1,141	4,996

Таблица 153

Теплоемкость 1 — октена C_8H_{16}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	42,29	40,30	42,29	40,30	0,3769	0,3592	0,3769	0,3592	1,887	1,798	1,887	1,798
100	52,44	50,45	47,75	45,76	0,4674	0,4496	0,4255	0,4078	2,340	2,251	2,130	2,042
200	63,03	61,04	52,82	50,83	0,5617	0,5440	0,4707	0,4530	2,812	2,723	2,356	2,268
300	71,64	69,65	57,66	55,67	0,6385	0,6207	0,5139	0,4961	3,196	3,108	2,572	2,484
400	78,94	76,95	62,11	60,12	0,7035	0,6858	0,5535	0,5358	3,522	3,433	2,771	2,682
500	85,31	83,32	66,14	64,15	0,7603	0,7425	0,5894	0,5717	3,806	3,717	2,951	2,862
600	90,73	88,74	69,72	67,73	0,8086	0,7909	0,6213	0,6036	4,048	3,959	3,110	3,022
700	95,51	93,52	73,05	71,06	0,8512	0,8335	0,6510	0,6333	4,261	4,172	3,259	3,170
800	99,60	97,61	76,09	74,10	0,8876	0,8699	0,6781	0,6604	4,444	4,355	3,395	3,306
900	103,18	101,19	78,94	76,95	0,9196	0,9018	0,7035	0,6858	4,603	4,514	3,522	3,433
1000	106,32	104,33	81,55	79,56	0,9475	0,9298	0,7268	0,7090	4,743	4,655	3,938	3,549
1100	109,02	107,03	83,96	81,97	0,9716	0,9539	0,7483	0,7305	4,864	4,775	3,746	3,657
1200	111,28	109,29	86,11	84,12	0,9917	0,9740	0,7674	0,7497	4,965	4,876	3,842	3,753

Таблица 154

Энтальпия и энтропия 1 — октена C_8H_{16}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	4 775	42,55	213,0	14,6	0,130	0,651
200	10 560	94,14	471,2	28,4	0,253	1,267
300	17 300	154,2	771,6	41,3	0,368	1,842
400	24 840	221,4	1108	53,4	0,476	2,382
500	33 070	294,7	1476	64,8	0,578	2,891
600	41 830	372,8	1866	75,4	0,672	3,364
700	51 140	455,7	2281	85,6	0,763	3,819
800	60 870	542,5	2716	95,1	0,847	4,243
900	71 050	633,2	3170	104,2	0,928	4,649
1000	81 550	726,8	3638	112,7	1,004	5,028
1100	92 360	823,1	4121	120,7	1,075	5,385
1200	103 300	920,9	4610	128,4	1,144	5,728

Таблица 155

Теплоемкость 1 — нонена C_9H_{18}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	47,82	45,83	47,82	45,83	0,3788	0,3631	0,3788	0,3631	2,133	2,045	2,133	2,045
100	59,19	57,20	53,88	51,89	0,4689	0,4531	0,4268	0,4111	2,641	2,552	2,404	2,315
200	71,15	69,16	59,60	57,61	0,5636	0,5478	0,4721	0,4564	3,174	3,085	2,659	2,570
300	80,84	78,85	65,06	63,07	0,6404	0,6246	0,5154	0,4996	3,607	3,518	2,903	2,814
400	89,06	87,07	70,08	68,09	0,7055	0,6898	0,5552	0,5394	3,973	3,885	3,127	3,038
500	96,25	94,26	74,63	72,64	0,7625	0,7467	0,5912	0,5754	4,294	4,205	3,330	3,241
600	102,34	100,35	78,66	76,67	0,8107	0,7950	0,6231	0,6074	4,566	4,477	3,509	3,421
700	107,73	105,74	82,42	80,43	0,8531	0,8377	0,6529	0,6372	4,806	4,717	3,677	3,588
800	112,33	110,34	85,84	83,85	0,8899	0,8741	0,6800	0,6642	5,011	4,923	3,830	3,741
900	116,35	114,36	89,06	87,07	0,9217	0,9059	0,7055	0,6898	5,191	5,102	3,973	3,885
1000	119,89	117,90	92,00	90,01	0,9497	0,9340	0,7288	0,7130	5,349	5,260	4,104	4,016
1100	122,92	120,93	94,72	92,73	0,9737	0,9580	0,7504	0,7346	5,484	5,395	4,226	4,137
1200	125,45	123,46	97,13	95,14	0,9938	0,9780	0,7694	0,7537	5,597	5,508	4,333	4,245

*

Таблица 156

Энтальпия и энтропия I — нонена C_9H_{18}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	5 388	42,68	240,4	16,6	0,132	0,741
200	11 920	94,42	531,8	32,1	0,254	1,433
300	19 520	154,6	870,9	46,7	0,370	2,083
400	28 030	222,1	1251	60,3	0,478	2,691
500	37 320	295,6	1665	73,1	0,579	3,262
600	47 200	373,9	2105	85,2	0,675	3,802
700	57 690	457,0	2574	96,6	0,765	4,310
800	68 670	544,0	3064	107,4	0,851	4,791
900	80 150	635,0	3576	117,5	0,931	5,245
1000	92 000	728,8	4104	127,1	1,007	5,674
1100	104 200	825,4	4649	136,3	1,080	6,081
1200	116 600	923,3	5200	145,0	1,149	6,469

Таблица 157

Теплоемкость I — декена $C_{10}H_{20}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	53,35	51,36	53,35	51,36	0,3804	0,3662	0,3804	0,3662	2,380	2,291	2,380	2,291
100	65,94	63,95	60,01	58,02	0,4701	0,4559	0,4278	0,4137	2,942	2,853	2,677	2,588
200	79,27	77,28	66,38	64,39	0,5652	0,5510	0,4733	0,4591	3,537	3,448	2,961	2,873
300	90,04	88,05	72,46	70,47	0,6420	0,6278	0,5166	0,5024	4,017	3,928	3,233	3,144
400	92,18	97,19	78,05	76,06	0,7071	0,6929	0,5565	0,5423	4,425	4,336	3,482	3,393
500	107,19	105,20	83,12	81,13	0,7642	0,7500	0,5926	0,5784	4,782	4,693	3,708	3,620
600	113,95	111,96	87,60	85,61	0,8124	0,7982	0,6246	0,6104	5,084	4,995	3,908	3,819
700	119,95	117,96	91,79	89,80	0,8552	0,8410	0,6544	0,6402	5,351	5,263	4,095	4,006
800	125,06	123,07	95,59	93,60	0,8916	0,8774	0,6815	0,6673	5,579	5,491	4,265	4,176
900	129,52	127,53	99,18	97,19	0,9234	0,9092	0,7071	0,6929	5,778	5,690	4,425	4,336
1000	133,46	131,47	102,45	100,46	0,9515	0,9373	0,7304	0,7162	5,954	5,865	4,571	4,482
1100	136,82	134,83	105,38	103,39	0,9755	0,9613	0,7513	0,7371	6,104	6,015	4,701	4,613
1200	139,62	137,63	108,15	106,16	0,9954	0,9812	0,7711	0,7569	6,229	6,140	4,825	4,736

Таблица 158

Энтальпия и энтропия 1 — декена $C_{10}H_{20}$

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	6 001	42,78	267,7	18,5	0,132	0,826
200	13 280	94,66	592,2	35,8	0,255	1,598
300	21 730	155,0	969,9	51,9	0,370	2,316
400	31 220	222,6	1393	67,2	0,479	2,999
500	41 560	296,3	1854	81,5	0,581	3,637
600	52 560	374,8	2345	95,0	0,677	4,239
700	64 250	458,1	2867	107,6	0,767	4,801
800	76 470	545,2	3412	119,6	0,852	5,336
900	89 260	636,4	3983	130,9	0,933	5,840
1000	102 500	730,4	4571	141,6	1,009	6,318
1100	115 900	826,4	5171	151,8	1,082	6,773
1200	129 800	925,3	5790	161,5	1,151	7,206

Таблица 159

Теплоемкость 1 — ундекена $C_{11}H_{22}$

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	58,88	56,89	58,88	56,89	0,3816	0,3687	0,3816	0,3687	2,627	2,538	2,627	2,588
100	72,69	70,70	66,14	64,15	0,4711	0,4582	0,4287	0,4158	3,243	3,154	2,951	2,862
200	87,39	85,40	73,16	71,17	0,5664	0,5535	0,4748	0,4613	3,899	3,810	3,264	3,175
300	99,24	97,25	79,86	77,87	0,6432	0,6303	0,5176	0,5047	4,427	4,339	3,563	3,474
400	109,30	107,31	86,02	84,03	0,7084	0,6955	0,5575	0,5446	4,876	4,788	3,838	3,749
500	118,13	116,14	91,61	89,62	0,7657	0,7528	0,5938	0,5809	5,270	5,181	4,087	3,998
600	125,56	123,57	96,54	94,55	0,8138	0,8009	0,6257	0,6128	5,602	5,513	4,307	4,218
700	132,17	130,18	101,16	99,17	0,8567	0,8438	0,6557	0,6428	5,897	5,808	4,513	4,424
800	137,79	135,80	105,34	103,35	0,8931	0,8802	0,6828	0,6699	6,147	6,059	4,700	4,611
900	142,69	140,70	109,30	107,31	0,9248	0,9119	0,7084	0,6955	6,366	6,277	4,876	4,788
1000	147,03	145,04	112,90	110,91	0,9530	0,9401	0,7318	0,7189	6,560	6,471	5,037	4,948
1100	150,72	148,73	116,24	114,25	0,9769	0,9640	0,7534	0,7405	6,724	6,635	5,186	5,097
1200	153,79	151,80	119,17	117,18	0,9968	0,9839	0,7724	0,7595	6,861	6,772	5,317	5,228

Таблица 160

Энтальпия и энтропия 1 — ундекена $C_{11}H_{22}$

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	<i>i</i>	<i>i'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>
	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
°С						
0	0	0	0	0	0	0
100	6 614	42,87	295,1	20,5	0,133	0,914
200	14 630	94,96	652,8	39,4	0,255	1,757
300	23 960	155,3	1069	57,8	0,371	2,552
400	34 410	223,0	1535	74,0	0,480	3,301
500	45 810	296,9	2044	89,8	0,582	4,006
600	57 920	375,4	2584	104,6	0,678	4,666
700	70 810	459,0	3159	118,6	0,768	5,291
800	84 270	546,2	3760	131,8	0,854	5,880
900	98 370	637,6	4388	144,3	0,935	6,437
1000	112 900	731,8	5037	156,1	1,012	6,964
1100	127 900	828,7	5705	167,4	1,085	7,468
1200	143 000	926,9	6380	178,0	1,153	7,941

Таблица 161

Теплоемкость 1 — додекена $C_{12}H_{24}$

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
°С												
0	64,41	62,42	64,41	62,42	0,3827	0,3709	0,3827	0,3709	2,874	2,785	2,874	2,785
100	79,44	77,45	72,27	70,28	0,4720	0,4602	0,4294	0,4176	3,544	3,455	3,224	3,135
200	95,51	93,52	79,94	77,95	0,5675	0,5556	0,4750	0,4631	4,261	4,172	3,566	3,478
300	108,44	106,45	87,26	85,27	0,6443	0,6325	0,5184	0,5066	4,838	4,749	3,893	3,804
400	119,42	117,43	93,99	92,00	0,7095	0,6977	0,5554	0,5466	5,328	5,239	4,193	4,104
500	129,07	127,08	100,01	98,02	0,7668	0,7550	0,5942	0,5824	5,758	5,670	4,462	4,373
600	137,17	135,18	105,48	103,49	0,8150	0,8032	0,6267	0,6149	6,120	6,031	4,706	4,617
700	144,39	142,40	110,53	108,54	0,8579	0,8460	0,6567	0,6449	6,442	6,353	4,931	4,842
800	150,52	148,53	115,09	113,10	0,8943	0,8825	0,6838	0,6720	6,715	6,626	5,135	5,046
900	155,86	153,87	119,42	117,43	0,9260	0,9142	0,7095	0,6977	6,954	6,865	5,328	5,239
1000	160,60	158,61	123,35	121,36	0,9542	0,9424	0,7329	0,7210	7,165	7,076	5,503	5,414
1100	164,62	162,63	127,00	125,01	0,9781	0,9662	0,7546	0,7427	7,344	7,256	5,666	5,577
1200	167,96	165,97	130,19	128,20	0,9979	0,9861	0,7735	0,7617	7,493	7,405	5,808	5,719

Таблица 162

Энтальпия и энтропия 1 — додекена $C_{12}H_{24}$

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t						
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	7 227	42,94	322 4	22,2	0,132	0,991
200	15 990	95,00	713,2	43,0	0,256	1,918
300	26 180	155,5	1168	62,5	0,371	2,789
400	37 600	223,4	1677	80,8	0,480	3,605
500	50 010	297,1	2231	97,9	0,582	4,369
600	63 290	376,0	2824	114,2	0,679	5,093
700	77 370	459,7	3452	129,5	0,770	5,778
800	92 070	547,0	4108	144,0	0,856	6,424
900	107 500	638,6	4795	157,6	0,937	7,031
1000	123 400	732,9	5503	170,5	1,013	7,607
1100	139 700	830,1	6233	182,8	1,086	8,155
1200	156 200	928,2	6970	194,4	1,155	8,673

Таблица 163

Теплоемкость 1 — тридекена $C_{13}H_{26}$

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t												
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	69,94	67,95	69,94	67,95	0,3836	0,3727	0,3836	0,3727	3,120	3,032	3,120	3,032
100	86,19	84,20	78,40	76,41	0,4727	0,4618	0,4300	0,4191	3,845	3,756	3,498	3,409
200	103,63	101,64	86,72	84,73	0,5683	0,5574	0,4756	0,4647	4,623	4,535	3,869	3,780
300	117,64	115,65	94,66	92,67	0,6452	0,6343	0,5191	0,5082	5,248	5,160	4,223	4,134
400	129,54	127,55	101,96	99,97	0,7104	0,6995	0,5592	0,5483	5,779	5,690	4,549	4,460
500	140,01	138,02	108,59	106,60	0,7679	0,7569	0,5955	0,5846	6,246	6,158	4,845	4,756
600	148,78	146,79	114,42	112,43	0,8160	0,8050	0,6275	0,6166	6,638	6,549	5,105	5,016
700	156,61	154,62	119,90	117,91	0,8589	0,8480	0,6576	0,6467	6,987	6,898	5,349	5,260
800	163,25	161,26	124,84	122,85	0,8953	0,8844	0,6847	0,6737	7,283	7,194	5,570	5,481
900	169,03	167,04	129,54	127,55	0,9270	0,9161	0,7104	0,6995	7,541	7,452	5,779	5,690
1000	174,17	172,18	133,80	131,81	0,9552	0,9443	0,7338	0,7229	7,770	7,682	5,969	5,881
1100	178,52	176,53	137,76	135,77	0,9791	0,9681	0,7555	0,7446	7,964	7,876	6,146	6,057
1200	182,13	180,14	141,21	139,22	0,9989	0,9879	0,7744	0,7635	8,126	8,037	6,300	6,211

Таблица 164

Энтальпия и энтропия 1 — тридекена $C_{13}H_{26}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	7 840	43,00	349,8	24,2	0,133	1,080
200	17 340	95,12	773,8	46,7	0,256	2,083
300	28 400	155,7	1267	67,9	0,372	3,029
400	40 780	223,7	1820	87,7	0,481	3,913
500	54 300	297,8	2423	106,4	0,584	4,747
600	68 650	376,5	3063	124,0	0,680	5,532
700	83 930	460,3	3744	140,6	0,771	6,273
800	99 870	547,8	4456	156,3	0,857	6,973
900	116 600	639,4	5201	171,1	0,938	7,633
1000	133 800	733,8	5969	185,2	1,021	8,263
1100	151 500	831,1	6761	198,5	1,088	8,856
1200	169 500	929,3	7560	211,0	1,157	9 414

Таблица 165

Теплоемкость 1 — тетрадекена $C_{14}H_{28}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	75,47	73,48	75,47	73,48	0,3843	0,3742	0,3843	0,3742	3,367	3,278	3,367	3,278
100	92,94	90,95	84,53	82,54	0,4733	0,4632	0,4305	0,4203	4,148	4,058	3,771	3,682
200	111,75	109,76	93,50	91,51	0,5591	0,5590	0,4762	0,4660	4,986	4,897	4,171	4,083
300	126,84	124,85	102,06	100,07	0,6459	0,6358	0,5197	0,5096	5,659	5,570	4,553	4,465
400	139,66	137,67	109,93	107,94	0,7112	0,7011	0,5598	0,5497	6,231	6,142	4,904	4,816
500	150,95	148,96	117,08	115,09	0,7687	0,7586	0,5962	0,5861	6,734	6,646	5,223	5,135
600	160,39	158,40	123,36	121,37	0,8168	0,8067	0,6282	0,6181	7,156	7,067	5,504	5,415
700	168,83	166,84	129,27	127,28	0,8598	0,8496	0,6583	0,6482	7,532	7,443	5,767	5,678
800	175,98	173,99	134,59	132,60	0,8962	0,8861	0,6854	0,6753	7,851	7,762	6,005	5,916
900	182,20	180,21	139,66	137,67	0,9279	0,9177	0,7112	0,7011	8,129	8,040	6,231	6,142
1000	187,74	185,75	144,25	142,26	0,9561	0,9459	0,7346	0,7245	8,376	8,287	6,436	6,347
1100	192,42	190,43	148,52	146,53	0,9799	0,9698	0,7564	0,7462	8,585	8,496	6,626	6,537
1200	196,30	194,31	152,23	150,24	0,9997	0,9895	0,7752	0,7651	8,758	8,669	6,792	6,703

Таблица 166

Энтальпия и энтропия 1 — тетрадекена $C_{14}H_{28}$

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t						
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	8 453	43,05	377,1	26,1	0,133	1,165
200	18 700	95,24	834,2	50,4	0,257	2,249
300	30 620	155,9	1366	73,0	0,372	3,257
400	43 970	223,9	1962	94,5	0,481	4,216
500	58 540	298,1	2612	114,7	0,584	5,117
600	74 020	376,9	3302	133,6	0,680	5,961
700	90 490	460,8	4037	151,5	0,772	6,759
800	107 700	548,3	4804	168,5	0,858	7,518
900	125 700	640,1	5608	184,5	0,940	8,231
1000	144 300	734,6	6436	199,7	1,017	8,909
1100	163 400	832,0	7289	214,0	1,090	9,548
1200	182 700	930,2	8150	227,5	1,159	10,150

Таблица 167

Теплоемкость 1 — пентадекена $C_{15}H_{30}$

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t												
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	81,00	79,01	81,00	79,01	0,3850	0,3755	0,3850	0,3755	3,614	3,525	3,614	3,525
100	99,69	97,70	90,66	88,67	0,4738	0,4644	0,4309	0,4215	4,448	4,359	4,045	3,956
200	119,87	117,88	100,28	98,29	0,5698	0,5603	0,4766	0,4672	5,348	5,259	4,474	4,385
300	136,04	134,05	109,46	107,47	0,6466	0,6371	0,5203	0,5108	6,069	5,980	4,883	4,795
400	149,78	147,79	117,90	115,91	0,7119	0,7025	0,5604	0,5509	6,682	6,593	5,260	5,171
500	161,89	159,90	125,57	123,58	0,7695	0,7600	0,5968	0,5874	7,223	7,134	5,602	5,513
600	172,00	170,01	132,30	130,31	0,8175	0,8081	0,6288	0,6194	7,674	7,585	5,902	5,814
700	181,05	179,06	138,64	136,65	0,8605	0,8511	0,6590	0,6495	8,077	7,989	6,185	6,096
800	188,71	186,72	144,34	142,35	0,8970	0,8875	0,6861	0,6766	8,419	8,330	6,440	6,351
900	195,37	193,38	149,78	147,79	0,9286	0,9192	0,7119	0,7025	8,716	8,627	6,682	6,593
1000	201,31	199,32	154,70	152,71	0,9568	0,9474	0,7353	0,7258	8,981	8,892	6,902	6,813
1100	206,32	204,33	159,28	157,29	0,9807	0,9712	0,7571	0,7476	9,205	9,116	7,106	7,017
1200	210,47	208,48	163,25	161,26	1,0004	0,9909	0,7759	0,7665	9,390	9,301	7,283	7,194

Таблица 168

Энтальпия и энтропия 1 — пентадекена $C_{15}H_{30}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	9 066	43,09	404,5	28,1	0,134	1,254
200	20 060	95,34	894,8	54,1	0,257	2,413
300	32 840	156,1	1465	78,5	0,373	3,502
400	47 160	224,2	2104	101,5	0,483	4,528
500	62 790	298,4	2801	123,1	0,585	5,492
600	79 380	377,3	3541	143,4	0,682	6,398
700	97 050	461,3	4330	162,6	0,773	7,254
800	115 500	548,9	5152	180,8	0,859	8,064
900	134 800	640,7	6014	197,9	0,941	8,829
1000	154 700	735,3	6902	214,1	1,018	9,554
1100	175 200	832,8	7817	229,5	1,091	10,239
1200	195 900	931,1	8740	244,0	1,160	10,886

Таблица 169

Теплоемкость 1 — гексадекена $C_{16}H_{32}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	86,53	84,54	86,53	84,54	0,3856	0,3767	0,3856	0,3767	3,860	3,772	3,860	3,772
100	106,44	104,45	96,79	94,60	0,4743	0,4654	0,4313	0,4224	4,749	4,660	4,318	4,229
200	127,99	126,00	107,06	105,07	0,5703	0,5615	0,4771	0,4682	5,710	5,621	4,776	4,688
300	145,24	143,25	116,86	114,87	0,6472	0,6383	0,5207	0,5119	6,480	6,391	5,214	5,125
400	159,90	157,91	125,87	123,88	0,7125	0,7036	0,5609	0,5520	7,134	7,045	5,616	5,527
500	172,83	170,84	134,06	132,07	0,7701	0,7613	0,5974	0,5885	7,711	7,622	5,981	5,892
600	183,61	181,62	141,24	139,25	0,8182	0,8093	0,6294	0,6205	8,192	8,103	6,301	6,212
700	193,27	191,28	148,01	146,02	0,8612	0,8523	0,6595	0,6507	8,623	8,534	6,603	6,515
800	201,44	199,45	154,09	152,10	0,8976	0,8888	0,6866	0,6778	8,987	8,898	6,875	6,786
900	208,54	206,55	159,90	157,91	0,9293	0,9204	0,7125	0,7036	9,304	9,215	7,134	7,045
1000	214,88	212,89	165,15	163,16	0,9575	0,9486	0,7359	0,7270	9,587	9,498	7,368	7,279
1100	220,22	218,23	170,04	168,05	0,9813	0,9724	0,7577	0,7488	9,825	9,736	7,586	7,497
1200	224,64	222,65	174,27	172,28	1,0010	0,9921	0,7766	0,7677	10,022	9,933	7,775	7,686

Таблица 170

Энтальпия и энтропия 1 — гексадекена $C_{16}H_{32}$

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
	°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	9 679	43,13	431,8	29,9	0,133	1,334
200	21 410	95,42	955,2	57,5	0,256	2,566
300	35 060	156,2	1564	83,7	0,373	3,735
400	50 350	224,8	2246	108,3	0,483	4,832
500	67 030	298,7	2991	131,3	0,585	5,858
600	84 740	377,6	3781	153,1	0,682	6,831
700	103 600	461,7	4622	173,6	0,774	7,745
800	123 300	549,3	5500	193,0	0,860	8,611
900	143 900	641,3	6421	211,2	0,941	9,423
1000	165 200	735,9	7368	228,5	1,018	10,195
1100	187 000	833,5	8345	244,9	1,091	10,928
1200	209 100	931,9	9330	260,4	1,160	11,618

Таблица 171

Теплоемкость 1 — гептадекена $C_{17}H_{34}$

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
	°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град		
0	92,06	90,07	92,06	90,07	0,3861	0,3777	0,3861	0,3777	4,107	4,018	4,107	4,018
100	113,19	111,20	102,92	100,93	0,4747	0,4664	0,4316	0,4233	5,050	4,961	4,592	4,503
200	136,11	134,12	113,84	111,85	0,5708	0,5625	0,4774	0,4691	6,072	5,984	5,079	4,990
300	154,44	152,45	124,26	122,27	0,6477	0,6394	0,5211	0,5128	6,890	6,801	5,544	5,455
400	170,02	168,03	133,84	131,85	0,7130	0,7047	0,5613	0,5530	7,585	7,496	5,971	5,882
500	183,77	181,78	142,55	140,56	0,7707	0,7624	0,5978	0,5895	8,199	8,110	6,360	6,271
600	195,22	193,23	150,18	148,19	0,8187	0,8104	0,6298	0,6215	8,710	8,621	6,700	6,611
700	205,49	203,50	157,38	155,39	0,8618	0,8535	0,6600	0,6517	9,168	9,079	7,021	6,933
800	214,17	212,18	163,84	161,85	0,8982	0,8899	0,6871	0,6788	9,555	9,466	7,310	7,221
900	221,71	219,72	170,02	168,03	0,9298	0,9215	0,7130	0,7047	9,891	9,803	7,585	7,496
1000	228,45	226,46	175,60	173,61	0,9581	0,9497	0,7364	0,7281	10,192	10,103	7,834	7,745
1100	234,12	232,13	180,80	178,81	0,9819	0,9735	0,7583	0,7499	10,445	10,356	8,066	7,977
1200	238,81	236,82	185,29	183,30	1,0015	0,9932	0,7771	0,7687	10,654	10,565	8,266	8,178

Таблица 172

Энтальпия и энтропия 1 — гептадекена $C_{17}H_{34}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	10 292	43,16	459,2	31,7	0,133	1,414
200	22 770	95,48	1016	61,2	0,257	2,730
300	37 280	156,3	1663	88,9	0,373	3,966
400	53 540	224,5	2388	115,0	0,482	5,131
500	71 280	298,9	3180	139,6	0,585	6,228
600	90 110	377,9	4020	162,8	0,683	7,261
700	110 200	462,0	4915	184,6	0,774	8,235
800	131 100	549,7	5848	205,1	0,860	9,150
900	153 000	641,7	6827	224,5	0,942	10,015
1000	175 600	736,4	7834	242,9	1,019	10,836
1100	198 900	834,1	8873	260,4	1,092	11,617
1200	222 300	932,4	9919	276,8	1,161	12,349

Таблица 173

Теплоемкость 1 — октадекена $C_{18}H_{36}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	97,59	95,60	97,59	95,60	0,3865	0,3787	0,3865	0,3787	4,354	4,265	4,354	4,265
100	119,94	117,95	109,05	107,06	0,4751	0,4672	0,4319	0,4241	5,351	5,262	4,865	4,776
200	144,23	142,24	120,62	118,63	0,5713	0,5634	0,4778	0,4699	6,435	6,346	5,381	5,293
300	163,64	161,65	131,66	129,67	0,6482	0,6403	0,5215	0,5136	7,301	7,212	5,874	5,785
400	180,14	178,15	141,81	139,82	0,7135	0,7056	0,5617	0,5538	8,037	7,948	6,327	6,238
500	194,71	192,72	151,04	149,05	0,7712	0,7633	0,5983	0,5904	8,687	8,598	6,738	6,650
600	206,83	204,84	159,12	157,13	0,8192	0,8114	0,6303	0,6224	9,227	9,139	7,099	7,010
700	217,71	215,72	166,75	164,76	0,8623	0,8544	0,6605	0,6526	9,713	9,624	7,439	7,351
800	226,90	224,91	173,59	171,60	0,8987	0,8908	0,6876	0,6797	10,123	10,034	7,745	7,656
900	234,88	232,89	180,14	178,15	0,9303	0,9225	0,7135	0,7056	10,479	10,390	8,037	7,948
1000	242,02	240,03	186,05	184,06	0,9586	0,9507	0,7369	0,7290	10,797	10,709	8,300	8,212
1100	248,02	246,03	191,56	189,57	0,9824	0,9745	0,7587	0,7509	11,065	10,976	8,546	8,457
1200	252,98	250,99	196,31	194,32	1,0020	0,9941	0,7776	0,7697	11,286	11,198	8,758	8,669

Таблица 174

Энтальпия и энтропия 1 — октадекена $C_{18}H_{36}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	10 905	43,19	486,5	33,6	0,133	1,499
200	24 120	95,56	1 076	64,9	0,257	2,895
300	39 500	156,5	1 762	94,2	0,373	4,202
400	56 720	224,7	2 531	121,9	0,483	5,438
500	75 520	299,2	3 369	148,0	0,586	6,603
600	95 470	378,2	4 259	172,5	0,683	7,696
700	116 700	462,4	5 207	195,5	0,774	8,722
800	138 900	550,1	6 196	217,4	0,861	9,699
900	162 100	642,2	7 233	238,0	0,943	10,618
1000	186 100	736,9	8 300	257,5	1,020	11,488
1100	210 700	834,6	9 401	275,9	1,093	12,309
1200	235 600	933,1	10 510	293,3	1,162	13,085

Таблица 175

Теплоемкость 1 — нонадекена $C_{19}H_{38}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	103,12	101,13	103,12	101,13	0,3870	0,3795	0,3870	0,3795	4,601	4,512	4,601	4,512
100	126,69	124,70	115,18	113,19	0,4754	0,4679	0,4322	0,4247	5,652	5,563	5,139	5,050
200	152,35	150,36	127,40	125,41	0,5717	0,5642	0,4781	0,4706	6,797	6,708	5,684	5,595
300	172,84	170,85	139,06	137,07	0,6486	0,6411	0,5218	0,5143	7,711	7,622	6,204	6,115
400	190,26	188,27	149,78	147,79	0,7139	0,7065	0,5620	0,5546	8,488	8,399	6,682	6,593
500	205,65	203,66	159,53	157,54	0,7717	0,7642	0,5986	0,5912	9,175	9,086	7,117	7,028
600	213,44	216,45	168,06	166,07	0,8197	0,8122	0,6306	0,6232	9,745	9,657	7,498	7,409
700	229,93	227,94	176,12	174,13	0,8628	0,8553	0,6609	0,6534	10,258	10,169	7,857	7,769
800	239,63	237,64	183,34	181,35	0,8992	0,8917	0,6880	0,6805	10,691	10,602	8,179	8,091
900	248,05	246,06	190,26	188,27	0,9308	0,9233	0,7139	0,7065	11,066	10,978	8,488	8,399
1000	255,59	253,60	196,50	194,51	0,9591	0,9516	0,7374	0,7299	11,403	11,314	8,767	8,678
1100	261,92	259,93	202,32	200,33	0,9828	0,9754	0,7592	0,7517	11,685	11,596	9,026	8,937
1200	267,15	265,16	207,33	205,34	1,0025	0,9950	0,7780	0,7705	11,919	11,830	9,250	9,161

Таблица 179

Энтальпия и энтропия 1 — нонадекена $C_{19}H_{38}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	11 520	43,22	513,9	35,6	0,134	1,589
200	25 480	95,62	1 137	68,6	0,257	3,061
300	41 720	156,5	1 861	99,7	0,374	4,448
400	59 910	224,8	2 673	128,9	0,484	5,751
500	79 770	299,3	3 559	156,4	0,587	6,978
600	100 800	378,4	4 499	182,1	0,683	8,125
700	123 300	462,6	5 500	206,6	0,775	9,218
800	146 700	550,4	6 543	229,6	0,862	10,244
900	171 200	642,5	7 639	251,4	0,943	11,216
1000	196 500	737,4	8 767	272,1	1,021	12,140
1100	222 600	835,1	9 929	291,6	1,094	13,010
1200	248 800	933,6	11 100	309,9	1,163	13,826

Таблица 177

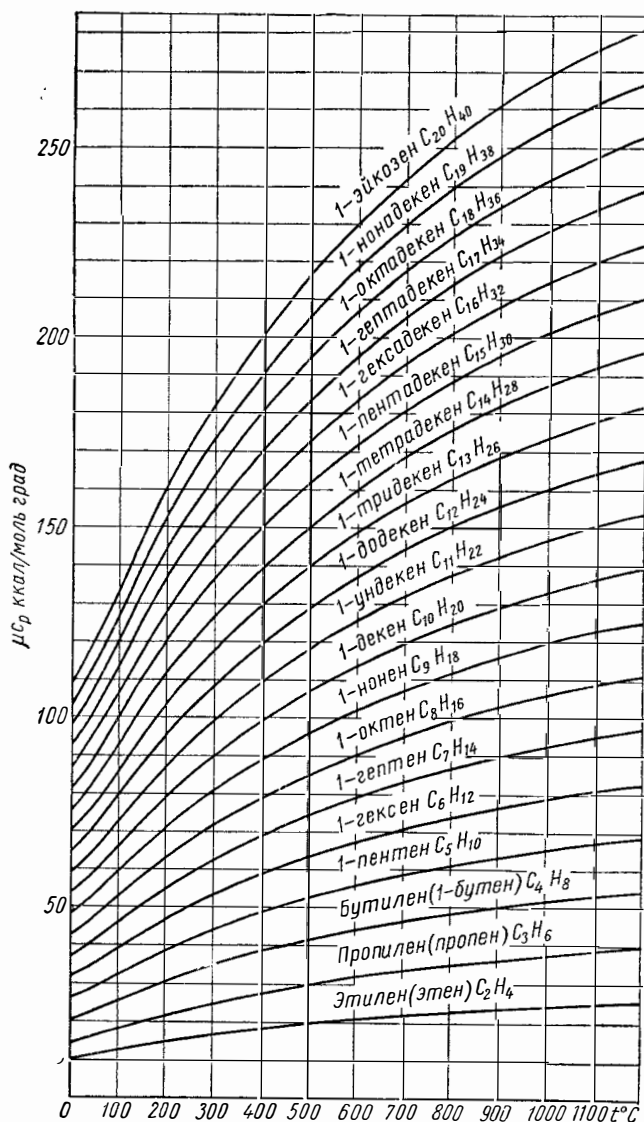
Теплоемкость 1 — эйкозена $C_{20}H_{40}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	108,65	106,66	108,65	106,66	0,3873	0,3802	0,3873	0,3802	4,847	4,759	4,847	4,759
100	133,44	131,45	121,31	119,32	0,4757	0,4686	0,4324	0,4254	5,953	5,864	5,412	5,323
200	160,47	158,48	134,18	132,19	0,5720	0,5650	0,4783	0,4712	7,159	7,070	5,986	5,897
300	182,04	180,05	146,46	144,47	0,6489	0,6418	0,5221	0,5150	8,121	8,033	6,534	6,445
400	200,38	198,39	157,75	155,76	0,7143	0,7072	0,5623	0,5553	8,940	8,851	7,038	6,949
500	216,59	214,60	168,02	166,03	0,7721	0,7650	0,5990	0,5919	9,663	9,574	7,496	7,407
600	230,05	228,06	177,00	175,01	0,8201	0,8130	0,6310	0,6239	10,263	10,175	7,897	7,808
700	242,15	240,16	185,49	183,50	0,8632	0,8561	0,6612	0,6541	10,803	10,714	8,275	8,187
800	252,36	250,37	193,09	191,10	0,8996	0,8925	0,6883	0,6812	11,259	11,170	8,614	8,526
900	261,22	259,23	200,38	198,39	0,9312	0,9241	0,7143	0,7072	11,654	11,565	8,940	8,851
1000	269,16	267,17	206,95	204,96	0,9595	0,9524	0,7377	0,7306	12,008	11,919	9,233	9,144
1100	275,82	273,83	213,08	211,09	0,9832	0,9762	0,7596	0,7525	12,305	12,217	9,506	9,418
1200	281,32	279,33	218,35	216,36	1,0029	0,9958	0,7784	0,7713	12,551	12,462	9,741	9,653

Таблица 178

Энтальпия и энтропия 1 — эйкозена $C_{20}H_{40}$

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t						
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	12 130	43,24	541,2	37,3	0,133	1,664
200	26 840	95,66	1 197	72,1	0,257	3,217
300	43 940	156,6	1 960	104,9	0,374	4,680
400	63 100	224,9	2 815	135,7	0,484	6,054
500	84 010	299,5	3 748	164,7	0,587	7,348
600	106 200	378,6	4 738	191,7	0,683	8,553
700	129 800	462,8	5 793	217,4	0,775	9,699
800	154 500	550,6	6 891	241,8	0,862	10,788
900	180 300	642,9	8 046	264,8	0,944	11,814
1000	207 000	737,7	9 233	286,4	1,021	12,777
1100	234 400	835,6	10 457	306,9	1,094	13,693
1200	262 000	934,1	11 689	326,1	1,163	14,549



Фиг. 5. Истинные молярные теплоемкости при постоянном давлении для углеводородов этиленового ряда C_mH_{2m}

$$\mu C_p = f(t)$$

V. ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ
И ЭНТРОПИИ УГЛЕВОДОРОДОВ
АЦЕТИЛЕНОВОГО РЯДА $C_m H_{2m-2}$

(таблицы 179—192)

Таблица 179

Теплоемкость ацетилена (этина) C_2H_2

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
°C												
0	10,01	8,02	10,01	8,02	0,38447	0,3080	0,38447	0,3080	0,4466	0,3578	0,4466	0,3578
100	11,63	9,64	10,956	8,970	0,44669	0,3703	0,42080	0,3445	0,5189	0,4301	0,48879	0,4002
200	12,71	10,72	11,588	9,602	0,48817	0,4117	0,44508	0,3688	0,5670	0,4783	0,51698	0,4284
300	13,52	11,53	12,104	10,118	0,51928	0,4428	0,46489	0,38862	0,6032	0,5144	0,54000	0,45140
400	14,19	12,20	12,548	10,562	0,54501	0,4686	0,48195	0,40567	0,6331	0,5443	0,55981	0,47121
500	14,777	12,791	12,936	10,950	0,56756	0,49128	0,49685	0,42057	0,65926	0,57065	0,57712	0,48852
600	15,305	13,319	13,289	11,303	0,58784	0,51156	0,51041	0,43413	0,68281	0,59421	0,59287	0,50427
700	15,789	13,803	13,614	11,628	0,60643	0,53015	0,52289	0,44661	0,70441	0,61580	0,60737	0,51877
800	16,230	14,244	13,917	11,931	0,62337	0,54709	0,53453	0,45825	0,72408	0,63548	0,62089	0,53229
900	16,632	14,646	14,198	12,212	0,63881	0,56253	0,54532	0,46904	0,74202	0,65341	0,63343	0,54482
1000	16,996	15,010	14,459	12,473	0,65279	0,57651	0,55535	0,47907	0,75826	0,66965	0,64507	0,55647
1100	17,325	15,339	14,706	12,720	0,66542	0,58915	0,56483	0,48855	0,77293	0,68433	0,65609	0,56749
1200	17,619	15,633	14,938	12,952	0,67672	0,60044	0,57374	0,49746	0,78605	0,69745	0,66644	0,57784

Таблица 180

Энтальпия и энтропия ацетилена (этина) C_2H_2

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
°C						
0	0	0	0	0	0	0
100	1 095,6	42,080	48,879	3,384	0,1300	0,1510
200	2 317,6	89,016	103,40	6,280	0,2412	0,2802
300	3 631,2	139,47	162,00	8,798	0,3379	0,3925
400	5 019,2	192,78	223,92	11,029	0,4236	0,4920
500	6 468,0	248,42	288,56	13,036	0,5007	0,5816
600	7 973,4	306,25	355,72	14,868	0,5711	0,6633
700	9 529,8	366,02	425,16	16,555	0,6359	0,7386
800	11 134	427,62	496,71	18,123	0,6961	0,8085
900	12 778	490,79	570,09	19,589	0,7524	0,8739
1000	14 459	555,35	645,07	20,965	0,8053	0,9353
1100	16 177	621,31	721,70	22,263	0,8551	0,9932
1200	17 926	688,49	799,73	23,493	0,9024	1,0481

Таблица 181

Теплоемкость метилацетилена (пропина) C_3H_4

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/мм ³ град			
°C												
0	13,69	11,70	13,69	11,70	0,3417	0,2920	0,3417	0,2920	0,6108	0,5220	0,6108	0,5220
100	16,61	14,62	15,26	13,27	0,4146	0,3649	0,3809	0,3312	0,7410	0,6522	0,6808	0,5920
200	19,12	17,13	16,57	14,58	0,4773	0,4276	0,4136	0,3639	0,8530	0,7642	0,7392	0,6505
300	21,27	19,28	17,80	15,81	0,5309	0,4812	0,4443	0,3946	0,9489	0,8601	0,7941	0,7053
400	23,11	21,12	18,89	16,90	0,5769	0,5272	0,4715	0,4218	1,031	0,9422	0,8427	0,7540
500	24,72	22,73	19,90	17,91	0,6170	0,5674	0,4967	0,4471	1,103	1,014	0,8878	0,7990
600	26,14	24,15	20,84	18,85	0,6525	0,6028	0,5202	0,4705	1,166	1,077	0,9297	0,8410
700	27,38	25,39	21,69	19,70	0,6834	0,6338	0,5414	0,4917	1,221	1,133	0,9677	0,8789
800	28,48	26,49	22,45	20,46	0,7109	0,6612	0,5604	0,5107	1,271	1,182	1,002	0,9128
900	29,44	27,45	23,18	21,19	0,7349	0,6852	0,5786	0,5289	1,313	1,225	1,034	0,9454
1000	30,27	28,28	23,84	21,85	0,7556	0,7059	0,5951	0,5454	1,350	1,262	1,064	0,9748
1100	31,01	29,02	24,47	22,48	0,7740	0,7244	0,6108	0,5611	1,383	1,295	1,092	1,003
1200	31,66	29,67	25,04	23,05	0,7903	0,7406	0,6250	0,5754	1,412	1,324	1,117	1,028

Таблица 182

Энтальпия и энтропия метилацетилена (пропина) C_3H_4

Температура	Энтальпия			Энтропия								
	μi	i	i'	μS	S	S'						
t	ккал/моль			ккал/кг град								
°C												
0	0	0	0	0	0	0						
100	1 526	38,09	68,08	4,70	0,117	0,210						
200	3 314	82,72	147,8	8,94	0,223	0,399						
300	5 340	133,3	238,2	12,80	0,320	0,571						
400	7 556	188,6	337,1	16,38	0,409	0,731						
500	9 950	248,3	443,9	19,69	0,491	0,879						
600	12 510	312,1	557,8	22,78	0,569	1,017						
700	15 180	379,0	677,4	25,68	0,641	1,146						
800	17 960	448,3	801,6	28,41	0,709	1,268						
900	20 860	520,7	930,6	30,99	0,774	1,383						
1000	23 840	595,1	1064	33,44	0,835	1,492						
1100	26 920	671,9	1201	35,76	0,893	1,596						
1200	30 050	750,0	1340	37,97	0,948	1,694						

Таблица 183

Теплоемкость этилацетилена (1— бутина) C_4H_6

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
°С												
0	18,19	16,20	18,19	16,20	0,3363	0,2995	0,3363	0,2995	0,8115	0,7227	0,8115	0,7227
100	22,76	20,77	20,79	18,80	0,4208	0,3840	0,3844	0,3476	1,015	0,9266	0,927	0,8387
200	26,66	24,67	22,77	20,78	0,4929	0,4561	0,4210	0,3842	1,189	1,101	1,016	0,9271
300	30,00	28,01	24,62	22,63	0,5546	0,5179	0,4552	0,4184	1,338	1,250	1,098	1,010
400	32,86	30,87	26,33	24,34	0,6075	0,5707	0,4868	0,4500	1,466	1,377	1,175	1,086
500	35,32	33,33	27,90	25,91	0,6530	0,6162	0,5158	0,4790	1,576	1,487	1,245	1,156
600	37,47	35,48	29,32	27,33	0,6928	0,6560	0,5421	0,5053	1,672	1,583	1,308	1,219
700	39,35	37,36	30,61	28,62	0,7275	0,6907	0,5659	0,5291	1,756	1,667	1,366	1,277
800	40,99	39,00	31,81	29,82	0,7578	0,7210	0,5881	0,5513	1,829	1,740	1,419	1,330
900	42,42	40,43	32,91	30,92	0,7843	0,7475	0,6084	0,5717	1,892	1,804	1,468	1,379
1000	43,67	41,68	33,93	31,94	0,8074	0,7706	0,6273	0,5905	1,948	1,859	1,514	1,425
1100	44,76	42,77	34,87	32,88	0,8275	0,7907	0,6447	0,6079	1,997	1,908	1,555	1,467
1200	45,72	43,73	35,73	33,74	0,8453	0,8085	0,6606	0,6238	2,040	1,951	1,594	1,505

Таблица 184

Энтальпия и энтропия этилацетилена (1— бутина) C_4H_6

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
°С						
0	0	0	0	0	0	0
100	2 079	38,44	92,75	6,38	0,118	0,284
200	4 554	84,20	203,2	12,25	0,227	0,546
300	7 386	136,6	329,4	17,67	0,327	0,788
400	10 530	194,7	470,0	22,74	0,420	1,014
500	13 950	257,9	622,5	27,46	0,508	1,225
600	17 590	325,3	784,8	31,88	0,589	1,422
700	21 430	396,1	956,2	36,04	0,666	1,608
800	25 450	470,5	1135	39,98	0,739	1,783
900	29 620	547,6	1321	43,70	0,808	1,949
1000	33 930	627,3	1514	47,21	0,873	2,106
1100	38 360	709,2	1712	50,56	0,935	2,255
1200	42 880	792,7	1913	53,74	0,994	2,397

Таблица 185

Теплоемкость диметилацетилена (2 — бутина) C_4H_6

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	17,19	15,20	17,19	15,20	0,3178	0,2810	0,3178	0,2810	0,7669	0,6781	0,7669	0,6781
100	21,58	19,59	19,77	17,78	0,3990	0,3622	0,3655	0,3287	0,9628	0,8740	0,8820	0,7932
200	25,37	23,38	21,66	19,67	0,4691	0,4323	0,4005	0,3637	1,132	1,043	0,9663	0,8775
300	28,81	26,82	23,48	21,49	0,5326	0,4959	0,4341	0,3973	1,285	1,196	1,047	0,9587
400	31,83	29,84	25,19	23,20	0,5885	0,5517	0,4657	0,4289	1,420	1,331	1,124	1,035
500	34,47	32,48	26,77	24,78	0,6373	0,6005	0,4949	0,4581	1,538	1,449	1,194	1,105
600	36,78	34,79	28,26	26,27	0,6800	0,6432	0,5225	0,4857	1,641	1,552	1,261	1,172
700	38,77	36,78	29,63	27,64	0,7168	0,6800	0,5478	0,5110	1,730	1,641	1,322	1,233
800	40,52	38,53	30,89	28,90	0,7491	0,7124	0,5711	0,5343	1,808	1,719	1,378	1,289
900	42,04	40,05	32,04	30,05	0,7772	0,7405	0,5924	0,5556	1,876	1,787	1,429	1,341
1000	43,36	41,37	33,11	31,12	0,8017	0,7649	0,6121	0,5754	1,934	1,846	1,477	1,388
1100	44,51	42,52	34,07	32,08	0,8229	0,7861	0,6299	0,5931	1,986	1,897	1,520	1,431
1200	45,51	43,52	35,01	33,02	0,8414	0,8046	0,6473	0,6105	2,030	1,942	1,562	1,473

Таблица 186

Энтальпия и энтропия диметилацетилена (2 — бутина) C_4H_6

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	1 977	36,55	88,20	6,03	0,111	0,269
200	4 332	80,10	193,4	11,61	0,215	0,518
300	7 044	130,2	314,1	16,80	0,311	0,749
400	10 070	186,3	449,6	21,66	0,400	0,966
500	13 390	247,4	597,0	26,26	0,486	1,171
600	16 960	313,5	756,6	30,60	0,566	1,365
700	20 740	383,5	925,4	34,69	0,641	1,548
800	24 710	456,9	1102	38,57	0,713	1,721
900	28 840	533,2	1286	42,25	0,781	1,885
1000	33 110	612,1	1477	45,74	0,846	2,041
1100	37 480	692,9	1672	49,06	0,907	2,189
1200	42 010	776,8	1874	52,22	0,965	2,330

Таблица 187

Теплоемкость *n* — пропилацетилена (1— пентина) C₅H₈

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
°C												
0	23,9	21,9	23,9	21,9	0,351	0,321	0,351	0,321	1,07	0,977	1,07	0,977
100	29,7	27,7	27,3	25,3	0,436	0,407	0,401	0,371	1,32	1,24	1,22	1,13
200	34,8	32,8	29,9	27,9	0,511	0,482	0,439	0,410	1,55	1,46	1,33	1,24
300	39,3	37,3	32,3	30,3	0,577	0,548	0,474	0,445	1,75	1,66	1,44	1,35
400	43,1	41,1	34,5	32,5	0,633	0,603	0,506	0,477	1,92	1,83	1,54	1,45
500	46,3	44,3	36,6	34,6	0,680	0,650	0,537	0,508	2,07	1,98	1,63	1,54
600	49,1	47,1	38,4	36,4	0,721	0,691	0,564	0,534	2,19	2,10	1,71	1,62
700	51,6	49,6	40,0	38,0	0,758	0,728	0,587	0,558	2,30	2,21	1,78	1,69
800	53,8	51,8	41,5	39,5	0,790	0,760	0,609	0,580	2,40	2,31	1,85	1,76
900	55,6	53,6	43,1	41,1	0,816	0,787	0,633	0,603	2,48	2,39	1,92	1,83
1000	57,3	55,3	44,5	42,5	0,841	0,812	0,653	0,624	2,56	2,47	1,98	1,90
1100	58,7	56,7	45,7	43,7	0,862	0,832	0,671	0,642	2,62	2,53	2,04	1,95
1200	59,9	57,9	46,9	44,9	0,879	0,850	0,689	0,659	2,67	2,58	2,09	2,00

Таблица 188

Энтальпия и энтропия *n* — пропилацетилена (1— пентина) C₅H₈

Температура	Энтальпия			Энтропия								
	μi	i	i'	μS	S	S'						
t	ккал/моль			ккал/кг град								
°C												
0	0	0	0	0	0	0						
100	2 730	40,1	122	8,4	0,123	0,375						
200	5 980	87,8	266	16,1	0,236	0,719						
300	9 690	142	432	23,2	0,341	1,035						
400	13 800	202	616	29,8	0,438	1,330						
500	18 300	268	815	36,0	0,529	1,606						
600	23 000	338	1030	41,8	0,614	1,865						
700	28 000	411	1250	47,2	0,693	2,106						
800	33 200	487	1480	52,4	0,769	2,338						
900	38 800	570	1730	57,2	0,840	2,552						
1000	44 500	653	1980	61,8	0,907	2,757						
1100	50 300	738	2240	66,2	0,973	2,953						
1200	56 300	827	2510	70,4	1,034	3,141						

Таблица 189

Теплоемкость метилэтилацетилена (2— пентина) C_5H_8

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
°С												
0	23,6	21,6	23,6	21,6	0,346	0,317	0,346	0,317	1,05	0,964	1,05	0,964
100	29,6	27,6	26,5	24,5	0,435	0,405	0,389	0,360	1,32	1,23	1,18	1,09
200	34,9	32,9	29,8	27,3	0,512	0,483	0,430	0,401	1,56	1,47	1,31	1,22
300	39,5	37,5	32,0	30,0	0,580	0,550	0,470	0,440	1,76	1,67	1,43	1,34
400	43,3	41,3	34,5	32,5	0,636	0,606	0,506	0,477	1,93	1,84	1,54	1,45
500	46,6	44,6	36,6	34,6	0,684	0,655	0,537	0,508	2,08	1,99	1,63	1,54
600	49,4	47,4	38,5	36,5	0,725	0,696	0,565	0,536	2,20	2,11	1,72	1,63
700	51,8	49,8	40,2	38,2	0,760	0,731	0,590	0,561	2,31	2,22	1,79	1,70
800	54,0	52,0	41,7	39,7	0,793	0,763	0,612	0,583	2,41	2,32	1,86	1,77
900	55,8	53,8	43,3	41,3	0,819	0,790	0,636	0,606	2,49	2,40	1,93	1,84
1000	57,4	55,4	44,5	42,5	0,843	0,813	0,653	0,624	2,56	2,47	1,98	1,90
1100	58,8	56,8	45,7	43,7	0,863	0,834	0,671	0,642	2,62	2,53	2,04	1,95
1200	60,1	58,1	46,9	44,9	0,882	0,853	0,689	0,659	2,68	2,59	2,09	2,00

Таблица 190

Энтальпия и энтропия метилэтилацетилена (2— пентина) C_5H_8

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
°С						
0	0	0	0	0	0	0
100	2 650	38,9	118	7,7	0,113	0,344
200	5 960	86,0	262	14,9	0,219	0,665
300	9 600	141	429	21,7	0,319	0,968
400	13 800	202	616	28,1	0,413	1,254
500	18 300	268	815	34,1	0,501	1,522
600	23 100	339	1030	39,7	0,583	1,771
700	28 100	413	1250	45,0	0,661	2,008
800	33 400	490	1490	50,1	0,736	2,235
900	39 000	572	1740	54,9	0,806	2,450
1000	44 500	653	1980	59,5	0,874	2,655
1100	50 300	738	2240	63,9	0,938	2,851
1200	56 300	827	2510	68,1	1,000	3,033

Таблица 191

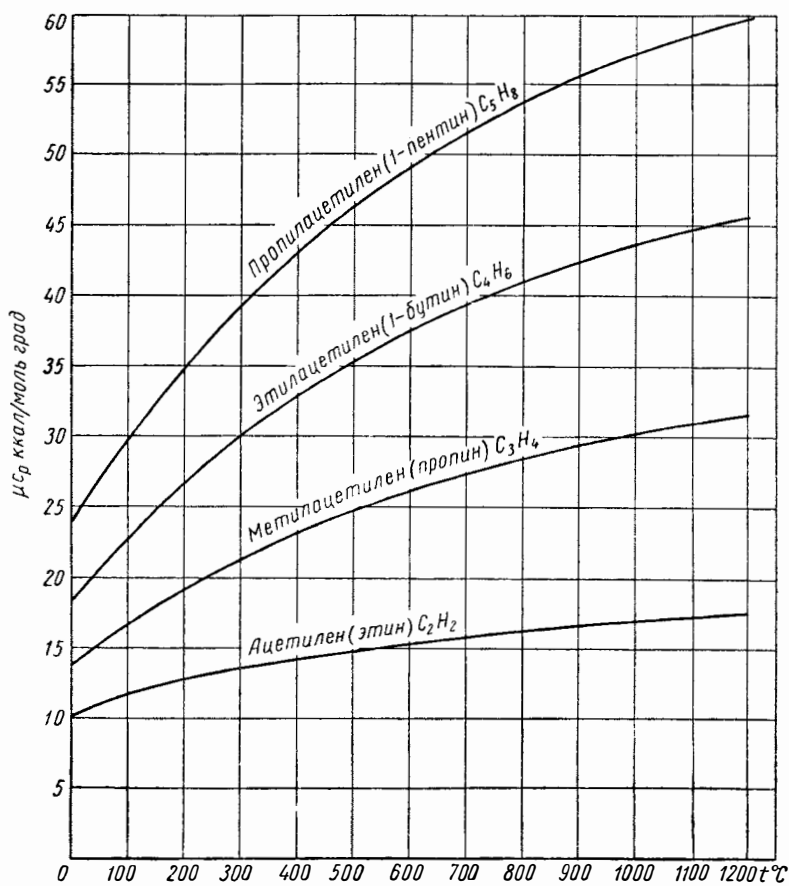
Теплоемкость 3—метил—1—бутина C_5H_8

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
°C												
0	22,8	20,8	22,8	20,8	0,335	0,305	0,335	0,305	1,02	0,928	1,02	0,928
100	27,8	25,8	25,3	23,3	0,408	0,379	0,371	0,342	1,24	1,15	1,13	1,04
200	33,0	31,0	27,9	25,9	0,484	0,455	0,410	0,380	1,47	1,38	1,24	1,15
300	37,6	35,6	30,2	28,2	0,552	0,523	0,443	0,414	1,68	1,59	1,35	1,26
400	41,6	39,6	32,6	30,6	0,611	0,581	0,479	0,449	1,86	1,77	1,45	1,36
500	45,1	43,1	34,8	32,8	0,662	0,633	0,511	0,481	2,01	1,92	1,55	1,46
600	48,1	46,1	36,9	34,9	0,706	0,677	0,542	0,512	2,15	2,06	1,65	1,56
700	50,8	48,8	38,5	36,5	0,746	0,716	0,565	0,536	2,27	2,18	1,72	1,63
800	53,0	51,0	40,2	38,2	0,778	0,749	0,590	0,561	2,36	2,27	1,79	1,70
900	55,1	53,1	41,9	39,9	0,809	0,780	0,615	0,586	2,46	2,37	1,87	1,78
1000	56,8	54,8	43,2	41,2	0,834	0,804	0,634	0,605	2,53	2,44	1,93	1,84
1100	58,3	56,3	44,5	42,5	0,856	0,827	0,653	0,624	2,60	2,51	1,98	1,90
1200	59,6	57,6	45,7	43,7	0,875	0,846	0,671	0,642	2,66	2,57	2,04	1,95

Таблица 192

Энтальпия и энтропия изопропилацетилена (3—метил—1—бутина) C_5H_8

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 530	37,1	113	8,1	0,119	0,362
200	5 580	82,0	248	15,8	0,232	0,705
300	9 060	133	405	23,0	0,338	1,027
400	13 000	192	580	29,7	0,436	1,325
500	17 400	256	775	35,9	0,527	1,602
600	22 100	325	990	41,7	0,612	1,861
700	27 000	396	1200	47,2	0,693	2,106
800	32 200	472	1430	52,3	0,768	2,334
900	37 700	554	1680	57,2	0,840	2,552
1000	43 200	634	1930	61,9	0,909	2,762
1100	49 000	718	2180	66,3	0,973	2,958
1200	54 800	805	2450	70,4	1,034	3,141



Фиг. 6. Истинные молярные теплоемкости при постоянном давлении для углеводородов ацетиленового ряда C_mH_{2m-2}

$$\mu_{ср} = f(t).$$

VI. ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ
И ЭНТРОПИИ УГЛЕВОДОРОДОВ
ГРУППЫ ДИОЛЕФИНОВ

(таблицы 193—212)

Таблица 193

Теплоемкость пропадиена (аллена) C_3H_4

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³			
°C												
0	13,19	11,20	13,19	11,20	0,3290	0,2794	0,3290	0,2794	0,5885	0,4997	0,5885	0,4997
100	16,43	14,44	14,87	12,88	0,4101	0,3605	0,3712	0,3216	0,7330	0,6442	0,6634	0,5746
200	19,15	17,16	16,34	14,35	0,4780	0,4283	0,4078	0,3582	0,8543	0,7655	0,7290	0,6402
300	21,44	19,45	17,66	15,67	0,5350	0,4854	0,4408	0,3911	0,9565	0,8677	0,7879	0,6991
400	23,36	21,37	18,84	16,85	0,5832	0,5335	0,4702	0,4205	1,0422	0,9534	0,8415	0,7518
500	25,00	23,01	19,92	17,93	0,6241	0,5745	0,4972	0,4475	1,1153	1,0266	0,8887	0,7999
600	26,43	24,44	20,89	18,90	0,6598	0,6102	0,5214	0,4717	1,1791	1,0904	0,9320	0,8432
700	27,68	25,69	21,77	19,78	0,6909	0,6413	0,5433	0,4337	1,2349	1,1461	0,9712	0,8825
800	28,76	26,77	22,57	20,58	0,7179	0,6683	0,5633	0,5137	1,2831	1,1943	1,0069	0,9181
900	29,71	27,72	23,31	21,32	0,7416	0,6919	0,5819	0,5323	1,3255	1,2367	1,0399	0,9512
1000	30,53	28,54	23,99	22,00	0,7621	0,7124	0,5988	0,5491	1,3621	1,2733	1,0703	0,9815
1100	31,25	29,26	24,62	22,63	0,7800	0,7304	0,6146	0,5650	1,3942	1,3054	1,0984	1,0096
1200	31,89	29,90	25,20	23,21	0,7960	0,7463	0,6291	0,5795	1,4227	1,3339	1,1243	1,0355

Таблица 194

Энтальпия и энтропия пропадиена (аллена) C_3H_4

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	1 487	37,12	66,34	4,60	0,115	0,205
200	3 268	81,56	145,8	8,83	0,220	0,393
300	5 298	132,2	236,4	12,71	0,317	0,567
400	7 536	188,1	336,6	16,31	0,407	0,727
500	9 960	248,6	444,4	19,66	0,491	0,877
600	12 530	312,8	559,2	22,79	0,569	1,016
700	15 240	380,3	679,8	25,71	0,642	1,147
800	18 060	450,6	805,5	28,47	0,710	1,270
900	20 980	523,7	989,9	31,08	0,776	1,386
1000	23 990	598,8	1070	33,55	0,837	1,496
1100	27 080	676,1	1208	35,89	0,896	1,601
1200	30 240	754,9	1349	38,11	0,951	1,700

Таблица 195

Теплоемкость 1,2 — бутадиена C_4H_6

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
°С												
0	17,89	15,90	17,89	15,90	0,3308	0,2940	0,3308	0,2940	0,798	0,709	0,798	0,709
100	22,42	20,43	20,26	18,27	0,4145	0,3777	0,3746	0,3378	1,000	0,911	0,904	0,816
200	26,39	24,40	22,35	20,36	0,4879	0,4511	0,4132	0,3764	1,177	1,089	0,997	0,908
300	29,86	27,87	24,28	22,29	0,5521	0,5153	0,4489	0,4121	1,132	1,243	1,083	0,994
400	32,81	30,82	26,05	24,06	0,6065	0,5698	0,4816	0,4448	1,464	1,375	1,162	1,073
500	35,36	33,37	27,67	25,68	0,6537	0,6170	0,5116	0,4748	1,577	1,489	1,234	1,146
600	37,59	35,60	27,15	27,16	0,6950	0,6582	0,5389	0,5021	1,677	1,588	1,300	1,212
700	39,52	37,53	30,51	28,52	0,7307	0,6940	0,5641	0,5273	1,763	1,675	1,361	1,272
800	41,18	39,19	31,74	29,75	0,7613	0,7246	0,5868	0,5500	1,837	1,748	1,416	1,327
900	42,63	40,64	32,86	30,87	0,7882	0,7514	0,6075	0,5707	1,902	1,813	1,466	1,377
1000	43,89	41,90	33,91	31,92	0,8115	0,7747	0,6269	0,5901	1,958	1,869	1,513	1,424
1100	44,99	43,00	34,87	32,88	0,8318	0,7950	0,6447	0,6079	2,007	1,918	1,556	1,467
1200	45,94	43,95	35,75	33,76	0,8494	0,8126	0,6610	0,6242	2,050	1,961	1,595	1,505

Таблица 196

Энтальпия и энтропия 1,2 — бутадиена C_4H_6

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
°С						
0	0	0	0	0	0	0
100	2 026	37,16	90,4	6,26	0,1158	0,2793
200	4 470	82,64	199,4	12,05	0,2228	0,5376
300	7 284	134,7	324,9	17,43	0,3223	0,7776
400	10 420	192,6	464,8	22,47	0,4154	1,0025
500	13 840	255,8	617,0	27,19	0,5027	1,2131
600	16 290	323,3	780,0	31,63	0,5848	1,4112
700	21 360	394,9	952,7	35,82	0,6623	1,5981
800	25 390	469,4	1133	39,76	0,7351	1,7739
900	29 570	546,8	1319	43,49	0,8041	1,9403
1000	33 910	626,9	1513	47,04	0,8697	2,0987
1100	38 360	709,2	1712	50,40	0,9318	2,2486
1200	42 900	793,2	1914	53,60	0,9910	2,3914

Таблица 197

Теплоемкость 1,3 — бутадиена C_4H_6

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/мм ³ град			
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/мм ³ град			
0	17,69	15,70	17,69	15,70	0,3271	0,2903	0,3271	0,2903	0,789	0,700	0,789	0,700
100	22,99	21,00	20,53	18,54	0,4250	0,3883	0,3796	0,3428	1,026	0,937	0,916	0,827
200	27,46	25,47	22,93	20,94	0,5077	0,4709	0,4239	0,3871	1,225	1,136	1,023	0,934
300	31,11	29,12	25,06	23,07	0,5752	0,5384	0,4633	0,4265	1,388	1,299	1,118	1,029
400	33,85	31,86	26,91	24,92	0,6258	0,5890	0,4975	0,4607	1,510	1,421	1,201	1,112
500	36,24	34,25	28,55	26,56	0,6700	0,6332	0,5278	0,4910	1,617	1,528	1,274	1,185
600	38,28	36,29	30,01	28,02	0,7077	0,6709	0,5548	0,5180	1,708	1,619	1,339	1,250
700	40,05	38,06	31,32	29,33	0,7405	0,7037	0,5791	0,5423	1,787	1,693	1,397	1,308
800	41,61	39,62	32,51	30,52	0,7693	0,7325	0,6011	0,5643	1,856	1,768	1,450	1,362
900	42,96	40,97	33,60	31,61	0,7943	0,7575	0,6212	0,5844	1,917	1,828	1,499	1,410
1000	44,15	42,16	34,60	32,61	0,8163	0,7795	0,6397	0,6029	1,970	1,881	1,544	1,455
1100	45,19	43,20	35,51	33,52	0,8355	0,7987	0,6565	0,6197	2,016	1,927	1,584	1,495
1200	46,09	44,10	36,35	34,36	0,8521	0,8153	0,6720	0,6353	2,056	1,967	1,622	1,533

Таблица 198

Энтальпия и энтропия 1,3 — бутадиена C_4H_6

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/мм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/мм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 053	37,96	91,6	6,32	0,1168	0,2820
200	4 586	84,78	204,6	12,30	0,2274	0,5488
300	7 518	139,0	335,4	17,90	0,3309	0,7986
400	10 760	199,0	480,4	23,12	0,4274	1,0315
500	14 280	263,9	637,0	27,98	0,5173	1,2483
600	18 010	332,9	803,4	32,51	0,6010	1,4504
700	21 920	405,4	977,9	36,76	0,6796	1,6400
800	26 010	480,9	1160	40,75	0,7534	1,8180
900	30 240	559,1	1349	44,52	0,8231	1,9862
1000	34 600	639,7	1544	48,08	0,8889	2,1451
1100	39 060	722,2	1742	51,46	0,9514	2,2959
1200	43 620	806,4	1946	54,67	1,0107	2,4391

Таблица 199

Теплоемкость 1,2 — пентадиена C_5H_8

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
$^{\circ}C$												
0	24,0	22,0	24,0	22,0	0,3520	0,323	0,352	0,323	1,07	0,98	1,07	0,98
100	29,9	27,9	27,2	25,2	0,439	0,410	0,399	0,370	1,33	1,24	1,21	1,12
200	35,2	33,2	30,0	28,0	0,517	0,487	0,440	0,411	1,57	1,48	1,34	1,25
300	39,7	37,7	32,5	30,5	0,583	0,553	0,477	0,448	1,77	1,68	1,45	1,36
400	43,6	41,6	34,8	32,8	0,640	0,611	0,511	0,482	1,95	1,86	1,55	1,46
500	46,9	44,9	36,9	34,9	0,689	0,659	0,542	0,512	2,09	2,00	1,65	1,56
600	49,7	47,7	38,9	36,9	0,730	0,700	0,571	0,542	2,22	2,13	1,74	1,65
700	52,2	50,2	40,6	38,6	0,766	0,737	0,596	0,567	2,33	2,24	1,81	1,72
800	54,4	52,4	42,1	40,1	0,799	0,769	0,618	0,589	2,43	2,34	1,88	1,79
900	56,3	54,3	43,6	41,6	0,827	0,797	0,640	0,611	2,51	2,42	1,95	1,86
1000	57,8	55,8	45,0	43,0	0,849	0,819	0,661	0,631	2,58	2,49	2,01	1,92
1100	59,2	57,2	46,1	44,1	0,870	0,840	0,677	0,647	2,64	2,55	2,06	1,97
1200	60,4	58,4	47,3	45,3	0,887	0,857	0,694	0,665	2,69	2,61	2,11	2,02

Таблица 200

Энтальпия и энтропия 1,2 — пентадиена C_5H_8

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
$^{\circ}C$						
0	0	0	0	0	0	0
100	2 720	39,90	121,0	8,2	0,1203	0,366
200	6 000	88,00	268,0	15,9	0,2334	0,709
300	9 750	143,1	435,0	23,1	0,3391	1,031
400	13 920	204,4	620,0	29,9	0,4389	1,334
500	18 450	271,0	825,0	36,1	0,5299	1,611
600	23 340	342,6	1044	41,9	0,6151	1,869
700	28 420	417,2	1267	47,4	0,6958	2,115
800	33 680	494,4	1504	52,6	0,7721	2,347
900	39 240	576,0	1755	57,6	0,8455	2,570
1000	45 000	661,0	2010	62,3	0,9145	2,779
1100	50 710	744,7	2288	66,7	0,9791	2,976
1200	56 760	832,8	2532	70,9	1,0408	3,163

Таблица 201

Теплоемкость *cis* — 1,3 — пентадиена C₅H₈

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	20,5	18,5	20,5	18,5	0,301	0,272	0,301	0,272	0,915	0,825	0,915	0,825
100	27,8	25,8	25,4	23,4	0,408	0,379	0,373	0,344	1,24	1,15	1,13	1,04
200	33,8	31,8	28,2	26,2	0,496	0,467	0,414	0,385	1,51	1,42	1,26	1,17
300	38,7	36,7	30,9	28,9	0,568	0,539	0,454	0,424	1,73	1,64	1,38	1,29
400	42,8	40,8	33,4	31,4	0,628	0,599	0,490	0,461	1,91	1,82	1,49	1,40
500	46,2	44,2	35,8	33,8	0,678	0,649	0,526	0,496	2,06	1,97	1,60	1,51
600	49,1	47,1	37,7	35,7	0,721	0,691	0,553	0,524	2,19	2,10	1,68	1,59
700	51,6	49,6	39,5	37,5	0,758	0,728	0,580	0,551	2,30	2,21	1,76	1,67
800	53,8	51,8	41,1	39,1	0,790	0,760	0,603	0,574	2,40	2,31	1,83	1,74
900	55,6	53,6	42,7	40,7	0,816	0,787	0,627	0,598	2,48	2,39	1,91	1,82
1000	57,3	55,3	44,1	42,1	0,841	0,812	0,647	0,618	2,56	2,47	1,97	1,88
1100	58,7	56,7	45,3	43,3	0,862	0,832	0,665	0,636	2,62	2,53	2,02	1,93
1200	60,0	58,0	46,5	44,5	0,881	0,852	0,683	0,653	2,68	2,59	2,07	1,99

Таблица 202

Энтальпия и энтропия *cis* — 1,3 — пентадиена C₅H₈

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 540	37,30	113,0	7,6	0,1115	0,339
200	5 640	82,80	252,0	14,9	0,2187	0,665
300	9 270	136,2	414,0	21,9	0,3215	0,977
400	13 360	196,0	596,0	28,5	0,4183	1,271
500	17 900	263,0	800,0	34,6	0,5079	1,544
600	22 620	331,8	1008	40,4	0,5930	1,802
700	27 650	406,0	1232	45,9	0,6738	2,048
800	32 880	482,4	1464	51,1	0,7501	2,280
900	38 430	564,3	1719	55,9	0,8206	2,494
1000	44 100	647,0	1970	60,5	0,8881	2,699
1100	49 830	731,5	2222	64,9	0,9527	2,895
1200	55 800	819,6	2484	69,1	1,0143	3,083

Таблица 203

Теплоемкость *trans* — 1,3 — пентадиена C_5H_8

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	23,0	21,0	23,0	21,0	0,333	0,308	0,338	0,308	1,03	0,94	1,03	0,94
100	29,4	27,4	26,8	24,8	0,432	0,402	0,393	0,364	1,31	1,22	1,20	1,11
200	35,2	33,2	29,6	27,6	0,517	0,487	0,435	0,405	1,57	1,48	1,32	1,23
300	39,8	37,8	32,3	30,3	0,584	0,555	0,474	0,445	1,78	1,69	1,44	1,35
400	43,6	41,6	34,7	32,7	0,640	0,611	0,509	0,480	1,95	1,86	1,55	1,46
500	46,9	44,9	36,8	34,8	0,689	0,659	0,540	0,511	2,09	2,00	1,64	1,55
600	49,6	47,6	38,7	36,7	0,728	0,699	0,568	0,539	2,21	2,12	1,73	1,64
700	52,0	50,0	40,5	38,5	0,763	0,734	0,595	0,565	2,32	2,23	1,81	1,72
800	54,2	52,2	42,0	40,0	0,796	0,766	0,617	0,587	2,42	2,33	1,87	1,78
900	56,0	54,0	43,4	41,4	0,822	0,793	0,637	0,608	2,50	2,41	1,94	1,85
1000	57,6	55,6	44,8	42,8	0,846	0,816	0,658	0,628	2,57	2,48	2,00	1,91
1100	59,0	57,0	46,0	44,0	0,866	0,837	0,675	0,646	2,63	2,54	2,05	1,96
1200	60,2	58,2	47,1	45,1	0,884	0,854	0,691	0,662	2,69	2,60	2,10	2,01

Таблица 204

Энтальпия и энтропия *trans* — 1,3 — пентадиена C_5H_8

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	<i>i</i>	<i>i'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 680	39,30	120,0	8,5	0,1248	0,380
200	5 920	87,00	264,0	16,1	0,2364	0,719
300	9 690	142,2	432,0	23,3	0,3421	1,040
400	13 880	203,6	620,0	30,0	0,4404	1,339
500	18 400	270,0	820,0	36,3	0,5329	1,620
600	23 220	340,8	1038	42,2	0,6195	1,883
700	28 350	416,5	1267	47,7	0,7003	2,129
800	33 600	493,6	1496	52,9	0,7766	2,361
900	39 060	573,3	1746	57,7	0,8471	2,575
1000	44 800	658,0	2000	62,4	0,9161	2,784
1100	50 600	742,5	2255	66,8	0,9806	2,981
1200	56 520	829,2	2520	71,0	1,0423	3,168

Таблица 205

Теплоемкость 1,4 — пентадиена C_5H_8

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
°С												
0	23,3	21,3	23,3	21,3	0,342	0,313	0,342	0,313	1,04	0,950	1,04	0,950
100	29,8	27,8	27,3	25,3	0,437	0,408	0,401	0,371	1,33	1,24	1,22	1,13
200	35,2	33,2	29,9	27,9	0,517	0,487	0,439	0,410	1,57	1,48	1,33	1,24
300	39,7	37,7	32,4	30,4	0,583	0,553	0,476	0,446	1,77	1,68	1,45	1,36
400	43,3	41,3	34,7	32,7	0,636	0,606	0,509	0,480	1,93	1,84	1,55	1,46
500	46,8	44,8	36,8	34,8	0,687	0,658	0,540	0,511	2,09	2,00	1,64	1,55
600	49,6	47,6	38,7	36,7	0,728	0,699	0,568	0,539	2,21	2,12	1,73	1,64
700	52,1	50,1	40,4	38,4	0,765	0,736	0,593	0,564	2,32	2,23	1,80	1,71
800	54,2	52,2	42,0	40,0	0,796	0,766	0,617	0,587	2,42	2,33	1,87	1,78
900	56,0	54,0	43,5	41,5	0,822	0,793	0,639	0,609	2,50	2,41	1,94	1,85
1000	57,7	55,7	44,9	42,9	0,847	0,818	0,659	0,630	2,57	2,48	2,00	1,91
1100	59,1	57,1	46,1	44,1	0,868	0,838	0,677	0,647	2,64	2,55	2,06	1,97
1200	60,0	58,0	47,2	45,2	0,881	0,852	0,693	0,664	2,68	2,59	2,11	2,02

Таблица 206

Энтальпия и энтропия 1,4 — пентадиена C_5H_8

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 730	40,10	122,0	8,3	0,1228	0,371
200	5 980	87,80	266,0	16,0	0,235	0,714
300	9 720	142,8	435,0	23,1	0,339	1,031
400	13 880	203,6	620,0	29,9	0,439	1,334
500	18 400	270,0	820,0	36,1	0,530	1,611
600	23 220	340,8	1038	41,9	0,615	1,869
700	28 280	418,6	1211	47,4	0,696	2,115
800	33 600	493,6	1496	52,7	0,773	2,351
900	39 150	575,1	1746	57,5	0,844	2,565
1000	44 900	659,0	2000	62,2	0,913	2,775
1100	50 710	744,7	2266	66,6	0,978	2,971
1200	56 640	831,6	2532	70,8	1,039	3,209

Таблица 207

Теплоемкость 2,3 — пентадиена C_5H_8

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
°С												
0	22,7	20,7	22,7	20,7	0,333	0,304	0,333	0,304	1,01	0,924	1,01	0,924
100	28,5	26,5	26,1	24,1	0,418	0,389	0,383	0,354	1,27	1,18	1,16	1,07
200	33,7	31,7	28,6	26,6	0,495	0,465	0,420	0,391	1,50	1,41	1,28	1,19
300	38,3	36,3	30,9	28,9	0,562	0,533	0,454	0,424	1,71	1,62	1,38	1,29
400	42,2	40,2	33,4	31,4	0,620	0,590	0,490	0,461	1,88	1,79	1,49	1,40
500	45,7	43,7	35,5	33,5	0,671	0,642	0,521	0,492	2,04	1,95	1,58	1,49
600	48,8	46,8	37,5	35,5	0,716	0,687	0,551	0,521	2,18	2,09	1,67	1,58
700	51,4	49,4	39,4	37,4	0,755	0,725	0,578	0,549	2,29	2,20	1,76	1,67
800	53,6	51,6	40,9	38,9	0,787	0,758	0,600	0,571	2,39	2,30	1,82	1,73
900	55,6	53,6	42,5	40,5	0,816	0,787	0,624	0,595	2,48	2,39	1,90	1,81
1000	57,3	55,3	43,9	41,9	0,841	0,812	0,645	0,615	2,56	2,47	1,96	1,87
1100	58,7	56,7	45,2	43,2	0,862	0,832	0,664	0,634	2,62	2,53	2,02	1,93
1200	60,0	58,0	46,3	44,3	0,881	0,852	0,680	0,650	2,68	2,59	2,07	1,98

Таблица 208

Энтальпия и энтропия 2,3 — пентадиена C_5H_8

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
°С	ккал/м ³			ккал/м ³ град		
0	0	0	0	0	0	0
100	2 610	38,30	116,0	12,90	0,1075	0,353
200	5 720	84,00	256,0	15,3	0,225	0,683
300	9 270	136,2	414,0	22,1	0,325	0,986
400	13 360	196,0	596,0	28,6	0,420	1,276
500	17 750	260,5	765,0	34,7	0,500	1,558
600	22 500	330,6	1002	40,5	0,595	1,807
700	27 580	404,6	1232	46,0	0,676	2,053
800	32 720	480,0	1456	51,1	0,751	2,280
900	38 250	561,6	1710	55,9	0,821	2,494
1000	43 900	645,0	1960	60,6	0,890	2,704
1100	49 720	730,4	2222	65,0	0,955	2,900
1200	55 560	816,0	2484	69,1	1,108	3,083

Таблица 209

Теплоемкость 3 — метил — 1,2 — бутадиена C_5H_8

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	23,9	21,9	23,9	21,9	0,351	0,322	0,351	0,322	1,07	0,98	1,07	0,977
100	29,6	27,6	26,6	24,6	0,435	0,405	0,391	0,361	1,32	1,23	1,19	1,10
200	34,7	32,7	29,2	27,2	0,509	0,480	0,429	0,399	1,55	1,46	1,30	1,21
300	39,2	37,2	31,8	29,8	0,576	0,546	0,467	0,437	1,75	1,66	1,42	1,33
400	43,1	41,1	34,3	32,3	0,633	0,603	0,504	0,474	1,92	1,83	1,53	1,44
500	46,4	44,4	36,3	34,3	0,681	0,652	0,533	0,504	2,07	1,98	1,62	1,53
600	49,3	47,3	38,3	36,3	0,724	0,694	0,562	0,533	2,20	2,11	1,71	1,62
700	51,8	49,8	40,0	38,0	0,760	0,731	0,587	0,558	2,31	2,22	1,78	1,69
800	54,0	52,0	41,6	39,6	0,793	0,763	0,611	0,581	2,41	2,32	1,86	1,77
900	55,9	53,9	43,2	41,2	0,821	0,791	0,634	0,605	2,49	2,40	1,93	1,84
1000	57,5	55,5	44,6	42,6	0,844	0,815	0,655	0,625	2,51	2,48	1,99	1,90
1100	59,0	57,0	45,9	43,9	0,866	0,837	0,674	0,645	2,63	2,54	2,05	1,96
1200	60,2	58,2	47,2	45,2	0,884	0,854	0,693	0,664	2,69	2,60	2,11	2,02

Таблица 210

Энтальпия и энтропия 3 — метил — 1,2 — бутадиена C_5H_8

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 660	39,10	119,0	8,29	0,1218	0,370
200	5 840	85,80	260,0	15,9	0,233	0,709
300	9 540	140,1	426,0	23,0	0,337	1,026
400	13 720	201,6	612,0	29,7	0,435	1,325
500	18 150	266,5	810,0	35,8	0,522	1,597
600	22 980	337,2	1026	41,6	0,612	1,856
700	28 000	410,9	1246	47,1	0,692	2,101
800	33 280	488,8	1488	52,3	0,762	2,333
900	38 880	570,6	1734	57,2	0,842	2,552
1000	44 600	655,0	1990	61,9	0,912	2,761
1100	50 490	741,4	2255	66,3	0,972	2,958
1200	56 640	831,6	2532	70,4	1,032	3,141

Таблица 211

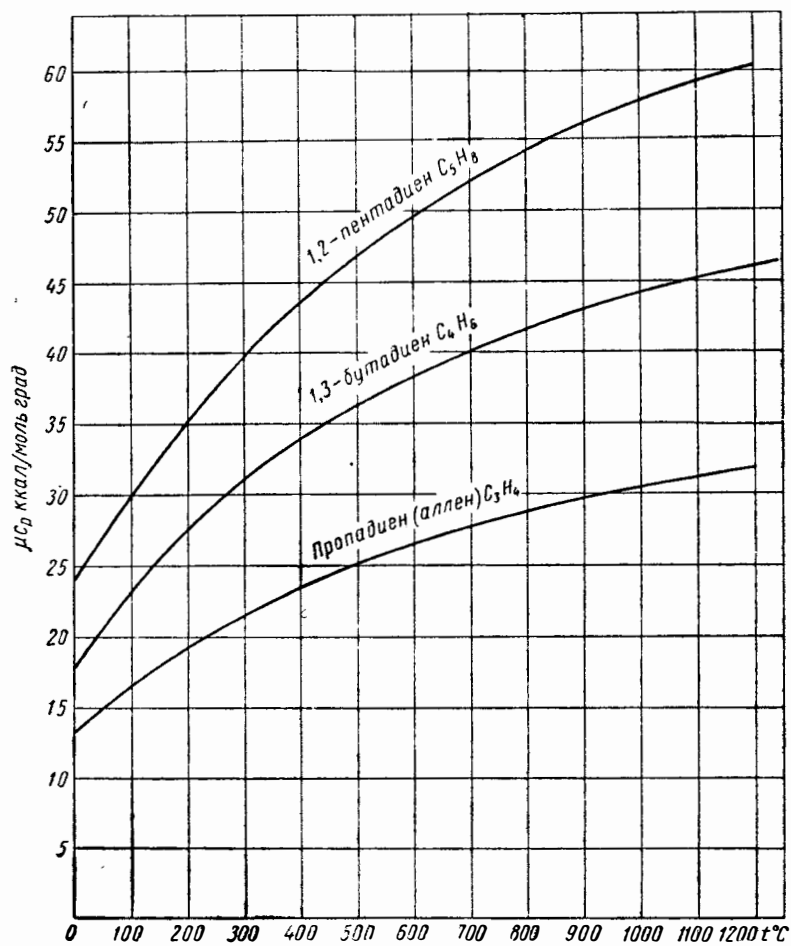
Теплоемкость 2 — метил — 1,3 — бутадиена (изопрена) C_5H_8

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	23,3	21,3	23,3	21,3	0,342	0,313	0,342	0,313	1,04	0,950	1,04	0,950
100	30,2	28,2	27,1	25,1	0,443	0,414	0,398	0,368	1,35	1,26	1,21	1,12
200	35,8	33,8	30,1	28,1	0,526	0,496	0,442	0,413	1,60	1,51	1,34	1,25
300	40,3	38,3	32,9	30,9	0,592	0,562	0,483	0,454	1,80	1,71	1,47	1,38
400	44,1	42,1	35,2	33,2	0,647	0,618	0,517	0,487	1,97	1,88	1,57	1,48
500	47,3	45,3	37,3	35,3	0,694	0,665	0,548	0,518	2,11	2,02	1,66	1,57
600	49,9	47,9	39,2	37,2	0,733	0,703	0,576	0,546	2,23	2,14	1,75	1,66
700	52,3	50,3	40,8	38,8	0,768	0,738	0,599	0,570	2,33	2,24	1,82	1,73
800	54,4	52,4	42,4	40,4	0,799	0,769	0,622	0,593	2,43	2,34	1,89	1,80
900	56,2	54,2	44,0	42,0	0,825	0,796	0,646	0,617	2,51	2,42	1,96	1,87
1000	57,8	55,8	45,2	43,2	0,849	0,819	0,664	0,634	2,58	2,49	2,02	1,93
1100	59,2	57,2	46,3	44,3	0,869	0,840	0,680	0,650	2,64	2,55	2,07	1,98
1200	60,3	58,3	47,5	45,5	0,885	0,856	0,697	0,668	2,69	2,60	2,12	2,03

Таблица 212

Энтальпия и энтропия 2 — метил — 1,3 — бутадиена (изопрена) C_5H_8

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	S_μ	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 710	39,80	121,0	8,19	0,1205	0,366
200	6 020	88,40	268,0	16,0	0,235	0,714
300	9 870	144,9	441,0	23,3	0,342	1,040
400	14 080	206,8	628,0	30,1	0,442	1,343
500	18 650	271,5	830,0	36,5	0,536	1,629
600	23 520	345,6	1050	42,4	0,623	1,892
700	28 560	419,3	1274	47,9	0,703	2,137
800	33 920	497,6	1512	53,1	0,780	2,369
900	39 600	581,4	1764	58,0	0,852	2,588
1000	45 200	664,0	2020	62,7	0,921	2,797
1100	50 930	748,0	2277	67,1	0,985	2,994
1200	57 000	836,4	2544	71,3	1,047	3,181



Фиг. 7. Истинные молярные теплоемкости при постоянном давлении для пропандиена (аллена) C_3H_4 ; 1,3-бутадиена C_4H_6 и 1,2 пентадиена C_5H_8

$$\mu_{ср} = f(t).$$

VII. ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ
И ЭНТРОПИИ ЭТИЛОВОГО
СПИРТА, БЕНЗОЛА,
УГЛЕВОДОРОДОВ ГРУППЫ
СТИРОЛА И МЕТИЛСТИРОЛОВ

(таблицы 213—222)

Таблица 213

Теплоемкость этилового спирта C_2H_5OH

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	16,74	14,75	16,74	14,75	0,3633	0,3202	0,3633	0,3202	0,7468	0,6582	0,7468	0,6582
100	20,11	18,12	18,16	16,47	0,4363	0,3932	0,4005	0,3574	0,8972	0,8086	0,8236	0,7350
200	23,28	21,29	20,04	18,05	0,5053	0,4622	0,4348	0,3917	1,0386	0,9500	0,8941	0,8055
300	26,10	24,11	21,61	19,62	0,5664	0,5233	0,4688	0,4257	1,1644	1,0758	0,9641	0,8755
400	28,56	26,57	23,04	21,05	0,6198	0,5767	0,5001	0,4570	1,2742	1,1856	1,0279	0,9393
500	30,70	28,71	24,26	22,37	0,6662	0,6231	0,5287	0,4856	1,3696	1,2810	1,0868	0,9982
600	32,59	30,60	25,59	23,60	0,7071	0,6640	0,5553	0,5122	1,4540	1,3654	1,1417	1,0531
700	34,23	32,24	26,70	24,71	0,7427	0,6996	0,5794	0,5363	1,5271	1,4386	1,1915	1,1026
800	35,68	33,69	27,73	25,74	0,7742	0,7311	0,6018	0,5587	1,5918	1,5032	1,2371	1,1485
900	36,95	34,96	28,68	26,79	0,8017	0,7586	0,6224	0,5793	1,6485	1,5599	1,2795	1,1909
1000	38,05	36,06	29,54	27,55	0,8256	0,7825	0,6410	0,5979	1,6976	1,6090	1,3179	1,2293
1100	39,00	37,01	30,36	28,37	0,8463	0,8032	0,6588	0,6157	1,7399	1,6513	1,3545	1,2659
1200	39,83	37,84	31,10	29,11	0,8644	0,8213	0,6749	0,6318	1,7770	1,6884	1,3875	1,2989

Таблица 214

Энтальпия и энтропия этилового спирта C_2H_5OH

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	1 846	40,05	82,36	5,68	0,123	0,253
200	4 008	86,96	178,8	10,83	0,235	0,483
300	6 483	140,6	289,2	15,56	0,338	0,694
400	9 216	200,0	411,2	19,95	0,433	0,890
500	12 180	264,4	543,4	24,06	0,522	1,073
600	15 350	333,2	685,0	27,92	0,606	1,246
700	18 690	405,6	833,8	31,54	0,685	1,408
800	22 180	481,4	989,7	34,95	0,759	1,559
900	25 810	560,2	1152	38,19	0,829	1,704
1000	29 540	641,0	1318	41,25	0,895	1,840
1100	33 400	724,7	1490	44,17	0,959	1,971
1200	37 320	809,9	1665	46,94	1,019	2,094

Таблица 215

Теплоемкость бензола C_6H_6

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м.м ³ град			
0	17,60	15,61	17,60	15,61	0,2253	0,1998	0,2253	0,1998	0,7852	0,6964	0,7852	0,6964
100	24,91	22,92	21,37	19,38	0,3189	0,2934	0,2736	0,2481	1,1113	1,0225	0,9434	0,8646
200	31,27	29,28	24,73	22,74	0,4003	0,3749	0,3166	0,2911	1,3951	1,3063	1,1033	1,0145
300	36,50	34,51	27,84	25,85	0,4673	0,4418	0,3564	0,3309	1,6284	1,5396	1,2420	1,1533
400	40,72	38,73	30,55	28,56	0,5213	0,4958	0,3911	0,3656	1,8167	1,7279	1,3629	1,2742
500	44,20	42,21	32,93	30,94	0,5659	0,5404	0,4216	0,3961	1,9719	1,8831	1,4691	1,3803
600	47,09	45,10	35,07	33,08	0,6029	0,5774	0,4490	0,4235	2,1009	2,0121	1,5646	1,4758
700	49,54	47,55	36,96	34,97	0,6342	0,6088	0,4732	0,4477	2,2102	2,1214	1,6489	1,5601
800	51,62	49,63	38,66	36,67	0,6609	0,6354	0,4950	0,4695	2,3030	2,2142	1,7248	1,6360
900	53,38	51,39	40,20	38,24	0,6834	0,6579	0,5147	0,4892	2,3815	2,2927	1,7935	1,7047
1000	54,90	52,91	41,60	39,61	0,7029	0,6774	0,5326	0,5071	2,4493	2,3605	1,8559	1,7671
1100	56,21	54,22	42,87	40,88	0,7196	0,6942	0,5489	0,5234	2,5077	2,4190	1,9126	1,8238
1200	57,33	55,34	44,01	42,02	0,7340	0,7085	0,5634	0,5380	2,5577	2,4689	1,9634	1,8747

Таблица 216

Энтальпия и энтропия бензола C_6H_6

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 137	27,36	95,34	6,60	0,085	0,294
200	4 946	63,32	220,7	13,26	0,170	0,591
300	8 352	106,9	372,6	19,76	0,253	0,881
400	12 220	156,4	545,2	25,97	0,333	1,158
500	16 460	210,8	734,5	31,86	0,408	1,421
600	21 040	269,4	938,8	37,40	0,479	1,668
700	25 870	331,2	1154	42,65	0,546	1,902
800	30 930	396,0	1380	47,60	0,609	2,123
900	36 180	463,2	1614	52,27	0,669	2,331
1000	41 600	532,6	1856	56,71	0,726	2,530
1100	47 160	603,8	2104	60,91	0,780	2,717
1200	52 810	676,1	2356	64,90	0,831	2,895

Таблица 217

Теплоемкость этенилбензола (стирола, винилбензола, фенилэтилена) C_8H_8

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
°С												
0	26,68	24,69	26,68	24,69	0,2562	0,2370	0,2562	0,2370	1,190	1,101	1,190	1,101
100	36,03	34,04	32,13	30,14	0,3460	0,3268	0,3085	0,2894	1,607	1,518	1,433	1,345
200	44,00	42,01	36,38	34,39	0,4225	0,4034	0,3493	0,3302	1,963	1,875	1,623	1,534
300	50,57	48,58	40,01	38,02	0,4856	0,4665	0,3842	0,3651	2,256	2,168	1,785	1,697
400	55,91	53,92	43,34	41,35	0,5368	0,5177	0,4161	0,3970	2,494	2,405	1,934	1,845
500	60,31	58,32	46,30	44,31	0,5791	0,5600	0,4446	0,4255	2,690	2,602	2,066	1,977
600	64,00	62,01	48,95	46,96	0,6145	0,5954	0,4700	0,4509	2,855	2,766	2,184	2,095
700	67,13	65,14	51,33	49,34	0,6446	0,6255	0,4929	0,4738	2,995	2,906	2,290	2,202
800	69,78	67,79	53,49	51,50	0,6701	0,6510	0,5137	0,4946	3,113	3,025	2,386	2,297
900	72,06	70,07	55,42	53,43	0,6919	0,6728	0,5322	0,5131	3,215	3,126	2,472	2,383
1000	74,01	72,02	57,19	55,20	0,7106	0,6915	0,5491	0,5300	3,302	3,213	2,551	2,462
1100	75,70	73,71	58,80	56,81	0,7269	0,7077	0,5646	0,5455	3,377	3,289	2,623	2,534
1200	77,16	75,17	60,28	58,29	0,7409	0,7218	0,5788	0,5597	3,443	3,354	2,689	2,600

Таблица 218

Энтальпия и энтропия этенилбензола (стирола, винилбензола) C_8H_8

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
°С						
0	0	0	0	0	0	0
100	3 213	30,85	143,3	9,77	0,0938	0,436
200	7 276	69,86	324,6	19,25	0,1848	0,859
300	12 000	115,3	535,5	28,33	0,2720	1,264
400	17 340	166,4	773,6	36,89	0,3542	1,646
500	23 150	222,3	1033	44,94	0,4315	2,005
600	29 370	282,0	1310	52,49	0,5040	2 342
700	35 930	345,0	1603	59,61	0,5724	2,659
800	42 790	411,0	1909	66,31	0,6367	2,958
900	49 880	479,0	2225	72,63	0,6974	3,240
1000	57 190	549,1	2551	78,60	0,7547	3,506
1100	64 680	621,1	2885	84,27	0,8092	3,759
1200	72 340	694,6	3227	89,64	0,8607	3,999

Таблица 219

Теплоемкость
 изопропенилбензола, *cis* — 1 — пропенилбензола, 1 — метил — 2 — этенилбензола, 1 — метил — 3 — этенилбензола, 1 — метил — 4 — этенилбензола } C_9H_{10}

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	32,1	30,1	32,1	30,1	0,272	0,255	0,272	0,255	1,43	1,34	1,43	1,34
100	42,3	40,3	37,3	35,3	0,352	0,341	0,316	0,299	1,89	1,80	1,66	1,57
200	51,3	49,3	41,9	39,9	0,434	0,417	0,355	0,338	2,29	2,20	1,87	1,78
300	58,9	56,9	46,5	44,5	0,498	0,482	0,394	0,377	2,63	2,54	2,07	1,98
400	65,3	63,3	50,5	48,5	0,553	0,536	0,427	0,410	2,91	2,82	2,25	2,16
500	70,6	68,6	53,9	51,9	0,597	0,580	0,456	0,439	3,15	3,06	2,40	2,31
600	75,0	73,0	57,1	55,1	0,635	0,618	0,483	0,466	3,35	3,26	2,55	2,46
700	78,8	76,8	60,0	58,0	0,668	0,651	0,508	0,491	3,52	3,43	2,68	2,59
800	82,0	80,0	62,5	60,5	0,695	0,678	0,529	0,512	3,66	3,57	2,79	2,70
900	84,8	82,8	64,9	62,9	0,717	0,700	0,549	0,532	3,79	3,70	2,89	2,81
1000	87,2	85,2	67,0	65,0	0,738	0,721	0,567	0,550	3,89	3,81	2,99	2,90
1100	89,3	87,3	68,9	66,9	0,755	0,738	0,583	0,566	3,99	3,90	3,07	2,98
1200	91,1	89,1	70,7	68,7	0,771	0,754	0,598	0,581	4,07	3,98	3,15	3,06

Таблица 220

Энтальпия и энтропия изопропенилбензола
cis — 1 — пропенилбензола
 1 — метил — 2 — этенилбензола
 1 — метил — 3 — этенилбензола
 1 — метил — 4 — этенилбензола } C_9H_{10}

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 730	31,60	166,0	11,7	0,099	0,522
200	8 380	71,00	374,0	22,7	0,192	1,013
300	13 950	118,2	621,0	33,3	0,282	1,485
400	20 200	170,8	900,0	43,4	0,367	1,936
500	26 950	228,0	1200	52,8	0,447	2,355
600	34 260	289,8	1530	61,6	0,521	2,748
700	42 000	355,6	1876	70,0	0,592	3,123
800	50 000	423,2	2232	77,9	0,659	3,475
900	58 410	494,1	2601	85,3	0,722	3,805
1000	67 000	567,0	2990	92,4	0,782	4,122
1100	75 790	641,3	3377	99,0	0,838	4,417
1200	84 840	717,6	3780	105,1	0,889	4,689

Таблица 221

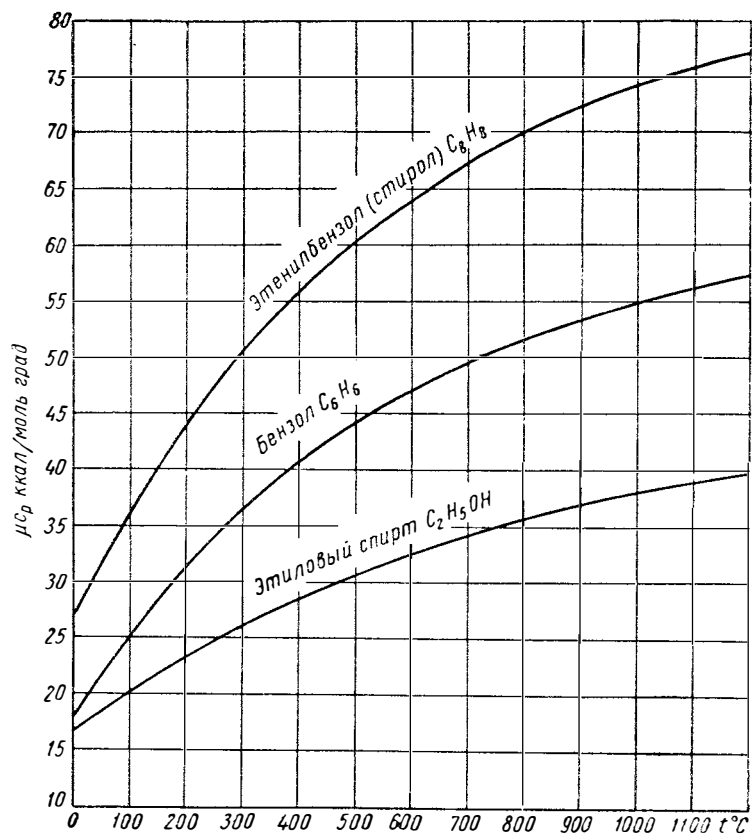
Теплоемкость *trans*-1-пропенилбензола C_9H_{10}

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	32	30	32	30	0,271	0,254	0,271	0,254	1,43	1,34	1,43	1,34
100	42,6	40,6	37,7	35,7	0,361	0,344	0,319	0,302	1,90	1,81	1,68	1,59
200	51,8	49,8	42,4	40,4	0,438	0,421	0,359	0,342	2,31	2,22	1,89	1,80
300	59,4	57,4	46,8	44,8	0,503	0,486	0,396	0,379	2,65	2,56	2,09	2,00
400	65,7	63,7	50,8	48,8	0,556	0,539	0,430	0,413	2,93	2,84	2,27	2,18
500	71,0	69,0	54,3	52,3	0,601	0,584	0,459	0,443	3,17	3,08	2,42	2,33
600	75,3	73,3	57,4	55,4	0,637	0,620	0,486	0,469	3,36	3,27	2,56	2,47
700	79,0	77,0	60,3	58,3	0,669	0,652	0,510	0,493	3,53	3,44	2,69	2,60
800	82,2	80,2	63,0	61,0	0,696	0,679	0,533	0,516	3,67	3,58	2,81	2,72
900	85,0	83,0	65,2	63,2	0,720	0,703	0,552	0,535	3,80	3,71	2,91	2,82
1000	87,4	85,4	67,3	65,3	0,739	0,722	0,569	0,553	3,90	3,81	3,00	2,91
1100	89,4	87,4	69,3	67,3	0,756	0,739	0,586	0,569	3,99	3,90	3,09	3,00
1200	91,2	89,2	71,0	69,0	0,772	0,755	0,601	0,584	4,07	3,98	3,17	3,08

Энтальпия и энтропия *trans*-1-пропенилбензола C_9H_{10}

Таблица 222

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 770	31,90	168,0	11,7	0,099	0,522
200	8 480	71,80	378,0	22,9	0,194	1,022
300	14 040	118,8	627,0	33,5	0,283	1,495
400	20 320	172,0	908,0	43,6	0,369	1,945
500	27 150	229,5	1210	53,1	0,449	2,369
600	34 440	291,6	1536	61,9	0,526	2,762
700	42 210	357,0	1883	70,3	0,595	3,136
800	50 400	426,4	2248	78,3	0,663	3,493
900	58 680	496,8	2619	85,8	0,726	3,828
1000	67 300	569,0	3000	92,9	0,786	4,145
1100	76 230	644,6	3399	99,6	0,843	4,444
1200	85 200	721,2	3804	105,8	0,895	4,720



Фиг. 8. Истинные молярные теплоемкости при постоянном давлении для этилового спирта C_2H_5OH , бензола C_6H_6 и этилбензола (стирола) C_8H_8

$$\mu_{ср} = f(t).$$

VIII. ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ
И ЭНТРОПИИ УГЛЕВОДОРОДОВ
РЯДА ЦИКЛОПЕНТАНОВ

(таблицы 223–256)

Таблица 223

Теплоемкость циклопентана C_5H_{10}

Температура	Теплоемкость											
t	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	17,76	15,77	17,76	15,77	0,2532	0,2249	0,2532	0,2249	0,7923	0,7036	0,7923	0,7036
100	26,03	24,04	21,95	19,96	0,3712	0,3428	0,3130	0,2846	1,1613	1,0725	0,9793	0,8905
200	33,90	31,91	25,97	23,98	0,4834	0,4550	0,3703	0,3419	1,5124	1,4236	1,1586	1,0698
300	40,70	38,71	29,84	27,85	0,5803	0,5520	0,4255	0,3971	1,8158	1,7270	1,3313	1,2425
400	46,40	44,41	33,26	31,27	0,6616	0,6332	0,4742	0,4459	2,0701	1,9813	1,4839	1,3951
500	51,24	49,25	36,41	34,42	0,7306	0,7023	0,5192	0,4908	2,2860	2,1972	1,6244	1,5356
600	55,33	53,34	39,23	37,24	0,7890	0,7606	0,5594	0,5310	2,4685	2,3797	1,7502	1,6614
700	58,85	56,86	41,76	39,77	0,8391	0,8108	0,5955	0,5671	2,6255	2,5367	1,8631	1,7743
800	61,90	59,91	44,10	42,11	0,8826	0,8543	0,6289	0,6004	2,7616	2,6728	1,9675	1,8787
900	64,50	62,51	46,23	44,24	0,9197	0,8913	0,6592	0,6308	2,8776	2,7888	2,0625	1,9737
1000	66,77	64,78	48,17	46,18	0,9521	0,9237	0,6869	0,6585	2,9789	2,8901	2,1490	2,0603
1100	68,72	66,73	49,96	47,97	0,9799	0,9515	0,7124	0,6840	3,0659	2,9771	2,2289	2,1401
1200	70,40	68,41	51,58	49,59	1,0038	0,9755	0,7355	0,7071	3,1408	3,0520	2,3012	2,2124

Таблица 224

Энтальпия и энтропия циклопентана C_5H_{10}

Температура	Энтальпия			Энтропия		
t	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 195	31,30	97,93	6,89	0,098	0,307
200	5 194	74,06	231,7	13,94	0,199	0,622
300	8 952	127,6	399,4	21,10	0,301	0,941
400	13 300	189,7	593,6	28,12	0,401	1,254
500	18 200	259,6	812,2	34,87	0,497	1,556
600	23 540	335,6	1050	41,36	0,590	1,845
700	29 230	416,8	1304	47,55	0,678	2,122
800	35 280	503,0	1574	53,47	0,762	2,386
900	41 610	593,3	1856	59,12	0,843	2,637
1000	48 170	686,9	2149	64,48	0,919	2,877
1100	54 960	783,6	2452	69,60	0,992	3,105
1200	61 900	682,6	2761	74,49	1,062	3,323

Теплоемкость метилциклопентана C_6H_{12}

Таблица 225

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	23,84	21,85	23,84	21,85	0,2833	0,2596	0,2833	0,2596	1,0636	0,9748	1,0636	0,9748
100	34,27	32,28	28,65	26,56	0,4072	0,3836	0,3404	0,3168	1,5289	1,4401	1,2782	1,1894
200	42,67	40,68	33,41	31,42	0,5070	0,4834	0,3970	0,3733	1,9037	1,8149	1,4905	1,4018
300	50,53	48,54	37,87	35,88	0,6004	0,5768	0,4500	0,4263	2,2543	2,1655	1,6895	1,6007
400	57,06	55,07	41,87	39,88	0,6780	0,6544	0,4975	0,4739	2,5457	2,4569	1,8680	1,7792
500	62,62	60,63	44,23	42,24	0,7441	0,7204	0,5256	0,5019	2,7937	2,7049	1,9733	1,8845
600	67,34	65,35	48,74	46,75	0,8002	0,7765	0,5792	0,5555	3,0043	2,9155	2,1745	2,0857
700	71,39	69,40	51,68	49,69	0,8483	0,8247	0,6141	0,5904	3,1850	3,0962	2,3056	2,2169
800	74,91	72,92	54,36	52,37	0,8901	0,8665	0,6459	0,6223	3,3420	3,2532	2,4252	2,3364
900	77,93	75,94	56,83	54,84	0,9260	0,9024	0,6753	0,6516	3,4767	3,3880	2,5354	2,4466
1000	80,55	78,56	59,08	57,09	0,9571	0,9335	0,7020	0,6784	3,5936	3,5049	2,6358	2,5470
1100	82,82	80,83	61,13	59,14	0,9841	0,9605	0,7264	0,7027	3,6949	3,6061	2,7272	2,6385
1200	84,77	82,78	63,00	61,01	1,0073	0,9836	0,7486	0,7250	3,7819	3,6931	2,8107	2,7219

Энтальпия и энтропия метилциклопентана C_6H_{12}

Таблица 226

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 865	34,04	127,8	8,95	0,106	0,400
200	6 682	79,40	298,1	17,91	0,213	0,799
300	11 360	135,0	506,8	26,88	0,319	1,199
400	16 750	199,0	747,2	35,53	0,422	1,586
500	22 110	262,8	986,6	43,84	0,521	1,956
600	29 240	347,5	1305	51,75	0,615	2,309
700	36 180	429,9	1614	59,27	0,704	2,645
800	43 490	516,7	1940	66,42	0,789	2,964
900	51 150	607,8	2282	73,23	0,869	3,267
1000	59 080	702,0	2636	79,71	0,947	3,556
1100	67 240	799,0	3000	85,86	1,020	3,831
1200	75 600	898,3	3373	91,78	1,091	4,095

Таблица 227

Теплоемкость этилциклопентана C_7H_{14}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	$\mu c_{p,t}$	$\mu c_{v,t}$	c_p	c_v	$c_{p,t}$	$c_{v,t}$	c'_p	c'_v	$c'_{p,t}$	$c'_{v,t}$
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	29,13	27,14	29,13	27,14	0,2967	0,2764	0,2967	0,2764	1,2996	1,2108	1,2996	1,2108
100	40,41	38,42	34,79	32,30	0,4116	0,3913	0,3543	0,3341	1,8028	1,7141	1,5521	1,4633
200	50,96	48,97	40,23	38,24	0,5190	0,4988	0,4097	0,3895	2,2735	2,1847	1,7948	1,7060
300	59,91	57,92	45,35	43,36	0,6102	0,5899	0,4619	0,4416	2,6728	2,5840	2,0232	1,9344
400	67,39	65,40	49,97	47,98	0,6864	0,6661	0,5089	0,4887	3,0065	2,9177	2,2294	2,1406
500	73,73	71,74	54,09	52,10	0,7510	0,7307	0,5509	0,5306	3,2894	3,2006	2,4132	2,3244
600	79,12	77,13	57,84	55,85	0,8059	0,7856	0,5891	0,5688	3,5298	3,4411	2,5805	2,4917
700	83,75	81,76	61,19	59,20	0,8530	0,8327	0,6232	0,6030	3,7364	3,6476	2,7299	2,6411
800	87,77	85,78	64,26	62,27	0,8940	0,8737	0,6545	0,6342	3,9158	3,8270	2,8669	2,7781
900	91,22	89,23	67,10	65,11	0,9291	0,9088	0,6834	0,6632	4,0697	3,9809	2,9936	2,9048
1000	94,20	92,21	69,65	67,66	0,9594	0,9392	0,7094	0,6891	4,2026	4,1138	3,1073	3,0186
1100	96,81	94,82	72,00	70,01	0,9860	0,9658	0,7333	0,7131	4,3191	4,2303	3,2122	3,1234
1200	99,04	97,05	74,14	72,15	1,0087	0,9885	0,7551	0,7349	4,4185	4,3298	3,3077	3,2189

Таблица 228

Энтальпия и энтропия этилциклопентана C_7H_{14}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 479	35,43	155,2	10,84	0,110	0,484
200	8 046	81,94	359,0	21,57	0,220	0,962
300	13 600	138,6	607,0	32,20	0,328	1,437
400	19 990	203,6	891,8	42,46	0,433	1,894
500	27 040	275,4	1207	52,27	0,532	2,332
600	34 700	353,5	1548	61,56	0,627	2,746
700	42 830	436,2	1911	70,41	0,717	3,141
800	51 410	523,6	2293	78,79	0,803	3,515
900	60 390	615,1	2694	86,78	0,884	3,871
1000	69 650	709,4	3107	94,38	0,961	4,211
1100	79 200	806,6	3533	101,60	1,035	4,532
1200	88 970	906,1	3969	108,45	1,105	4,838

Таблица 229

Теплоемкость n — пропилциклопентана C_8H_{16}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	34,66	32,67	34,66	32,67	0,3089	0,2912	0,3089	0,2912	1,546	1,458	1,546	1,458
100	47,16	45,17	40,62	38,63	0,4203	0,4026	0,3647	0,3469	2,104	2,015	1,826	1,737
200	59,08	57,09	47,01	45,02	0,5265	0,5088	0,4190	0,4012	2,636	2,547	2,097	2,009
300	69,11	67,12	52,75	50,76	0,6159	0,5982	0,4701	0,4524	3,083	2,994	2,353	2,265
400	77,51	75,52	57,94	55,95	0,6908	0,6730	0,5164	0,4986	3,458	3,369	2,585	2,496
500	84,67	82,68	62,57	60,58	0,7546	0,7368	0,5576	0,5399	3,777	3,689	2,791	2,703
600	90,73	88,74	66,78	64,79	0,8086	0,7909	0,5951	0,5774	4,048	3,959	2,979	2,891
700	95,97	93,98	70,56	68,57	0,8553	0,8376	0,6288	0,6111	4,282	4,193	3,148	3,059
800	100,50	98,51	74,01	72,02	0,8957	0,8779	0,6596	0,6418	4,484	4,395	3,302	3,213
900	104,39	102,40	77,22	75,23	0,9303	0,9126	0,6882	0,6705	4,657	4,568	3,445	3,356
1000	107,77	105,78	80,10	78,11	0,9604	0,9427	0,7139	0,6961	4,808	4,719	3,574	3,485
1100	110,71	108,72	82,76	80,77	0,9866	0,9689	0,7376	0,7198	4,939	4,850	3,692	3,603
1200	113,21	111,22	85,16	83,17	1,0089	0,9912	0,7589	0,7412	5,051	4,962	3,799	3,711

Таблица 230

Энтальпия и энтропия n — пропилциклопентана C_8H_{16}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	4 092	36,47	182,6	12,6	0,112	0,562
200	9 400	83,80	419,4	25,2	0,224	1,124
300	15 830	141,0	705,9	37,4	0,333	1,668
400	23 180	206,6	1034	49,2	0,438	2,195
500	31 290	278,8	1396	60,5	0,539	2,699
600	40 070	357,1	1787	71,2	0,634	3,176
700	49 390	440,2	2204	81,3	0,724	3,627
800	59 210	527,7	2642	90,9	0,810	4,055
900	69 500	619,4	3101	100,1	0,892	4,466
1000	80 100	713,9	3574	108,8	0,970	4,854
1100	91 040	811,4	4061	117,0	1,043	5,220
1200	102 200	910,7	4559	124,8	1,112	5,568

Таблица 231

Теплоемкость n — бутилциклопентана C_9H_{18}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	40,19	38,20	40,19	38,20	0,3184	0,3026	0,3184	0,3026	1,793	1,704	1,793	1,704
100	53,91	51,92	47,05	46,06	0,4271	0,4113	0,3727	0,3570	2,405	2,316	2,099	2,010
200	67,20	65,21	53,79	51,80	0,5323	0,5166	0,4261	0,4103	2,998	2,909	2,400	2,311
300	78,31	76,32	60,15	58,16	0,6204	0,6046	0,4765	0,4607	3,494	3,405	2,684	2,595
400	87,63	85,64	65,91	63,92	0,6942	0,6784	0,5221	0,5064	3,910	3,821	2,940	2,852
500	95,61	93,62	71,06	69,07	0,7574	0,7416	0,5629	0,5472	4,266	4,177	3,170	3,081
600	102,34	100,35	75,72	73,73	0,8107	0,7950	0,5998	0,5841	4,566	4,477	3,378	3,289
700	108,19	106,20	79,93	77,94	0,8671	0,8413	0,6332	0,6174	4,827	4,738	3,566	3,477
800	113,23	111,24	83,76	81,76	0,8970	0,8812	0,6635	0,6478	5,052	4,963	3,737	3,648
900	117,56	115,57	87,34	85,35	0,9313	0,9155	0,6919	0,6761	5,245	5,156	3,897	3,808
1000	121,34	119,35	90,55	88,56	0,9612	0,9451	0,7173	0,7016	5,413	5,325	4,040	3,951
1100	124,61	122,62	93,52	91,53	0,9871	0,9714	0,7408	0,7251	5,559	5,471	4,172	4,083
1200	127,38	125,39	96,18	94,19	1,0091	0,9933	0,7619	0,7462	5,683	5,594	4,291	4,202

Таблица 232

Энтальпия и энтропия n — бутилциклопентана C_9H_{18}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	4 705	37,27	209,9	14,5	0,115	0,647
200	10 760	85,22	480,0	28,8	0,228	1,285
300	18 050	143,0	805,2	42,7	0,339	1,909
400	26 360	208,8	1176	56,1	0,444	2,502
500	35 530	281,5	1585	68,8	0,545	3,069
600	45 430	359,9	2027	80,9	0,641	3,609
700	55 950	443,2	2496	92,3	0,731	4,118
800	67 010	530,8	2990	103,2	0,818	4,604
900	78 610	622,7	3507	113,5	0,899	5,064
1000	90 550	717,3	4040	123,2	0,976	5,486
1100	102 900	814,9	4589	132,4	1,049	5,907
1200	115 400	914,3	5149	141,2	1,119	6,299

Таблица 233

Теплоемкость *n* — пентилциклопентана C₁₀H₂₀

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_l	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	$c_{p,t}$	$c_{v,t}$	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м. ³ град			
0	45,72	43,73	45,72	43,73	0,3260	0,3118	0,3260	0,3118	2,040	1,951	2,040	1,951
100	60,66	58,67	53,18	51,19	0,4325	0,4183	0,3792	0,3650	2,706	2,617	2,373	2,284
200	75,32	73,33	60,57	58,58	0,5370	0,5228	0,4318	0,4177	3,360	3,272	2,702	2,613
300	87,51	85,52	67,55	65,56	0,6239	0,6097	0,4816	0,4674	3,904	3,815	3,014	2,925
400	97,75	95,76	73,88	71,89	0,6969	0,6827	0,5267	0,5125	4,361	4,272	3,296	3,207
500	106,55	104,56	79,55	77,56	0,7597	0,7455	0,5672	0,5530	4,754	4,665	3,549	3,460
600	113,95	111,96	84,66	82,67	0,8124	0,7982	0,6036	0,5894	5,084	4,995	3,777	3,688
700	120,41	118,42	89,30	87,31	0,8585	0,8443	0,6367	0,6225	5,372	5,283	3,984	3,895
800	125,96	123,97	93,51	91,52	0,8980	0,8839	0,6667	0,6525	5,620	5,531	4,172	4,083
900	130,73	128,74	97,46	95,47	0,9321	0,9179	0,6949	0,6807	5,832	5,744	4,348	4,259
1000	134,91	132,92	101,00	99,01	0,9619	0,9477	0,7201	0,7059	6,019	5,930	4,506	4,417
1100	138,51	136,52	104,28	102,29	0,9875	0,9733	0,7435	0,7293	6,179	6,091	4,652	4,564
1200	141,55	139,56	107,20	105,21	1,0092	0,9950	0,7643	0,7501	6,315	6,226	4,783	4,694

Таблица 234

Энтальпия и энтропия *n* — пентилциклопентана C₁₀H₂₀

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м. ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м. ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	5 318	37,92	237,3	16,4	0,117	0,732
200	12 110	86,36	540,4	32,5	0,232	1,450
300	20 270	144,5	940,2	48,0	0,342	2,141
400	29 550	210,7	1318	62,9	0,448	2,806
500	39 780	283,6	1775	77,1	0,550	3,440
600	50 800	362,2	2266	90,6	0,646	4,042
700	62 510	445,7	2789	103,4	0,737	4,609
800	74 810	533,4	3338	115,3	0,822	5,144
900	87 710	625,4	3913	126,7	0,903	5,652
1000	101 000	720,1	4506	137,6	0,981	6,137
1100	114 700	817,9	5117	147,9	1,054	6,598
1200	128 600	917,2	5740	157,8	1,125	7,040

Таблица 235

Теплоемкость n — гексилциклопентана $C_{11}H_{22}$

Температура t	Теплоемкость											
	ρc_p	ρc_v		$\rho c_{вт}$	c_p	c_v	$c_{рт}$	$c_{вт}$	c'_p	c'_v	$c'_{рт}$	$c'_{вт}$
С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	51,25	49,26	51,25	49,26	0,3322	0,3193	0,3322	0,3193	2,286	2,198	2,286	2,198
100	67,41	65,42	59,31	57,32	0,4369	0,4240	0,3844	0,3715	3,007	2,919	2,646	2,557
200	83,44	81,45	67,35	65,36	0,5408	0,5279	0,4365	0,4236	3,723	3,634	3,005	2,916
300	96,71	94,72	74,95	72,96	0,6268	0,6139	0,4858	0,4729	4,315	4,226	3,344	3,255
400	107,87	105,88	81,85	79,86	0,6992	0,6863	0,5305	0,5176	4,812	4,724	3,652	3,563
500	117,49	115,50	88,04	86,05	0,7615	0,7486	0,5706	0,5577	5,242	5,153	3,928	3,839
600	125,56	123,57	93,60	91,61	0,8138	0,8009	0,6067	0,5938	5,602	5,513	4,176	4,087
700	132,63	130,64	98,67	96,68	0,8596	0,8467	0,6395	0,6266	5,917	5,828	4,402	4,313
800	138,69	136,70	103,26	101,27	0,8989	0,8860	0,6693	0,6564	6,187	6,099	4,607	4,518
900	143,90	141,91	107,58	105,59	0,9327	0,9198	0,6973	0,6844	6,420	6,331	4,800	4,711
1000	148,48	146,49	111,45	109,46	0,9624	0,9495	0,7224	0,7095	6,624	6,535	4,972	4,883
1100	152,41	150,42	115,04	113,05	0,9878	0,9749	0,7456	0,7327	6,800	6,711	5,132	5,044
1200	155,72	153,73	118,22	116,23	1,0093	0,9964	0,7662	0,7533	6,947	6,858	5,274	5,185

Таблица 236

Энтальпия и энтропия n — гексилциклопентана $C_{11}H_{22}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	ρi	i	i'	ρS	S	S'
С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	5 931	38,41	264,6	18,3	0,119	0,816
200	13 470	87,30	601,0	36,1	0,234	1,611
300	22 490	145,7	1003	53,3	0,345	2,378
400	32 740	212,2	1461	69,8	0,452	3,114
500	44 020	285,3	1964	85,5	0,554	3,815
600	56 160	364,0	2506	100,3	0,650	4 475
700	69 070	447,7	3081	114,2	0,740	5,097
800	82 610	535,4	3686	127,5	0,827	5,688
900	96 820	627,6	4320	140,1	0,908	6,251
1000	111 500	722,4	4972	152,1	0,986	6,786
1100	126 500	820,2	5645	163,5	1,060	7,295
1200	141 900	919,4	6329	174,2	1,129	7,772

Таблица 237

Теплоемкость *n* — гептилциклопентана C₁₂H₂₄

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	56,78	54,79	56,78	54,79	0,3373	0,3255	0,3373	0,3255	2,533	2,444	2,533	2,444
100	74,16	72,17	65,44	63,45	0,4406	0,4288	0,3888	0,3770	3,309	3,220	2,920	2,831
200	91,56	89,57	74,13	72,14	0,5440	0,5322	0,4404	0,4286	4,085	3,996	3,307	3,218
300	105,91	103,92	82,35	80,36	0,6292	0,6174	0,4893	0,4774	4,725	4,636	3,674	3,585
400	117,99	116,00	89,82	87,83	0,7010	0,6892	0,5337	0,5218	5,264	5,175	4,007	3,918
500	128,43	126,44	96,53	94,54	0,7630	0,7512	0,5735	0,5617	5,730	5,641	4,307	4,218
600	137,17	135,18	102,54	100,55	0,8150	0,8032	0,6092	0,5974	6,120	6,031	4,575	4,486
700	144,85	142,86	108,04	106,05	0,8606	0,8488	0,6419	0,6301	6,462	6,374	4,820	4,731
800	151,42	149,43	113,01	111,02	0,8996	0,8878	0,6714	0,6596	6,755	6,667	5,042	4,953
900	157,07	155,08	117,70	115,71	0,9332	0,9214	0,6993	0,6875	7,007	6,919	5,251	5,162
1000	162,05	160,06	121,90	119,91	0,9628	0,9510	0,7243	0,7124	7,230	7,141	5,438	5,350
1100	166,31	164,32	125,80	123,81	0,9881	0,9763	0,7474	0,7356	7,420	7,331	5,612	5,524
1200	169,89	167,90	129,24	127,25	1,0094	0,9976	0,7679	0,7560	7,579	7,491	5,766	5,677

Таблица 238

Энтальпия и энтропия *n* — гептилциклопентана C₁₂H₂₄

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	6 544	38,88	292,0	20,2	0,119	0,892
200	14 830	88,08	661,4	39,8	0,237	1,775
300	24 710	146,8	1102	58,6	0,348	2,614
400	35 930	213,5	1603	76,6	0,455	3,417
500	48 270	286,8	2154	93,7	0,557	4,180
600	61 520	365,5	2745	109,9	0,653	4,902
700	75 630	449,3	3374	125,2	0,744	5,585
800	90 410	537,1	4034	139,7	0,830	6,232
900	105 900	624,4	4726	153,5	0,912	6,848
1000	121 900	724,3	5438	166,6	0,990	7,432
1100	138 400	822,1	6173	179,0	1,063	7,985
1200	155 100	921,5	6919	190,7	1,133	8,507

Таблица 239

Теплоемкость n — октилциклопентана $C_{18}H_{26}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	ϵ_p	ϵ_v	ϵ_{pt}	ϵ_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	62,31	60,32	62,31	60,32	0,3417	0,3308	0,3417	0,3308	2,780	2,691	2,780	2,691
100	80,91	78,92	71,57	69,58	0,4437	0,4328	0,3925	0,3816	3,610	3,521	3,193	3,104
200	99,68	97,69	80,91	78,92	0,5467	0,5358	0,4437	0,4328	4,447	4,358	3,610	3,521
300	115,11	113,12	89,75	87,76	0,6313	0,6204	0,4922	0,4813	5,135	5,047	4,004	3,915
400	128,11	126,12	97,79	95,80	0,7026	0,6917	0,5363	0,5254	5,715	5,627	4,363	4,274
500	139,37	137,38	105,02	103,03	0,7643	0,7534	0,5760	0,5650	6,218	6,129	4,685	4,597
600	148,78	146,79	111,48	109,49	0,8160	0,8050	0,6114	0,6005	6,638	6,549	4,974	4,885
700	157,07	155,08	117,41	115,42	0,8614	0,8505	0,6439	0,6330	7,007	6,919	5,238	5,149
800	164,15	162,16	122,75	120,76	0,9003	0,8893	0,6732	0,6623	7,323	7,235	5,476	5,388
900	170,24	168,25	127,82	125,83	0,9337	0,9227	0,7010	0,6901	7,595	7,506	5,703	5,614
1000	175,62	173,63	132,35	130,36	0,9632	0,9522	0,7258	0,7149	7,835	7,746	5,905	5,816
1100	180,21	178,22	136,56	134,57	0,9883	0,9774	0,7489	0,7380	8,040	7,951	6,092	6,004
1200	184,06	182,07	140,26	138,27	1,0094	0,9985	0,7692	0,7583	8,212	8,123	6,258	6,169

Таблица 240

Энтальпия и энтропия n — октилциклопентана $C_{18}H_{26}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	7 157	39,25	319,3	22,1	0,121	0,985
200	16 180	88,74	722,0	43,4	0,238	1,936
300	26 930	147,7	1201	63,9	0,350	2,850
400	39 120	160,9	1745	83,5	0,458	3,725
500	52 510	288,0	2343	102,0	0,559	4,550
600	66 890	366,8	2984	119,6	0,656	5,335
700	82 190	450,7	3667	136,2	0,747	6,076
800	98 200	358,6	4381	151,9	0,833	6,776
900	115 000	630,9	5133	166,9	0,916	7,445
1000	132 400	725,8	5905	181,1	0,994	8,079
1100	150 200	823,8	6701	194,4	1,066	8,672
1200	168 300	923,0	7510	207,2	1,137	9,243

Таблица 241

Теплоемкость *n* — нонилциклопентана C₁₄H₂₈

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	67,84	65,85	67,84	65,85	0,3455	0,3353	0,3455	0,3353	3,027	2,938	3,027	2,938
100	87,66	85,67	77,70	75,71	0,4464	0,4363	0,3957	0,3856	3,911	3,822	3,466	3,378
200	107,80	105,81	87,69	85,70	0,5490	0,5388	0,4466	0,4364	4,809	4,721	3,912	3,823
300	124,31	122,32	97,15	95,16	0,6331	0,6229	0,4947	0,4846	5,546	5,457	4,334	4,245
400	138,23	136,24	105,76	103,77	0,7039	0,6938	0,5386	0,5285	6,167	6,078	4,718	4,630
500	150,31	148,32	113,51	111,52	0,7655	0,7553	0,5781	0,5679	6,706	6,617	5,064	4,975
600	160,39	158,40	120,42	118,43	0,8168	0,8067	0,6132	0,6031	7,156	7,067	5,372	5,284
700	169,29	167,30	126,78	124,79	0,8621	0,8520	0,6456	0,6355	7,553	7,464	5,656	5,567
800	176,88	174,89	132,51	130,52	0,9008	0,8906	0,6748	0,6647	7,891	7,803	5,912	5,823
900	183,41	181,42	137,94	135,95	0,9340	0,9239	0,7025	0,6923	8,183	8,094	6,154	6,065
1000	189,19	187,20	142,80	140,81	0,9635	0,9533	0,7272	0,7171	8,440	8,352	6,371	6,282
1100	194,11	192,12	147,32	145,33	0,9885	0,9784	0,7502	0,7401	8,660	8,571	6,573	6,484
1200	198,23	196,24	151,28	149,29	1,0095	0,9994	0,7704	0,7603	8,844	8,755	6,749	6,660

Таблица 242

Энтальпия и энтропия *n* — нонилциклопентана C₁₄H₂₈

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	7 770	39,57	346,6	23,8	0,121	1,062
200	17 540	89,32	782,4	46,9	0,239	2,092
300	29 150	148,4	1300	69,1	0,352	3,083
400	42 300	215,4	1887	90,2	0,459	4,024
500	56 760	289,1	2532	110,3	0,562	4,921
600	72 250	367,9	3223	129,2	0,658	5,764
700	88 750	451,9	3959	147,1	0,749	6,563
800	106 000	539,8	4730	164,0	0,835	7,317
900	124 100	632,3	5539	180,1	0,917	8,035
1000	142 800	727,2	6371	195,4	0,995	8,718
1100	162 100	825,2	7230	209,9	1,069	9,365
1200	181 500	924,5	8099	223,6	1,143	9,975

Таблица 243

Теплоемкость n — декилциклопентана $C_{15}H_{30}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	73,37	71,38	73,37	71,38	0,3487	0,3393	0,3487	0,3393	3,273	3,185	3,273	3,185
100	94,41	92,42	83,83	81,84	0,4487	0,4393	0,3985	0,3890	4,212	4,123	3,740	3,651
200	115,92	113,93	94,47	92,48	0,5510	0,5415	0,4490	0,4396	5,172	5,083	4,215	4,126
300	133,51	131,52	104,55	102,56	0,6346	0,6251	0,4969	0,4875	5,956	5,868	4,664	4,576
400	148,35	146,36	113,73	111,74	0,7051	0,6957	0,5406	0,5311	6,618	6,530	5,074	4,985
500	161,25	159,26	122,00	120,01	0,7664	0,7570	0,5799	0,5704	7,194	7,105	5,442	5,354
600	172,00	170,01	129,36	127,37	0,8175	0,8081	0,6148	0,6054	7,674	7,585	5,771	5,682
700	181,51	179,52	136,15	134,16	0,8627	0,8533	0,6471	0,6377	8,098	8,009	6,074	5,985
800	189,61	187,62	142,26	140,27	0,9012	0,8918	0,6762	0,6667	8,459	8,370	6,347	6,258
900	196,58	194,59	148,06	146,07	0,9344	0,9249	0,7037	0,6943	8,770	8,681	6,606	6,517
1000	202,76	200,77	153,25	151,26	0,9637	0,9543	0,7284	0,7190	9,046	8,957	6,837	6,748
1100	208,01	206,02	158,08	156,09	0,9887	0,9792	0,7514	0,7418	9,280	9,191	7,053	6,964
1200	212,40	210,41	162,30	160,31	1,0096	1,0001	0,7714	0,7620	9,476	9,387	7,241	7,152

Таблица 244

Энтальпия и энтропия n — декилциклопентана $C_{15}H_{30}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	8 383	39,85	374,0	25,9	0,123	1,155
200	18 890	89,80	843,0	50,7	0,241	2,262
300	31 370	149,1	1399	74,4	0,354	3,319
400	45 490	216,2	2030	97,2	0,462	4,336
500	61 000	290,0	2721	118,7	0,564	5,295
600	77 620	368,9	3463	139,0	0,661	6,201
700	95 310	453,0	4252	158,2	0,752	7,058
800	113 800	541,0	5078	176,4	0,839	7,870
900	133 300	633,3	5945	193,6	0,920	8,637
1000	153 300	728,4	6837	210,0	0,998	9,369
1100	173 900	826,5	7758	225,4	1,071	10,056
1200	194 800	925,7	8689	240,0	1,140	10,707

Таблица 245

Теплоемкость *n* — ундецилциклопентана C₁₆H₃₂

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	78,90	76,91	78,90	76,91	0,3516	0,3427	0,3516	0,3427	3,520	3,431	3,520	3,431
100	101,16	99,17	89,96	87,97	0,4508	0,4419	0,4009	0,3920	4,513	4,424	4,013	3,925
200	124,04	122,05	101,25	99,26	0,5527	0,5439	0,4512	0,4423	5,534	5,445	4,517	4,428
300	142,71	140,72	111,95	109,96	0,6359	0,6270	0,4989	0,4900	6,367	6,278	4,995	4,906
400	158,47	156,48	121,70	119,71	0,7061	0,6973	0,5423	0,5334	7,070	6,981	5,429	5,341
500	172,19	170,20	130,49	128,50	0,7673	0,7584	0,5815	0,5726	7,682	7,593	5,822	5,733
600	183,61	181,62	138,30	136,31	0,8182	0,8093	0,6163	0,6074	8,192	8,103	6,170	6,081
700	193,73	191,74	145,52	143,53	0,8633	0,8544	0,6484	0,6396	8,643	8,554	6,492	6,403
800	202,34	200,35	152,01	150,02	0,9016	0,8928	0,6774	0,6685	9,027	8,938	6,782	6,693
900	209,75	207,76	158,18	156,19	0,9346	0,9258	0,7049	0,6960	9,358	9,269	7,057	6,968
1000	216,33	214,34	163,70	161,71	0,9640	0,9551	0,7294	0,7206	9,651	9,563	7,303	7,214
1100	221,91	219,92	168,84	166,85	0,9888	0,9800	0,7514	0,7435	9,900	9,811	7,533	7,444
1200	226,57	224,58	173,32	171,33	1,0096	1,0007	0,7723	0,7634	10,108	10,019	7,732	7,644

Таблица 246

Энтальпия и энтропия *n* — ундецилциклопентана C₁₆H₃₂

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	8 996	40,09	401,3	27,7	0,123	1,236
200	20 250	90,24	903,4	54,3	0,242	2,422
300	33 590	149,7	1499	79,8	0,356	3,560
400	48 680	216,9	2172	104,1	0,464	4,644
500	65 250	290,8	2911	127,1	0,566	5,670
600	82 980	369,8	3702	148,7	0,663	6,634
700	101 900	453,9	4544	169,2	0,754	7,549
800	121 600	541,9	5426	188,6	0,840	8,414
900	142 400	634,4	6351	207,0	0,922	9,235
1000	163 700	729,4	7303	224,4	1,000	10,011
1100	185 700	827,6	8286	240,9	1,073	10,747
1200	208 000	926,8	9278	256,5	1,143	11,438

Таблица 247

Теплоемкость n — додекилциклопентана $C_{17}H_{34}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	84,43	82,44	84,43	82,44	0,3541	0,3457	0,3541	0,3457	3,767	3,678	3,767	3,678
100	107,91	105,92	96,09	94,10	0,4526	0,4442	0,4030	0,3946	4,814	4,725	4,287	4,198
200	132,19	130,17	108,03	106,04	0,5543	0,5459	0,4531	0,4447	5,896	5,807	4,820	4,731
300	151,91	149,92	119,35	117,36	0,6371	0,6287	0,5005	0,4922	6,777	6,688	5,325	5,236
400	168,59	166,60	129,67	127,68	0,7070	0,6987	0,5438	0,5355	7,521	7,433	5,785	5,696
500	183,13	181,14	138,98	136,99	0,7680	0,7597	0,5829	0,5745	8,170	8,081	6,200	6,112
600	195,22	193,23	147,24	145,25	0,8187	0,8104	0,6175	0,6092	8,710	8,621	6,569	6,480
700	205,95	203,96	154,89	152,90	0,8637	0,8554	0,6496	0,6412	9,188	9,099	6,910	6,821
800	215,07	213,08	161,76	159,77	0,9020	0,8936	0,6784	0,6701	9,595	9,506	7,217	7,128
900	222,92	220,93	168,30	166,31	0,9349	0,9266	0,7058	0,6975	9,944	9,857	7,508	7,420
1000	229,90	227,91	174,15	172,16	0,9642	0,9558	0,7304	0,7220	10,257	10,168	7,769	7,681
1100	235,81	233,82	179,60	177,61	0,9890	0,9806	0,7532	0,7449	10,520	10,432	8,013	7,924
1200	240,74	238,75	184,34	182,35	1,0096	1,0013	0,7731	0,7648	10,740	10,652	8,224	8,135

Таблица 248

Энтальпия и энтропия n — додекилциклопентана $C_{17}H_{34}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	9 609	40,30	428,7	29,6	0,124	1,321
200	21 610	90,62	964,0	57,9	0,243	2,583
300	35 810	150,2	1598	85,0	0,357	3,792
400	51 870	217,5	2314	110,9	0,465	4,948
500	69 490	291,5	3100	135,4	0,568	6,041
600	88 340	370,5	3941	158,4	0,664	7,067
700	108 400	454,7	4837	180,1	0,755	8,035
800	129 400	542,7	5774	200,8	0,842	8,958
900	151 500	635,2	6757	220,3	0,924	9,828
1000	174 200	730,4	7769	238,9	1,002	10,658
1100	197 600	828,5	8814	256,5	1,076	11,443
1200	221 200	927,7	9869	273,0	1,145	12,180

Таблица 249

Теплоемкость *n* — тридекилциклопентана $C_{18}H_{36}$

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	89,96	87,97	89,96	87,97	0,3563	0,3484	0,3563	0,3484	4,013	3,925	4,013	3,925
100	114,66	112,67	102,22	100,23	0,4542	0,4463	0,4049	0,3970	5,115	5,027	4,560	4,472
200	140,28	138,29	114,81	112,82	0,5556	0,5478	0,4548	0,4469	6,258	6,170	5,122	5,033
300	161,11	159,12	126,75	124,76	0,6381	0,6303	0,5020	0,4942	7,188	7,099	5,655	5,556
400	178,71	176,72	137,64	135,65	0,7079	0,7000	0,5452	0,5373	7,973	7,884	6,141	6,052
500	194,07	192,08	147,47	145,48	0,7687	0,7608	0,5841	0,5762	8,658	8,569	6,579	6,490
600	206,83	204,84	156,18	154,19	0,8192	0,8114	0,6186	0,6107	9,227	9,139	6,968	6,879
700	218,17	216,18	164,26	162,27	0,8641	0,8563	0,6506	0,6427	9,733	9,645	7,328	7,239
800	227,80	225,81	171,51	169,52	0,9023	0,8944	0,6793	0,6715	10,163	10,074	7,652	7,563
900	236,09	234,10	178,42	176,43	0,9351	0,9272	0,7067	0,6988	10,533	10,444	7,960	7,871
1000	243,47	241,48	184,60	182,61	0,9644	0,9565	0,7312	0,7233	10,862	10,773	8,236	8,147
1100	249,71	247,72	190,36	188,37	0,9891	0,9812	0,7540	0,7461	11,141	11,052	8,493	8,404
1200	254,91	252,92	195,36	193,37	1,0097	1,0018	0,7738	0,7659	11,372	11,284	8,716	8,627

Таблица 250

Энтальпия и энтропия *n* — тридекилциклопентана $C_{18}H_{36}$

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	<i>i</i>	<i>i'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	10 220	40,49	456,0	31,5	0,125	1,404
200	22 960	90,96	1 024	61,5	0,244	2,743
300	38 030	150,6	1 697	90,3	0,358	4,028
400	55 060	218,1	2 456	117,8	0,467	5,255
500	73 740	292,1	3 290	143,7	0,569	6,410
600	93 710	371,2	4 181	168,1	0,666	7,499
700	115 000	455,4	5 130	191,2	0,757	8,529
800	137 200	543,4	6 122	213,0	0,844	9,504
900	160 600	636,0	7 164	233,8	0,926	10,430
1000	184 600	731,2	8 236	253,4	1,004	11,304
1100	209 400	829,4	9 342	271,9	1,077	12,130
1200	234 400	928,6	10 459	289,8	1,147	12,915

Таблица 251

Теплоемкость *n* — тетрадекилциклопентана C₁₉H₃₈

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м. ³ град			
0	95,49	93,50	95,49	93,50	0,3583	0,3509	0,3583	0,3509	4,260	4,171	4,260	4,171
100	121,41	119,42	108,35	106,36	0,4556	0,4481	0,4066	0,3991	5,417	5,328	4,834	4,745
200	148,40	146,41	121,49	119,50	0,5569	0,5494	0,4559	0,4484	6,621	6,532	5,420	5,331
300	170,31	168,32	134,15	132,16	0,6391	0,6316	0,5034	0,4959	7,598	7,509	5,985	5,896
400	188,83	186,84	145,61	143,62	0,7086	0,7011	0,5464	0,5389	8,424	8,336	6,496	6,407
500	205,01	203,02	155,96	153,97	0,7693	0,7618	0,5852	0,5778	9,146	9,057	6,958	6,869
600	218,44	216,45	165,12	163,13	0,8197	0,8122	0,6196	0,6121	9,745	9,657	7,367	7,278
700	230,39	228,40	173,63	171,64	0,8645	0,8571	0,6515	0,6441	10,279	10,190	7,746	7,658
800	240,53	238,54	181,26	179,27	0,9026	0,8951	0,6802	0,6727	10,731	10,642	8,087	7,998
900	249,26	247,27	188,54	186,55	0,9353	0,9279	0,7075	0,7000	11,120	11,032	8,411	8,323
1000	257,04	255,05	195,05	193,06	0,9645	0,9571	0,7319	0,7244	11,468	11,379	8,702	8,613
1100	263,61	261,62	201,12	199,13	0,9892	0,9817	0,7547	0,7472	11,761	11,672	8,973	8,884
1200	269,08	267,09	206,38	204,39	1,0097	1,0022	0,7744	0,7670	12,005	11,916	9,207	9,119

Таблица 252

Энтальпия и энтропия *n* — тетрадекилциклопентана C₁₉H₃₈

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м. ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м. ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	10 835	40,66	483,4	33,5	0,126	1,494
200	24 300	91,18	1 084	65,3	0,245	2,913
300	40 250	151,0	1 796	95,7	0,359	4 269
400	58 240	218,6	2 598	124,7	0,468	5,563
500	77 980	292,6	3 479	152,1	0,571	6,786
600	99 070	371,8	4 420	177,9	0,668	7,937
700	121 500	456,1	5 422	202,2	0,759	9,021
800	145 000	544,2	6 470	225,2	0,845	10,054
900	169 700	636,8	7 570	247,1	0,927	11,024
1000	195 100	731,9	8 702	267,9	1,005	11,952
1100	221 200	830,2	9 870	287,5	1,079	12,826
1200	247 700	929,3	10 484	306,0	1,148	13,652

Таблица 253

Теплоемкость *n* — пентадецилциклопентана $C_{20}H_{40}$

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	ρc_p	ρc_v	ρc_{pm}	ρc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	101,02	99,03	101,02	99,03	0,3601	0,3530	0,3601	0,3530	4,507	4,418	4,507	4,418
100	128,16	126,17	114,58	112,59	0,4569	0,4498	0,4085	0,4014	5,716	5,629	5,112	5,023
200	156,52	154,53	128,37	126,38	0,5580	0,5509	0,4576	0,4505	6,983	6,894	5,727	5,638
300	179,51	177,52	141,55	139,56	0,6399	0,6328	0,5046	0,4975	8,009	7,920	6,315	6,226
400	198,95	196,96	153,58	151,59	0,7092	0,7021	0,5475	0,5404	8,876	8,787	6,852	6,763
500	215,95	213,96	164,45	162,46	0,7698	0,7627	0,5862	0,5791	9,634	9,546	7,337	7,248
600	230,05	228,06	174,06	172,07	0,8201	0,8130	0,6205	0,6134	10,263	10,175	7,765	7,677
700	242,61	240,62	183,00	181,01	0,8649	0,8578	0,6524	0,6453	10,824	10,735	8,164	8,076
800	253,26	251,27	191,01	189,02	0,9028	0,8957	0,6809	0,6738	11,299	11,210	8,522	8,433
900	262,43	260,44	198,66	196,67	0,9355	0,9284	0,7082	0,7011	11,708	11,619	8,863	8,774
1000	270,61	268,62	205,50	203,51	0,9648	0,9576	0,7326	0,7255	12,073	11,984	9,168	9,079
1100	277,51	275,52	211,88	209,89	0,9893	0,9822	0,7553	0,7482	12,381	12,292	9,453	9,364
1200	283,25	281,26	217,40	215,41	1,0097	1,0026	0,7750	0,7679	12,637	12,548	9,699	9,610

Таблица 254

Энтальпия и энтропия *n* — пентадецилциклопентана $C_{20}H_{40}$

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	ρi	<i>i</i>	<i>i'</i>	ρS	<i>S</i>	<i>S'</i>
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	11 458	40,85	511,2	35,2	0,126	1,571
200	25 670	91,52	1 145	68,9	0,246	3,074
300	42 470	151,4	1 895	101,0	0,360	4,506
400	61 430	219,0	2 741	131,5	0,469	5,867
500	82 230	293,1	3 669	160,3	0,571	7,152
600	104 400	372,3	4 659	187,4	0,668	8,361
700	128 100	456,7	5 715	213,1	0,760	9,508
800	152 800	544,7	6 818	237,4	0,846	10,592
900	178 800	637,4	7 977	260,4	0,929	11,618
1000	205 500	732,6	9 168	282,3	1,007	12,595
1100	233 100	830,8	10 398	303,0	1,081	13,518
1200	260 900	930,0	11 639	322,4	1,150	14,384

Таблица 255

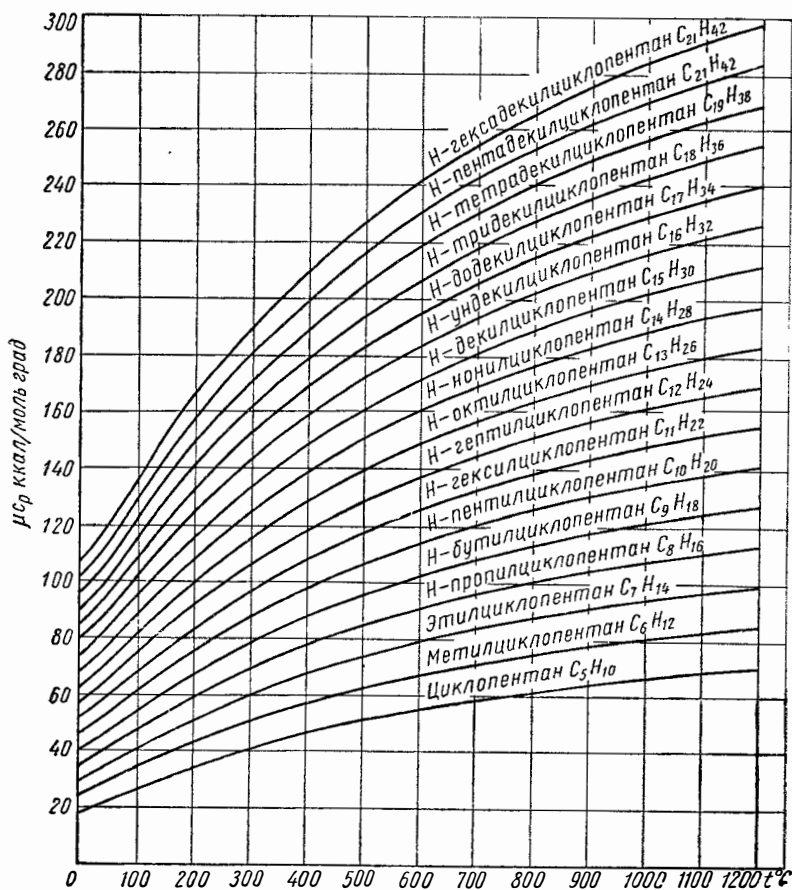
Теплоемкость n — гексадецилциклопентана $C_{21}H_{42}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	106,55	104,56	106,55	104,56	0,3317	0,3550	0,3617	0,3550	4,754	4,665	4,754	4 665
100	134,91	132,92	120,61	118,62	0,4580	0,4513	0,4095	0,4027	6,019	5,930	5,381	5,292
200	164,64	162,65	135,15	133,16	0,5590	0,5522	0,4588	0,4521	7,345	7,256	6,030	5,941
300	188,71	186,72	149,95	147,96	0,6407	0,6339	0,5091	0,5023	8,419	8,330	6,690	6,601
400	209,07	207,08	161,55	159,54	0,7098	0,7030	0,5485	0,5417	9,327	9,239	7,207	7,119
500	226,89	224,90	172,94	170,95	0,7703	0,7635	0,5871	0,5804	10,122	10,034	7,716	7,627
600	241,66	239,67	183,00	181,01	0,8204	0,8137	0,6213	0,6145	10,781	10,693	8,164	8,076
700	254,83	252,84	192,37	190,38	0,8652	0,8584	0,6531	0,6464	11,369	11,280	8,582	8,494
800	265,99	264,00	200,76	198,77	0,9031	0,8963	0,6816	0,6748	11,867	11,778	8,957	8,868
900	275,60	273,61	208,78	206,79	0,9357	0,9289	0,7088	0,7021	12,296	12,207	9,314	9,226
1000	284,18	282,19	215,95	213,96	0,9648	0,9581	0,7332	0,7264	12,678	12,590	9,634	9,546
1100	291,41	289,42	222,64	220,65	0,9894	0,9826	0,7559	0,7491	13,001	12,912	9,933	9,844
1200	297,42	295,43	228,42	226,43	1,0098	1,0030	0,7755	0,7687	13,269	13,180	10,191	10,102

Таблица 256

Энтальпия и энтропия n — гексадецилциклопентана $C_{21}H_{42}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	12 061	40,95	538,1	37,1	0,126	1,655
200	27 030	91,76	1 206	72,6	0,246	3,239
300	44 990	152,7	2 007	106,3	0,361	4,742
400	64 620	219,4	2 883	138,3	0,470	6,170
500	86 470	293,6	3 858	168,6	0,572	7,522
600	109 800	372,8	4 898	197,0	0,669	8,789
700	134 700	457,2	6 007	224,0	0,760	9,993
800	160 600	545,3	7 166	249,6	0,847	11,135
900	187 900	637,9	8 383	273,8	0,930	12,215
1000	216 000	733,2	9 634	296,8	1,008	13,241
1100	244 900	831,5	10 926	318,5	1,081	14,209
1200	274 100	930,6	12 229	338,8	1,150	15,115



Фиг. 9. Истинные молярные теплоемкости при постоянном давлении для углеводородов ряда циклопентанов

$$\mu_{ср} = f(t).$$

IX. ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ
И ЭНТРОПИИ УГЛЕВОДОРОДОВ
РЯДА ЦИКЛОГЕКСАНОВ

(таблицы 257--290)

Таблица 257

Теплоемкость циклогексана C_6H_{12}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	22,0	20,0	22,0	20,0	0,2614	0,2377	0,2614	0,2377	0,982	0,892	0,982	0,892
100	33,1	31,1	27,92	25,93	0,3933	0,3695	0,3318	0,3081	1,477	1,387	1,246	1,157
200	43,0	41,0	33,00	31,01	0,5110	0,4872	0,3921	0,3685	1,918	1,829	1,472	1,383
300	51,57	49,58	37,82	35,83	0,6128	0,5891	0,4494	0,4258	2,301	2,212	1,687	1,598
400	59,06	57,07	42,23	40,24	0,7018	0,6781	0,5018	0,4782	2,635	2,546	1,884	1,795
500	65,25	63,26	46,23	44,24	0,7753	0,7517	0,5493	0,5257	2,911	2,822	2,062	1,974
600	70,40	68,41	49,83	47,84	0,8365	0,8129	0,5921	0,5685	3,141	3,052	2,223	2,134
700	74,72	72,73	53,10	51,11	0,8879	0,8642	0,6310	0,6073	3,333	3,245	2,369	2,280
800	78,3	76,3	56,1	54,1	0,9304	0,9066	0,6666	0,6428	3,493	3,404	2,503	2,414
900	81,4	79,4	58,7	56,7	0,9672	0,9435	0,6975	0,6737	3,632	3,542	2,619	2,530
1000	84,0	82,0	61,2	59,2	0,9981	0,9744	0,7272	0,7034	3,748	3,658	2,730	2,641
1100	86,2	84,2	63,3	61,3	1,0243	1,0005	0,7522	0,7284	3,846	3,756	2,824	2,735
1200	88,1	86,1	65,3	63,3	1,0469	1,0231	0,7759	0,7522	3,930	3,841	2,913	2,824

Таблица 258

Энтальпия и энтропия циклогексана C_6H_{12}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	2 792	33,18	124,6	8,73	0,1037	0,390
200	6 600	78,42	294,4	17,66	0,2098	0,788
300	11 350	134,8	506,1	26,79	0,3183	1,195
400	16 890	200,7	753,6	35,69	0,4241	1,592
500	23 110	274,6	1031	44,28	0,5262	1,976
600	29 900	355,3	1334	52,53	0,6242	2,344
700	37 170	441,7	1658	60,41	0,7178	2,695
800	44 880	533,3	2002	67,9	0,807	3,028
900	52 830	627,8	2357	75,1	0,892	3,349
1000	61 200	727,2	2730	81,8	0,972	3,648
1100	69 630	827,4	3106	88,2	1,048	3,933
1200	78 360	931,1	3496	94,4	1,122	4,210

Таблица 259

Теплоемкость метилциклогексана C_7H_{14}

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	29	27	29	27	0,2954	0,2750	0,2954	0,2750	1,294	1,205	1,294	1,205
100	41,3	39,3	35,08	33,09	0,4206	0,4003	0,3573	0,3370	1,843	1,753	1,565	1,476
200	52,4	50,4	41,02	39,03	0,5337	0,5133	0,4178	0,3975	2,338	2,249	1,830	1,741
300	62,09	60,10	46,44	44,45	0,6324	0,6121	0,4730	0,4527	2,770	2,681	2,072	1,983
400	70,23	68,24	51,42	49,43	0,7153	0,6950	0,5237	0,5034	3,133	3,044	2,294	2,205
500	77,06	75,07	55,88	53,89	0,7849	0,7646	0,5691	0,5489	3,438	3,349	2,493	2,404
600	82,76	80,77	59,89	57,90	0,8429	0,8227	0,6100	0,5897	3,692	3,603	2,672	2,583
700	87,58	85,59	63,52	61,53	0,8920	0,8717	0,6470	0,6267	3,907	3,818	2,834	2,745
800	91,66	89,67	66,8	64,8	0,9336	0,9133	0,6804	0,6600	4,089	4,000	2,980	2,891
900	95,1	93,1	69,7	67,7	0,9686	0,9482	0,7099	0,6895	4,243	4,153	3,110	3,020
1000	98,0	96,0	72,3	70,3	0,9981	0,9778	0,7364	0,7160	4,372	4,283	3,226	3,136
1100	100,5	98,5	74,8	72,8	1,0236	1,0032	0,7618	0,7415	4,484	4,394	3,337	3,248
1200	102,6	100,6	77,0	75,0	1,0450	1,0246	0,7843	0,7639	4,577	4,488	3,435	3,346

Таблица 260

Энтальпия и энтропия метилциклогексана C_7H_{14}

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	3 508	35,73	156,5	10,97	0,1117	0,490
200	8 204	83,56	366,0	21,98	0,2238	0,981
300	13 930	141,9	621,6	32,98	0,3359	1,471
400	20 570	209,5	917,6	43,64	0,4444	1,947
500	27 940	284,5	1246	53,85	0,5484	2,403
600	35 930	366,0	1603	63,58	0,6475	2,837
700	44 460	452,9	1984	72,81	0,7415	3,248
800	53 440	544,3	2384	81,5	0,831	3,638
900	62 730	638,9	2799	89,8	0,915	4,008
1000	72 300	736,4	3226	97,7	0,996	4,361
1100	82 280	838,0	3671	105,2	1,072	4,695
1200	92 400	941,2	4122	112,4	1,145	5,016

Таблица 261

Теплоемкость этилциклогексана C_8H_{16}

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	34,5	32,5	34,5	32,5	0,3075	0,2896	0,3075	0,2896	1,539	1,450	1,539	1,450
100	48,1	46,1	41,5	39,5	0,4287	0,4108	0,3698	0,3520	2,146	2,057	1,851	1,762
200	60,7	58,7	48,0	46,0	0,5410	0,5231	0,4278	0,4100	2,708	2,619	2,141	2,052
300	71,4	69,4	54,0	52,0	0,6363	0,6185	0,4812	0,4634	3,185	3,096	2,409	2,320
400	80,5	78,5	59,6	57,6	0,7174	0,6996	0,5312	0,5133	3,591	3,502	2,659	2,570
500	88,2	86,2	64,7	62,7	0,7860	0,7682	0,5766	0,5588	3,935	3,846	2,887	2,797
600	94,6	92,6	69,1	67,1	0,8431	0,8252	0,6158	0,5980	4,220	4,131	3,083	2,994
700	99,9	97,9	73,1	71,1	0,8903	0,8725	0,6515	0,6336	4,457	4,368	3,261	3,172
800	104,5	102,5	76,7	74,7	0,9313	0,9135	0,6835	0,6657	4,662	4,573	3,422	3,333
900	108,4	106,4	80,0	78,0	0,9661	0,9482	0,7130	0,6951	4,836	4,747	3,569	3,480
1000	111,6	109,6	83,0	81,0	0,9946	0,9767	0,7397	0,7219	4,979	4,890	3,703	3,614
1100	114,5	112,5	85,7	83,7	1,0204	1,0026	0,7638	0,7459	5,108	5,019	3,823	3,734
1200	116,9	114,9	88,2	86,2	1,0418	1,0240	0,7860	0,7682	5,215	5,126	3,935	3,846

Таблица 262

Энтальпия и энтропия этилциклогексана C_8H_{16}

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	<i>i</i>	<i>i'</i>	μS	<i>S</i>	<i>S'</i>
°С	ккал/мол	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	4 150	36,98	185,1	12,8	0,114	0,571
200	9 600	85,56	428,1	25,6	0,228	1,142
300	16 200	144,4	722,7	38,3	0,341	1,709
400	23 840	212,5	1064	50,5	0,450	2,251
500	32 350	288,3	1444	62,2	0,554	2,776
600	41 460	369,5	1850	73,3	0,653	3,268
700	51 170	455,0	2283	83,9	0,748	3,743
800	61 360	546,8	2738	93,9	0,837	4,189
900	72 000	641,7	3212	103,4	0,924	4,613
1000	83 000	739,7	3703	112,4	1,002	5,015
1100	94 270	840,2	4205	120,9	1,077	5,394
1200	105 800	943,2	4722	129,0	1,150	5,755

Таблица 263

Теплоемкость *n* — пропициклогексана C₉H₁₈

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	40,0	38,0	40,0	38,0	0,3169	0,3010	0,3169	0,3010	1,785	1,695	1,785	1,695
100	54,8	52,8	46,3	44,3	0,4341	0,4183	0,3668	0,3509	2,445	2,356	2,066	1,976
200	68,6	66,6	54,5	52,5	0,5434	0,5276	0,4317	0,4159	3,061	2,971	2,431	2,342
300	80,5	78,5	61,0	59,0	0,6377	0,6219	0,4832	0,4674	3,591	3,502	2,721	2,632
400	90,6	88,6	67,2	65,2	0,7177	0,7019	0,5323	0,5165	4,042	3,953	2,998	2,909
500	99,0	97,0	72,6	70,6	0,7843	0,7684	0,5751	0,5593	4,417	4,327	3,239	3,150
600	106,1	104,1	77,7	75,7	0,8405	0,8247	0,6155	0,5997	4,733	4,644	3,466	3,377
700	112,1	110,1	82,1	80,1	0,8880	0,8722	0,6504	0,6345	5,001	4,912	3,663	3,574
800	117,2	115,2	86,2	84,2	0,9284	0,9126	0,6829	0,6670	5,229	5,139	3,846	3,756
900	121,6	119,6	90,0	88,0	0,9633	0,9474	0,7130	0,6971	5,425	5,335	4,015	3,926
1000	125,2	123,2	93,4	91,4	0,9918	0,9760	0,7399	0,7240	5,586	5,496	4,167	4,078
1100	128,4	126,4	96,4	94,4	1,0172	1,0013	0,7637	0,7478	5,728	5,639	4,301	4,211
1200	131,1	129,1	99,2	97,2	1,0335	1,0227	0,7858	0,7700	5,849	5,760	4,426	4,336

Таблица 264

Энтальпия и энтропия *n* — пропициклогексана C₉H₁₈

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	4 630	36,68	206,6	14,6	0,115	0,651
200	10 900	86,34	486,2	29,2	0,231	1,302
300	18 300	145,0	816,3	43,5	0,344	1,940
400	26 880	212,9	1199	57,3	0,454	2,556
500	36 300	287,5	1619	70,5	0,558	3,145
600	46 620	369,3	2080	83,0	0,657	3,703
700	57 470	455,3	2564	94,8	0,751	4,229
800	68 960	546,3	3077	106,0	0,839	4,729
900	81 000	641,7	3613	116,6	0,923	5,202
1000	93 400	739,9	4167	126,7	1,003	5,652
1100	106 000	840,1	4731	136,2	1,079	6,078
1200	119 000	943,0	5311	145,4	1,151	6,487

Таблица 265

Теплоемкость *n* — бутилциклогексана C₁₀H₂₀

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	45,53	43,54	45,53	43,54	0,3246	0,3104	0,3246	0,3104	2,031	1,942	2,031	1,942
100	61,55	59,56	61,55	59,56	0,4388	0,4246	0,4388	0,4246	2,746	2,657	2,746	2,657
200	76,72	74,73	76,72	74,73	0,5470	0,5328	0,5470	0,5328	3,423	3,334	3,423	3,334
300	89,70	87,71	89,70	87,71	0,6395	0,6253	0,6395	0,6253	4,002	3,913	4,002	3,913
400	100,72	98,73	100,72	98,73	0,7181	0,7039	0,7181	0,7039	4,493	4,405	4,493	4,405
500	109,94	107,95	109,94	107,95	0,7838	0,7696	0,7838	0,7696	4,905	4,816	4,905	4,816
600	117,71	115,72	117,71	115,72	0,8392	0,8250	0,8392	0,8250	5,251	5,163	5,251	5,163
700	124,32	122,33	124,32	122,33	0,8864	0,8722	0,8864	0,8722	5,546	5,458	5,546	5,458
800	129,93	127,94	129,93	127,94	0,9264	0,9122	0,9264	0,9122	5,797	5,708	5,797	5,708
900	134,77	132,78	134,77	132,78	0,9609	0,9467	0,9609	0,9467	6,013	5,924	6,013	5,924
1000	138,77	136,78	138,77	136,78	0,9894	0,9752	0,9894	0,9752	6,191	6,102	6,191	6,102
1100	142,30	140,31	142,30	140,31	1,0145	1,0004	1,0145	1,0004	6,349	6,260	6,349	6,260
1200	145,27	143,28	145,27	143,28	1,0357	1,0215	1,0357	1,0215	6,481	6,392	6,481	6,392

Таблица 266

Энтальпия и энтропия *n* — бутилциклогексана C₁₀H₂₀

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	5 243	37,38	233,9	16,5	0,118	0,736
200	12 260	87,38	546,8	32,9	0,235	1,468
300	20 520	146,3	915,6	48,8	0,348	2,177
400	30 070	214,4	1342	64,1	0,457	2,860
500	40 550	289,1	1807	78,8	0,562	3,515
600	51 980	370,6	2319	92,7	0,661	4,136
700	64 380	456,5	2857	105,9	0,755	4,724
800	76 760	547,3	3425	118,3	0,844	5,278
900	90 110	642,4	4020	129,9	0,926	5,797
1000	103 900	740,4	4633	141,1	1,006	6,293
1100	117 900	840,4	5259	151,7	1,082	6,768
1200	132 300	943,0	5900	161,9	1,155	7,223

Теплоемкость n — пентилциклогексана $C_{11}H_{22}$

Таблица 267

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м. ³ град			
°С												
0	51,06	49,07	51,06	49,07	0,3309	0,3180	0,3309	0,3180	2,278	2,189	2,278	2,189
100	68,30	66,31	58,56	56,57	0,4427	0,4298	0,3796	0,3667	3,347	2,958	2,613	2,524
200	84,84	82,85	68,06	66,07	0,5499	0,5370	0,4411	0,4282	3,785	3,696	3,036	2,948
300	98,90	96,91	75,80	73,81	0,6410	0,6281	0,4913	0,4784	4,412	4,324	3,382	3,293
400	110,84	108,85	83,14	81,15	0,7184	0,7055	0,5389	0,5260	4,945	4,856	3,709	3,620
500	120,88	118,89	89,58	87,59	0,7835	0,7706	0,5806	0,5677	5,393	5,304	3,997	3,908
600	129,32	127,33	95,58	93,59	0,8382	0,8253	0,6195	0,6066	5,769	5,681	4,264	4,175
700	136,54	134,55	100,84	98,85	0,8850	0,8721	0,6536	0,6407	6,092	6,003	4,499	4,410
800	142,66	140,67	105,70	103,71	0,9246	0,9117	0,6851	0,6722	6,365	6,276	4,716	4,627
900	147,94	145,95	110,24	108,25	0,9587	0,9460	0,7145	0,7016	6,660	6,511	4,918	4,829
1000	152,34	150,35	114,30	112,31	0,9874	0,9745	0,7408	0,7279	6,796	6,708	5,099	5,011
1100	156,20	154,21	117,92	115,93	1,0124	0,9995	0,7643	0,7514	6,969	6,880	5,261	5,172
1200	159,44	157,45	121,24	119,25	1,0334	1,0205	0,7858	0,7729	7,113	7,024	5,409	5,320

Энтальпия и энтропия n — пентилциклогексана $C_{11}H_{22}$

Таблица 268

Температура	Энтальпия			Энтропия								
	μi	i	i'	μS	S	S'						
t	ккал/моль			ккал/кг град								
°С												
0	0	0	0	0	0	0						
100	5 856	37,96	261,3	18,4	0,119	0,821						
200	13 610	88,22	607,2	36,5	0,237	1,628						
300	22 740	147,4	1015	54,1	0,351	2,414						
400	33 260	215,6	1484	70,9	0,460	3,163						
500	44 790	290,3	1999	87,0	0,564	3,881						
600	57 350	371,3	2558	102,3	0,663	4,566						
700	70 590	457,5	3149	116,7	0,756	5,206						
800	84 560	548,1	3773	130,5	0,845	5,822						
900	99 210	643,1	4426	143,4	0,929	6,398						
1000	114 300	740,8	5099	155,6	1,008	6,944						
1100	129 700	840,7	5787	167,3	1,084	7,464						
1200	145 500	943,0	6491	178,4	1,156	7,959						

Таблица 269

Теплоемкость n — гексилциклогексана $C_{12}H_{24}$

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	56,59	54,60	56,59	54,60	0,3362	0,3244	0,3362	0,3244	2,525	2,436	2,525	2,436
100	75,05	73,06	64,69	62,70	0,4459	0,4341	0,3843	0,3725	3,348	3,259	2,886	2,797
200	92,96	90,97	74,84	72,85	0,5523	0,5405	0,4447	0,4328	4,147	4,059	3,339	3,250
300	108,10	106,11	83,20	81,21	0,6423	0,6304	0,4943	0,4825	4,823	4,734	3,712	3,623
400	120,96	118,97	91,11	89,12	0,7187	0,7068	0,5413	0,5295	5,396	5,308	4,065	3,976
500	131,82	129,83	98,07	96,08	0,7832	0,7714	0,5827	0,5708	5,831	5,792	4,375	4,286
600	140,93	138,94	104,52	102,53	0,8373	0,8255	0,6210	0,6092	6,287	6,199	4,663	4,574
700	148,76	146,77	110,21	108,22	0,8838	0,8720	0,6548	0,6430	6,637	6,548	4,917	4,828
800	155,39	153,40	115,45	113,46	0,9232	0,9114	0,6859	0,6741	6,933	6,844	5,151	5,062
900	161,11	159,12	120,36	118,37	0,9572	0,9454	0,7151	0,7033	7,188	7,099	5,370	5,281
1000	165,91	163,92	124,75	122,76	0,9857	0,9739	0,7412	0,7294	7,402	7,313	5,566	5,477
1100	170,10	168,11	128,68	126,69	1,0106	0,9988	0,7645	0,7527	7,589	7,500	5,741	5,652
1200	173,61	171,62	132,26	130,27	1,0315	1,0197	0,7858	0,7740	7,745	7,657	5,901	5,812

Таблица 270

Энтальпия и энтропия n — гексилциклогексана $C_{12}H_{24}$

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	6 469	38,43	288,6	20,1	0,119	0,896
200	14 970	88,94	667,8	40,0	0,238	1,784
300	24 960	148,3	1114	59,3	0,352	2,645
400	36 440	216,5	1626	77,7	0,462	3,466
500	49 040	291,9	2188	95,3	0,566	4,251
600	62 710	372,6	2798	111,9	0,665	4,992
700	77 150	458,4	3442	127,6	0,759	5,692
800	92 360	548,7	4121	142,4	0,846	6,353
900	108 300	643,6	4833	156,5	0,930	6,982
1000	124 750	741,2	5566	169,9	1,010	7,584
1100	141 500	841,0	6315	182,6	1,085	8,146
1200	158 700	943,0	7081	194,7	1,157	8,686

Таблица 271

Теплоемкость *n* — гептилциклогексана C₁₃H₂₆

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	62,12	60,13	62,12	60,13	0,3407	0,3298	0,3407	0,3298	2,771	2,683	2,771	2,683
100	81,80	79,81	70,82	68,83	0,4486	0,4377	0,3884	0,3775	3,649	3,561	3,160	3,071
200	101,03	99,09	81,62	79,63	0,5544	0,5434	0,4476	0,4367	4,510	4,421	3,641	3,553
300	117,30	115,31	90,60	88,61	0,6433	0,6324	0,4969	0,4860	5,233	5,144	4,042	3,953
400	131,08	129,09	99,08	97,09	0,7189	0,7080	0,5434	0,5325	5,848	5,759	4,420	4,332
500	142,76	140,77	106,56	104,57	0,7829	0,7721	0,5844	0,5735	6,369	6,280	4,754	4,665
600	152,54	150,55	113,46	111,47	0,8366	0,8257	0,6223	0,6113	6,805	6,717	5,062	4,973
700	160,98	158,99	119,58	117,59	0,8829	0,8720	0,6558	0,6449	7,182	7,093	5,335	5,246
800	168,12	166,13	125,20	123,21	0,9220	0,9111	0,6866	0,6757	7,500	7,412	5,586	5,597
900	174,28	172,29	130,48	128,49	0,9558	0,9449	0,7156	0,7047	7,775	7,687	5,821	5,732
1000	179,48	177,49	135,20	133,21	0,9843	0,9734	0,7415	0,7306	8,007	7,918	6,032	5,943
1100	184,00	182,01	139,44	137,45	1,0091	0,9982	0,7647	0,7538	8,209	8,120	6,221	6,132
1200	187,78	185,79	143,28	141,29	1,0300	1,0189	0,7858	0,7749	8,378	8,289	6,392	6,303

Таблица 272

Энтальпия и энтропия *n* — гептилциклогексана C₁₃H₂₆

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	7 082	38,84	316,0	22,1	0,122	0,986
200	16 320	89,52	728,2	43,8	0,240	1,954
300	27 180	149,1	1213	64,7	0,355	2,887
400	39 630	217,4	1768	84,7	0,465	3,779
500	53 280	292,2	2377	103,6	0,568	4,623
600	68 080	373,4	3037	121,6	0,667	5,425
700	83 710	459,1	3735	138,6	0,761	6,184
800	100 200	549,3	4469	154,7	0,848	6,902
900	117 400	644,0	5239	170,0	0,932	7,585
1000	135 200	741,5	6032	184,5	1,011	8,232
1100	153 400	841,2	6843	198,2	1,086	8,843
1200	171 900	943,0	7670	211,3	1,158	9,427

Таблица 273

Теплоемкость n — октилциклогексана $C_{14}H_{28}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	67,65	65,66	67,65	65,66	0,3445	0,3344	0,3445	0,3344	3,018	2,929	3,018	2,929
100	88,55	86,56	76,95	74,96	0,4509	0,4408	0,3919	0,3817	3,951	3,862	3,433	3,344
200	109,20	107,21	88,40	86,41	0,5561	0,5460	0,4502	0,4401	4,872	4,783	3,944	3,855
300	126,50	124,51	98,00	96,01	0,6442	0,6341	0,4991	0,4889	5,644	5,555	4,372	4,283
400	141,20	139,21	107,05	105,06	0,7191	0,7089	0,5452	0,5350	6,299	6,211	4,766	4,687
500	153,70	151,71	115,05	113,06	0,7827	0,7726	0,5859	0,5758	6,857	6,763	5,133	5,044
600	164,15	162,16	122,40	120,41	0,8359	0,8258	0,6233	0,6132	7,323	7,235	5,461	4,372
700	173,20	171,21	128,95	126,96	0,8820	0,8719	0,6567	0,6466	7,727	7,638	5,753	5,664
800	180,85	178,86	134,95	132,96	0,9210	0,9109	0,6872	0,6771	8,068	7,930	6,021	5,932
900	187,45	185,46	140,60	138,61	0,9546	0,9445	0,7160	0,7059	8,363	8,274	6,273	6,184
1000	193,05	191,06	145,65	143,66	0,9831	0,9730	0,7417	0,7316	8,613	8,524	6,498	6,409
1100	197,90	195,91	150,20	148,21	1,0078	0,9977	0,7649	0,7548	8,829	8,740	6,701	6,612
1200	201,95	199,96	154,30	152,31	1,0284	1,0183	0,7858	0,7757	9,010	8,921	6,884	6,795

Таблица 274

Энтальпия и энтропия n — октилциклогексана $C_{14}H_{28}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	7 695	39,19	343,3	24 0	0,122	1,071
200	17 680	90,04	788,8	47,3	0,241	2,110
300	29 400	149,7	1312	69,8	0,355	3,114
400	42 820	218,1	1906	91,3	0,465	4,073
500	57 530	293,0	2567	111,9	0,570	4,992
600	73 440	374,0	3277	131,3	0,669	5,858
700	90 270	459,7	4027	149,6	0,761	6,674
800	108 000	549,8	4817	166,9	0,849	7,446
900	126 500	644,4	5646	183,3	0,933	8,178
1000	145 650	741,7	6948	198,8	1,012	8,869
1100	165 200	841,4	7371	213,6	1,087	9,530
1200	185 200	943,0	8261	227,6	1,158	10,154

Таблица 275

Теплоемкость n — нонилциклогексана $C_{15}H_{30}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	$\mu c_{p,m}$	$\mu c_{v,m}$	c_p	c_v	$c_{p,m}$	$c_{v,m}$	c'_p	c'_v	$c'_{p,m}$	$c'_{v,m}$
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	73,18	71,19	73,18	71,19	0,3478	0,3384	0,3478	0,3384	3,265	3,176	3,265	3,176
100	95,30	93,31	83,08	81,09	0,4530	0,4435	0,3949	0,3854	4,252	4,163	3,707	3,618
200	117,32	115,33	95,18	93,19	0,5576	0,5482	0,4524	0,4429	5,234	5,145	4,246	4,158
300	135,70	133,71	105,40	103,41	0,6450	0,6355	0,5010	0,4915	6,054	5,965	4,702	4,614
400	151,32	149,33	115,02	113,03	0,7192	0,7098	0,5467	0,5372	6,751	6,662	5,131	5,043
500	164,64	162,65	123,54	121,55	0,7825	0,7731	0,5872	0,5777	7,345	7,256	5,512	5,423
600	175,76	173,77	131,34	129,35	0,8354	0,8259	0,6243	0,6148	7,841	7,753	5,860	5,771
700	185,42	183,43	133,32	136,33	0,8813	0,8719	0,6574	0,6480	8,272	8,184	6,171	6,082
800	193,58	191,59	144,70	142,71	0,9201	0,9106	0,6878	0,6783	8,636	8,548	6,456	6,367
900	200,62	198,63	150,72	148,73	0,9536	0,9441	0,7164	0,7069	8,950	8,862	6,724	6,635
1000	206,62	204,63	156,10	154,11	0,9821	0,9726	0,7420	0,7325	9,218	9,129	6,964	6,875
1100	211,80	209,81	160,96	158,97	1,0067	0,9972	0,7651	0,7556	9,449	9,360	7,181	7,092
1200	216,12	214,13	165,32	163,33	1,0272	1,0178	0,7858	0,7763	9,642	9,553	7,376	7,287

Таблица 276

Энтальпия и энтропия n — нонилциклогексана $C_{15}H_{30}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	8 308	39,49	370,7	25,9	0,123	1,155
200	19 040	90,48	849,2	51,1	0,243	2,279
300	31 620	150,3	1411	75,3	0,358	3,359
400	46 010	218,7	2052	98,3	0,467	4,385
500	61 770	293,6	2756	120,3	0,572	5,367
600	78 800	374,6	3516	141,0	0,670	6,290
700	96 820	460,2	4320	160,6	0,763	7,165
800	115 800	550,2	5165	179,2	0,852	7,994
900	135 600	644,8	6052	196,8	0,936	8,780
1000	156 100	742,0	6964	213,5	1,015	9,525
1100	177 100	841,6	7899	229,3	1,090	10,225
1200	198 400	943,0	8851	244,2	1,161	10,894

Таблица 277

Теплоемкость n — децилциклогексана $C_{16}H_{32}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	78,71	76,72	78,71	76,72	0,3507	0,3419	0,3507	0,3419	3,512	3,423	3,512	3,423
100	102,05	101,06	89,21	87,22	0,4547	0,4459	0,3975	0,3887	4,553	4,464	3,980	3,891
200	125,44	123,45	101,96	99,97	0,5590	0,5501	0,4543	0,4455	5,596	5,508	4,549	4,460
300	144,90	142,91	112,80	110,81	0,6457	0,6368	0,5026	0,4938	6,465	6,376	5,032	4,944
400	161,44	159,45	122,99	121,00	0,7194	0,7105	0,5480	0,5392	7,202	7,114	5,487	5,398
500	175,76	173,77	132,03	130,04	0,7832	0,7743	0,5883	0,5795	7,841	7,753	5,890	5,802
600	187,37	185,38	140,28	138,29	0,8349	0,8261	0,6251	0,6162	8,359	8,271	6,258	6,170
700	197,64	195,65	147,69	145,70	0,8807	0,8718	0,6581	0,6492	8,817	8,729	6,589	6,500
800	206,31	204,32	154,45	152,46	0,9193	0,9105	0,6882	0,6794	9,204	9,115	6,891	6,802
900	213,79	211,80	160,84	158,85	0,9527	0,9438	0,7167	0,7078	9,538	9,449	7,176	7,087
1000	220,19	218,20	166,55	164,56	0,9812	0,9723	0,7421	0,7333	9,824	9,735	7,430	7,342
1100	225,70	223,71	171,72	169,73	1,0057	0,9969	0,7652	0,7563	10,069	9,981	7,661	7,572
1200	230,29	228,30	176,34	174,35	1,0262	1,0173	0,7858	0,7769	10,274	10,185	7,867	7,778

Таблица 278

Энтальпия и энтропия n — децилциклогексана $C_{16}H_{32}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	8 921	39,75	398,0	27,7	0,123	1,236
200	20 390	90,86	909,8	54,6	0,243	2,436
300	33 840	150,8	1510	80,4	0,358	3,587
400	49 200	219,2	2195	105,1	0,468	4,689
500	66 020	294,2	2945	128,5	0,573	5,733
600	84 170	375,1	3755	150,7	0,672	6,723
700	103 400	460,7	4612	171,6	0,765	7,656
800	123 600	550,6	5513	191,4	0,853	8,54
900	144 800	644,8	6458	210,1	0,937	9,38
1000	166 600	742,1	7430	227,9	1,016	10,17
1100	188 900	841,7	8427	244,6	1,090	10,91
1200	211 600	943,0	9440	260,6	1,162	11,63

Таблица 279

Теплоемкость *n* — ундецилциклогексана C₁₇H₃₄

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
°С												
0	84,24	82,25	84,24	82,25	0,3533	0,3449	0,3533	0,3449	3,758	3,669	3,758	3,669
100	108,80	106,81	95,34	93,35	0,4563	0,4479	0,3998	0,3915	4,854	4,765	4,253	4,165
200	133,56	131,57	108,74	106,75	0,5601	0,5518	0,4560	0,4477	5,959	5,870	4,851	4,763
300	154,10	152,11	120,20	118,21	0,6463	0,6379	0,5041	0,4958	6,875	6,786	5,363	5,274
400	171,56	169,57	130,96	128,97	0,7195	0,7112	0,5492	0,5409	7,654	7,565	5,843	5,754
500	186,52	184,53	140,52	138,53	0,7822	0,7739	0,5893	0,5810	8,321	8,233	6,269	6,180
600	198,98	196,99	149,22	147,23	0,8345	0,8262	0,6258	0,6175	8,877	8,788	6,657	6,568
700	209,86	207,87	157,06	155,07	0,8801	0,8718	0,6587	0,6503	9,363	9,274	7,007	6,918
800	219,04	217,05	164,20	162,21	0,9186	0,9103	0,6886	0,6803	9,772	9,683	7,326	7,237
900	226,96	224,97	170,96	168,97	0,9518	0,9435	0,7170	0,7086	10,126	10,037	7,627	7,538
1000	233,76	231,77	177,00	175,01	0,9804	0,9720	0,7423	0,7340	10,429	10,340	7,897	7,808
1100	239,60	237,61	182,48	180,49	1,0049	0,9965	0,7653	0,7570	10,689	10,601	8,141	8,052
1200	244,46	242,47	187,36	185,37	1,0252	1,0169	0,7858	0,7774	10,906	10,818	8,359	8,270

Таблица 280

Энтальпия и энтропия *n* — ундецилциклогексана C₁₇H₃₄

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
°С						
0	0	0	0	0	0	0
100	9 534	39,98	425,3	29,6	0,124	1,321
200	21 750	91,20	970,2	58,3	0,245	2,601
300	36 060	151,2	1609	85,7	0,359	3,824
400	52 380	219,7	2337	111,9	0,469	4,993
500	70 260	294,7	3135	136,8	0,574	6,103
600	89 530	375,5	3994	160,3	0,672	7,152
700	109 900	461,1	4905	182,5	0,765	8,142
800	131 400	550,9	5861	203,5	0,853	9,08
900	153 900	645,3	6864	223,4	0,937	9,96
1000	177 000	742,3	7897	242,3	1,016	10,81
1100	200 700	841,8	8955	260,1	1,090	11,60
1200	224 800	943,0	10030	277,0	1,161	12,36

Таблица 281

Теплоемкость n — додекилциклогексана $C_{18}H_{36}$

Температура t °C	Теплоемкость											
	ρc_p	ρc_v	ρc_{pm}	ρc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	89,97	87,78	89,97	87,78	0,3556	0,3477	0,3556	0,3477	4,005	3,916	4,005	3,916
100	115,55	113,56	101,47	98,48	0,4577	0,4498	0,4019	0,3901	5,155	5,066	4,527	4,394
200	141,68	139,69	115,52	113,53	0,5612	0,5533	0,4576	0,4497	6,321	6,232	5,154	5,065
300	163,30	161,31	127,60	125,61	0,6468	0,6389	0,5054	0,4975	7,285	7,197	5,693	5,604
400	181,68	179,69	138,93	136,94	0,7196	0,7117	0,5503	0,5424	8,105	8,017	6,198	6,109
500	197,46	195,47	149,01	147,02	0,7821	0,7742	0,5902	0,5823	8,809	8,721	6,648	6,559
600	210,59	208,60	158,16	156,17	0,8341	0,8262	0,6265	0,6186	9,395	9,306	7,056	6,967
700	222,08	220,09	166,43	164,44	0,8796	0,8718	0,6592	0,6513	9,908	9,819	7,425	7,336
800	231,77	229,78	173,95	171,96	0,9180	0,9101	0,6890	0,6811	10,340	10,251	7,761	7,672
900	240,13	239,14	181,08	179,09	0,9511	0,9472	0,7172	0,7094	10,713	10,669	8,079	7,990
1000	247,33	245,34	187,45	185,46	0,9796	0,9718	0,7425	0,7346	11,034	10,946	8,363	8,274
1100	253,50	251,51	193,24	191,25	1,0041	0,9962	0,7654	0,7575	11,310	11,221	8,621	8,532
1200	258,63	256,64	198,38	196,39	1,0244	1,0165	0,7858	0,7779	11,538	11,450	8,850	8,762

Таблица 282

Энтальпия и энтропия n — додекилциклогексана $C_{18}H_{36}$

Температура t °C	Энтальпия			Энтропия		
	ρi	i	i'	ρS	S	S'
	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	10 150	40,19	452,7	31,7	0,126	1,414
200	23 100	91,52	1031	62,0	0,246	2,766
300	38 280	151,6	1708	91,1	0,361	4,064
400	55 570	220,1	2479	118,9	0,471	5,305
500	74 510	295,1	3324	145,3	0,576	6,482
600	94 900	375,9	4234	170,2	0,674	7,593
700	116 500	461,4	5198	193,6	0,767	8,64
800	139 200	551,2	6209	215,8	0,855	9,63
900	163 000	645,5	7271	236,8	0,938	10,57
1000	187 500	742,5	8363	256,8	1,017	11,46
1100	212 600	841,9	9759	275,7	1,092	12,30
1200	238 100	943,0	10620	293,6	1,163	13,10

Таблица 283

Теплоемкость *n* — тридекилциклогексана C₁₉H₃₈

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	95,30	93,31	95,30	93,31	0,3576	0,3501	0,3576	0,3501	4,252	4,163	4,252	4,163
100	122,30	120,31	107,60	105,61	0,4589	0,4515	0,4038	0,3963	5,456	5,367	4,800	4,712
200	149,30	147,81	122,30	120,31	0,5621	0,5546	0,4589	0,4515	6,683	6,594	5,456	5,367
300	172,50	170,51	135,00	133,01	0,6473	0,6398	0,5066	0,4991	7,696	7,607	6,023	5,934
400	191,80	189,81	146,90	144,91	0,7197	0,7122	0,5512	0,5438	8,557	8,468	6,554	6,465
500	208,40	206,41	157,50	155,51	0,7820	0,7745	0,5910	0,5835	9,298	9,209	7,027	6,938
600	222,20	220,21	167,10	165,11	0,8338	0,8263	0,6270	0,6196	9,913	9,824	7,455	7,366
700	234,30	232,31	175,80	173,81	0,8792	0,8717	0,6597	0,6522	10,453	10,364	7,843	7,754
800	244,50	242,51	183,70	181,71	0,9175	0,9100	0,6893	0,6819	10,908	10,819	8,196	8,107
900	253,30	251,31	191,20	189,21	0,9505	0,9430	0,7175	0,7100	11,301	11,212	8,530	8,441
1000	260,90	258,91	197,90	195,91	0,9790	0,9715	0,7426	0,7351	11,640	11,551	8,829	8,740
1100	267,40	265,41	204,00	202,01	1,0034	0,9959	0,7655	0,7580	11,930	11,841	9,101	9,012
1200	272,80	270,81	209,40	207,41	1,0237	1,0162	0,7858	0,7783	12,171	12,082	9,342	9,253

Таблица 284

Энтальпия и энтропия *n* — тридекилциклогексана C₁₉H₃₈

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	10 760	40,38	480,0	33,4	0,125	1,490
200	24 460	91,78	1 091	65,5	0,246	2,922
300	40 500	152,0	1 807	96,3	0,361	4,295
400	58 760	220,5	2 622	125,8	0,472	5,612
500	78 750	295,5	3 514	153,5	0,576	6,84
600	100 300	376,2	4 473	179,7	0,674	8,01
700	123 100	461,8	5 490	204,4	0,767	9,12
800	147 000	551,4	6 557	227,9	0,855	10,16
900	172 100	645,7	7 677	250,1	0,938	11,15
1000	197 900	742,6	8 829	271,2	1,017	12,10
1100	224 400	842,1	10 010	291,1	1,092	12,98
1200	251 300	943,0	11 210	310,0	1,163	13,83

Таблица 285

Теплоемкость n — тетрадекилциклогексана $C_{20}H_{40}$

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μ_{pm}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
°C												
0	100,83	98,84	100,83	98,84	0,3594	0,3523	0,3594	0,3523	4,498	4,410	4,498	4,410
100	129,05	127,06	113,73	111,74	0,4600	0,4529	0,4054	0,3983	5,757	5,669	5,074	4,985
200	157,92	155,93	129,08	127,09	0,5630	0,5559	0,4601	0,4602	7,045	6,957	5,759	5,670
300	181,70	179,71	142,40	140,41	0,6477	0,6406	0,5076	0,5005	8,106	8,018	6,353	6,264
400	201,92	199,93	154,87	152,88	0,7198	0,7127	0,5521	0,5450	9,008	8,920	6,909	6,821
500	219,34	217,35	165,99	164,00	0,7819	0,7748	0,5917	0,5846	9,786	9,697	7,405	7,317
600	233,81	231,82	176,04	174,05	0,8335	0,8264	0,6275	0,6205	10,431	10,342	7,854	7,765
700	246,52	244,53	185,17	183,18	0,8788	0,8717	0,6601	0,6530	10,998	10,909	8,261	8,172
800	257,23	255,24	193,45	191,46	0,9170	0,9099	0,6896	0,6825	11,476	11,387	8,631	8,542
900	266,47	264,48	201,32	199,33	0,9499	0,9428	0,7177	0,7106	11,888	11,799	8,982	8,893
1000	274,47	272,48	208,35	206,36	0,9784	0,9713	0,7427	0,7356	12,245	12,156	9,295	9,206
1100	281,30	279,31	214,76	212,77	1,0028	0,9957	0,7656	0,7585	12,550	12,461	9,581	9,492
1200	286,97	284,98	220,42	218,43	1,0230	1,0159	0,7858	0,7787	12,803	12,714	9,834	9,745

Таблица 286

Энтальпия и энтропия n — тетрадекилциклогексана $C_{20}H_{40}$

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
°C						
0	0	0	0	0	0	0
100	11 370	40,54	507,4	35,2	0,125	1,570
200	25 820	92,02	1 152	69,1	0,246	3,083
300	42 720	152,3	1 906	101,6	0,362	4,533
400	61 950	220,8	2 764	132,5	0,472	5,911
500	83 000	295,9	3 703	161,8	0,577	7,218
600	105 600	376,5	4 712	189,3	0,675	8,44
700	129 600	462,1	5 783	215,4	0,768	9,60
800	154 800	551,7	6 905	240,1	0,856	10,71
900	181 200	645,9	8 084	263,5	0,939	11,75
1000	208 400	742,7	9 295	285,7	1,019	12,74
1100	236 200	842,2	10 540	306,7	1,093	13,68
1200	264 500	943,0	11 800	326,4	1,164	14,56

Таблица 287

Теплоемкость *n* — пентадекилциклогексана C₂₁H₄₂

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/мм ³ град			
0	106,38	104,39	106,38	104,39	0,3612	0,3544	0,3612	0,3544	4,746	4,657	4,746	4,657
100	135,80	133,81	119,86	117,87	0,4610	0,4543	0,4069	0,4002	6,059	5,970	5,347	5,259
200	166,04	164,05	135,86	133,87	0,5637	0,5570	0,4613	0,4545	7,408	7,319	6,061	5,972
300	190,90	188,91	149,80	147,81	0,6481	0,6414	0,5086	0,5018	8,517	8,428	6,683	6,594
400	212,04	210,05	162,84	160,85	0,7199	0,7131	0,5529	0,5461	9,460	9,371	7,265	7,176
500	230,28	228,29	174,48	172,49	0,7818	0,7751	0,5924	0,5856	10,274	10,185	7,784	7,695
600	245,42	243,43	184,98	182,99	0,8332	0,8265	0,6280	0,6213	10,949	10,860	8,253	8,164
700	258,74	256,75	194,54	192,55	0,8784	0,8717	0,6605	0,6537	11,543	11,455	8,679	8,590
800	269,96	267,97	203,20	201,21	0,9165	0,9098	0,6899	0,6831	12,044	11,955	9,066	8,977
900	279,64	277,65	211,44	209,45	0,9494	0,9426	0,7179	0,7111	12,476	12,387	9,433	9,344
1000	288,04	286,05	218,80	216,81	0,9779	0,9712	0,7428	0,7361	12,851	12,762	9,761	9,673
1100	295,20	293,21	225,52	223,53	1,0022	0,9955	0,7657	0,7589	13,170	13,081	10,061	9,973
1200	301,14	299,15	231,44	229,45	1,0224	1,0156	0,7858	0,7790	13,435	13,346	10,325	10,237

Таблица 288

Энтальпия и энтропия *n* — пентадекилциклогексана C₂₁H₄₂

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/мм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/мм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	11 990	40,69	534,7	37,1	0,126	1,655
200	27 170	92,26	1 212	72,8	0,247	3,248
300	44 940	152,6	2 005	106,9	0,363	4,769
400	65 140	221,2	2 906	139,4	0,473	6,219
500	87 240	296,2	3 892	170,1	0,578	7,59
600	111 000	376,8	4 952	199,0	0,675	8,88
700	136 200	462,4	6 075	226,4	0,769	10,10
800	162 600	551,9	7 253	252,4	0,857	11,26
900	190 300	646,1	8 490	276,9	0,940	12,36
1000	218 800	742,8	9 761	300,1	1,019	13,39
1100	248 100	842,3	11 070	322,1	1,094	14,37
1200	277 700	943,0	12 390	342,9	1,164	15,30

Таблица 289

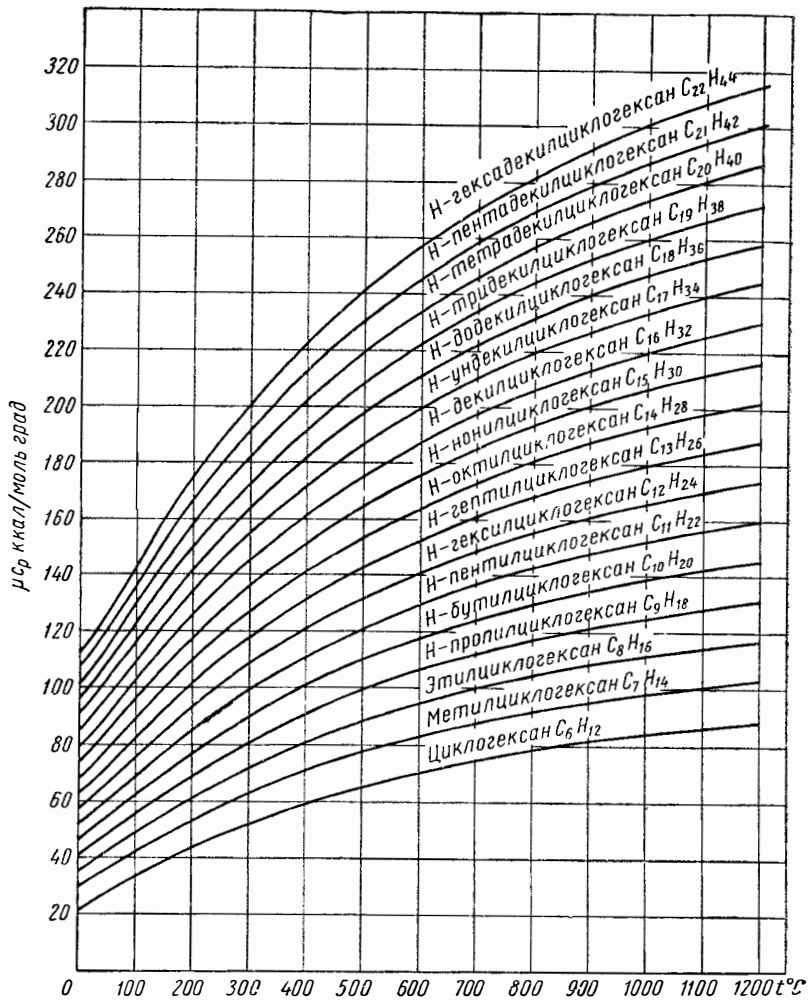
Теплоемкость n — гексадекилциклогексана $C_{22}H_{44}$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	111,91	109,92	111,91	109,92	0,3627	0,3562	0,3627	0,3562	4,993	4,904	4,993	4,904
100	142,55	140,56	125,99	124,00	0,4620	0,4555	0,4083	0,4018	6,360	6,271	5,621	5,532
200	174,16	172,17	142,64	140,65	0,5644	0,5580	0,4623	0,4558	7,770	7,681	6,364	6,275
300	200,10	198,11	157,20	155,21	0,6485	0,6420	0,5094	0,5030	8,927	8,838	7,013	6,925
400	222,16	220,17	170,81	168,82	0,7200	0,7135	0,5535	0,5471	9,911	9,823	7,620	7,532
500	241,22	239,23	182,97	180,98	0,7817	0,7753	0,5930	0,5865	10,762	10,673	8,163	8,074
600	257,03	255,04	193,92	191,93	0,8330	0,8265	0,6284	0,6220	11,467	11,378	8,652	8,563
700	270,96	268,97	203,91	201,92	0,8781	0,8717	0,6608	0,6544	12,089	12,000	9,097	9,008
800	282,69	280,70	212,95	210,96	0,9161	0,9097	0,6901	0,6837	12,612	12,523	9,501	9,412
900	292,81	290,82	221,56	219,57	0,9489	0,9425	0,7180	0,7116	13,063	12,975	9,885	9,796
1000	301,61	299,62	229,25	227,26	0,9774	0,9710	0,7429	0,7365	13,456	13,367	10,228	10,139
1100	309,10	307,11	236,28	234,29	1,0017	0,9953	0,7657	0,7593	13,790	13,701	10,541	10,453
1200	315,31	313,32	242,46	240,47	1,0218	1,0154	0,7857	0,7793	14,067	13,978	10,817	10,728

Таблица 290

Энтальпия и энтропия n — гексадекилциклогексана $C_{22}H_{44}$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	12 600	40,83	562,1	39,0	0,126	1,740
200	28 530	92,46	1 273	76,5	0,248	3,413
300	47 160	152,8	2 104	112,2	0,364	5,006
400	68 320	221,4	3 048	146,2	0,474	6,52
500	91 490	296,5	4 082	178,4	0,578	7,96
600	116 400	377,0	5 191	208,8	0,677	9,32
700	142 700	462,6	6 368	237,4	0,769	10,59
800	170 400	552,1	7 601	264,6	0,858	11,80
900	199 400	646,2	8 897	290,3	0,941	12,95
1000	229 300	742,9	10 230	314,6	1,019	14,03
1100	259 900	842,3	11 600	337,5	1,094	15,06
1200	291 000	942,8	12 980	359,4	1,165	16,04



Фиг. 10. Истинные молярные теплоемкости при постоянном давлении для углеводородов ряда циклогексанов

$$\mu_{ср} = f(t).$$

Х. ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ
И ЭНТРОПИИ ГОРЮЧИХ
ГАЗОВ

(таблицы 291—304)

Таблица 291

Теплоемкость доменного газа (коксовых печей)

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	7,11	5,12	7,11	5,12	0,245	0,176	0,245	0,176	0,317	0,229	0,317	0,229
100	7,25	5,26	7,18	5,19	0,250	0,181	0,247	0,179	0,323	0,235	0,320	0,232
200	7,40	5,42	7,25	5,26	0,255	0,187	0,250	0,181	0,330	0,242	0,323	0,235
300	7,59	5,60	7,33	5,35	0,261	0,193	0,252	0,184	0,339	0,250	0,327	0,239
400	7,78	5,80	7,42	5,43	0,268	0,200	0,255	0,187	0,347	0,259	0,331	0,242
500	7,98	6,00	7,51	5,53	0,275	0,206	0,259	0,190	0,356	0,268	0,335	0,247
600	8,17	6,18	7,61	5,62	0,281	0,213	0,262	0,193	0,364	0,276	0,339	0,251
700	8,33	6,35	7,70	5,71	0,287	0,218	0,265	0,197	0,372	0,283	0,343	0,255
800	8,48	6,49	7,79	5,80	0,292	0,224	0,268	0,200	0,378	0,290	0,347	0,259
900	8,61	6,62	7,87	5,89	0,296	0,228	0,271	0,203	0,384	0,296	0,351	0,263
1000	9,72	6,74	7,95	5,96	0,300	0,232	0,274	0,205	0,389	0,301	0,355	0,266

Таблица 292

Энтальпия и энтропия доменного газа (коксовых печей)

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μs	s	s'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	718	24,7	32,03	2,24	0,0770	0,0998
200	1450	49,9	64,7	3,98	0,1377	0,177
300	2200	75,7	98,1	5,41	0,186	0,241
400	2970	102,2	132,4	6,65	0,229	0,296
500	3760	129,3	168	7,74	0,266	0,345
600	4560	157	204	8,72	0,300	0,389
700	5390	185	240	9,62	0,331	0,429
800	6230	215	278	10,44	0,359	0,466
900	7080	244	316	11,20	0,385	0,500
1000	7950	274	355	11,91	0,410	0,531

Таблица 293

Теплоемкость газа подземной газификации подмосковного угля состава I (по объему)

 $N_2 = 63,6\%/0$; $H_2 = 14,5\%/0$; $CO = 9,5\%/0$; $H_2S = 0,6\%/0$; $CH_4 = 1,8\%/0$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	7,11	5,12	7,11	5,12	0,277	0,199	0,277	0,199	0,317	0,228	0,317	0,228
100	7,26	5,27	7,18	5,20	0,283	0,205	0,280	0,202	0,324	0,235	0,321	0,232
200	7,42	5,43	7,26	5,27	0,289	0,212	0,283	0,205	0,331	0,242	0,324	0,235
300	7,60	5,62	7,34	5,36	0,296	0,219	0,286	0,209	0,339	0,251	0,328	0,239
400	7,80	5,81	7,43	5,45	0,304	0,226	0,289	0,212	0,348	0,259	0,332	0,243
500	7,99	6,01	7,52	5,54	0,311	0,234	0,293	0,216	0,357	0,268	0,336	0,247
600	8,17	6,19	7,62	5,63	0,318	0,241	0,297	0,219	0,365	0,276	0,340	0,251
700	8,35	6,36	7,71	5,72	0,325	0,248	0,300	0,223	0,372	0,284	0,344	0,255
800	8,50	6,51	7,80	5,81	0,331	0,254	0,304	0,226	0,379	0,291	0,348	0,259
900	8,64	6,65	7,89	5,90	0,336	0,259	0,307	0,230	0,385	0,297	0,352	0,263
1000	8,76	6,78	7,97	5,98	0,341	0,264	0,311	0,234	0,391	0,302	0,356	0,267

Таблица 294

Энтальпия и энтропия газа подземной газификации подмосковного угля состава I (по объему)

 $N_2 = 63,6\%/0$; $H_2 = 14,5\%/0$; $CO = 9,5\%/0$; $H_2S = 0,6\%/0$; $CH_4 = 1,8\%/0$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	718	28,1	32,1	2,23	0,0869	0,0996
200	1452	56,5	64,8	3,98	0,155	0,177
300	2210	85,8	98,3	5,41	0,211	0,242
400	2970	115,7	132,6	6,65	0,259	0,297
500	3760	146,5	168	7,74	0,301	0,346
600	4570	178	204	8,73	0,340	0,389
700	5400	210	241	9,62	0,375	0,429
800	6240	243	278	10,45	0,407	0,466
900	7100	276	317	11,21	0,435	0,500
1000	7970	311	356	11,92	0,464	0,532

Таблица 295

Теплоемкость газа подземной газификации подмосковного угля состава II (по объему)
 $N_2 = 54,0^0/0$; $O_2 = 0,2^0/0$; $H_2 = 18,7^0/0$; $CO = 9,4^0/0$; $H_2S = 0,5^0/0$; $CO_2 = 16,0^0/0$; $CH_4 = 1,0^0/0$;
 $C_2H_4 = 0,2^0/0$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град			
0	7,20	5,22	7,20	5,22	0,280	0,202	0,280	0,202	0,321	0,233	0,321	0,233
100	7,42	5,44	7,32	5,33	0,288	0,211	0,284	0,207	0,331	0,243	0,326	0,238
200	7,62	5,64	7,42	5,43	0,296	0,219	0,288	0,211	0,340	0,252	0,331	0,242
300	7,83	5,85	7,52	5,54	0,304	0,227	0,292	0,215	0,349	0,261	0,336	0,247
400	8,04	6,06	7,63	5,64	0,312	0,235	0,296	0,219	0,359	0,270	0,340	0,252
500	8,24	6,26	7,73	5,74	0,320	0,243	0,300	0,223	0,368	0,279	0,345	0,256
600	8,43	6,45	7,83	5,84	0,327	0,250	0,304	0,227	0,376	0,288	0,349	0,261
700	8,61	6,62	7,93	5,94	0,334	0,257	0,308	0,231	0,384	0,295	0,354	0,265
800	8,77	6,78	8,03	6,04	0,340	0,263	0,312	0,234	0,391	0,302	0,358	0,269
900	8,91	6,92	8,12	6,13	0,346	0,269	0,315	0,238	0,397	0,309	0,362	0,273
1000	9,03	7,05	8,20	6,21	0,351	0,274	0,318	0,241	0,403	0,314	0,366	0,277

Таблица 296

Энтальпия и энтропия газа подземной газификации подмосковного угля
состава II (по объему)

$N_2 = 54,0$; $O_2 = 0,2^0/0$; $H_2 = 18,7^0/0$; $CO = 9,4^0/0$; $H_2S = 0,5^0/0$; $CO_2 = 16,0^0/0$; $CH_4 = 1,0^0/0$;
 $C_2H_4 = 0,2^0/0$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
°C	ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/н.м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	732	28,4	32,6	2,27	0,0883	0,101
200	1484	57,6	66,2	4,07	0,158	0,182
300	2260	87,6	100,7	5,54	0,215	0,247
400	3050	118,4	136,1	6,81	0,265	0,304
500	3870	150,1	172	7,94	0,309	0,354
600	4700	182	210	8,96	0,348	0,400
700	5550	216	248	9,88	0,384	0,441
800	6420	249	286	10,73	0,417	0,479
900	7300	284	326	11,52	0,448	0,514
1000	8200	318	366	12,25	0,476	0,547

Таблица 297

Теплоемкость газа подземной газификации подмосковного угля состава III
(по объему) $N_2 = 56,2^0/0$; $O_2 = 0,2^0/0$; $H_2 = 14,6^0/0$; $CO = 4,8^0/0$; $H_2S = 2,0^0/0$; $CO_2 = 16,0^0/0$;
 $CH_4 = 1,0^0/0$; $C_2H_4 = 0,2^0/0$; $H_2O = 5,0^0/0$

Температура t	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}
$^{\circ}C$	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
0	7,28	5,29	7,28	5,29	0,275	0,200	0,275	0,200	0,325	0,236	0,325	0,236
100	7,50	5,51	7,39	5,40	0,284	0,209	0,280	0,204	0,335	0,246	0,330	0,241
200	7,72	5,73	7,50	5,51	0,292	0,217	0,284	0,208	0,344	0,256	0,335	0,246
300	7,94	5,95	7,61	5,62	0,300	0,225	0,288	0,213	0,354	0,266	0,339	0,251
400	8,16	6,17	7,72	5,73	0,309	0,234	0,292	0,217	0,364	0,276	0,344	0,256
500	8,39	6,40	7,83	5,84	0,317	0,242	0,296	0,221	0,374	0,286	0,349	0,261
600	8,58	6,60	7,94	5,95	0,325	0,249	0,300	0,225	0,383	0,294	0,354	0,266
700	8,77	6,78	8,04	6,06	0,332	0,257	0,304	0,229	0,391	0,303	0,359	0,270
800	8,94	6,96	8,15	6,16	0,338	0,263	0,308	0,233	0,399	0,310	0,363	0,275
900	9,10	7,11	8,24	6,26	0,344	0,269	0,312	0,237	0,406	0,317	0,368	0,279
1000	9,23	7,25	8,33	6,35	0,349	0,274	0,315	0,240	0,412	0,323	0,372	0,283

Таблица 298

Энтальпия и энтропия газа подземной газификации подмосковного угля
состава III (по объему) $N_2 = 56,2^0/0$; $O_2 = 0,2^0/0$; $H_2 = 14,6^0/0$; $CO = 4,8^0/0$; $H_2S = 2,0^0/0$;
 $CO = 16,0^0/0$; $CH_4 = 1,0^0/0$; $C_2H_4 = 0,2^0/0$; $H_2O = 5,0^0/0$

Температура t	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
$^{\circ}C$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	739	28,0	33,0	2,33	0,0885	0,104
200	1500	56,7	66,9	4,10	0,156	0,183
300	2280	86,3	101,8	5,60	0,212	0,250
400	3090	116,8	137,7	6,89	0,262	0,308
500	3910	148,1	175	8,04	0,305	0,359
600	4760	180	213	9,07	0,344	0,405
700	5630	213	251	10,01	0,380	0,447
800	6520	247	291	10,88	0,413	0,485
900	7420	281	331	11,68	0,443	0,521
1000	8330	315	372	12,43	0,472	0,555

Таблица 299

Теплоемкость газа подземной газификации каменного угля

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
$^{\circ}\text{C}$												
0	7,12	5,14	7,12	5,14	0,267	0,192	0,267	0,192	0,318	0,229	0,318	0,229
100	7,29	5,30	7,20	5,22	0,273	0,199	0,270	0,196	0,325	0,236	0,321	0,233
200	7,46	5,47	7,29	5,30	0,279	0,205	0,273	0,199	0,333	0,244	0,325	0,236
300	7,65	5,66	7,37	5,39	0,286	0,212	0,276	0,202	0,341	0,253	0,329	0,240
400	7,85	5,86	7,47	5,48	0,294	0,220	0,280	0,205	0,350	0,262	0,333	0,245
500	8,05	6,07	7,56	5,58	0,302	0,227	0,283	0,209	0,359	0,271	0,337	0,249
600	8,24	6,26	7,66	5,68	0,309	0,234	0,287	0,213	0,368	0,279	0,342	0,253
700	8,42	6,43	7,78	5,77	0,315	0,241	0,291	0,216	0,376	0,287	0,346	0,258
800	8,58	6,59	7,85	5,87	0,321	0,247	0,294	0,220	0,383	0,294	0,350	0,262
900	8,72	6,73	7,94	5,95	0,326	0,252	0,297	0,223	0,389	0,300	0,354	0,266
1000	8,84	6,85	8,02	6,04	0,331	0,257	0,301	0,226	0,394	0,306	0,358	0,269

Таблица 300

Энтальпия и энтропия газа подземной газификации каменного угля

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль			ккал/кг град		
$^{\circ}\text{C}$	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	720,4	27,0	32,1	2,24	0,0840	0,100
200	1457	54,6	65,0	3,99	0,149	0,178
300	2210	82,9	98,7	5,44	0,204	0,243
400	2990	111,9	133,3	6,68	0,250	0,298
500	3780	141,7	169	7,78	0,292	0,347
600	4600	172	205	8,77	0,329	0,391
700	5430	203	242	9,68	0,363	0,432
800	6280	235	280	10,51	0,394	0,469
900	7150	268	319	11,28	0,422	0,503
1000	8020	301	358	12,00	0,449	0,535

Теплоемкость саратовского газа (Елшанка)

Таблица 301

Температура	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pT}	μc_{vT}	c_p	c_v	c_{pT}	c_{vT}	c'_p	c'_v	c'_{pT}	c'_{vT}
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град			
° С												
0	8,45	6,46	8,45	6,46	0,493	0,377	0,493	0,377	0,377	0,288	0,377	0,288
100	9,58	7,59	8,97	6,98	0,559	0,443	0,523	0,407	0,427	0,339	0,400	0,311
200	10,98	8,99	9,61	7,62	0,640	0,524	0,560	0,445	0,490	0,401	0,429	0,340
300	12,40	10,42	10,30	8,32	0,723	0,607	0,601	0,485	0,553	0,465	0,460	0,371
400	13,77	11,78	11,01	9,02	0,804	0,688	0,642	0,526	0,614	0,526	0,491	0,402
500	15,02	13,03	11,68	9,69	0,876	0,760	0,681	0,565	0,670	0,582	0,521	0,432
600	16,2	14,17	12,33	10,34	0,943	0,827	0,719	0,603	0,721	0,632	0,550	0,462
700	17,2	15,2	12,95	10,97	1,002	0,886	0,755	0,640	0,767	0,678	0,578	0,489
800	18,2	16,1	13,58	11,59	1,055	0,939	0,792	0,676	0,807	0,719	0,606	0,517
900	18,9	16,9	14,16	12,17	1,103	0,987	0,826	0,710	0,843	0,755	0,632	0,543
1000	19,6	17,6	14,68	12,69	1,145	1,029	0,856	0,740	0,876	0,787	0,655	0,566

Энтальпия и энтропия саратовского газа (Елшанка)

Таблица 302

Температура	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
t	ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/м ³ град
° С						
0	0	0	0	0	0	0
100	896,6	52,3	40,0	2,77	0,161	0,123
200	1 920	112,1	85,7	5,19	0,303	0,232
300	3 090	180	137,9	7,43	0,434	0,332
400	4 400	257	196	9,53	0,556	0,425
500	5 840	341	261	11,53	0,672	0,514
600	7 400	432	330	13,43	0,783	0,599
700	9 070	529	405	15,2	0,889	0,680
800	10 300	634	485	16,9	0,988	0,756
900	12 700	743	569	18,6	1,083	0,829
1000	14 700	856	655	20,1	1,175	0,899

Таблица 303

Теплоемкость дагестанского газа (Изербаш)

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											
	μc_p	μc_v	μc_{pT}	μc_{vT}	c_p	c_v	c_{pT}	c_{vT}	c'_p	c'_v	c'_{pT}	c'_{vT}
° С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град			
0	9,84	7,85	9,84	7,85	0,440	0,351	0,440	0,351	0,439	0,350	0,439	0,350
100	11,55	9,56	10,66	8,68	0,516	0,427	0,477	0,388	0,515	0,427	0,476	0,387
200	13,46	11,47	11,58	9,59	0,602	0,513	0,517	0,429	0,600	0,512	0,516	0,428
300	15,3	13,28	12,50	10,51	0,683	0,594	0,559	0,470	0,681	0,593	0,558	0,469
400	17,0	14,96	13,41	11,42	0,758	0,669	0,600	0,511	0,756	0,667	0,598	0,510
500	18,5	16,5	14,26	12,27	0,826	0,737	0,637	0,549	0,824	0,735	0,636	0,548
600	19,8	17,9	15,09	13,10	0,887	0,798	0,674	0,586	0,885	0,796	0,673	0,584
700	21,1	19,1	15,9	13,86	0,941	0,852	0,709	0,620	0,939	0,851	0,707	0,619
800	22,1	20,1	16,6	14,61	0,988	0,899	0,742	0,653	0,986	0,897	0,740	0,652
900	23,0	21,0	17,3	15,3	1,030	0,941	0,773	0,684	1,028	0,939	0,771	0,682
1000	23,9	21,9	17,9	15,9	1,067	0,978	0,801	0,712	1,065	0,976	0,799	0,710

Таблица 314

Энтальпия и энтропия дагестанского газа (Изербаш)

Температура <i>t</i>	Энтальпия			Энтропия		
	μi	i	i'	μS	S	S'
° С	ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³	ккал/моль град	ккал/кг град	ккал/нм ³ град
0	0	0	0	0	0	0
100	1 066	47,7	47,6	3,29	0,147	0,147
200	2 320	103,5	103,3	6,25	0,279	0,279
300	3 750	168	167	8,99	0,402	0,401
400	5 360	240	239	11,44	0,511	0,510
500	7 130	319	318	14,03	0,627	0,626
600	9 050	405	404	16,3	0,730	0,728
700	11 100	496	495	18,6	0,831	0,829
800	13 300	593	592	20,6	0,924	0,922
900	15 600	695	694	22,7	1,013	1,011
1000	17 900	801	799	24,6	1,099	1,097

XI. ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ
И ЭНТРОПИИ ПРОДУКТОВ
СГОРАНИЯ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

(таблицы 305—325)

Таблица 305

Теплоемкость продуктов сгорания доменного газа (коксовых печей), отнесенная к 1 м³ топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t	Истинная теплоемкость				Средняя теплоемкость			
	При постоянном давлении		При постоянном объеме		При постоянном давлении		При постоянном объеме	
	$(c'_p)_{пр. сг} (тон)$	$(c'_p)_в (тон)$	$(c'_v)_{пр. сг} (тон)$	$(c'_v)_в (тон)$	$(c'_{pm})_{пр. сг} (тон)$	$(c'_{pm})_в (тон)$	$(c'_{vm})_{пр. сг} (тон)$	$(c'_{vm})_в (тон)$
° С	ккал/м ³ топ. град				ккал/м ³ топ. град			
0	0,532	0,235	0,388	0,168	0,532	0,235	0,388	0,168
100	0,551	0,237	0,407	0,170	0,542	0,236	0,398	0,163
200	0,570	0,240	0,426	0,173	0,551	0,237	0,407	0,170
300	0,588	0,245	0,444	0,178	0,560	0,239	0,416	0,172
400	0,606	0,251	0,462	0,184	0,569	0,241	0,425	0,174
500	0,623	0,256	0,479	0,189	0,578	0,244	0,434	0,177
600	0,639	0,262	0,495	0,195	0,587	0,246	0,443	0,179
700	0,653	0,267	0,509	0,200	0,596	0,249	0,452	0,182
800	0,666	0,271	0,522	0,204	0,604	0,251	0,460	0,184
900	0,676	0,275	0,532	0,208	0,611	0,254	0,467	0,187
1000	0,686	0,278	0,542	0,211	0,618	0,256	0,474	0,189

Таблица 306

Энтальпия и энтропия продуктов сгорания доменного газа (коксовых печей), отнесенные к 1 м³ топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t	Энтальпия		Энтропия	
	$i'_{пр. сг} (тон)$	$i'_в (тон)$	$S'_{пр. сг} (тон)$	$S'_в (тон)$
° С	ккал/м ³ топ.		ккал/м ³ топ. град	
0	0	0	0	0
100	54,2	23,6	0,169	0,0733
200	100,2	47,5	0,302	0,139
300	168	71,7	0,413	0,176
400	223	96,5	0,509	0,216
500	289	121,9	0,594	0,251
600	352	147,7	0,670	0,283
700	417	174	0,740	0,312
800	483	201	0,805	0,338
900	550	228	0,865	0,362
1000	618	256	0,924	0,385

Таблица 307

Теплоемкость продуктов сгорания газа подземной газификации подмосковного угля состава I ($N_2 = 63,6\%$; $H_2 = 14,5\%$; $CO = 10,0\%$; $CO_2 = 9,5\%$; $H_2S = 0,6\%$; $CH_4 = 1,8\%$, по объему), отнесенная к 1 м^3 топлива, при коэффициенте избытка $\alpha = 1$

Температура t °С	Истинная теплоемкость				Средняя теплоемкость			
	При постоянном давлении		При постоянном объеме		При постоянном давлении		При постоянном объеме	
	$(c'_p)_{np. cг} (топ)$	$(c'_p)_в (топ)$	$(c'_v)_{np} cг (топ)$	$(c'_v)_в (топ)$	$(c'_{рm})_{п. cг} (топ)$	$(c'_{рm})_в (топ)$	$(c'_{vm})_{п. cг} (топ)$	$(c'_{vm})_в (топ)$
	ккал/м ³ топ. град				ккал/м ³ топ. град			
0	0,548	0,248	0,398	0,177	0,548	0,248	0,398	0,177
100	0,561	0,250	0,411	0,179	0,554	0,249	0,404	0,178
200	0,574	0,253	0,424	0,182	0,561	0,250	0,411	0,179
300	0,590	0,258	0,440	0,187	0,568	0,252	0,418	0,181
400	0,606	0,264	0,456	0,193	0,576	0,254	0,426	0,183
500	0,622	0,270	0,472	0,199	0,583	0,257	0,433	0,186
600	0,638	0,275	0,488	0,204	0,591	0,259	0,441	0,188
700	0,652	0,281	0,502	0,210	0,599	0,262	0,449	0,191
800	0,665	0,285	0,515	0,214	0,606	0,265	0,456	0,194
900	0,677	0,289	0,527	0,218	0,614	0,267	0,464	0,196
1000	0,687	0,293	0,537	0,222	0,620	0,269	0,470	0,198

Таблица 308

Энтальпия и энтропия продуктов сгорания газа подземной газификации подмосковного угля состава I ($N_2 = 63,6\%$; $H_2 = 14,5\%$; $CO = 10,0\%$; $CO_2 = 9,5\%$; $H_2S = 0,6\%$; $CH_4 = 1,8\%$, по объему), отнесенные к 1 м^3 топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t °С	Энтальпия		Энтропия	
	$i'_{np. cг} (топ)$	$i'_в (топ)$	$S'_{np. cг} (топ)$	$S'_в (топ)$
	ккал/м ³ топ.		ккал/м ³ топ. град	
0	0,00	0,00	0	0
100	55,4	24,85	0,173	0,0772
200	112,2	49,96	0,307	0,1369
300	170	75,51	0,419	0,186
400	230	101,56	0,515	0,228
500	292	128,30	0,600	0,265
600	355	156	0,677	0,298
700	419	183	0,747	0,328
800	485	212	0,811	0,356
900	552	240	0,871	0,381
1000	620	269	0,926	0,405

Таблица 309

Теплоемкость продуктов сгорания газа подземной газификации подмосковного угля состава II ($N_2 = 54,0\%$; $O_2 = 0,20\%$; $H_2 = 18,70\%$; $CO = 9,40\%$; $H_2S = 0,50\%$; $CO_2 = 16,00\%$; $CH_4 = 1,0$; $C_2H_4 = 0,20\%$, по объему), отнесенная к 1 м^3 топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t	Истинная теплоемкость				Средняя теплоемкость			
	При постоянном давлении		При постоянном объеме		При постоянном давлении		При постоянном объеме	
	$(c'_p)_{пр. сг} \text{ (тон)}$	$(c'_p)_в \text{ (тон)}$	$(c'_v)_{пр. сг} \text{ (тон)}$	$(c'_v)_в \text{ (тон)}$	$(c'_{р\text{т}})_{пр. сг} \text{ (тон)}$	$(c'_{р\text{т}})_в \text{ (тон)}$	$(c'_{в\text{т}})_{пр. сг} \text{ (тон)}$	$(c'_{в\text{т}})_в \text{ (тон)}$
$^{\circ}C$	ккал/м ³ топ. град				ккал/м ³ топ. град			
0	0,553	0,254	0,403	0,181	0,533	0,254	0,403	0,181
100	0,568	0,255	0,418	0,182	0,561	0,254	0,411	0,181
200	0,584	0,259	0,434	0,186	0,568	0,256	0,418	0,183
300	0,601	0,264	0,451	0,191	0,576	0,258	0,426	0,185
400	0,618	0,270	0,468	0,197	0,585	0,260	0,435	0,187
500	0,635	0,276	0,485	0,203	0,593	0,263	0,443	0,190
600	0,652	0,282	0,502	0,209	0,601	0,265	0,451	0,192
700	0,666	0,287	0,516	0,214	0,610	0,268	0,460	0,195
800	0,680	0,292	0,530	0,219	0,618	0,271	0,468	0,198
900	0,692	0,296	0,542	0,223	0,625	0,273	0,475	0,200
1000	0,703	0,300	0,553	0,227	0,633	0,276	0,483	0,203

Таблица 310

Энтальпия и энтропия продуктов сгорания газа подземной газификации подмосковного угля состава II ($N_2 = 54,00\%$; $O_2 = 0,20\%$; $H_2 = 18,70\%$; $CO = 9,40\%$; $H_2S = 0,50\%$; $CO_2 = 16,00\%$; $CH_4 = 1,00\%$; $C_2H_4 = 0,20\%$, по объему), отнесенные к 1 м^3 топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t	Энтальпия		Энтропия	
	$i'_{пр. сг} \text{ (тон)}$	$i'_в \text{ (тон)}$	$S'_{пр. сг} \text{ (тон)}$	$S'_в \text{ (тон)}$
$^{\circ}C$	ккал/м ³ топ		ккал/м ³ топ. град	
0	0	0	0	0
100	56,1	25,4	0,174	0,0790
200	113,6	51,1	0,311	0,140
300	173	77,3	0,425	0,190
400	234	104	0,523	0,233
500	297	131	0,609	0,271
600	361	159	0,688	0,305
700	427	188	0,759	0,336
800	494	217	0,825	0,364
900	563	246	0,886	0,390
1000	632	276	0,943	0,415

Таблица 311

Теплоемкость продуктов сгорания газа подземной газификации подмосковного угля состава III ($N_2 = 56,2^0/0$; $O_2 = 0,2^0/0$; $H_2 = 14,6^0/0$; $CO = 4,8^0/0$; $H_2S = 2,0^0/0$; $CO_2 = 16,0^0/0$; $CH_4 = 1,0^0/0$; $C_2H_4 = 0,2^0/0$; $H_2O = 5,0^0/0$, по объему), отнесенная к 1 н.м³ топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t ° C	Истинная теплоемкость				Средняя теплоемкость			
	При постоянном давлении		При постоянном объеме		При постоянном давлении		При постоянном объеме	
	$(c'_p)_{np. cг} (тон)$	$(c'_p)_{в} (тон)$	$(c'_v)_{np. cг} (тон)$	$(c'_v)_{в} (тон)$	$(c'_{рп})_{np. cг} (тон)$	$(c'_{рп})_{в} (тон)$	$(c'_{рт})_{np. cг} (тон)$	$(c'_{рт})_{в} (тон)$
	ккал/н.м ³ топ. град				ккал/н.м ³ топ. град			
0	0,532	0,223	0,388	0,159	0,532	0,223	0,388	0,159
100	0,546	0,224	0,402	0,160	0,539	0,223	0,395	0,159
200	0,560	0,227	0,416	0,163	0,546	0,225	0,402	0,161
300	0,576	0,232	0,432	0,168	0,553	0,226	0,409	0,162
400	0,593	0,237	0,449	0,173	0,561	0,228	0,417	0,164
500	0,609	0,242	0,465	0,178	0,569	0,231	0,425	0,167
600	0,625	0,248	0,481	0,184	0,577	0,233	0,433	0,169
700	0,639	0,252	0,495	0,188	0,585	0,235	0,441	0,171
800	0,652	0,256	0,508	0,192	0,593	0,238	0,449	0,174
900	0,664	0,260	0,520	0,196	0,600	0,240	0,456	0,176
1000	0,674	0,263	0,530	0,199	0,607	0,242	0,463	0,178

Таблица 312

Энтальпия и энтропия продуктов сгорания газа подземной газификации подмосковного угля состава III ($N_2 = 56,2^0/0$; $O_2 = 0,2^0/0$; $H_2 = 14,6^0/0$; $CO = 4,8^0/0$; $H_2S = 2,0^0/0$; $CO_2 = 16,0^0/0$; $CH_4 = 1,0^0/0$; $C_2H_4 = 0,2^0/0$; $H_2O = 5,0^0/0$, по объему), отнесенные к 1 н.м³ топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t ° C	Энтальпия		Энтропия	
	$i'_{np. cг} (тон)$	$i'_{в} (тон)$	$S'_{np. cг} (тон)$	$S'_{в} (тон)$
	ккал/н.м ³ топ		ккал/н.м ³ топ. град	
0	0	0	0	0
100	53,9	22,3	0,168	0,0694
200	109,2	44,9	0,299	0,123
300	166	67,9	0,408	0,167
400	224	91,3	0,502	0,205
500	285	115	0,585	0,238
600	346	140	0,660	0,268
700	409	165	0,728	0,295
800	474	190	0,792	0,320
900	540	216	0,850	0,343
1000	607	242	0,905	0,364

Таблица 313

Теплоемкость продуктов сгорания газа подземной газификации каменного угля, отнесенная к 1 м³ топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t	Истинная теплоемкость				Средняя теплоемкость			
	При постоянном давлении		При постоянном объеме		При постоянном давлении		При постоянном объеме	
	$(c'_p)_{пр. сг} (тон)$	$(c'_p)_в (тон)$	$(c'_v)_{пр. сг} (тон)$	$(c'_v)_в (тон)$	$(c'_{рм})_{пр. сг} (тон)$	$(c'_{рм})_в (тон)$	$(c'_{vm})_{пр. сг} (тон)$	$(c'_{vm})_в (тон)$
°С	ккал/м ³ топ. град				ккал/м ³ топ. град			
0	0,578	0,282	0,421	0,201	0,578	0,282	0,421	0,201
100	0,595	0,284	0,438	0,203	0,586	0,283	0,429	0,202
200	0,612	0,288	0,455	0,207	0,596	0,284	0,439	0,203
300	0,629	0,294	0,472	0,213	0,603	0,286	0,446	0,205
400	0,648	0,300	0,491	0,219	0,612	0,289	0,455	0,208
500	0,666	0,307	0,509	0,226	0,621	0,292	0,464	0,211
600	0,682	0,313	0,525	0,232	0,630	0,295	0,473	0,214
700	0,698	0,319	0,541	0,238	0,638	0,298	0,481	0,217
800	0,711	0,324	0,554	0,243	0,647	0,301	0,490	0,220
900	0,724	0,329	0,567	0,248	0,655	0,304	0,498	0,223
1000	0,734	0,333	0,577	0,252	0,662	0,306	0,505	0,225

Таблица 314

Энтальпия и энтропия продуктов сгорания газа подземной газификации каменного угля, отнесенные к 1 м³ топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t	Энтальпия		Энтропия	
	$i'_{пр. сг} (тон)$	$i'_в (тон)$	$S'_{пр. сг} (тон)$	$S'_в (тон)$
°С	ккал/м ³ топ.		ккал/м ³ топ. град	
0	0,00	0,00	0	0
100	58,6	28,3	0,182	0,0878
200	119,1	56,8	0,326	0,156
300	181	85,9	0,445	0,211
400	245	116	0,547	0,259
500	311	146	0,638	0,301
600	378	177	0,720	0,339
700	447	209	0,795	0,373
800	517	241	0,864	0,405
900	589	273	0,928	0,434
1000	662	306	0,987	0,461

Таблица 315

Теплоемкость продуктов сгорания саратовского газа (Елшанка), отнесенная к 1 нм^3 топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t	Истинная теплоемкость				Средняя теплоемкость			
	При постоянном давлении		При постоянном объеме		При постоянном давлении		При постоянном объеме	
	$(c'_p)_{np, c_2}(\text{тон})$	$(c'_p)_s(\text{тон})$	$(c'_v)_{np, c_2}(\text{тон})$	$(c'_v)_s(\text{тон})$	$(c'_{pm})_{np, c_2}(\text{тон})$	$(c'_{pm})_s(\text{тон})$	$(c'_{vpm})_{np, c_2}(\text{тон})$	$(c'_{vpm})_s(\text{тон})$
$^{\circ}\text{C}$	$\text{ккал/нм}^3 \text{ топ. град}$				$\text{ккал/нм}^3 \text{ топ. град}$			
0	3,48	2,95	2,53	2,11	3,48	2,95	2,53	2,11
100	3,55	2,97	2,60	2,13	3,51	2,95	2,56	2,11
200	3,63	3,01	2,68	2,17	3,55	2,97	2,60	2,13
300	3,72	3,07	2,77	2,21	3,59	2,99	2,64	2,15
400	3,82	3,14	2,87	2,30	3,64	3,02	2,69	2,18
500	3,92	3,21	2,97	2,37	3,68	3,05	2,73	2,21
600	4,02	3,27	3,07	2,43	3,73	3,08	2,78	2,24
700	4,12	3,33	3,17	2,49	3,78	3,11	2,83	2,27
800	4,20	3,39	3,25	2,55	3,83	3,14	2,88	2,30
900	4,28	3,44	3,33	2,59	3,87	3,17	2,92	2,33
1000	4,35	3,48	3,40	2,64	3,92	3,20	2,97	2,36

Таблица 316

Энтальпия и энтропия продуктов сгорания саратовского газа, отнесенные к 1 нм^3 топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t	Энтальпия		Энтропия	
	$i'_{np, c_2}(\text{тон})$	$i'_s(\text{тон})$	$S'_{np, c_2}(\text{тон})$	$S'_s(\text{тон})$
$^{\circ}\text{C}$	$\text{ккал/нм}^3 \text{ топ}$		$\text{ккал/нм}^3 \text{ топ. град}$	
0	0,0	0,0	0	0
100	353	295	1,092	0,918
200	710	594	1,945	1,627
300	1077	898	2,648	2,209
400	1454	1207	3,253	2,707
500	1840	1530	3,790	3,146
600	2240	1850	4,273	3,541
700	2650	2180	4,715	3,899
800	3060	2520	5,121	4,227
900	3490	2860	5,499	4,532
1000	3920	3200	5,852	4,814

Таблица 317

Теплоемкость продуктов сгорания дагестанского газа (Изербаш), отнесенная к 1 м^3 топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура	Истинная теплоемкость				Средняя теплоемкость			
	При постоянном давлении		При постоянном объеме		При постоянном давлении		При постоянном объеме	
	$(c'_p)_{np. cг} (тон)$	$(c'_p)_{в} (тон)$	$(c'_{v})_{np. cг} (тон)$	$(c'_{v})_{в} (тон)$	$(c'_{рт})_{np. cг} (тон)$	$(c'_{рт})_{в} (тон)$	$(c'_{врт})_{np. cг} (тон)$	$(c'_{врт})_{в} (тон)$
°С	ккал/м ³ топ. град				ккал/м ³ топ. град			
0	4,24	3,60	3,09	2,57	4,24	3,60	3,09	2,57
100	4,32	3,63	3,17	2,60	4,28	3,61	3,13	2,58
200	4,42	3,68	3,27	2,65	4,32	3,63	3,17	2,60
300	4,54	3,75	3,39	2,72	4,38	3,66	3,23	2,63
400	4,66	3,84	3,51	2,81	4,43	3,69	3,28	2,66
500	4,79	3,92	3,64	2,89	4,49	3,73	3,34	2,70
600	4,91	4,00	3,76	2,97	4,55	3,77	3,40	2,74
700	5,02	4,08	3,87	3,05	4,61	3,81	3,46	2,78
800	5,13	4,14	3,98	3,11	4,67	3,85	3,52	2,82
900	5,22	4,20	4,07	3,17	4,72	3,88	3,57	2,85
1000	5,31	4,25	4,16	3,22	4,78	3,92	3,63	2,89

Таблица 318

Энтальпия и энтропия продуктов сгорания дагестанского газа (Изербаш), отнесенные к 1 м^3 топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура	Энтальпия		Энтропия	
	$i'_{np. cг} (тон)$	$i'_{в} (тон)$	$S'_{np. cг} (тон)$	$S'_{в} (тон)$
°С	ккал/м ³ топ		ккал/м ³ топ. град	
0	0,0	0,0	0	0
100	428	361	1,330	1,122
200	865	726	2,369	1,990
300	1313	1098	3,227	2,702
400	1770	1476	3,965	3,311
500	2240	1865	4,620	3,848
600	2730	2260	5,209	4,330
700	3230	2670	5,748	4,768
800	3730	3080	6,244	5,170
900	4250	3490	6,705	5,542
1000	4780	3920	7,135	5,887

Доменный газ (коксовых печей)

α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$	α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$
1,0	0,6173	13,836	0,4369	0,0000	0,000	0,0000	5,6	0,1955	4,382	0,14589	0,8993	20,16	0,6711
1,2	0,5643	12,648	0,4021	0,1129	2,530	0,0804	5,8	0,1898	4,254	0,14179	0,9110	20,42	0,6806
1,4	0,5198	11,651	0,3724	0,2079	4,660	0,1490	6,0	0,1845	4,135	0,13790	0,9225	20,68	0,6895
1,6	0,4817	10,797	0,3467	0,2890	6,478	0,2080	6,2	0,1795	4,023	0,13423	0,9333	20,92	0,6980
1,8	0,4488	10,060	0,3244	0,3590	8,048	0,2595	6,4	0,1747	3,916	0,13075	0,9434	21,15	0,7060
2,0	0,4202	9,419	0,3048	0,4202	9,419	0,3048	6,6	0,1702	3,815	0,12744	0,9531	21,36	0,7137
2,2	0,3949	8,852	0,2874	0,4739	10,622	0,3449	6,8	0,1659	3,719	0,12429	0,9622	21,57	0,7209
2,4	0,3726	8,352	0,2719	0,5216	11,693	0,3807	7,0	0,1618	3,627	0,12130	0,9708	21,76	0,7278
2,6	0,3526	7,903	0,2580	0,5642	12,645	0,4128	7,2	0,1579	3,539	0,11845	0,9790	21,94	0,7344
2,8	0,3347	7,502	0,2454	0,6025	13,504	0,4417	7,4	0,1542	3,456	0,11573	0,9869	22,12	0,7407
3,0	0,3185	7,139	0,2340	0,6370	14,278	0,4680	7,6	0,1507	3,378	0,11313	0,9946	22,29	0,7467
3,2	0,3038	6,810	0,2236	0,6684	14,982	0,4919	7,8	0,1473	3,302	0,11065	1,0016	22,45	0,7524
3,4	0,2904	6,509	0,2141	0,6970	15,62	0,5138	8,0	0,1441	3,230	0,10827	1,0087	22,61	0,7579
3,6	0,2781	6,234	0,2054	0,7231	16,21	0,5340	8,2	0,1410	3,160	0,10599	1,0152	22,75	0,7631
3,8	0,2668	5,980	0,1973	0,7470	16,74	0,5524	8,4	0,1380	3,093	0,10380	1,0212	22,89	0,7681
4,0	0,2564	5,747	0,1899	0,7692	17,24	0,5697	8,6	0,1352	3,030	0,10171	1,0275	23,03	0,7730
4,2	0,2468	5,532	0,1830	0,7898	17,70	0,5856	8,8	0,1325	2,970	0,09970	1,0335	23,17	0,7777
4,4	0,2379	5,332	0,1766	0,8089	18,13	0,6004	9,0	0,1299	2,912	0,09776	1,0392	23,30	0,7821
4,6	0,2296	5,146	0,1706	0,8266	18,53	0,6142	9,2	0,1274	2,856	0,09590	1,0447	23,42	0,7864
4,8	0,2218	4,972	0,1650	0,8428	18,89	0,6270	9,4	0,1249	2,800	0,09411	1,0492	23,52	0,7905
5,0	0,2146	4,810	0,1598	0,8584	19,24	0,6392	9,6	0,1226	2,748	0,09238	1,0544	23,63	0,7945
5,2	0,2078	4,658	0,1549	0,8728	19,56	0,6506	9,8	0,1204	2,699	0,09072	1,0595	23,75	0,7983
5,4	0,2014	4,514	0,1502	0,8862	19,86	0,6609	10,0	0,1182	2,649	0,08911	1,0638	23,84	0,8020

Газ подземной газификации подмосковного угля состава I
 ($N_2 = 63,6\%$; $H_2 = 14,5\%$; $CO = 10,0\%$; $CO_2 = 9,5\%$; $H_2S = 0,6\%$; $CH_4 = 1,8\%$, по объему)

α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$	α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$
1,0	0,5917	13,263	0,4565	0	0	0	5,6	0,1862	4,174	0,1429	0,8566	19,200	0,6574
1,2	0,5405	12,116	0,4167	0,1081	2,423	0,0833	5,8	0,1808	4,053	0,1388	0,8680	19,455	0,6661
1,4	0,4975	11,152	0,3833	0,1990	4,461	0,1533	6,0	0,1758	3,939	0,1349	0,8788	19,697	0,6744
1,6	0,4608	10,329	0,3549	0,2765	6,198	0,2129	6,2	0,1709	3,832	0,1312	0,8889	19,924	0,6821
1,8	0,4292	9,620	0,3304	0,3433	7,696	0,2843	6,4	0,1664	3,730	0,1277	0,8985	20,140	0,6894
2,0	0,416	9,062	0,3091	0,4016	9,002	0,3091	6,6	0,1621	3,633	0,1244	0,9076	20,343	0,6964
2,2	0,3774	8,458	0,2903	0,4528	10,150	0,3484	6,8	0,1580	3,541	0,1212	0,9163	20,533	0,7030
2,4	0,3559	7,977	0,2737	0,4982	11,167	0,3832	7,0	0,1541	3,454	0,1182	0,9245	20,722	0,7093
2,6	0,3367	7,547	0,2589	0,5387	12,075	0,4142	7,2	0,1504	3,371	0,1154	0,9324	20,898	0,7152
2,8	0,3195	7,161	0,2456	0,5751	12,890	0,4421	7,4	0,1468	3,291	0,1126	0,9398	21,065	0,7209
3,0	0,3040	6,813	0,2336	0,6079	13,626	0,4672	7,6	0,1435	3,216	0,1101	0,9469	21,224	0,7263
3,2	0,2899	6,497	0,2228	0,6377	14,294	0,4901	7,8	0,1403	3,144	0,1076	0,9537	21,376	0,7315
3,4	0,2770	6,209	0,2128	0,6648	14,902	0,5108	8,0	0,1372	3,075	0,1052	0,9602	21,522	0,7365
3,6	0,2653	5,946	0,2038	0,6897	15,458	0,5298	8,2	0,1342	3,009	0,1030	0,9665	21,663	0,7412
3,8	0,2545	5,703	0,1955	0,7125	15,970	0,5473	8,4	0,1314	2,946	0,1008	0,9724	21,797	0,7458
4,0	0,2445	5,480	0,1878	0,7335	16,441	0,5634	8,6	0,1287	2,885	0,09870	0,9781	21,924	0,7501
4,2	0,2353	5,274	0,1807	0,7529	16,876	0,5782	8,8	0,1261	2,827	0,09670	0,9833	22,047	0,7543
4,4	0,2268	5,083	0,1741	0,7710	17,281	0,5920	9,0	0,1236	2,771	0,09479	0,9889	22,166	0,7583
4,6	0,2188	4,905	0,1680	0,7878	17,657	0,6048	9,2	0,1212	2,717	0,09295	0,9939	22,279	0,7622
4,8	0,2114	4,739	0,1623	0,8034	18,008	0,6168	9,4	0,1189	2,665	0,09118	0,9988	22,389	0,7659
5,0	0,2045	4,584	0,1570	0,8180	18,335	0,6280	9,6	0,1167	2,216	0,08948	1,0035	22,494	0,7695
5,2	0,1980	4,439	0,1520	0,8317	18,642	0,6384	9,8	0,1146	2,568	0,08783	1,0080	22,595	0,7729
5,4	0,1919	4,302	0,1473	0,8445	18,930	0,6482	10,0	0,1125	2,521	0,08625	1,0124	22,693	0,7763

Газ подземной газификации подмосковного угля состава II
 ($N_2 = 54,0\%$; $O_2 = 0,2\%$; $H_2 = 18,7\%$; $CO = 9,4\%$; $H_2S = 0,5\%$; $CO_2 = 16,0\%$; $CH_4 = 1,0\%$; $C_2H_4 = 0,2\%$, по объему)

α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$	α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$
1,0	0,5921	13,272	0,4507	0,0000	0,000	0,0000	5,6	0,1833	4,109	0,14008	0,8432	18,90	0,6444
1,2	0,5397	12,097	0,4111	0,1079	2,419	0,0822	5,8	0,1779	3,988	0,13600	0,8539	19,14	0,6528
1,4	0,4959	11,115	0,3779	0,1984	4,446	0,1512	6,0	0,1729	3,875	0,13216	0,8645	19,38	0,6608
1,6	0,4586	10,279	0,3496	0,2752	6,167	0,2098	6,2	0,1681	3,768	0,12852	0,8741	19,59	0,6683
1,8	0,4266	9,562	0,3253	0,3413	7,650	0,2602	6,4	0,1636	3,667	0,12509	0,8834	19,80	0,6755
2,0	0,3987	8,937	0,3041	0,3987	8,937	0,3041	6,6	0,1594	3,573	0,12183	0,8926	20,01	0,6822
2,2	0,3743	8,390	0,2855	0,4492	10,068	0,3426	6,8	0,1553	3,481	0,11873	0,9007	20,19	0,6886
2,4	0,3527	7,906	0,2691	0,4938	11,068	0,3767	7,0	0,1514	3,394	0,11579	0,9084	20,36	0,6947
2,6	0,3334	7,473	0,2544	0,5334	11,957	0,4070	7,2	0,1478	3,313	0,11299	0,9164	20,54	0,7005
2,8	0,3161	7,085	0,2413	0,5690	12,753	0,4343	7,4	0,1443	3,234	0,11033	0,9235	20,70	0,7061
3,0	0,3006	6,736	0,2295	0,6012	13,476	0,4590	7,6	0,1410	3,160	0,10778	0,9306	20,86	0,7113
3,2	0,2865	6,422	0,2187	0,6303	14,128	0,4811	7,8	0,1378	3,089	0,10535	0,9370	21,01	0,7164
3,4	0,2736	6,133	0,2090	0,6566	14,719	0,5016	8,0	0,1347	3,019	0,10303	0,9429	21,13	0,7212
3,6	0,2619	5,870	0,2000	0,6809	15,262	0,5200	8,2	0,1318	2,954	0,10081	0,9490	21,27	0,7258
3,8	0,2511	5,628	0,1918	0,7031	15,758	0,5370	8,4	0,1290	2,891	0,09868	0,9546	21,39	0,7302
4,0	0,2412	5,406	0,1842	0,7236	16,22	0,5526	8,6	0,1264	2,833	0,09664	0,9606	21,53	0,7345
4,2	0,2320	5,200	0,1773	0,7424	16,64	0,5674	8,8	0,1238	2,775	0,09468	0,9656	21,65	0,7385
4,4	0,2235	5,010	0,1708	0,7593	17,03	0,5807	9,0	0,1213	2,719	0,09280	0,9704	21,75	0,7424
4,6	0,2156	4,833	0,1648	0,7762	17,40	0,5933	9,2	0,1190	2,667	0,09100	0,9758	21,87	0,7462
4,8	0,2083	4,669	0,1592	0,7915	17,74	0,6050	9,4	0,1167	2,616	0,08926	0,9803	21,97	0,7498
5,0	0,2014	4,514	0,1539	0,8056	18,06	0,6156	9,6	0,1145	2,566	0,08759	0,9847	22,07	0,7533
5,2	0,1950	4,371	0,14901	0,8190	18,36	0,6258	9,8	0,1124	2,519	0,08598	0,9891	22,17	0,7566
5,4	0,1889	4,234	0,14441	0,8312	18,63	0,6354	10,0	0,1104	2,475	0,08442	0,9936	22,28	0,7598

Газ подземной газификации подмосковного угля состава III
 ($N_2 = 56,20\%$; $O_2 = 0,20\%$; $H_2 = 14,60\%$; $CO = 4,50\%$; $H_2S = 2,0\%$; $CO_2 = 16,0\%$; $CH_4 = 1,00\%$; $C_2H_4 = 0,20\%$; $H_2O = 5,00\%$, по объему)

α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$	α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$
1,0	0,6158	13,802	0,4721	0,0000	0,900	0,0000	5,6	0,2028	4,545	0,1553	0,9328	20,91	0,7146
1,2	0,5657	12,679	0,4337	0,1131	2,536	0,0867	5,8	0,1970	4,417	0,1509	0,9458	21,20	0,7245
1,4	0,5231	11,725	0,4010	0,2092	4,690	0,1604	6,0	0,1916	4,295	0,14678	0,9580	21,47	0,7338
1,6	0,4865	10,905	0,3729	0,2919	6,543	0,2238	6,2	0,1865	4,180	0,14284	0,9696	21,73	0,7428
1,8	0,4547	10,192	0,3485	0,3638	8,154	0,2788	6,4	0,1816	4,070	0,13911	0,9806	21,98	0,7512
2,0	0,4268	9,567	0,3271	0,4268	9,567	0,3271	6,6	0,1770	3,967	0,13557	0,9911	22,21	0,7592
2,2	0,4021	9,013	0,3082	0,4825	10,816	0,3698	6,8	0,1726	3,868	0,13220	1,0010	22,44	0,7668
2,4	0,3801	8,521	0,2913	0,5322	11,929	0,4078	7,0	0,1684	3,775	0,12900	1,0105	22,65	0,7740
2,6	0,3604	8,079	0,2762	0,5767	12,927	0,4419	7,2	0,1644	3,685	0,12595	1,0194	22,85	0,7809
2,8	0,3427	7,681	0,2626	0,6168	13,826	0,4727	7,4	0,1606	3,600	0,12304	1,0280	23,04	0,7875
3,0	0,3266	7,320	0,2503	0,6532	14,640	0,5005	7,6	0,1570	3,519	0,12026	1,0362	23,23	0,7937
3,2	0,3119	6,992	0,2390	0,6863	15,382	0,5258	7,8	0,1535	3,442	0,11760	1,0441	23,40	0,7997
3,4	0,2986	6,692	0,2288	0,7165	16,06	0,5490	8,0	0,1502	3,367	0,11506	1,0515	23,57	0,8054
3,6	0,2863	6,416	0,2193	0,7442	16,68	0,5703	8,2	0,1470	3,296	0,11268	1,0587	23,73	0,8109
3,8	0,2749	6,163	0,2107	0,7698	17,26	0,5898	8,4	0,14399	3,227	0,11029	1,0655	23,88	0,8161
4,0	0,2645	5,928	0,2026	0,7934	17,78	0,6079	8,6	0,14107	3,162	0,10806	1,0721	24,03	0,8212
4,2	0,2548	5,711	0,1952	0,8153	18,28	0,6247	8,8	0,13827	3,099	0,10591	1,0785	24,17	0,8261
4,4	0,2459	5,510	0,1883	0,8357	18,73	0,6402	9,0	0,13558	3,039	0,10384	1,0846	24,31	0,8307
4,6	0,2374	5,321	0,1819	0,8546	19,16	0,6547	9,2	0,13298	2,981	0,10185	1,0904	24,44	0,8352
4,8	0,2296	5,145	0,1759	0,8723	19,55	0,6683	9,4	0,13049	2,925	0,09994	1,0961	24,57	0,8395
5,0	0,2222	4,981	0,1702	0,8889	19,92	0,6810	9,6	0,12808	2,871	0,09810	1,1015	24,69	0,8437
5,2	0,2153	4,827	0,1650	0,9044	20,27	0,6928	9,8	0,12577	2,819	0,09633	1,1068	24,81	0,8477
5,4	0,2089	4,682	0,1600	0,9190	20,60	0,7040	10,0	0,12353	2,769	0,09461	1,1118	24,92	0,8515

Газ подземной газификации каменного угля

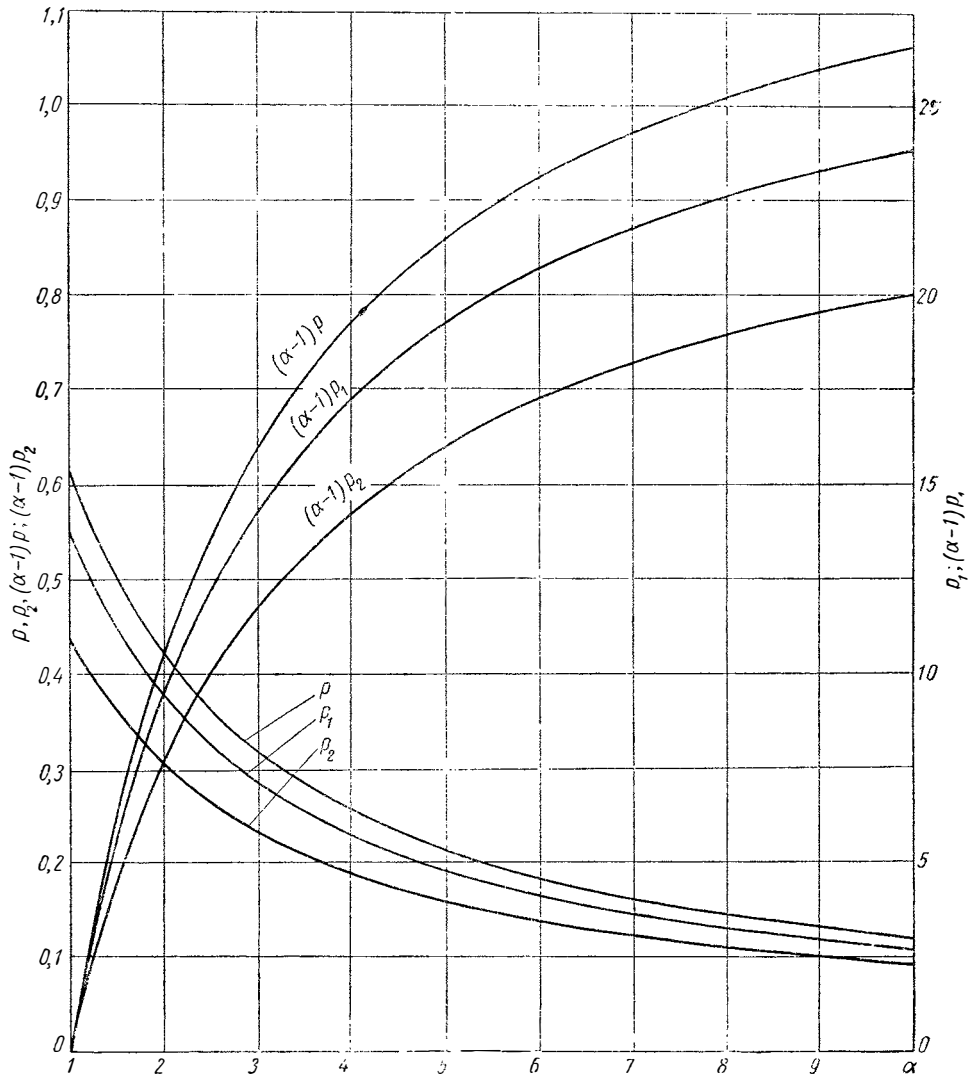
α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$	α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$
1,0	0,5650	12,664	0,4203	0	0	0	5,6	0,1679	3,763	0,1275	0,7723	17,312	0,5863
1,2	0,5123	11,483	0,3821	0,1025	2,297	0,0764	5,8	0,1629	3,653	0,1237	0,7820	17,530	0,5938
1,4	0,4686	10,504	0,3503	0,1874	4,201	0,1401	6,0	0,1582	3,547	0,1202	0,7912	17,734	0,6009
1,6	0,4318	9,678	0,3234	0,2591	5,807	0,1940	6,2	0,1538	3,447	0,1168	0,7998	17,926	0,6075
1,8	0,4003	8,973	0,3003	0,3203	7,178	0,2402	6,4	0,1496	3,353	0,1137	0,8079	18,108	0,6138
2,0	0,3731	8,364	0,2803	0,3731	8,364	0,2803	6,6	0,1457	3,265	0,1107	0,8156	18,282	0,6198
2,2	0,3494	7,832	0,2628	0,4193	9,398	0,3153	6,8	0,1419	3,180	0,1079	0,8229	18,445	0,6255
2,4	0,3285	7,364	0,2473	0,4599	10,309	0,3462	7,0	0,1383	3,100	0,1052	0,8297	18,601	0,6309
2,6	0,3100	6,948	0,2336	0,4960	11,117	0,3737	7,2	0,1349	3,024	0,1026	0,8365	18,750	0,6361
2,8	0,2934	6,577	0,2213	0,5282	11,839	0,3983	7,4	0,1317	2,952	0,1002	0,8428	18,890	0,6410
3,0	0,2786	6,244	0,2102	0,5571	12,487	0,4205	7,6	0,1286	2,883	0,0978	0,8488	19,025	0,6456
3,2	0,2651	5,942	0,2002	0,5832	13,073	0,4405	7,8	0,1257	2,817	0,09554	0,8545	19,153	0,6500
3,4	0,2529	5,669	0,1911	0,6070	13,605	0,4587	8,0	0,1229	2,754	0,09347	0,8600	19,275	0,6543
3,6	0,2418	5,419	0,1828	0,6285	14,090	0,4754	8,2	0,1202	2,693	0,09144	0,8652	19,392	0,6584
3,8	0,2316	5,191	0,1752	0,6485	14,535	0,4906	8,4	0,1176	2,636	0,08949	0,8702	19,504	0,6622
4,0	0,2222	4,981	0,1682	0,6667	14,943	0,5046	8,6	0,1151	2,581	0,08763	0,8750	19,613	0,6660
4,2	0,2136	4,787	0,1618	0,6835	15,319	0,5176	8,8	0,1128	2,528	0,08584	0,8796	19,716	0,6696
4,4	0,2056	4,608	0,1558	0,6990	15,668	0,5296	9,0	0,1105	2,477	0,08412	0,8840	19,814	0,6730
4,6	0,1982	4,442	0,1502	0,7134	15,992	0,5407	9,2	0,1083	2,428	0,08248	0,8882	19,909	0,6763
4,8	0,1913	4,288	0,1450	0,7269	16,293	0,5511	9,4	0,1062	2,381	0,08089	0,8922	20,000	0,6795
5,0	0,1848	4,143	0,1402	0,7394	16,572	0,5608	9,6	0,1042	2,336	0,07936	0,8962	20,088	0,6825
5,2	0,1788	4,008	0,1357	0,7511	16,835	0,5698	9,8	0,1023	2,292	0,07789	0,9000	20,172	0,6854
5,4	0,1732	3,882	0,1314	0,7620	17,081	0,5783	10,0	0,1004	2,250	0,07648	0,9036	20,254	0,6883

Саратовский газ (Елшанка)

α	p	p_1	v_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$	α	p	v_1	p_2	$(\alpha - 1) p$	$(\alpha - 1) p_1$	$(\alpha - 1) p_2$
1,0	0,09355	2,0968	0,07584	0	0	0	5,6	0,01837	0,4118	0,014221	0,08450	1,894	0,06542
1,2	0,07942	1,7801	0,06382	0,01588	0,3560	0,01276	5,8	0,01775	0,3979	0,013736	0,08520	1,910	0,06593
1,4	0,06899	1,5465	0,05509	0,02760	0,6186	0,02203	6,0	0,01717	0,3849	0,013283	0,08535	1,925	0,06642
1,6	0,06099	1,3671	0,04846	0,03659	0,8203	0,02907	6,2	0,01663	0,3727	0,012859	0,08646	1,938	0,06687
1,8	0,05474	1,2270	0,04325	0,04379	0,9816	0,03460	6,4	0,01612	0,3613	0,012461	0,08704	1,951	0,06729
2,0	0,04951	1,1096	0,03906	0,04950	1,1096	0,03905	6,6	0,01564	0,3505	0,012086	0,08757	1,963	0,06768
2,2	0,04525	1,0141	0,03560	0,05429	1,2169	0,04272	6,8	0,01519	0,3404	0,011734	0,08808	1,974	0,06806
2,4	0,04166	0,9338	0,03271	0,05832	1,3073	0,04579	7,0	0,01476	0,3308	0,011402	0,08856	1,985	0,06841
2,6	0,03860	0,8652	0,03025	0,06176	1,3843	0,04840	7,2	0,01436	0,3218	0,011088	0,08901	1,995	0,06875
2,8	0,03596	0,8061	0,02814	0,06473	1,4510	0,05065	7,4	0,01398	0,3132	0,010791	0,08944	2,005	0,06906
3,0	0,03366	0,7545	0,02630	0,06732	1,509	0,05260	7,6	0,01361	0,3052	0,010509	0,08985	2,014	0,06936
3,2	0,03163	0,7091	0,02469	0,06959	1,560	0,05431	7,8	0,01327	0,2974	0,010242	0,09024	2,022	0,06965
3,4	0,02984	0,6688	0,02326	0,07161	1,605	0,05582	8,0	0,01294	0,2901	0,009988	0,09060	2,031	0,06992
3,6	0,02824	0,6329	0,02199	0,07341	1,646	0,05717	8,2	0,01263	0,2831	0,009746	0,09095	2,038	0,07017
3,8	0,02680	0,6006	0,02085	0,07503	1,682	0,05838	8,4	0,01234	0,2765	0,009515	0,09129	2,046	0,07041
4,0	0,02550	0,5715	0,01982	0,07649	1,715	0,05947	8,6	0,01205	0,2702	0,009296	0,09160	2,054	0,07065
4,2	0,02432	0,5451	0,01889	0,07782	1,744	0,06046	8,8	0,01178	0,2641	0,009086	0,09191	2,060	0,07087
4,4	0,02324	0,5210	0,01805	0,07903	1,771	0,06136	9,0	0,01153	0,2583	0,008885	0,09220	2,066	0,07108
4,6	0,02226	0,4989	0,01727	0,08013	1,796	0,06218	9,2	0,01128	0,2528	0,008693	0,09248	2,073	0,07128
4,8	0,02136	0,4787	0,01656	0,08115	1,819	0,06294	9,4	0,01104	0,2475	0,008510	0,09274	2,079	0,07148
5,0	0,02052	0,4600	0,01591	0,08208	1,840	0,06363	9,6	0,01081	0,2424	0,008334	0,09300	2,085	0,07167
5,2	0,01975	0,4427	0,01530	0,08295	1,859	0,06427	9,8	0,01060	0,2375	0,008165	0,09324	2,090	0,07185
5,4	0,01904	0,4267	0,01474	0,08375	1,878	0,06486	10,0	0,01039	0,2328	0,008002	0,09347	2,095	0,07202

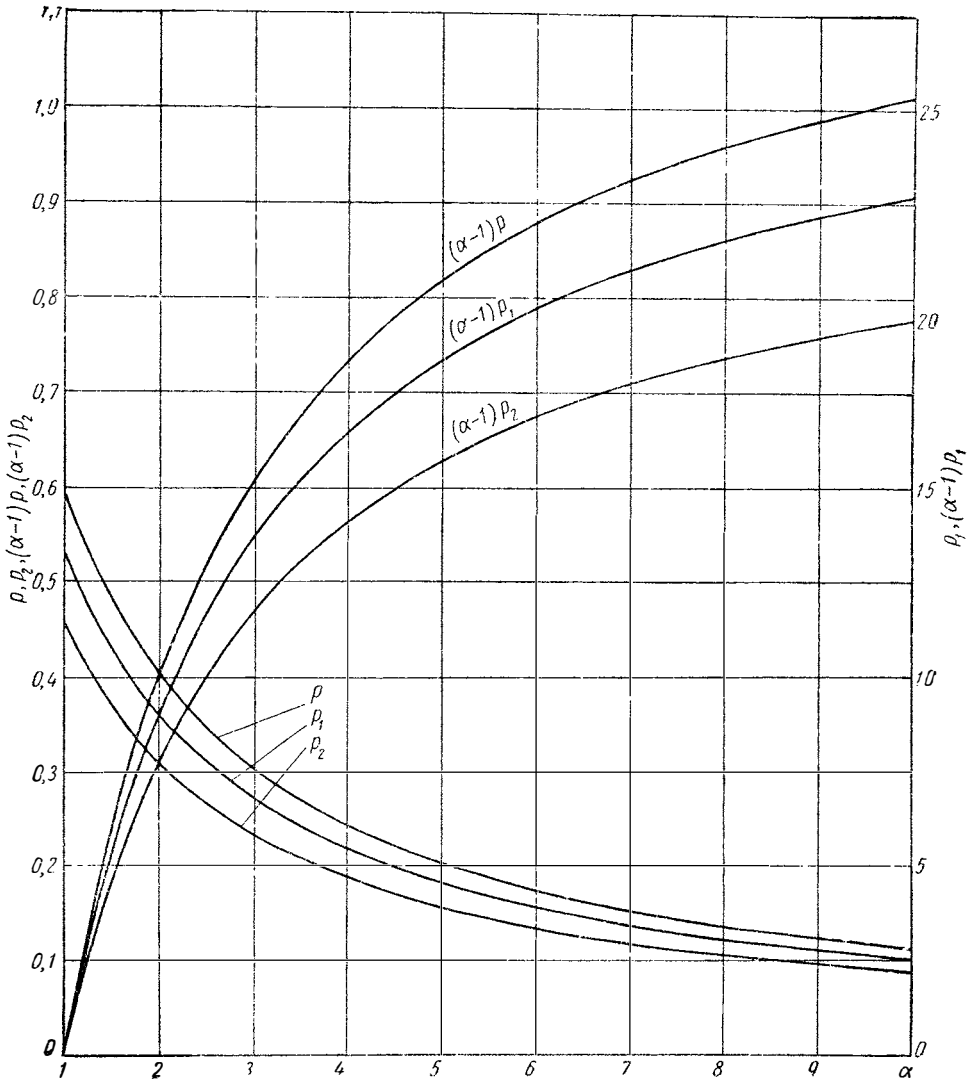
Дагестанский газ (Изербаш)

α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1)p$	$(\alpha - 1)p_1$	$(\alpha - 1)p_2$	α	p	p_1	p_2	$(\alpha - 1)p$	$(\alpha - 1)p_1$	$(\alpha - 1)p_2$
1,0	0,07686	1,7229	0,06178	0	0	0	5,6	0,01504	0,3370	0,011620	0,06917	1,5503	0,05345
1,2	0,06521	1,4616	0,05202	0,01304	0,2923	0,01040	5,8	0,01453	0,3256	0,011224	0,06973	1,5631	0,05388
1,4	0,05662	1,2691	0,04492	0,02265	0,5076	0,01797	6,0	0,01405	0,3150	0,010854	0,07027	1,5750	0,05427
1,6	0,05003	1,1214	0,03953	0,03002	0,6728	0,02372	6,2	0,01361	0,3050	0,010508	0,07076	1,5861	0,05464
1,8	0,04482	1,0045	0,03529	0,03585	0,8036	0,02823	6,4	0,01319	0,2957	0,010183	0,07123	1,5966	0,05499
2,0	0,04058	0,9097	0,03187	0,04058	0,9097	0,30187	6,6	0,01280	0,2869	0,009877	0,07167	1,6064	0,05531
2,2	0,03708	0,8312	0,02906	0,04450	0,9975	0,03487	6,8	0,01243	0,2786	0,009589	0,07208	1,6157	0,05562
2,4	0,03414	0,7652	0,02670	0,04779	1,0713	0,03738	7,0	0,01208	0,2708	0,009318	0,07247	1,6245	0,05591
2,6	0,03163	0,7089	0,02470	0,05060	1,1343	0,03952	7,2	0,01175	0,2634	0,009062	0,07284	1,6328	0,05618
2,8	0,02946	0,6603	0,02297	0,05303	1,1886	0,04135	7,4	0,01144	0,2563	0,008819	0,07319	1,6405	0,05644
3,0	0,02757	0,6180	0,02148	0,05514	1,2360	0,04296	7,6	0,01114	0,2497	0,008589	0,07352	1,6480	0,05669
3,2	0,02591	0,5807	0,02016	0,05700	1,2776	0,04435	7,8	0,01086	0,2434	0,008370	0,07383	1,6550	0,05692
3,4	0,02444	0,5478	0,01900	0,05865	1,3146	0,04559	8,0	0,01059	0,2374	0,008163	0,07414	1,6617	0,05714
3,6	0,02312	0,5183	0,01796	0,06012	1,3475	0,04670	8,2	0,01034	0,2317	0,007965	0,07442	1,6681	0,05735
3,8	0,02194	0,4918	0,01703	0,06144	1,3771	0,04769	8,4	0,01009	0,2263	0,007777	0,07470	1,6743	0,05755
4,0	0,02088	0,4680	0,01619	0,06263	1,4039	0,04858	8,6	0,009862	0,2211	0,007598	0,07495	1,6800	0,05774
4,2	0,01991	0,4463	0,01543	0,06371	1,4281	0,04939	8,8	0,009641	0,2161	0,007426	0,07520	1,6856	0,05792
4,4	0,01903	0,4265	0,01474	0,06470	1,4502	0,05013	9,0	0,009430	0,2114	0,007262	0,07544	1,6910	0,05810
4,6	0,01822	0,4084	0,01411	0,06560	1,4704	0,05080	9,2	0,009227	0,2068	0,007106	0,07566	1,6959	0,05827
4,8	0,01748	0,3918	0,01353	0,06643	1,4890	0,05142	9,4	0,009033	0,2025	0,006955	0,07588	1,7007	0,05842
5,0	0,01680	0,3765	0,01300	0,06719	1,5061	0,05199	9,6	0,008847	0,1983	0,006812	0,07608	1,7054	0,05858
5,2	0,01617	0,3624	0,01250	0,06790	1,5220	0,05251	9,8	0,008669	0,1943	0,006673	0,07629	1,7099	0,05872
5,4	0,01558	0,3492	0,01205	0,06856	1,5367	0,05300	10,0	0,008498	0,1905	0,006541	0,07648	1,7143	0,05887



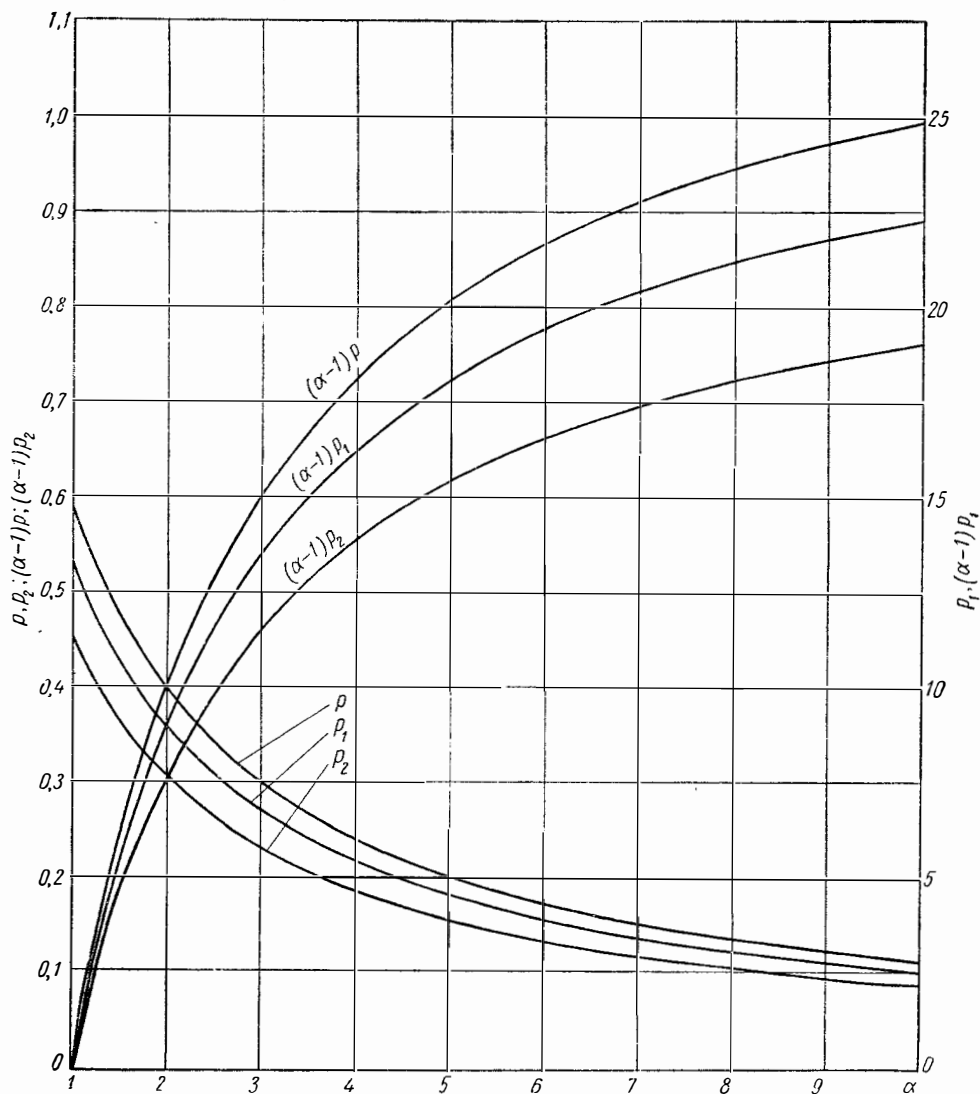
Фиг. 11. Коэффициенты для подсчета термодинамических величин продуктов сгорания доменного газа:

$$p_i = f(\alpha); \quad (\alpha - 1) p_i = f(\alpha)$$



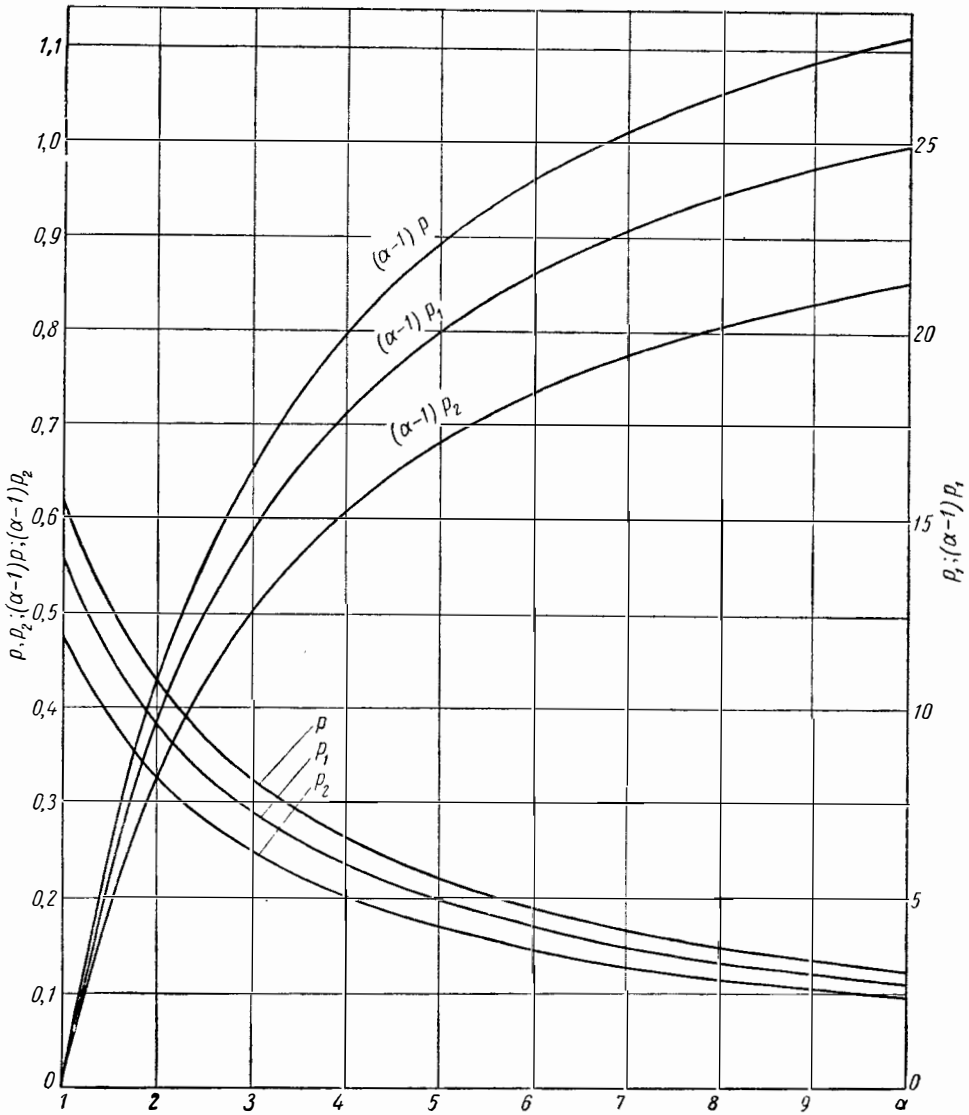
Фиг. 12. Коэффициенты для подсчета термодинамических величин продуктов сгорания газа подземной газификации подмосковного угля состава I:

$$v_i = f(\alpha); \quad (\alpha - 1) p_i = f(\alpha).$$



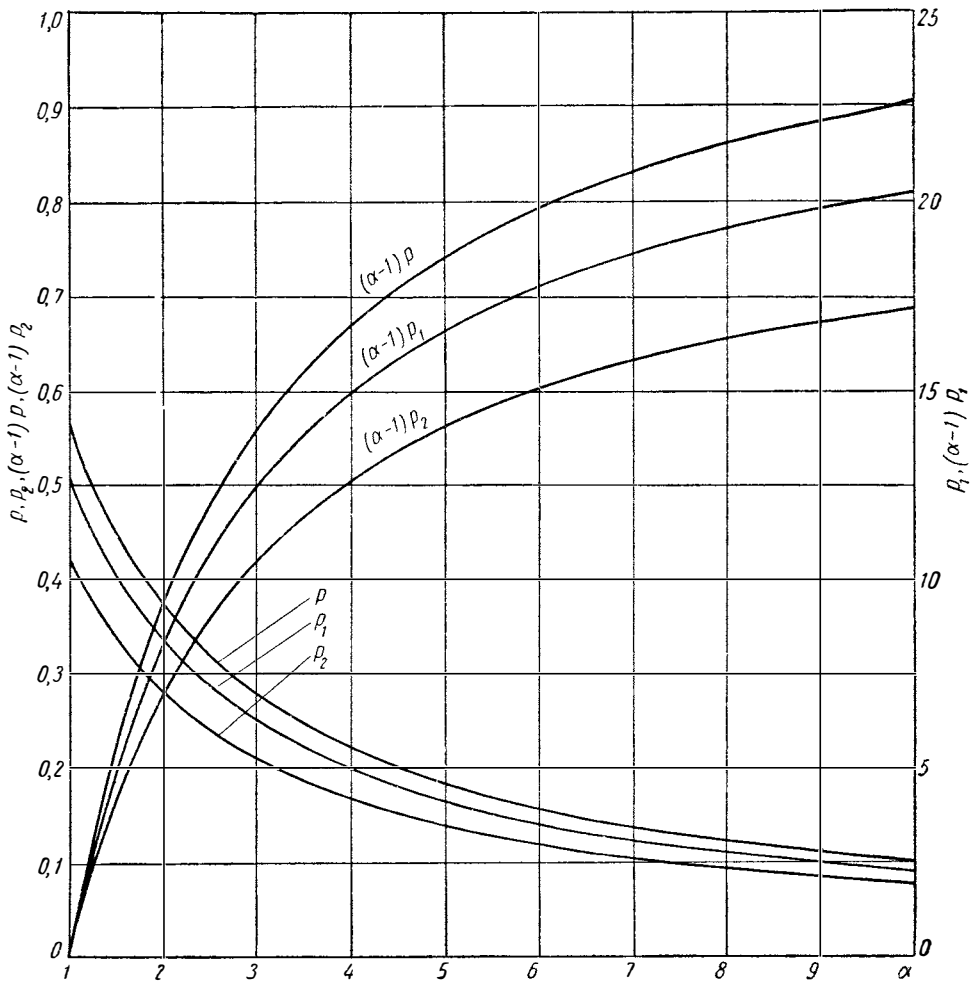
Фиг. 13. Коэффициенты для подсчета термодинамических величин продуктов сгорания газа подземной газификации подмосковного угля состава II:

$$v_i = f(\alpha); \quad (\alpha - 1) p_i = f(\alpha).$$



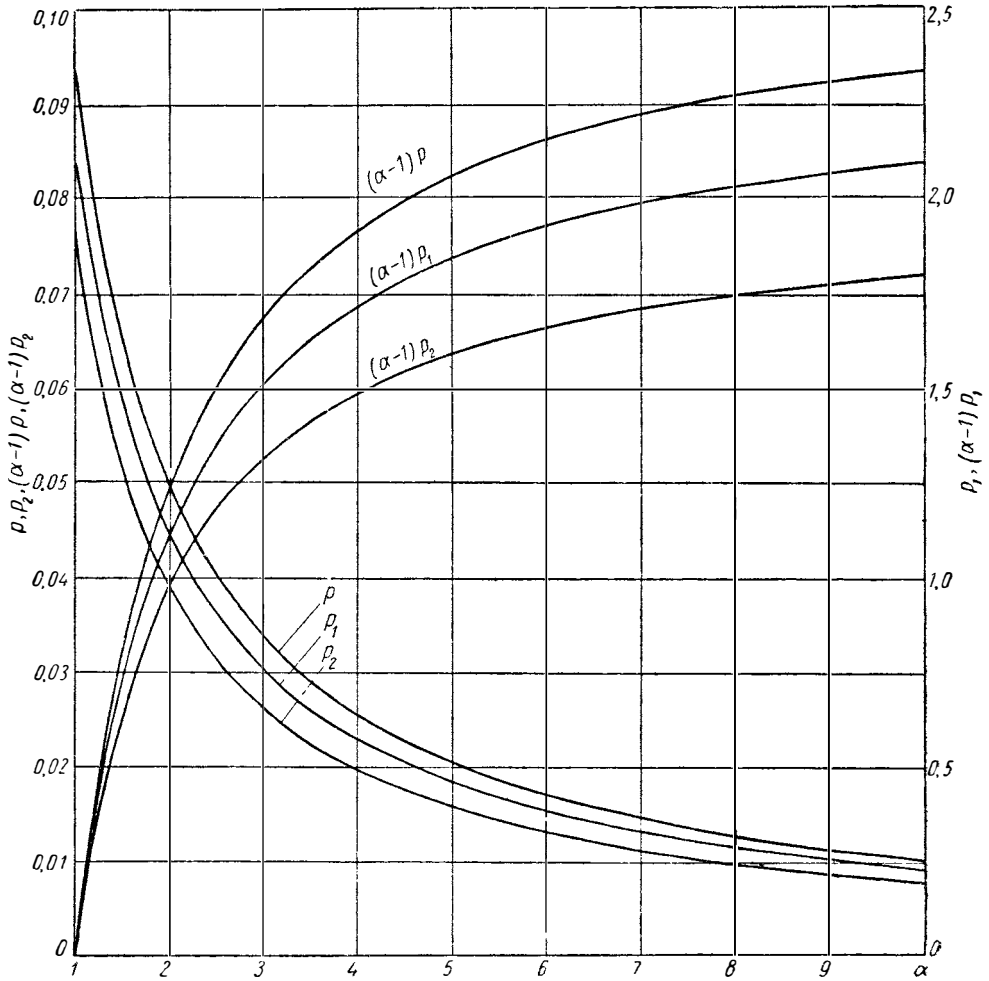
Фиг. 14. Коэффициенты для подсчета термодинамических величин продуктов сгорания газа подземной газификации подмосковного угля состава III:

$$\rho_i = f(\alpha); (\alpha - 1)\rho_i = f(\alpha).$$



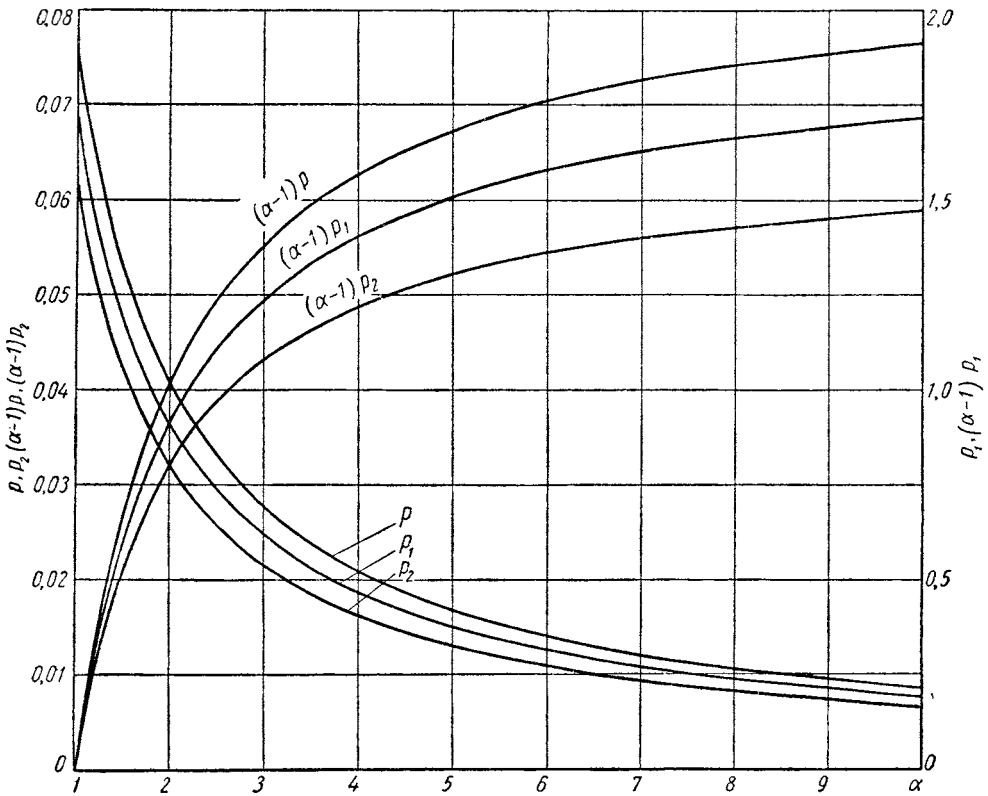
Фиг. 15. Коэффициенты для подсчета термодинамических величин продуктов сгорания газа подземной газификации каменного (днецкого) угля:

$$\rho_i = f(\alpha); \quad (\alpha - 1)\rho_i = f(\alpha).$$



Фиг. 16. Коэффициенты для подсчета термодинамических величин продуктов сгорания саратовского газа:

$$p_i = f(\alpha); \quad (\alpha - 1)p_i = f(\alpha).$$



Фиг. 17. Коэффициенты для подсчета термодинамических величин продуктов сгорания дагестанского газа:

$$v_i = f(\alpha); \quad (\alpha - 1)p_i = f(\alpha).$$

ХII. ТЕПЛОЕМКОСТИ, ЭНТАЛЬПИИ
И ЭНТРОПИИ ПРОДУКТОВ
ПОЛНОГО И НЕПОЛНОГО
СГОРАНИЯ БЕНЗИНА

(таблицы 326—337)

Теплоемкость и энтальпия продуктов сгорания бензина
 Полное сгорание ($\varphi = 1$); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											Энтальпия			
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}	μ	i	i'
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град				ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³
0	7,28	5,29	7,28	5,29	0,252	0,183	0,252	0,183	0,325	0,236	0,325	0,236	0	0	0
100	7,46	5,47	7,37	5,38	0,258	0,189	0,255	0,186	0,333	0,244	0,329	0,240	737	25,5	32,9
200	7,64	5,65	7,46	5,47	0,265	0,196	0,258	0,189	0,341	0,252	0,333	0,244	1 492	51,6	66,6
300	7,85	5,86	7,55	5,56	0,272	0,203	0,262	0,193	0,350	0,261	0,337	0,248	2 270	78,6	101,1
400	8,07	6,08	7,64	5,65	0,280	0,211	0,265	0,196	0,360	0,271	0,341	0,252	3 060	106,0	136,4
500	8,27	6,28	7,76	5,77	0,286	0,217	0,269	0,200	0,369	0,280	0,346	0,257	3 880	134,5	173
600	8,50	6,51	7,87	5,88	0,294	0,225	0,273	0,204	0,379	0,290	0,351	0,262	4 720	164	211
700	8,67	6,68	7,96	5,97	0,300	0,231	0,276	0,207	0,387	0,298	0,355	0,266	5 570	193	249
800	8,85	6,86	8,07	6,08	0,307	0,238	0,280	0,211	0,395	0,306	0,360	0,271	6 460	224	288
900	9,01	7,02	8,16	6,17	0,312	0,243	0,283	0,214	0,402	0,313	0,364	0,275	7 340	255	328
1000	9,15	7,16	8,25	6,26	0,317	0,248	0,286	0,217	0,408	0,319	0,368	0,279	8 250	286	368
1100	9,28	7,29	8,34	6,35	0,321	0,252	0,289	0,220	0,414	0,325	0,372	0,283	9 170	318	409
1200	9,37	7,38	8,43	6,44	0,325	0,256	0,292	0,223	0,418	0,329	0,376	0,287	10 120	350	451
1300	9,48	7,49	8,50	6,51	0,328	0,259	0,294	0,225	0,423	0,334	0,379	0,290	11 050	382	493
1400	9,57	7,58	8,56	6,57	0,331	0,262	0,296	0,227	0,427	0,338	0,382	0,293	11 980	414	535
1500	9,64	7,65	8,65	6,66	0,334	0,265	0,300	0,231	0,430	0,341	0,386	0,297	12 980	450	579
1600	9,73	7,74	8,72	6,73	0,337	0,268	0,302	0,233	0,434	0,345	0,389	0,300	13 950	483	622
1700	9,77	7,78	8,76	6,77	0,338	0,269	0,303	0,234	0,438	0,347	0,391	0,302	14 890	515	665
1800	9,84	7,85	8,83	6,84	0,341	0,272	0,306	0,237	0,439	0,350	0,394	0,305	15 900	551	709
1900	9,88	7,89	8,88	6,89	0,342	0,273	0,308	0,239	0,441	0,352	0,396	0,307	16 900	585	752
2000	9,93	7,94	8,94	6,95	0,344	0,275	0,310	0,241	0,443	0,354	0,399	0,310	17 900	620	798
2100	9,97	7,98	8,99	7,00	0,345	0,276	0,311	0,242	0,445	0,356	0,401	0,312	18 900	653	842
2200	10,02	8,03	9,03	7,04	0,347	0,278	0,313	0,244	0,447	0,358	0,403	0,314	19 900	689	887
2300	10,04	8,05	9,08	7,09	0,348	0,279	0,315	0,246	0,448	0,359	0,405	0,316	20 900	725	932
2400	10,09	8,10	9,12	7,13	0,349	0,280	0,316	0,247	0,450	0,361	0,407	0,318	21 900	758	977
2500	10,11	8,12	9,15	7,16	0,350	0,281	0,317	0,248	0,451	0,362	0,408	0,319	22 900	793	1020

Теплоемкость и энтальпия продуктов сгорания бензина
 Полное сгорание ($\varphi = 1$); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2$

Температура <i>t</i>	Теплоемкость											Энтальпия			
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град				ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³
0	7,13	5,14	7,13	5,14	0,247	0,178	0,247	0,178	0,318	0,229	0,318	0,229	0	0	0
100	7,24	5,25	7,19	5,20	0,250	0,181	0,249	0,180	0,323	0,234	0,321	0,232	719	24,9	32,1
200	7,37	5,38	7,26	5,27	0,255	0,186	0,251	0,182	0,329	0,240	0,324	0,235	1 452	50,2	64,8
300	7,55	5,56	7,33	5,34	0,261	0,192	0,253	0,184	0,337	0,248	0,327	0,238	2 200	75,9	98,1
400	7,76	5,77	7,42	5,43	0,268	0,199	0,257	0,188	0,346	0,257	0,331	0,242	2 970	102,8	132,4
500	7,93	5,94	7,49	5,50	0,274	0,205	0,259	0,190	0,354	0,265	0,334	0,245	3 750	129,5	167
600	8,11	6,12	7,58	5,59	0,280	0,211	0,262	0,193	0,362	0,273	0,338	0,249	4 550	157	203
700	8,29	6,30	7,67	5,68	0,287	0,218	0,265	0,196	0,370	0,281	0,342	0,253	5 370	186	239
800	8,47	6,48	7,76	5,77	0,293	0,224	0,268	0,199	0,378	0,289	0,346	0,257	6 210	214	277
900	8,58	6,59	7,85	5,86	0,297	0,228	0,271	0,202	0,383	0,294	0,350	0,261	7 070	244	315
1000	8,72	6,73	7,93	5,94	0,302	0,233	0,274	0,205	0,389	0,300	0,354	0,265	7 930	274	354
1100	8,83	6,84	8,00	6,01	0,305	0,236	0,277	0,208	0,394	0,305	0,357	0,268	8 800	305	393
1200	8,92	6,93	8,07	6,08	0,308	0,239	0,279	0,210	0,398	0,309	0,360	0,271	9 680	335	432
1300	9,01	7,02	8,14	6,15	0,312	0,243	0,281	0,212	0,402	0,313	0,363	0,274	10 580	365	472
1400	9,08	7,09	8,20	6,21	0,314	0,245	0,284	0,215	0,405	0,316	0,366	0,277	11 480	398	512
1500	9,15	7,16	8,27	6,28	0,316	0,247	0,286	0,217	0,408	0,319	0,369	0,280	12 400	429	554
1600	9,21	7,22	8,34	6,35	0,318	0,249	0,288	0,219	0,411	0,322	0,372	0,283	13 340	461	595
1700	9,26	7,27	8,38	6,39	0,320	0,251	0,290	0,221	0,413	0,324	0,374	0,285	14 250	493	636
1800	9,30	7,31	8,43	6,44	0,322	0,253	0,291	0,222	0,415	0,326	0,376	0,287	15 200	524	677
1900	9,35	7,36	8,47	6,48	0,323	0,254	0,293	0,224	0,417	0,328	0,378	0,289	16 100	557	718
2000	9,39	7,40	8,52	6,53	0,325	0,256	0,295	0,226	0,419	0,330	0,380	0,291	17 000	590	760
2100	9,44	7,45	8,56	6,57	0,326	0,257	0,296	0,227	0,421	0,332	0,382	0,293	18 000	622	802
2200	9,46	7,47	8,61	6,62	0,327	0,258	0,298	0,229	0,422	0,333	0,384	0,295	18 900	656	845
2300	9,50	7,51	8,65	6,66	0,328	0,259	0,299	0,230	0,424	0,335	0,386	0,297	19 900	688	888
2400	9,53	7,54	8,70	6,71	0,330	0,261	0,301	0,232	0,425	0,336	0,388	0,299	20 900	722	931
2500	9,55	7,56	8,72	6,73	0,330	0,261	0,302	0,233	0,426	0,337	0,389	0,300	21 800	755	973

Теплоемкость и энтальпия продуктов сгорания бензина
 Полное сгорание ($\varphi = 1$); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 3$

Температура	Теплоемкость												Энтальпия		
	μc_p	μc_v	$\mu c_{рт}$	$\mu c_{вт}$	c_p	c_v	$c_{рт}$	$c_{вт}$	c'_p	c'_v	$c'_{рт}$	$c'_{вт}$	μi	i	i'
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град				ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³
°С															
0	7,06	5,07	7,06	5,07	0,244	0,175	0,244	0,175	0,315	0,226	0,315	0,226	0	0	0
100	7,17	5,18	7,11	5,12	0,248	0,179	0,246	0,177	0,320	0,231	0,317	0,228	711	24,6	31,7
200	7,28	5,29	7,17	5,18	0,252	0,183	0,248	0,179	0,325	0,236	0,320	0,231	1 434	49,6	64,0
300	7,46	5,47	7,24	5,25	0,258	0,189	0,250	0,181	0,333	0,244	0,323	0,234	2 170	75,0	96,9
400	7,64	5,65	7,31	5,32	0,264	0,195	0,253	0,184	0,341	0,252	0,326	0,237	2 920	101,2	130,4
500	7,82	5,83	7,40	5,41	0,270	0,201	0,256	0,187	0,349	0,260	0,330	0,241	3 700	128,0	165
600	8,00	6,01	7,49	5,50	0,277	0,208	0,259	0,190	0,357	0,268	0,334	0,245	4 490	155	200
700	8,16	6,17	7,58	5,59	0,282	0,213	0,262	0,193	0,364	0,275	0,338	0,249	5 310	183	237
800	8,32	6,33	7,67	5,68	0,288	0,219	0,265	0,196	0,371	0,282	0,342	0,253	6 140	212	274
900	8,45	6,46	7,73	5,74	0,292	0,223	0,267	0,198	0,377	0,288	0,345	0,256	6 960	240	311
1000	8,54	6,55	7,82	5,83	0,295	0,226	0,270	0,201	0,381	0,292	0,349	0,260	7 820	270	349
1100	8,65	6,66	7,89	5,90	0,299	0,230	0,273	0,204	0,386	0,297	0,352	0,263	8 680	300	387
1200	8,74	6,75	7,96	5,97	0,302	0,233	0,275	0,206	0,390	0,301	0,355	0,266	9 550	330	426
1300	8,81	6,82	8,02	6,03	0,305	0,236	0,277	0,208	0,393	0,304	0,358	0,269	10 430	360	465
1400	8,88	6,89	8,09	6,10	0,307	0,238	0,280	0,211	0,396	0,307	0,361	0,272	11 300	392	505
1500	8,94	6,95	8,14	6,15	0,309	0,240	0,281	0,212	0,399	0,310	0,363	0,274	12 210	422	545
1600	9,01	7,02	8,20	6,21	0,312	0,243	0,284	0,215	0,402	0,313	0,366	0,277	13 120	454	586
1700	9,06	7,07	8,25	6,26	0,313	0,244	0,285	0,216	0,404	0,315	0,368	0,279	14 030	485	626
1800	9,10	7,11	8,29	6,30	0,315	0,246	0,287	0,218	0,406	0,317	0,370	0,281	14 920	517	666
1900	9,15	7,16	8,34	6,35	0,316	0,247	0,288	0,219	0,408	0,319	0,372	0,283	15 850	547	707
2000	9,19	7,20	8,38	6,39	0,317	0,248	0,290	0,221	0,410	0,321	0,374	0,285	16 800	580	748
2100	9,21	7,22	8,43	6,44	0,318	0,249	0,291	0,222	0,411	0,322	0,376	0,287	17 700	611	790
2200	9,26	7,27	8,45	6,46	0,320	0,251	0,292	0,223	0,413	0,324	0,377	0,288	18 600	642	829
2300	9,30	7,31	8,47	6,48	0,321	0,252	0,293	0,224	0,415	0,326	0,378	0,289	19 500	674	869
2400	9,32	7,33	8,51	6,52	0,322	0,253	0,294	0,225	0,416	0,327	0,380	0,291	20 400	706	912
2500	9,35	7,36	8,54	6,55	0,323	0,254	0,295	0,226	0,417	0,328	0,381	0,292	21 400	738	953

Теплоемкость и энтальпия продуктов сгорания бензина
 Полное сгорание ($\varphi = 1$); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 4$

Температура t °C	Теплоемкость												Энтальпия		
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}	μi	i	i'
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град				ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³
0	7,04	5,05	7,04	5,05	0,243	0,174	0,243	0,174	0,314	0,225	0,314	0,225	0	0	0
100	7,13	5,14	7,08	5,09	0,246	0,177	0,245	0,176	0,318	0,229	0,316	0,227	708	24,5	31,6
200	7,24	5,25	7,13	5,14	0,250	0,181	0,246	0,177	0,323	0,234	0,318	0,229	1 426	49,2	63,6
300	7,40	5,41	7,19	5,20	0,255	0,186	0,248	0,179	0,330	0,241	0,321	0,232	2 160	74,4	96,3
400	7,58	5,59	7,26	5,27	0,262	0,193	0,251	0,182	0,338	0,249	0,324	0,235	2 900	100,4	129,6
500	7,76	5,77	7,35	5,36	0,268	0,199	0,254	0,185	0,346	0,257	0,328	0,239	3 680	127,0	164
600	7,93	5,94	7,42	5,43	0,274	0,205	0,256	0,187	0,354	0,265	0,331	0,242	4 450	154	199
700	8,09	6,10	7,51	5,52	0,279	0,210	0,259	0,190	0,361	0,272	0,335	0,246	5 260	181	235
800	8,23	6,24	7,60	5,61	0,284	0,215	0,262	0,193	0,367	0,278	0,339	0,250	6 080	210	271
900	8,36	6,37	7,67	5,68	0,289	0,220	0,265	0,196	0,373	0,284	0,342	0,253	6 900	239	308
1000	8,47	6,48	7,73	5,74	0,293	0,224	0,267	0,198	0,378	0,289	0,345	0,256	7 730	267	345
1100	8,56	6,57	7,80	5,81	0,296	0,227	0,269	0,200	0,382	0,293	0,348	0,259	8 580	296	383
1200	8,65	6,66	7,87	5,88	0,299	0,230	0,271	0,202	0,386	0,297	0,351	0,262	9 440	325	421
1300	8,72	6,73	7,93	5,94	0,301	0,232	0,274	0,205	0,389	0,300	0,354	0,265	10 310	356	460
1400	8,79	6,80	8,00	6,01	0,303	0,234	0,276	0,207	0,392	0,303	0,357	0,268	11 200	386	500
1500	8,85	6,86	8,05	6,06	0,306	0,237	0,278	0,209	0,395	0,306	0,359	0,270	12 080	417	539
1600	8,92	6,93	8,09	6,10	0,308	0,239	0,279	0,210	0,398	0,309	0,361	0,272	12 940	446	578
1700	8,97	6,98	8,16	6,17	0,310	0,241	0,282	0,213	0,400	0,311	0,364	0,275	13 870	479	619
1800	9,01	7,02	8,20	6,21	0,311	0,242	0,283	0,214	0,402	0,313	0,366	0,277	14 760	509	659
1900	9,06	7,07	8,25	6,26	0,313	0,244	0,285	0,216	0,404	0,315	0,368	0,279	15 680	542	699
2000	9,08	7,09	8,29	6,30	0,314	0,245	0,286	0,217	0,405	0,316	0,370	0,281	16 600	572	740
2100	9,12	7,13	8,32	6,33	0,315	0,246	0,287	0,218	0,407	0,318	0,371	0,282	17 500	603	779
2200	9,15	7,16	8,36	6,37	0,316	0,247	0,289	0,220	0,408	0,319	0,373	0,284	18 400	636	821
2300	9,19	7,20	8,41	6,42	0,317	0,248	0,290	0,221	0,410	0,321	0,375	0,286	19 300	667	863
2400	9,21	7,22	8,43	6,44	0,318	0,249	0,291	0,222	0,411	0,322	0,376	0,287	20 200	698	902
2500	9,23	7,24	8,47	6,48	0,319	0,250	0,292	0,223	0,412	0,323	0,378	0,289	21 200	730	945

Теплоемкость и энтальпия продуктов сгорания бензина
 Полное сгорание ($\varphi = 1$); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 5$

Температура t	Теплоемкость												Энтальпия		
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}	μi	i	i'
t °C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град				ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³
0	7,02	5,03	7,02	5,03	0,243	0,174	0,243	0,174	0,313	0,224	0,313	0,224	0	0	0
100	7,11	5,12	7,06	5,07	0,246	0,177	0,245	0,176	0,317	0,228	0,315	0,226	706	24,5	31,5
200	7,22	5,23	7,11	5,12	0,250	0,181	0,246	0,177	0,322	0,233	0,317	0,228	1 422	49,2	63,4
300	7,37	5,38	7,15	5,16	0,256	0,187	0,248	0,179	0,329	0,240	0,319	0,230	2 145	74,4	95,7
400	7,55	5,56	7,24	5,25	0,262	0,193	0,251	0,182	0,337	0,248	0,323	0,234	2 900	100,4	129,2
500	7,73	5,74	7,31	5,32	0,268	0,199	0,253	0,184	0,345	0,256	0,326	0,237	3 660	126,5	163
600	7,89	5,90	7,40	5,41	0,274	0,205	0,257	0,188	0,352	0,263	0,330	0,241	4 440	154	198
700	8,05	6,06	7,49	5,50	0,279	0,210	0,260	0,191	0,359	0,270	0,334	0,245	5 240	182	234
800	8,18	6,19	7,55	5,56	0,284	0,215	0,262	0,193	0,365	0,276	0,337	0,248	6 040	210	270
900	8,32	6,33	7,64	5,65	0,288	0,219	0,265	0,196	0,371	0,282	0,341	0,252	6 880	239	307
1000	8,41	6,42	7,71	5,72	0,292	0,223	0,267	0,198	0,375	0,286	0,344	0,255	7 710	267	344
1100	8,52	6,53	7,78	5,79	0,295	0,226	0,270	0,201	0,380	0,291	0,347	0,258	8 560	297	382
1200	8,58	6,59	7,82	5,83	0,298	0,229	0,271	0,202	0,383	0,294	0,349	0,260	9 380	325	419
1300	8,65	6,66	7,89	5,90	0,300	0,231	0,274	0,205	0,386	0,297	0,352	0,263	10 260	356	458
1400	8,72	6,73	7,96	5,97	0,302	0,233	0,276	0,207	0,389	0,300	0,355	0,266	11 140	386	497
1500	8,79	6,80	8,00	6,01	0,305	0,236	0,278	0,209	0,392	0,303	0,357	0,268	12 000	417	536
1600	8,83	6,84	8,05	6,06	0,306	0,237	0,279	0,210	0,394	0,305	0,359	0,270	12 890	446	574
1700	8,90	6,91	8,09	6,10	0,309	0,240	0,281	0,212	0,397	0,308	0,361	0,272	13 750	478	614
1800	8,94	6,95	8,16	6,17	0,310	0,241	0,283	0,214	0,399	0,310	0,364	0,275	14 690	509	655
1900	8,97	6,98	8,20	6,21	0,311	0,242	0,285	0,216	0,400	0,311	0,366	0,277	15 600	542	695
2000	9,01	7,02	8,25	6,26	0,313	0,244	0,286	0,217	0,402	0,313	0,368	0,279	16 500	572	736
2100	9,06	7,07	8,27	6,28	0,314	0,245	0,287	0,218	0,404	0,315	0,369	0,280	17 400	603	775
2200	9,08	7,09	8,32	6,33	0,315	0,246	0,288	0,219	0,405	0,316	0,371	0,282	18 300	634	816
2300	9,12	7,13	8,34	6,35	0,316	0,247	0,289	0,220	0,407	0,318	0,372	0,283	19 200	665	856
2400	9,15	7,16	8,36	6,37	0,317	0,248	0,290	0,221	0,408	0,319	0,373	0,284	20 100	696	895
2500	9,17	7,18	8,41	6,42	0,318	0,249	0,292	0,223	0,409	0,320	0,375	0,286	21 000	730	938

Энтропия продуктов сгорания бензина при различных избытках воздуха
 Полное сгорание ($\varphi = 1$)

Температура	$\alpha = 1$		$\alpha = 2$		$\alpha = 3$		$\alpha = 4$		$\alpha = 5$	
	s'_p	s'_v	s'_p	s'_v	s'_p	s'_v	s'_p	s'_v	s'_p	s'_v
°C	ккал/м.м ³ град									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0,1022	0,0746	0,0996	0,0720	0,0986	0,0710	0,0981	0,0705	0,0978	0,0702
200	0,182	0,133	0,177	0,128	0,175	0,126	0,174	0,125	0,174	0,125
300	0,247	0,181	0,239	0,173	0,236	0,170	0,235	0,169	0,234	0,168
400	0,305	0,226	0,296	0,216	0,292	0,212	0,290	0,210	0,289	0,209
500	0,356	0,264	0,345	0,253	0,340	0,248	0,338	0,246	0,337	0,245
600	0,401	0,298	0,388	0,285	0,383	0,280	0,381	0,278	0,379	0,276
700	0,443	0,330	0,428	0,315	0,423	0,310	0,419	0,306	0,418	0,305
800	0,482	0,361	0,465	0,344	0,459	0,338	0,455	0,334	0,453	0,332
900	0,518	0,389	0,498	0,369	0,492	0,363	0,488	0,359	0,486	0,357
1000	0,550	0,414	0,530	0,394	0,522	0,386	0,518	0,382	0,516	0,380
1100	0,581	0,438	0,559	0,416	0,551	0,408	0,547	0,404	0,545	0,402
1200	0,611	0,462	0,587	0,438	0,579	0,430	0,574	0,425	0,572	0,423
1300	0,638	0,483	0,608	0,453	0,604	0,449	0,599	0,444	0,597	0,442
1400	0,665	0,505	0,638	0,477	0,629	0,468	0,624	0,463	0,621	0,460
1500	0,690	0,524	0,661	0,495	0,652	0,486	0,646	0,480	0,643	0,477
1600	0,713	0,543	0,685	0,514	0,674	0,503	0,668	0,497	0,665	0,494
1700	0,736	0,561	0,706	0,531	0,695	0,520	0,689	0,514	0,686	0,511
1800	0,758	0,578	0,726	0,546	0,715	0,535	0,709	0,529	0,705	0,525
1900	0,779	0,596	0,745	0,561	0,734	0,550	0,727	0,543	0,724	0,540
2000	0,797	0,609	0,764	0,576	0,752	0,561	0,746	0,558	0,742	0,554
2100	0,816	0,624	0,782	0,590	0,770	0,578	0,763	0,571	0,759	0,567
2200	0,834	0,639	0,799	0,604	0,787	0,592	0,780	0,585	0,776	0,581
2300	0,852	0,653	0,816	0,617	0,803	0,604	0,796	0,597	0,792	0,593
2400	0,869	0,667	0,833	0,631	0,819	0,617	0,812	0,610	0,807	0,605
2500	0,886	0,681	0,848	0,643	0,835	0,630	0,827	0,622	0,823	0,618

Теплоемкость и энтальпия продуктов сгорания бензина
Неполное сгорание ($\varphi = 0,8$); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$

Температура t	Теплоемкость								Энтальпия						
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'
°С	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град				ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³
0	7,19	5,20	7,19	5,20	0,255	0,184	0,255	0,184	0,321	0,232	0,321	0,232	0	0	0
100	7,33	5,34	7,26	5,27	0,261	0,190	0,258	0,187	0,327	0,238	0,324	0,235	726	25,8	32,4
200	7,48	5,49	7,33	5,34	0,266	0,195	0,261	0,190	0,334	0,245	0,327	0,238	1 466	52,2	65,4
300	7,67	5,68	7,41	5,42	0,273	0,202	0,264	0,193	0,342	0,253	0,331	0,242	2 220	79,2	99,3
400	7,87	5,88	7,50	5,51	0,280	0,209	0,267	0,196	0,351	0,262	0,335	0,246	3 000	106,8	134,0
500	8,07	6,08	7,59	5,60	0,287	0,216	0,270	0,199	0,360	0,271	0,339	0,250	3 800	135,0	170
600	8,26	6,27	7,69	5,70	0,294	0,223	0,273	0,202	0,369	0,280	0,343	0,254	4 610	164	206
700	8,44	6,45	7,79	5,80	0,300	0,229	0,277	0,206	0,377	0,288	0,348	0,259	5 450	194	244
800	8,61	6,62	7,88	5,89	0,306	0,235	0,280	0,209	0,384	0,295	0,352	0,263	6 300	224	282
900	8,76	6,77	7,97	5,98	0,312	0,241	0,283	0,212	0,391	0,302	0,356	0,267	7 170	255	320
1000	8,89	6,90	8,05	6,06	0,316	0,245	0,286	0,215	0,397	0,308	0,359	0,270	8 050	286	359
1100	9,00	7,01	8,13	6,14	0,320	0,249	0,289	0,218	0,402	0,313	0,363	0,274	8 940	318	399
1200	9,11	7,12	8,21	6,22	0,324	0,253	0,292	0,221	0,406	0,317	0,366	0,277	9 850	350	439
1300	9,20	7,21	8,28	6,29	0,327	0,256	0,294	0,223	0,410	0,321	0,369	0,280	10 760	382	480
1400	9,28	7,29	8,35	6,36	0,330	0,259	0,297	0,226	0,414	0,325	0,373	0,284	11 690	416	522
1500	9,36	7,37	8,42	6,43	0,333	0,262	0,299	0,228	0,418	0,329	0,376	0,287	12 630	449	564
1600	9,43	7,44	8,48	6,49	0,335	0,264	0,302	0,231	0,421	0,332	0,378	0,289	13 570	483	605
1700	9,48	7,49	8,54	6,55	0,337	0,266	0,304	0,233	0,423	0,334	0,381	0,292	14 520	517	648
1800	9,53	7,54	8,58	6,59	0,339	0,268	0,305	0,234	0,425	0,336	0,383	0,294	15 400	549	689
1900	9,59	7,60	8,64	6,65	0,341	0,270	0,307	0,236	0,428	0,339	0,385	0,296	16 400	583	732
2000	9,63	7,64	8,69	6,70	0,342	0,271	0,309	0,238	0,430	0,341	0,388	0,299	17 400	618	776
2100	9,67	7,68	8,73	6,74	0,344	0,273	0,310	0,239	0,431	0,342	0,389	0,300	18 300	651	828
2200	9,71	7,72	8,78	6,79	0,345	0,274	0,312	0,241	0,433	0,344	0,391	0,302	19 300	686	860
2300	9,74	7,75	8,82	6,83	0,346	0,275	0,314	0,243	0,435	0,346	0,393	0,304	20 300	722	904
2400	9,77	7,78	8,86	6,87	0,347	0,276	0,315	0,244	0,436	0,347	0,395	0,306	21 300	756	948
2500	9,80	7,81	8,89	6,90	0,349	0,278	0,316	0,245	0,437	0,348	0,397	0,308	22 200	790	993

Теплоемкость и энтальпия продуктов сгорания
Неполное сгорание ($\varphi = 0,8$); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2$

Температура t	Теплоемкость								Энтальпия						
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}	μi	i	i'
°C	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град				ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³
0	7,08	5,09	7,08	5,09	0,248	0,178	0,248	0,178	0,316	0,227	0,316	0,227	0	0	0
100	7,17	5,18	7,12	5,13	0,251	0,181	0,250	0,180	0,320	0,231	0,318	0,229	712	25,0	31,8
200	7,30	5,31	7,17	5,18	0,256	0,186	0,251	0,181	0,326	0,237	0,320	0,231	1 434	50,2	64,0
300	7,46	5,47	7,24	5,25	0,262	0,192	0,254	0,184	0,333	0,244	0,323	0,234	2 170	76,2	96,9
400	7,64	5,65	7,32	5,33	0,268	0,198	0,257	0,187	0,341	0,252	0,327	0,238	2 930	102,8	130,8
500	7,83	5,84	7,40	5,41	0,275	0,205	0,260	0,190	0,349	0,260	0,330	0,241	3 700	130,0	165
600	8,01	6,02	7,48	5,49	0,281	0,211	0,262	0,192	0,357	0,268	0,334	0,245	4 490	157	200
700	8,17	6,18	7,57	5,58	0,287	0,217	0,266	0,196	0,364	0,275	0,338	0,249	5 300	186	237
800	8,32	6,33	7,66	5,67	0,292	0,222	0,269	0,199	0,371	0,282	0,342	0,253	6 130	215	274
900	8,45	6,46	7,74	5,75	0,296	0,226	0,271	0,201	0,377	0,288	0,345	0,256	6 970	244	311
1000	8,56	6,57	7,81	5,82	0,300	0,230	0,274	0,204	0,382	0,293	0,348	0,259	7 810	274	348
1100	8,67	6,68	7,89	5,90	0,304	0,234	0,277	0,207	0,387	0,298	0,352	0,263	8 680	305	387
1200	8,76	6,77	7,96	5,97	0,307	0,237	0,279	0,209	0,391	0,302	0,355	0,266	9 550	335	426
1300	8,84	6,85	8,02	6,03	0,310	0,240	0,281	0,211	0,394	0,305	0,358	0,269	10 430	365	465
1400	8,91	6,92	8,08	6,09	0,313	0,243	0,283	0,213	0,398	0,309	0,360	0,271	11 310	396	504
1500	8,98	6,99	8,14	6,15	0,315	0,245	0,286	0,216	0,401	0,312	0,363	0,274	12 210	429	545
1600	9,03	7,04	8,19	6,20	0,317	0,247	0,287	0,217	0,403	0,314	0,365	0,276	13 100	459	584
1700	9,09	7,10	8,25	6,26	0,319	0,249	0,289	0,219	0,406	0,317	0,368	0,279	14 030	491	626
1800	9,14	7,15	8,30	6,31	0,321	0,251	0,291	0,221	0,408	0,319	0,370	0,281	14 940	524	666
1900	9,18	7,19	8,34	6,35	0,322	0,252	0,293	0,223	0,410	0,321	0,372	0,283	15 800	557	707
2000	9,22	7,23	8,38	6,39	0,323	0,253	0,294	0,224	0,411	0,322	0,374	0,285	15 900	588	748
2100	9,26	7,27	8,42	6,43	0,325	0,255	0,295	0,225	0,413	0,324	0,376	0,287	17 700	620	790
2200	9,29	7,30	8,46	6,47	0,326	0,256	0,297	0,227	0,414	0,325	0,377	0,288	18 600	653	829
2300	9,32	7,33	8,50	6,51	0,327	0,257	0,298	0,228	0,416	0,327	0,379	0,290	19 600	685	872
2400	9,35	7,36	8,53	6,54	0,328	0,258	0,299	0,229	0,417	0,328	0,381	0,292	20 500	718	914
2500	9,38	7,39	8,56	6,57	0,329	0,259	0,300	0,230	0,418	0,329	0,382	0,293	21 400	750	955

Теплоемкость и энтальпия продуктов сгорания бензина
Неполное сгорание ($\varphi = 0,8$); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 3$

Температура	Теплоемкость												Энтальпия		
	νc_p	νc_v	νc_{pm}	νc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/м ³ град				ккал/моль	ккал/кг	ккал/м ³
°С															
0	7,03	5,04	7,03	5,04	0,245	0,176	0,245	0,176	0,314	0,225	0,314	0,225	0	0	0
100	7,11	5,12	7,07	5,08	0,248	0,179	0,247	0,178	0,317	0,228	0,315	0,226	707	24,7	31,5
200	7,23	5,24	7,11	5,12	0,252	0,183	0,248	0,179	0,323	0,234	0,317	0,228	1 422	49,6	63,4
300	7,38	5,39	7,18	5,19	0,258	0,188	0,251	0,182	0,329	0,240	0,320	0,231	2 150	75,3	96,0
400	7,56	5,57	7,25	5,26	0,264	0,195	0,253	0,184	0,337	0,248	0,323	0,234	2 900	101,2	129,2
500	7,74	5,75	7,33	5,34	0,270	0,201	0,256	0,187	0,345	0,256	0,327	0,238	3 670	128,0	164
600	7,91	5,92	7,41	5,42	0,276	0,207	0,259	0,190	0,353	0,264	0,331	0,242	4 450	155	199
700	8,06	6,07	7,49	5,50	0,281	0,212	0,262	0,193	0,360	0,271	0,334	0,245	5 240	183	234
800	8,20	6,21	7,57	5,58	0,286	0,217	0,264	0,195	0,366	0,277	0,338	0,249	6 060	211	270
900	8,33	6,34	7,65	5,66	0,291	0,222	0,267	0,198	0,372	0,283	0,341	0,252	6 890	240	307
1000	8,44	6,45	7,72	5,73	0,295	0,226	0,270	0,201	0,377	0,288	0,344	0,255	7 720	270	344
1100	8,54	6,55	7,79	5,80	0,298	0,229	0,272	0,203	0,381	0,292	0,348	0,259	8 570	299	383
1200	8,62	6,63	7,86	5,87	0,301	0,232	0,274	0,205	0,385	0,296	0,351	0,262	9 430	329	421
1300	8,70	6,71	7,92	5,93	0,304	0,235	0,277	0,208	0,388	0,299	0,353	0,264	10 300	360	459
1400	8,77	6,78	7,98	5,99	0,306	0,237	0,279	0,210	0,391	0,302	0,356	0,267	11 170	391	498
1500	8,83	6,84	8,03	6,04	0,308	0,239	0,280	0,211	0,394	0,305	0,358	0,269	12 050	420	537
1600	8,89	6,90	8,09	6,10	0,310	0,241	0,282	0,213	0,397	0,308	0,361	0,272	12 940	451	578
1700	8,94	6,95	8,14	6,15	0,312	0,243	0,284	0,215	0,399	0,310	0,363	0,274	13 840	483	617
1800	8,98	6,99	8,18	6,19	0,314	0,245	0,286	0,217	0,401	0,312	0,365	0,276	14 720	515	657
1900	9,02	7,03	8,22	6,23	0,315	0,246	0,287	0,218	0,402	0,313	0,367	0,278	15 600	545	697
2000	9,06	7,07	8,26	6,27	0,316	0,247	0,288	0,219	0,404	0,315	0,369	0,280	16 500	576	738
2100	9,10	7,11	8,30	6,31	0,318	0,249	0,290	0,221	0,406	0,317	0,370	0,281	17 400	609	777
2200	9,14	7,15	8,34	6,35	0,319	0,250	0,291	0,222	0,408	0,319	0,372	0,283	18 300	640	818
2300	9,17	7,18	8,38	6,39	0,320	0,251	0,293	0,224	0,409	0,320	0,374	0,285	19 300	674	860
2400	9,19	7,20	8,41	6,42	0,321	0,252	0,294	0,225	0,410	0,321	0,375	0,286	20 200	706	900
2500	9,22	7,23	8,44	6,45	0,322	0,252	0,295	0,226	0,411	0,322	0,377	0,288	21 100	738	943

Теплоемкость и энтальпия продуктов сгорания бензина
Неполное сгорание ($\varphi = 0,8$); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 4$

Температура	Теплоемкость											Энтальпия			
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'
t	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/н.м ³ град				ккал/моль	ккал/кг	ккал/н.м ³
°C															
0	7,01	5,02	7,01	5,02	0,244	0,175	0,244	0,175	0,313	0,224	0,313	0,224	0	0	0
100	7,08	5,09	7,04	5,05	0,247	0,178	0,245	0,176	0,316	0,227	0,314	0,225	704	24,5	31,4
200	7,20	5,21	7,09	5,10	0,251	0,182	0,247	0,178	0,321	0,232	0,316	0,227	1 418	49,4	63,2
300	7,35	5,36	7,15	5,16	0,256	0,187	0,249	0,180	0,328	0,239	0,319	0,230	2 150	74,7	95,7
400	7,52	5,53	7,22	5,23	0,262	0,193	0,251	0,182	0,335	0,246	0,322	0,233	2 890	100,4	128,8
500	7,70	5,71	7,30	5,31	0,268	0,199	0,254	0,185	0,344	0,255	0,326	0,237	3 650	127,0	163
600	7,87	5,88	7,38	5,39	0,274	0,205	0,257	0,188	0,351	0,262	0,329	0,240	4 430	154	197
700	8,02	6,03	7,46	5,47	0,279	0,210	0,260	0,191	0,358	0,269	0,333	0,244	5 220	182	233
800	8,16	6,17	7,54	5,55	0,284	0,215	0,263	0,194	0,364	0,275	0,336	0,247	6 030	210	269
900	8,28	6,29	7,62	5,63	0,288	0,219	0,265	0,196	0,369	0,280	0,340	0,251	6 860	239	306
1000	8,39	6,40	7,69	5,70	0,292	0,223	0,268	0,199	0,374	0,285	0,343	0,254	7 690	268	343
1100	8,48	6,49	7,75	5,76	0,295	0,226	0,270	0,201	0,378	0,289	0,346	0,257	8 530	297	381
1200	8,57	6,58	7,82	5,83	0,298	0,229	0,272	0,203	0,382	0,293	0,349	0,260	9 380	326	419
1300	8,64	6,65	7,88	5,89	0,301	0,232	0,274	0,205	0,385	0,296	0,352	0,263	10 240	356	458
1400	8,71	6,72	7,94	5,95	0,303	0,234	0,276	0,207	0,389	0,300	0,354	0,265	11 120	386	496
1500	8,77	6,78	7,99	6,00	0,305	0,236	0,278	0,209	0,391	0,302	0,356	0,267	11 990	417	534
1600	8,82	6,83	8,04	6,05	0,307	0,238	0,280	0,211	0,393	0,304	0,359	0,270	12 860	448	574
1700	8,87	6,88	8,09	6,10	0,309	0,240	0,282	0,213	0,396	0,307	0,361	0,272	13 750	479	614
1800	8,92	6,93	8,13	6,14	0,311	0,242	0,283	0,214	0,398	0,309	0,363	0,274	14 630	509	653
1900	8,96	6,97	8,17	6,18	0,312	0,243	0,284	0,215	0,400	0,311	0,364	0,275	15 500	540	692
2000	9,00	7,01	8,21	6,22	0,313	0,244	0,286	0,217	0,402	0,313	0,366	0,277	16 400	572	732
2100	9,03	7,04	8,25	6,26	0,314	0,245	0,287	0,218	0,403	0,314	0,368	0,279	17 300	603	773
2200	9,06	7,07	8,29	6,30	0,315	0,246	0,289	0,220	0,404	0,315	0,370	0,281	18 200	636	814
2300	9,09	7,10	8,32	6,33	0,317	0,248	0,290	0,221	0,406	0,317	0,371	0,282	19 100	667	853
2400	9,12	7,13	8,36	6,37	0,318	0,249	0,291	0,222	0,407	0,318	0,373	0,284	20 100	698	895
2500	9,15	7,16	8,39	6,40	0,319	0,250	0,292	0,223	0,408	0,319	0,374	0,285	21 000	730	935

Теплоемкость и энтальпия продуктов сгорания бензина
Неполное сгорание ($\varphi = 0,8$); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 5$

Температура <i>t</i>	Теплоемкость												Энтальпия		
	μc_p	μc_v	μc_{pt}	μc_{vt}	c_p	c_v	c_{pt}	c_{vt}	c'_p	c'_v	c'_{pt}	c'_{vt}	μi	i	i'
	ккал/моль град				ккал/кг град				ккал/нм ³ град				ккал/моль	ккал/кг	ккал/нм ³
°С															
0	7,00	5,01	7,00	5,01	0,243	0,174	0,243	0,174	0,312	0,223	0,312	0,223	0	0	0
100	7,06	5,07	7,03	5,04	0,245	0,175	0,244	0,175	0,315	0,226	0,314	0,225	703	24,4	31,4
200	7,17	5,18	7,07	5,08	0,249	0,180	0,246	0,177	0,320	0,231	0,315	0,226	1 414	49,2	63,0
300	7,32	5,33	7,13	5,14	0,254	0,185	0,248	0,179	0,327	0,238	0,318	0,229	2 140	74,4	95,4
400	7,49	5,50	7,20	5,21	0,260	0,191	0,250	0,181	0,334	0,245	0,321	0,232	2 880	100,0	128,4
500	7,67	5,68	7,28	5,29	0,267	0,198	0,253	0,184	0,342	0,253	0,325	0,236	3 640	126,5	163
600	7,84	5,85	7,36	5,37	0,272	0,203	0,256	0,187	0,350	0,261	0,328	0,239	4 420	154	197
700	7,99	6,00	7,44	5,45	0,278	0,209	0,259	0,190	0,356	0,267	0,332	0,243	5 210	181	232
800	8,12	6,13	7,51	5,52	0,282	0,213	0,261	0,192	0,362	0,273	0,335	0,246	6 010	209	268
900	8,24	6,25	7,59	5,60	0,286	0,217	0,264	0,195	0,368	0,279	0,339	0,250	6 830	238	305
1000	8,35	6,36	7,66	5,67	0,290	0,221	0,266	0,197	0,373	0,284	0,342	0,253	7 660	266	342
1100	8,44	6,45	7,72	5,73	0,293	0,224	0,268	0,199	0,377	0,288	0,344	0,255	8 490	295	378
1200	8,52	6,53	7,79	5,80	0,296	0,227	0,271	0,202	0,380	0,291	0,347	0,258	9 350	325	416
1300	8,59	6,60	7,85	5,86	0,298	0,229	0,273	0,204	0,383	0,294	0,350	0,261	10 210	355	455
1400	8,66	6,67	7,91	5,92	0,301	0,232	0,275	0,206	0,386	0,297	0,353	0,264	11 070	385	494
1500	8,72	6,73	7,96	5,97	0,303	0,234	0,277	0,208	0,389	0,300	0,355	0,266	11 940	416	533
1600	8,77	6,78	8,01	6,02	0,305	0,236	0,278	0,209	0,391	0,302	0,357	0,268	12 820	445	571
1700	8,82	6,83	8,06	6,07	0,306	0,237	0,280	0,211	0,393	0,304	0,360	0,271	13 700	476	612
1800	8,87	6,88	8,11	6,12	0,308	0,239	0,282	0,213	0,396	0,307	0,362	0,273	14 600	508	652
1900	8,91	6,92	8,15	6,16	0,310	0,241	0,283	0,214	0,398	0,309	0,364	0,275	15 500	538	692
2000	8,95	6,96	8,19	6,20	0,311	0,242	0,285	0,216	0,399	0,310	0,365	0,276	16 400	570	730
2100	8,98	6,99	8,24	6,25	0,312	0,243	0,286	0,217	0,401	0,312	0,367	0,278	17 300	601	771
2200	9,02	7,03	8,27	6,28	0,313	0,244	0,287	0,218	0,402	0,313	0,369	0,280	18 200	631	812
2300	9,05	7,06	8,30	6,31	0,314	0,245	0,288	0,219	0,404	0,315	0,370	0,281	19 100	662	851
2400	9,08	7,09	8,33	6,34	0,315	0,246	0,289	0,220	0,405	0,316	0,372	0,283	20 000	694	893
2500	9,10	7,11	8,35	6,36	0,316	0,247	0,290	0,221	0,406	0,317	0,373	0,284	20 900	725	933

Энтропия продуктов сгорания бензина при различных избытках воздуха
Неполное сгорание ($\varphi = 0,8$)

Температура t	$\alpha = 1$		$\alpha = 2$		$\alpha = 3$		$\alpha = 4$		$\alpha = 5$	
	s'_p	s'_v	s'_p	s'_v	s'_p	s'_v	s'_p	s'_v	s'_p	s'_v
$^{\circ}\text{C}$	ккал/м ³ град									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0,100	0,072	0,099	0,071	0,098	0,070	0,097	0,069	0,097	0,069
200	0,179	0,130	0,175	0,124	0,174	0,125	0,173	0,124	0,173	0,124
300	0,243	0,177	0,238	0,172	0,235	0,169	0,235	0,169	0,234	0,168
400	0,301	0,221	0,294	0,214	0,291	0,211	0,290	0,210	0,290	0,210
500	0,349	0,257	0,340	0,248	0,337	0,245	0,336	0,244	0,335	0,243
600	0,393	0,290	0,383	0,280	0,380	0,277	0,378	0,275	0,377	0,274
700	0,434	0,321	0,423	0,310	0,418	0,305	0,417	0,304	0,415	0,302
800	0,471	0,350	0,459	0,338	0,454	0,333	0,452	0,331	0,450	0,329
900	0,505	0,376	0,492	0,363	0,487	0,358	0,485	0,356	0,482	0,353
1000	0,537	0,401	0,523	0,387	0,517	0,381	0,515	0,379	0,512	0,376
1100	0,567	0,424	0,552	0,409	0,546	0,403	0,543	0,400	0,540	0,397
1200	0,596	0,447	0,579	0,430	0,573	0,424	0,570	0,421	0,567	0,418
1300	0,623	0,468	0,605	0,450	0,598	0,443	0,595	0,440	0,592	0,437
1400	0,648	0,487	0,629	0,468	0,622	0,461	0,619	0,458	0,616	0,455
1500	0,672	0,506	0,652	0,486	0,645	0,479	0,642	0,476	0,639	0,473
1600	0,695	0,524	0,675	0,504	0,667	0,496	0,663	0,497	0,661	0,490
1700	0,717	0,542	0,696	0,521	0,687	0,512	0,684	0,509	0,681	0,506
1800	0,738	0,558	0,716	0,536	0,707	0,527	0,703	0,523	0,701	0,521
1900	0,758	0,574	0,735	0,551	0,726	0,542	0,722	0,538	0,719	0,535
2000	0,778	0,590	0,753	0,565	0,744	0,556	0,740	0,552	0,737	0,549
2100	0,796	0,604	0,771	0,579	0,761	0,569	0,757	0,565	0,754	0,562
2200	0,814	0,619	0,788	0,593	0,778	0,583	0,774	0,579	0,771	0,576
2300	0,831	0,632	0,804	0,605	0,794	0,595	0,790	0,591	0,787	0,588
2400	0,848	0,646	0,820	0,618	0,810	0,608	0,806	0,604	0,802	0,600
2500	0,863	0,658	0,836	0,631	0,825	0,620	0,821	0,616	0,817	0,612

ХIII. КОЭФИЦИЕНТЫ ВЯЗКОСТИ
И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ
ГАЗОВ

(таблицы 338—341)

Коэффициенты динамической вязкости $10^6 \cdot \eta$ кг/м сек в зависимости от температуры

Наименование газа	Химическая формула	Температура в °С												
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Кислород	O ₂	1,943	2,460	2,910	3,312	3,677	4,014	4,327	4,622	4,900	5,164	5,416	5,657	5,889
Азот	N ₂	1,667	2,101	2,478	2,815	3,121	3,402	3,664	3,911	4,143	4,364	4,575	4,777	4,972
Водород	H ₂	0,850	1,052	1,226	1,381	1,521	1,651	1,771	1,884	1,991	2,093	2,190	2,283	2,373
Воздух	—	1,721	2,192	2,604	2,973	3,308	3,617	3,905	4,175	4,430	4,672	4,904	5,125	5,338
Окись углерода . . .	CO	1,656	2,087	2,462	2,797	3,100	3,380	3,640	3,885	4,116	4,336	4,545	4,746	4,939
Окись азота	NO	1,352	1,825	2,257	2,653	3,020	3,362	3,683	3,986	4,272	4,546	4,807	5,057	5,298
Двуокись углерода .	CO ₂	1,384	1,846	2,262	2,642	2,991	3,316	3,620	3,906	4,177	4,435	4,681	4,917	5,143
Водяной пар	H ₂ O	0,8180	1,208	1,605	2,000	2,390	2,772	3,145	3,510	3,864	4,210	4,547	4,874	5,194
Сернистый ангидрид .	SO ₂	1,175	1,631	2,037	2,426	2,789	3,131	3,453	3,759	4,049	4,327	4,592	4,847	5,093
Метан	CH ₄	1,036	1,340	1,609	1,851	2,071	2,275	2,464	2,643	2,811	2,971	3,124	3,270	3,410
Этан	C ₂ H ₆	0,8630	1,157	1,423	1,667	1,892	2,101	2,297	2,482	2,657	2,823	2,983	3,135	3,281
Пропан	C ₃ H ₈	0,7508	1,006	1,238	1,450	1,646	1,828	1,999	2,159	2,312	2,456	2,595	2,727	2,855
Этилен	C ₂ H ₄	0,9420	1,256	1,532	1,796	2,034	2,254	2,461	2,655	2,839	3,014	3,181	3,341	3,495
Ацетилен	C ₂ H ₂	0,9488	1,253	1,526	1,774	2,001	2,211	2,408	2,593	2,768	2,934	3,093	3,245	3,391
Бензол	C ₆ H ₆	0,6897	0,9594	1,213	1,452	1,677	1,888	2,089	2,279	2,460	2,634	2,800	2,959	3,113

Коэффициенты кинематической вязкости $10^5 \cdot \nu$ $\text{м}^2/\text{сек}$ в зависимости от температуры

Наименование газа	Химическая формула	Температура t °C												
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Кислород	O ₂	1,361	2,353	3,530	4,866	6,345	7,956	9,686	11,531	13,481	15,53	17,68	19,91	22,24
Азот	N ₂	1,327	2,285	3,417	4,703	6,124	7,666	9,325	11,094	12,959	14,922	16,98	19,12	21,35
Водород	H ₂	0,0945	0,1598	0,2361	0,3222	0,4167	0,5196	0,6294	0,7463	0,8697	0,9944	11,35	1,276	1,423
Воздух	—	1,331	2,316	3,489	4,824	6,304	7,918	9,653	11,503	13,460	15,52	17,68	19,93	22,27
Окись углерода . . .	CO	1,325	2,281	3,412	4,695	6,112	7,653	9,308	11,073	12,936	14,898	16,95	19,09	21,31
Окись азота	NO	1,010	1,862	2,920	4,157	5,558	7,107	8,792	10,605	12,534	14,381	16,73	18,99	21,34
Двуокись углерода .	CO ₂	0,7052	1,184	1,996	2,824	3,755	4,781	5,895	7,089	8,360	9,703	11,114	12,591	14,131
Водяной пар	H ₂ O	1,017	2,053	3,457	5,219	7,325	9,759	12,505	15,55	18,88	22,49	26,36	30,48	34,84
Сернистый ангидрид .	SO ₂	0,4111	0,7747	1,235	1,781	2,405	3,100	3,862	4,685	5,566	6,502	7,489	8,526	9,610
Метан	CH ₄	1,446	2,557	3,893	5,423	7,128	8,991	11,001	13,149	15,42	17,82	20,33	22,96	25,69
Этан	C ₂ H ₆	0,6435	1,178	1,838	2,608	3,477	4,435	5,476	6,594	7,784	9,042	10,401	11,751	13,196
Пропан	C ₃ H ₈	0,3497	0,6403	0,9972	1,417	1,889	2,410	2,975	3,583	4,266	4,914	5,633	6,386	7,171
Этилен	C ₂ H ₄	0,5271	0,9598	1,485	2,109	2,805	3,571	4,402	5,293	6,241	7,244	8,297	9,399	10,548
Ацетилен	C ₂ H ₂	0,8165	1,473	2,275	3,202	4,243	5,386	6,623	7,949	9,357	10,844	12,405	14,037	15,74
Бензол	C ₆ H ₆	0,1979	0,3761	0,6031	0,8743	1,185	1,534	1,916	2,330	2,773	3,245	3,744	4,269	4,818

Таблица 340

Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^3$ ккал/м час град для двух- и трехатомных неорганических газов в зависимости от температуры

Температура	Кислород	Азот	Воздух	Водород	Двуокись углерода	Водяной пар
$t^\circ \text{C}$	O_2	N_2	—	H_2	CO_2	H_2O
0	21,55	21,38	21,36	150	12,42	13,89
100	27,99	27,09	27,40	186	19,52	21,19
200	34,37	32,30	32,91	222	26,70	28,94
300	40,64	37,31	38,28	258	33,86	39,24
400	46,65	42,44	43,45	294	40,84	49,06
500	52,40	47,47	48,38	330	47,60	60,16
600	57,72	52,35	53,22	366	54,07	72,10
700	62,82	57,08	57,81	402	60,27	84,68
800	67,69	61,63	62,21	438	66,12	98,10
900	72,00	66,03	66,40	474	71,74	111,90
1000	76,36	70,27	70,50	510	77,10	126,10
1100	80,60	74,29	74,32	546	82,26	140,50
1200	84,60	78,17	78,10	582	87,11	155,00

Таблица 341

Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^3$ ккал/м час град для некоторых углеводородов в зависимости от температуры

Наименование вещества	Химическая формула	Температура $t^\circ \text{C}$					
		0	20	50	100	150	200
Метан	CH_4	26,0	28,5	—	—	—	—
Этан	C_2H_6	15,7	17,8	21,4	28,2	—	—
Пропан	C_3H_8	13,0	14,9	—	—	—	—
Н — бутан	C_4H_{10}	11,6	13,3	—	—	—	—
Изобутан	C_4H_{10}	12,0	—	—	—	—	—
Н — пентан	C_5H_{12}	11,0	12,25	—	—	—	—
Изопентан	C_5H_{12}	10,7	12,1	14,4	18,8	23,8	29,5
Н — гексан	C_6H_{14}	10,65	—	—	—	—	—
Н — гептан	C_7H_{16}	—	—	—	15,2	—	—
Этилен	C_2H_4	15,0	—	—	—	—	—
1 — гексилен (1 — гексен)	C_6H_{12}	8,95	10,4	12,5	16,1	—	—
Ацетилен	C_2H_2	16,2	—	—	—	—	—
Бензол	C_6H_6	7,6	9,0	11,1	15,1	19,4	24,4
Циклогексан	C_6H_{12}	—	—	—	11,6	—	—

ОСНОВНЫЕ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ ДЛЯ ГАЗОВ

I. ОДНОАТОМНЫЕ ГАЗЫ

1. Водород Н

Атомные веса и состав изотопической смеси водорода следующий

Изотоп	H ¹	H ²
Атомный вес	1,00813	2,01473
Содержание в смеси	0,9998551	0,0001449

Основное электронное состояние водорода $1S : {}^2S_{1/2}^1$. Статистический вес этого состояния равен $p_0 = 2$, а электронная энергия $\epsilon_0 = 82\,000 \text{ см}^{-1}$. Так как других электронных уровней нет, то характеристическая температура для водорода равна нулю, т. е.

$$\theta = \frac{hc}{k}(\epsilon - \epsilon_0) = 0.$$

Теплоемкость будет постоянна и не будет зависеть от температуры:

$$\mu c_p = 2,5R \text{ ккал/моль.}$$

Энтропию водорода вычисляют по формуле

$$S = 6,85876 \lg \mu + 11,43126 \lg T - 0,9361.$$

2. Азот N

Атомные веса и состав изотопической смеси азота следующий.

Изотоп	N ¹⁴	N ¹⁵
Атомный вес	14,00053	15,0049
Содержание в смеси	0,99653	0,00369

Кроме основного электронного состояния $1S^2 2S^2 2P^3 : {}^4S_{3/2}^0$ со статистическим весом $p_0 = 4$ и электронной энергией $\epsilon_0 = 83\,000 \text{ см}^{-1}$, азот имеет еще следующие электронные состояния:

$$2S^2 \cdot 2P^3 : {}^2D^0, \quad {}^2P^0$$

Статистические веса и электронные энергии всех состояний азота следующие.

Статистический вес p_0	4	6	4	6	2
Электронная энергия $(\epsilon - \epsilon_0)$	0	19223	19231	28340	83285,5

Вычисление термодинамических величин проводится методом непосредственного суммирования.

3. Кислород O

Атомный вес и состав изотопической смеси кислорода следующий.

Изотоп	O ¹⁶	O ¹⁷	O ¹⁸
Атомный вес	16,000	17,0045	18,0049
Содержание в смеси	0,997626	0,000402	0,001972

Основное электронное состояние кислорода $1S^2 2S^2 2P^4 : ^3P_2$ со статистическим весом $p_0 = 5$ и электронной энергией $\epsilon_0 = 74\,000 \text{ см}^{-1}$.

Кроме этого, имеются электронные состояния $2S^2 2P^4 : ^3P_1, ^3P_0, ^1D_2, ^1D_0$. Статистические веса и электронные энергии всех состояний кислорода следующие.

Статистический вес p_0	5	3	1	5	1	5
Электронная энергия $\epsilon - \epsilon_0$	0	158,5	226,5	22828,4	48616,2	106127,7

Вычисление всех термодинамических величин проводится методом непосредственного суммирования.

4. Углерод C

Атомные веса изотопов и состав изотопической смеси углерода следующий.

Изотоп	C ¹²	C ¹³
Атомный вес	12,00386	13,00761
Содержание в смеси	0,98925	0,01075

Основное электронное состояние углерода $1S^2 2S^2 2P^2 : ^3P_0$ со статистическим весом $p_0 = 1$ и электронной энергией $\epsilon_0 = 60\,000 \text{ см}^{-1}$. Кроме основного, имеются электронные состояния $2S^2 2P^2 : ^3P, ^1D, ^1S_1$ и $2S 2P^2 : ^5S$.

Электронные энергии и статистические веса всех состояний углерода следующие (табл. 1).

Таблица 1

№ уровня	Статистический вес p_0	Электронная энергия ($\epsilon - \epsilon_0$) см^{-1}
1	1	0
2	3	16,56
3	5	43,47
4	5	10192
5	1	21647
6	5	33735,2
7	1	60331,3

Все термодинамические величины вычисляются методом непосредственного суммирования.

II. ДВУХАТОМНЫЕ ГАЗЫ

1. Азот

Нормальная смесь азота состоит из азота N_2^{14} , имеющего молекулярный вес $\mu_{N_2^{14}} = 28,00744$, и двух изотопов N_2^{15} и $N^{14}N^{15}$. Нормальная смесь азота имеет молекулярный вес $\mu_{N_2} = 28,01480$.

Молекула азота N_2^{14} симметрична и имеет пара-модификацию (пара — N_2) со статистическим весом $3(2K + 1)$ и орто-модификацию (орто — N_2) со статистическим весом $6(2K + 1)$.

Основное электронное состояние азота $N_2^{14} - {}^1\Sigma_g^+$. Кроме этого, имеется второе электронное состояние $A^3\Sigma_u^+$ с электронной энергией, отсчитываемой от основного состояния $\epsilon - \epsilon_0 = 50\,000 \text{ см}^{-1}$. Так как электронная энергия этого состояния велика, то она не будет влиять на термодинамические величины даже при очень высоких температурах.

Спектроскопические константы азота N_2^{14} в основном электронном состоянии имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= 2345,16 \text{ см}^{-1}; & B_0 &= 1,998 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 x_0 &= 14,445 \text{ см}^{-1}; & \alpha_0 &= 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 y_0 &= 6,4958 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}; & D_0 &= -5,808 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 z_0 &= -5,09 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}; & F_0 &= 4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-1}. \end{aligned}$$

2. Окись углерода CO

Нормальная смесь изотопов окиси углерода имеет молекулярный вес $\mu_{CO} = 28,01139$; причем основную долю составляет окись углерода $C^{12}O^{16}$, имеющая молекулярный вес $\mu_{C^{12}O^{16}} = 27,99625$.

Основное электронное состояние окиси углерода $X^1\Sigma^+$. Имеются и другие состояния — $a^3\Pi$, $a'^3\Sigma$, $A^1\Pi$, $B^1\Sigma$, $C^1\Sigma$, но с большой разностью энергий по отношению к основному состоянию (порядка $45\,000 \text{ см}^{-1}$).

Спектроскопические константы $C^{12}O^{16}$ в основном состоянии следующие:

$$\begin{aligned} \omega_e &= 2170 \text{ см}^{-1}; & B_e &= 1,9314 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_e x_e &= 13,461 \text{ см}^{-1}; & \alpha_0 &= 0,017485 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_e y_e &= 0,0308 \text{ см}^{-1}; & D_e &= -6,43 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}; \\ & & \beta_e &= -0,04 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}; \\ & & F_0 &= 6,5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-1}. \end{aligned}$$

3. Кислород O₂

Смесь изотопов кислорода состоит из следующих составляющих:

$$\begin{aligned} O_2^{16} &= 99,526\% ; \\ O^{16}O^{18} &= 0,394\% ; \\ O^{16}O^{17} &= 0,80\% . \end{aligned}$$

Основное электронное состояние кислорода ${}^3\Sigma_g^-$. Этот низший уровень распадается на три составляющие: низшую F_3 , среднюю F_1 и высшую. Константы, характеризующие энергию этих составляющих в соответствии с уравнениями (355) и (357), равны

$$B = 1,438 \text{ см}^{-1}; \quad \lambda = 1,985 \text{ см}^{-1}.$$

Спектроскопические константы кислорода при различных электронных состояниях следующие:

а) электронное состояние ${}^3\Sigma_g^0$,

статистический вес $p_g = \frac{3}{2}$

$$\begin{aligned}\omega_0 &= 1568,33 \text{ см}^{-1}; & B_v &= 1,4456 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 x_0 &= 11,993 \text{ см}^{-1}; & \alpha_0 &= 0,0158 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 y_0 &= 0,0517 \text{ см}^{-1}; & D_v &= -4,838 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 z_0 &= 0,001433 \text{ см}^{-1}; & \beta_0 &= 4,96 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}; \\ & & F_v &= 0,1387 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-1}; \\ & & H_v &= -32,2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^{-1}.\end{aligned}$$

б) электронное состояние ${}^1\Delta_g$,

статистический вес $p_g = 1$

$$\begin{aligned}\omega_0 &= 1496,4 \text{ см}^{-1}; & B_0 &= 1,4264 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 x_0 &= 12,9 \text{ см}^{-1}; & \alpha_0 &= 0,0171 \text{ см}^{-1}; \\ & & D_v &= 4,86 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}.\end{aligned}$$

Разность уровней между данным и самым низким электронным состоянием ${}^3\Sigma_g^0$ и ${}^1\Delta_g$ равна:

$$y_{00} = 7132 \text{ см}^{-1} \quad \text{и} \quad \Delta\varepsilon_g = 7883,5 \text{ см}^{-1};$$

в) электронное состояние ${}^1\Sigma_g^+$,

статистический вес $p_g = \frac{1}{2}$

$$\begin{aligned}\omega_0 &= 1418,69 \text{ см}^{-1}; & B_v &= 1,4014 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 x_0 &= 13,925 \text{ см}^{-1}; & \alpha_0 &= 0,0188 \text{ см}^{-1}; \\ & & D_v &= -5,36 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}.\end{aligned}$$

Разность уровней между данным и самым низким электронным состоянием равна:

$$y_{00} = 12\,409,2 \text{ см}^{-1} \quad \text{и} \quad \Delta\varepsilon_g = 13\,122 \text{ см}^{-1};$$

г) электронное состояние ${}^3\Sigma_u^+$,

статистический вес $p_g = \frac{3}{2}$

$$\begin{aligned}\omega_0 &= 771,2 \text{ см}^{-1}; & B_v &= 1,13 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 x_0 &= 19,74 \text{ см}^{-1}; & \alpha_0 &= 0,06 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 y_0 &= 0,63 \text{ см}^{-1}; & D_v &= -9,10^{-6} \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 z_0 &= 0,099 \text{ см}^{-1};\end{aligned}$$

Разность уровней между данным и самым низким электронным состоянием равна:

$$y_{00} = 35\,385 \text{ см}^{-1} \quad \text{и} \quad \Delta\varepsilon_g = 35\,776 \text{ см}^{-1};$$

д) электронное состояние ${}^3\Sigma_u^-$,

статистический вес $p_g = \frac{3}{2}$

$$\begin{aligned}\omega_0 &= 698,86 \text{ см}^{-1}; & B_v &= 0,82 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_0 x_0 &= 10,708 \text{ см}^{-1}; & \alpha_0 &= 0,014 \text{ см}^{-1}.\end{aligned}$$

Разность уровней между данным и самым низким электронным состоянием равна:

$$y_{00} = 49\,007 \text{ см}^{-1} \quad \text{и} \quad \Delta\varepsilon_g = 49\,359 \text{ см}^{-1}.$$

4. Водород H_2

Состав изотопической смеси водорода следующий:

$$H^1 = 99,98551\%; \quad H^2 = 0,0001449\%;$$

молекулярный вес смеси $\mu_{H_2} = 2,0160$.

Устойчивым электронным состоянием водорода является $F^1 \Sigma_g^+$.

Другие электронные состояния отличаются большой электронной энергией.

Спектроскопические константы водорода следующие:

$$\begin{aligned} \omega_e &= 4371 \text{ см}^{-1}; & \delta_0 &= 0,002406 \text{ см}^{-1}; \\ \omega_e x_e &= 113,5 \text{ см}^{-1}; & D_e &= -0,0465 \text{ см}^{-1}; \\ B_e &= 60,564 \text{ см}^{-1}; & \beta_e &= 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}; \\ \alpha_0 &= 2,7931 \text{ см}^{-1}; & F_e &= 5,18 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}. \\ \gamma_0 &= 0,0105 \text{ см}^{-1}; \end{aligned}$$

III. ТРЕХАТОМНЫЕ ГАЗЫ

1. Углекислота CO_2

Нормальная смесь изотопов углекислоты имеет молекулярный вес $\mu_{CO_2} = 44,01139$.

Эта смесь составлена из изотопов углерода и кислорода в следующих пропорциях:

$$C^{12} = 92; \quad C^{13} = 1; \quad O^{16} = 506; \quad O^{17} = 0,204; \quad O^{18} = 1.$$

Молекулярный вес основного соединения $C^{12}O_2^{16}$ равен $\mu_{C^{12}O_2^{16}} = 43,9919$.

Молекула углекислоты линейна и симметрична. Из всех спектров многоатомных газов спектр углекислоты наиболее изучен.

Спектроскопические константы углекислоты имеют следующие значения:

а) моменты инерции

$$I_0 = 71,87 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \quad I_e = 71,67 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

б) расстояния между атомами $C=O$;

$$r_e = 1,1615 \cdot 10^{-8} \text{ см}; \quad r_0 = 1,1632 \cdot 10^{-8} \text{ см};$$

в) вращательные постоянные

$$\begin{aligned} B_0 &= 0,3895 \text{ см}^{-1}; & \alpha_1 &= 0,00056 \text{ см}^{-1}; \\ B_e &= 0,3906 \text{ см}^{-1}; & \alpha_2 &= 0,00062 \text{ см}^{-1}; \\ D_0 &= 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}; & \alpha_3 &= 0,0029 \text{ см}^{-1}; \end{aligned}$$

г) колебательные частоты и постоянные ангармоничности

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 1351,2 \text{ см}^{-1}; & x_{33} &= -12,3; \\ \omega_2 &= 672,2(2)^* \text{ см}^{-1}; & x_{12} &= 5,7; \\ \omega_3 &= 2396,4 \text{ см}^{-1}; & x_{13} &= -21,9; \\ x_{11} &= -0,3; & x_{23} &= -11,0; \\ x_{22} &= -1,3; & y_{22} &= 1,7. \end{aligned}$$

При колебаниях атомов в молекуле CO_2 может быть острый резонанс, так как удвоенная частота ω_2 очень близка по значению к частоте ω_1 .

* Частота ω_2 дважды вырождена.

Величина возмущений в уровнях энергии молекулы CO_2 характеризуется уравнением

$$\epsilon = \bar{\epsilon} \pm 1/2 \sqrt{1/4 (W_{ni})^2 + \delta^2},$$

где $\bar{\epsilon}$ — среднее значение энергии невозмущенных уровней ϵ_1 и ϵ_2 , [$\bar{\epsilon} = 1/2 (\epsilon_1 + \epsilon_2)$];

δ — расстояние между невозмущенными уровнями ($\delta_{\text{CO}_2} = 16,7 \text{ см}^{-1}$);

W_{ni} — матричный элемент возмущающей функции.

Для двух уровней $V_1 V_2 V_3 1, 0, 0$ и $V_1, V_2 V_3 0, 2^0, 0$ матричный элемент равен

$$W_{100,02^0 0} = - \frac{\hbar^2}{8 \sqrt{2\pi^3} c^2 \omega_1^2 \omega_2} \alpha_{122} = 50,4 \text{ см}^{-1}.$$

2. Закись азота N_2O

Молекула N_2O линейна и несимметрична. Спектроскопические константы имеют следующие значения:

а) момент инерции $I_0 = 66,94 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2$;

б) вращательная постоянная $B_0 = 0,4182 \text{ см}^{-1}$;

в) колебательные частоты и постоянные ангармоничности:

$$\omega_1^0 = 1288,25 \text{ см}^{-1}; \quad x_{33} = -13,75;$$

$$\omega_2 = 588,05 (2)^* \text{ см}^{-1}; \quad x_{12} = 4,75;$$

$$\omega_3^0 = 2237,25 \text{ см}^{-1}; \quad x_{23} = -12,45;$$

$$x_{11} = -3,25; \quad x_{13} = -26,15;$$

$$x_{22} = -2,28; \quad y_{22} = 3,03.$$

3. Водяной пар H_2O

Молекула H_2O нелинейна. Модель вращения — асимметричный волчок.

Нормальная смесь изотопов имеет молекулярный вес $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18,016$. Молекулярный вес основного соединения H_2^{16}O равен $\mu_{\text{H}_2^{16}\text{O}} = 18,01136$.

Спектроскопические константы имеют следующие значения:

а) моменты инерции в самом низком колебательном состоянии

$$I_A^0 = 1,0073 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \quad I_B^0 = 1,9296 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \quad I_C^0 = 3,0137 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

б) вращательные постоянные в самом низком колебательном состоянии

$$A_0 = 27,79 \text{ см}^{-1}; \quad B_0 = 14,508 \text{ см}^{-1}; \quad C_0 = 9,289 \text{ см}^{-1};$$

в) вращательные постоянные в положении равновесия

$$A_e = 27,33 \text{ см}^{-1}; \quad B_e = 14,575 \text{ см}^{-1}; \quad C_e = 9,499 \text{ см}^{-1};$$

г) вращательные постоянные α (коэффициенты при квантовых числах)

$$\alpha_1^A = 0,495; \quad \alpha_2^A = 2,659; \quad \alpha_3^A = 1,234;$$

$$\alpha_1^B = 0,224; \quad \alpha_2^B = -0,202; \quad \alpha_3^B = 0,112;$$

$$\alpha_1^C = 0,145; \quad \alpha_2^C = 0,105; \quad \alpha_3^C = 0,169;$$

* Частота ω_2 дважды вырождена.

д) колебательные частоты и постоянные ангармоничности:

$$\begin{aligned}\omega_1^0 &= 3693,89 \text{ см}^{-1}; & x_{33} &= -46,37; \\ \omega_2^0 &= 1614,5 \text{ см}^{-1}; & x_{12} &= -20,02; \\ \omega_3^0 &= 3801,78 \text{ см}^{-1}; & x_{13} &= -155,06; \\ x_{11} &= -43,89; & x_{23} &= -19,81; \\ x_{22} &= -19,5;\end{aligned}$$

В связи с тем, что два первых обертона $2V_1$ и $2V_3$ имеют одинаковую симметрию, они могут возмущать друг друга. Любое состояние $V_1V_2V_3$ с $V_1 > 2$ возмущается состоянием

$$V_1 - 2, \quad V_2, \quad V_3 + 2.$$

Энергию возмущенных уровней надо вычислять по уравнению

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} \pm \frac{1}{2} \sqrt{4(W_{ni})^2 + \delta^2};$$

здесь обозначения те же, что и для углекислоты

$$W_{ni} = W_{V_1-2, V_2, V_3+2}^{V_1, V_2, V_3} = \frac{1}{2} |\gamma| \sqrt{V_1(V_1-1)(V_3+1)(V_3+2)},$$

где $|\gamma|$ — постоянная, зависящая от потенциальной энергии и равная $|\gamma|_{\text{H}_2\text{O}} = 74,46$.

4. Сероводород H_2S

Молекула H_2S нелинейна. Вращение описывается моделью асимметричного волчка.

Спектроскопические константы имеют следующие значения:

а) моменты инерции и вращательные постоянные в самом низком колебательном состоянии

$$\begin{aligned}I_A^0 &= 2,694 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; & A_0 &= 10,393 \text{ см}^{-1}; \\ I_B^0 &= 3,097 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; & B_0 &= 9,040 \text{ см}^{-1}; \\ I_C^0 &= 5,927 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; & C_0 &= 4,723 \text{ см}^{-1};\end{aligned}$$

б) колебательные частоты

$$\omega_1 = 2610,8 \text{ см}^{-1}; \quad \omega_2 = 1290 \text{ см}^{-1}; \quad \omega_3 = 2684 \text{ см}^{-1}.$$

5. Двуокись серы SO_2

Молекула SO_2 нелинейна и симметрична. Колебательные частоты имеют следующие значения:

$$\omega_1 = 1151,2 \text{ см}^{-1}; \quad \omega_2 = 519 \text{ см}^{-1}; \quad \omega_3 = 1361 \text{ см}^{-1}.$$

IV. УГЛЕВОДОРОДЫ МЕТАНОВОГО РЯДА

1. Метан CH_4

Вращение молекулы CH_4 описывается моделью сферического волчка.

Спектроскопические константы имеют следующие значения:

а) момент инерции

$$I_B^0 = 5,330 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

б) вращательная постоянная

$$B_0 = 5,252 \text{ см}^{-1};$$

в) колебательные частоты

$$V_1(a_1) = 2914,2 \text{ см}^{-1}; \quad V_3(f_2) = 3020,3 (3) \text{ см}^{-1};$$

$$V_2(e) = 1528 (2) \text{ см}^{-1}; \quad V_4(f_2) = 1306,2 (3) \text{ см}^{-1}.$$

Колебание $V_2(e)$ дважды вырождено, а колебания $V_3(f_2)$ и $V_4(f_2)$ трижды вырождены.

2. Этан C_2H_6

Вращение молекулы C_2H_6 описывается моделью симметричного волчка. Спектроскопические константы имеют следующие значения:

а) моменты инерции

$$I_A^0 = 11,03 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \quad I_B^0 = 42,28 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \quad I_C^0 = I_B^0;$$

б) вращательные постоянные

$$A_0 = 0,6621 \text{ см}^{-1}; \quad B_0 = 2,538 \text{ см}^{-1};$$

в) расстояние между атомами C—C

$$r_0 = 1,573 \cdot 10^{-8} \text{ см};$$

Таблица 2

Группа	Тип колебания	Частота см^{-1}	Симметрия
CH	Валентное	$\nu_1 = 2899$	(a'_1)
CH ₃	Внутреннее деформационное	$\nu_2 = 1375$	(a'_1)
	Валентное	$\nu_3 = 993$	(a'_1)
C—C	Крутильное	$\nu_4 = 275$	(a''_1)
CH	Валентное	$\nu_5 = 2954$	(a''_2)
CH ₃	Внутреннее деформационное	$\nu_6 = 1379,0$	(a''_2)
	Валентное	$\nu_7 = 2994,3 (2)$	(e')
CH ₃	Внутреннее деформационное	$\nu_8 = 1486,0 (2)$	(e')
	Внешнее деформационное	$\nu_9 = 820,82 (2)$	(e')
CH	Валентное	$\nu_{10} = 2963 (2)$	(e'')
CH ₃	Внутреннее деформационное	$\nu_{11} = 1460 (2)$	(e'')
CH ₃	Внешнее деформационное	$\nu_{12} = 1155 (2)$	(e'')

Примечание. Цифры в скобках у частот ν_7 — ν_{12} показывают, что частоты дважды вырождены.

г) угол между атомами НСН равен $112^{\circ}12'$;

д) произведение моментов инерции

$$I_1 I_1 I_3 = 18,56 \cdot 10^{-117} \text{ (г} \cdot \text{см}^2)^3;$$

е) приведенный момент инерции внутреннего вращения

$$I_{np} = 2,65 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

ж) колебательные частоты (табл. 2).

Потенциальный барьер внутреннего вращения вокруг связи С—С равен $V_0 = 2750 \text{ ккал/моль}$ при числе максимумов косинусоидальной потенциальной функции $n = 3$.

3. Пропан C_3H_8

Колебательные частоты молекулы C_3H_8 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Частоты колебаний пропана $\nu \text{ см}^{-1}$

Группа	Тип колебания	Симметрия			
		a_1	a_2	b_1	b_2
CH_2	Валентное	2967	—	—	2980
CH_3	Несимметричное валентное	2946	2967	2968	2968
CH_3	Симметричное валентное	2903	—	2885	—
CH_3	Внутреннее деформационное	1468	—	—	—
CH_3	Несимметричное внутреннее деформационное	1451	1451	1465	1470
CH_3	Симметричное внутреннее деформационное	1370	—	1375	—
CH_2	Внешнее деформационное	—	—	1152	1179
CH_3	Внешнее деформационное	1152	1278	1054	748
С—С	Валентное	867	—	922	—
С—С—С	Деформационное	375	—	—	—
CH_2	Крутильное	—	—	—	—
CH_3	"	—	333	—	—

Потенциальный барьер $V_0 = 2300 \text{ ккал/моль}$ при числе максимумов $n = 3$.

V. УГЛЕВОДОРОДЫ АЦЕТИЛЕНОВОГО РЯДА

1. Ацетилен C_2H_2

Молекула C_2H_2 линейна.

Спектроскопические константы имеют следующие значения:

а) моменты инерции и вращательные постоянные

$$I_0 = 23,786 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \quad D_v = 1,83 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1};$$

$$I_e = 23,648 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = -0,00434;$$

$$B_0 = 1,1769 \text{ см}^{-1}; \quad \alpha_4 = \alpha_5 = 0,0017;$$

$$B_e = 1,1838 \text{ см}^{-1};$$

б) частоты колебаний и постоянные ангармоничности

$$\begin{aligned}\omega_1 &= 3273 \text{ см}^{-1} (\sum_g^+); & \omega_4 &= 611,8 \text{ см}^{-1} (\pi_g); \\ \omega_2 &= 1973,8 \text{ см}^{-1} (\sum_g^+); & \omega_5 &= 729,1 \text{ см}^{-1} (\pi_u); \\ \omega_3 &= 3287 \text{ см}^{-1} (\sum_u^+); \\ x_{11} &= 12; & x_{22} &= 49; & x_{33} &= 5; & x_{44} &= 0; & x_{55} &= -5; & x_{12} &= 5; \\ x_{13} &= 5; & x_{14} &= -2,5; & x_{15} &= 10; & x_{23} &= 73; & x_{24} &= 5; & x_{25} &= 5; \\ & & x_{34} &= 5; & x_{35} &= 5; & x_{45} &= -2,5.\end{aligned}$$

Следует оговорить, что все приведенные константы найдены без учета явления резонанса. Так как частоты колебаний $\omega_1 = 3273,7$; $\omega_3 = 3287$ близки одна к другой, а симметрия их различна, следует ожидать взаимодействия между уровнями V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 и $V_1 - 2, V_3, V_3 + 2, V_4, V_5$. Спектроскопических постоянных с учетом указанных резонансных возмущений еще не имеется.

2. Метилацетилен C_3H_4

Спектроскопические константы метилацетилена имеют следующие значения:

а) моменты инерции

$$\begin{aligned}\text{большой } I &= 98,276 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \\ \text{малый } I &= 5,499 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;\end{aligned}$$

б) вращательная постоянная

$$B_0 = 0,28496 \text{ см}^{-1};$$

в) число симметрии $\sigma = 3$;

г) межуатомные расстояния

$$\begin{aligned}\text{ацетиленовая группа C—H} & r = 1,060 \cdot 10^{-8} \text{ см}; \\ \text{ацетиленовая группа C}\equiv\text{C} & r = 1,217 \cdot 10^{-8} \text{ см}; \\ \text{метиловая группа C—H} & r = 1,11 \cdot 10^{-8} \text{ см}; \\ \text{метиловая группа C—C} & r = 1,462 \cdot 10^{-8} \text{ см};\end{aligned}$$

д) частоты колебаний молекулы метилацетилена (табл. 4).

Таблица 4

Группа и симметрия	Частота колебаний см^{-1}
CH (a_1)	$\nu_1 = 3429$
CH (a_1)	$\nu_2 = 2941$
$C \equiv C$ (a_2)	$\nu_3 = 2142$
CH_3 (a_1)	$\nu_4 = 1382$
C—C (a_1)	$\nu_5 = 930$
CH (e)	$\nu_6 = 2971$
CH_3 (e)	$\nu_7 = 1448$
CH_3 (e)	$\nu_8 = 1041$
$C \equiv C - H$ (e)	$\nu_9 = 643$
C—C \equiv C (e)	$\nu_{10} = 336$

Энтропию поступательного и вращательного движений можно вычислить по формуле

$$\mu S = 10,407 + 18,2905 \lg T \text{ ккал/моль град.}$$

3. Этилацетилен C_4H_6

Спектроскопические константы молекулы ацетилена имеют следующие значения:

а) межуатомные расстояния

ацетиленовая группа $C-H$ $r = 1,06 \cdot 10^{-8}$ см;

ацетиленовая группа $C \equiv C$ $r = 1,207 \cdot 10^{-8}$ см;

метилацетиленовая группа $\begin{array}{c} \diagup \\ C-C \\ \diagdown \end{array}$ $r = 1,462 \cdot 10^{-8}$ см;

парафиновая группа $C-C$ $r = 1,54 \cdot 10^{-8}$ см;

метилаленовая группа $C-H$ $r = 1,11 \cdot 10^{-8}$ см;

метиловая группа $C-H$ $r = 1,09 \cdot 10^{-8}$ см;

б) произведение моментов инерции, полученное на основании приведенных в пункте а) расстояний, равно $1,1645 \cdot 10^{-117}$ ($г \cdot см^2$)³;

в) колебательные частоты (табл. 5).

Таблица 5

Группа	Частота колебания $см^{-1}$	Тип колебания	Группа	Частота колебания $см^{-1}$	Тип колебания
H $C \equiv$	3380	Валентное	$C-C-C$	509	Деформационное
$C \equiv C$	2151	То же	CH_2 и CH_3	1005	То же
$C-C \equiv$	840	"	CH_2 и CH_3	1252 (2)	"
$C-C$	1068	"	CH_2 и CH_3	1314	"
CH_2 и CH_3	2963 (5)	"	CH_2 и CH_3	1456	"
$H-C \equiv C$	642 (2)	Деформационное	CH_2 и CH_3	1375	"
$C \equiv C-C$	206	То же	CH_2 и CH_3	1438	"
$C \equiv C-C$	348	"	CH_2 и CH_3	1459	"

Примечание. Цифры в скобках показывают кратность вырождения частоты.

Энтропию поступательного и вращательного движений с учетом внутреннего вращения можно определить по формуле

$$\mu S = 14,397 + 20,5768 \lg T \text{ ккал/моль град.}$$

Внутреннее вращение молекулы этилацетилена заторможено.

На основании сравнения расчетных и опытных данных по энтропии и теплоемкости потенциальный барьер принят равным $V_0 = 2710$ ккал/моль.

Приведенный момент инерции при внутреннем вращении

$$I_{np} = 4,847 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot см^2.$$

4. Диметилацетилен C_4H_6

Спектроскопические константы диметилацетилена имеют следующие значения:

а) моменты инерции

$$I_1 = 249 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot см^2; \quad I_2 = 10,998 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot см^2; \quad I_3 = 2,75 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot см^2;$$

б) число симметрии $\sigma = 18$;

в) колебательные частоты молекулы диметилацетилена (табл. 6).

Таблица 6

Группа и симметрия	Тип колебания	Частота колебания см^{-1}
C—H	Валентное	$\nu_1 = 2920$
C≡C	”	$\nu_2 = 2312,7$
CH ₃ (a ₁)	Деформационное	$\nu_3 = 1379$
C—C (a ₁)	Валентное	$\nu_4 = 697,4$
C—H	”	$\nu_5 = 2975$
CH ₃	Деформационное	$\nu_6 = 1380$
C—C	Валентное	$\nu_7 = 1126$
C—H (e)	”	$\nu_8 = 2975$
CH ₃ (e)	Деформационное	$\nu_9 = 1468$
CH ₃ (e)	Крутильное	$\nu_{10} = 1050$
C—C≡C—C (e)	Деформационное	$\nu_{11} = 213$
C—H (e)	Валентное	$\nu_{12} = 2161$
CH ₃ (e)	Деформационное	$\nu_{13} = 1447$
CH ₃ (e)	Крутильное	$\nu_{14} = 1029$
C—C≡C—C (e)	Деформационное	$\nu_{15} = 374$

Энтропию поступательного и вращательного движения с учетом внутреннего вращения можно вычислить по формуле

$$\mu S = 9,752 + 20,5768 \lg T \text{ ккал/моль град.}$$

Потенциальный барьер в молекуле диметилацетилена невелик и составляет $V_0 = 500 \text{ ккал/моль}$. Поэтому практически внутреннее вращение можно считать свободным.

VI. УГЛЕВОДОРОДЫ ЭТИЛЕНОВОГО РЯДА

1. Этилен C₂H₄

Вращение молекулы этилена описывается моделью симметричного волчка. Спектроскопические константы имеют следующие значения:

а) моменты инерции

$$I_A^0 = 28,08 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \quad I_B^0 = 5,752 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

$$I_C^0 = 33,81 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

б) вращательные постоянные

$$A_0 = 4,867 \text{ см}^{-1}; \quad B_0 = 0,9116 \text{ см}^{-1};$$

в) расстояние между атомами

$$\text{C}=\text{C} \quad r = 1,353 \cdot 10^{-8} \text{ см};$$

$$\text{C}-\text{H} \quad r = 1,071 \cdot 10^{-8} \text{ см};$$

г) угол между атомами H—C—H $\alpha = 119,55^\circ$;

д) число симметрии $\sigma = 4$;

е) колебательные частоты (табл. 7).

Потенциальный барьер молекулы этилена, вычисленный в соответствии с частотой крутильного колебания (ν_4), составляет

$$V_0 = 8700 \text{ ккал/моль при } n = 2.$$

Энтропия поступательного и вращательного движений определяется из уравнения

$$\mu S = 6,520 + 18,2906 \lg T \text{ ккал/моль град.}$$

Таблица 7

Группа и симметрия	Частота колебания см^{-1}	Группа и симметрия	Частота колебания см^{-1}
C—H (a_g)	$\nu_1 = 3019,3$	(b_{2u})	$\nu_7 = 949,2$
C—C (a_g)	$\nu_2 = 1623,3$	(b_{2g})	$\nu_8 = 943$
CH ₂ (a_g)	$\nu_3 = 1342,4$	CH (b_{2u})	$\nu_9 = 3105,5$
(a_u)	$\nu_4 = 825$	(b_{2u})	$\nu_{10} = 995$
CH	$\nu_5 = 3272,3$	CH (b_{3u})	$\nu_{11} = 2989,5$
(b_{1g})	$\nu_6 = 1050$	CH ₂ (b_{3u})	$\nu_{12} = 1443,5$

2. Пропилен C₃H₆

Спектроскопические константы пропилена имеют следующие значения:

а) моменты инерции

$$I_A = 89,199 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \quad I_B = 19,348 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

$$I_C = 103,286 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

б) приведенный момент инерции при внутреннем вращении

$$I_{np} = 4,073 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

в) число симметрии $\sigma = 3$;

г) колебательные частоты (табл. 8).

Таблица 8

Группа и симметрия	Тип частоты	Частота колебания см^{-1}
C=C (a')	Валентная	$\nu_6 = 1647$
CH ₂ (a')	Симметричная валентная	$\nu_3 = 2979$
CH ₃ (a')	Несимметричная валентная	$\nu_4 = 2916$
CH ₃ (a')	Симметричная валентная	$\nu_5 = 2852$
CH ₃ (a')	Несимметричная внутренняя деформационная	$\nu_7 = 1448$
CH ₂ (a')	Внутренняя деформационная	$\nu_8 = 1416$
CH ₃ (a')	Симметричная внутренняя деформационная	$\nu_9 = 1399$
CH (a')	Внутренняя деформационная	$\nu_{10} = 1287$
CH ₂ (a')	Внешняя деформационная	$\nu_{11} = 1224$
CH ₃ (a')	То же	$\nu_{12} = 1043$
C—C (a')	Валентная	$\nu_{13} = 919$
C=C—C (a')	Деформационная	$\nu_{14} = 417$
CH ₃ (a')	Несимметричная валентная	$\nu_{15} = 2960$
CH ₃ (a')	Несимметричная внутренняя деформационная	$\nu_{16} = 1472$
CH ₂ (a'')	Внешняя деформационная	$\nu_{17} = 1166$
CH ₃ (a'')	То же	$\nu_{18} = 996$
C—H (a'')	"	$\nu_{19} = 936$
C—CH ₂ (a'')	Крутильная	$\nu_{20} = 578$
C—CH ₃ (a'')	То же	$\nu_{21} = 177$
CH (a')	Валентная	$\nu_2 = 3012$
CH ₂ (a')	Несимметричная валентная	$\nu_1 = 3081$

Энтропия поступательного и вращательного движений при свободном внутреннем вращении определяется из формулы:

$$\mu S = 11,613 + 20,5768 \lg T \text{ ккал/моль град.}$$

Высота потенциального барьера, препятствующего свободному вращению вокруг оси C—C, при числе максимумов $n = 3$, равна $V_0 = 2100 \text{ ккал/моль}$. Это значение получено на основании опытных данных по теплоемкости.

3. Cis—2—бутен C_4H_8

Спектроскопические константы молекулы C_4H_8 имеют следующие значения:

а) моменты инерции

$$I_A = 142,431 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \quad I_B = 59,977 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

$$I_C = 191,886 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

б) приведенный момент инерции при внутреннем вращении метиловых групп $I_{np} = 5,037 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2$;

в) число симметрии $\sigma = 18$;

г) колебательные частоты (табл. 9).

Таблица 9

Колебательные частоты cis—2—бутена $\nu \text{ см}^{-1}$

Группа	Тип колебаний	Симметрия			
		a_1	a_2	b_1	b_2
C—H (этилен)	Валентное	3050	—	—	3050
C—H (метил)	”	2950 (2)	2950	2950	2950 (2)
C=C	”	1672	—	—	—
C—C	”	876	—	—	986
CH ₃	Внутреннее деформационное	1450	1450	1450	1450
CH ₃	Деформационное	1380	—	—	1380
C—H	—	1267	—	—	1390
C—H	—	—	1050	673	—
CH ₃	—	1018	—	—	1064
CH ₃	—	—	950	1040	—
CH ₃	—	304	—	—	581
C=C	Крутильное	—	402	—	—

Примечание. Цифры в скобках показывают кратность вырождения частоты.

Энтропию поступательного и вращательного движений при свободном внутреннем вращении определяют из уравнения

$$\mu S = 10,864 + 22,8632 \lg T \text{ ккал/моль град.}$$

Высота потенциального барьера при внутреннем вращении $V_0 = 1950 \text{ ккал/моль}$

4. Изобутен C_4H_8

Спектроскопические константы изобутена имеют следующие значения:

а) моменты инерции

$$I_A = 107,646 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2; \quad I_B = 89,842 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

$$I_C = 186,968 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

б) приведенный момент инерции при внутреннем вращении двух метиловых групп

$$I_{пр} = 4,999 \cdot 10^{-40} \text{ г} \cdot \text{см}^2;$$

в) число симметрии $\sigma = 18$;

г) колебательные частоты (табл. 10).

Таблица 10

Частоты колебаний изобутена ν см^{-1}

Группа	Симметрия			
	a_1	a_2	b_1	b_2
C — H	3050	—	—	3050
C — H	2950 (2)	2950	2950	2950 (2)
C = C	1664	—	—	—
C — C	800	—	—	986
CH ₃ δ (π)	1450	1450	1450	1450
CH ₃ δ (σ)	1380	—	—	1380
CH ₂	1390	—	—	—
CH ₂	—	—	—	1280
CH ₂	—	—	888	—
CH ₃	1053	—	—	1007
CH ₃	—	988	1066	—
CH ₃	378	—	391	431
C = C (крутильное)	—	700	—	—

Примечание. Цифры в скобках показывают кратность вырождения частоты.

Энтропию поступательного и вращательного движений при свободном внутреннем вращении определяют из выражения

$$\mu S = 11,474 + 22,8632 \lg T \text{ ккал/моль град.}$$

Потенциальный барьер, определенный по опытным значениям энтропии, равен $V_0 = 1950$ ккал/моль.

5. 1 — бутен C₄H₈

Для молекулы 1 — бутена произведение моментов инерции, вычисленное при значении угла между пропиленовой и метиловой группами, равном 60°, будет

$$I_1 I_2 I_3 = 2,232 \cdot 10^{-117} (\text{г} \cdot \text{см}^2)^3.$$

Колебательные частоты равны двадцати частотам пропилена с добавлением шести характеристических частот метиловой группы, одной деформационной частоты группы C—C, равной 995 см^{-1} , и одной валентной частоты группы C—C, равной 320 см^{-1} .

Потенциальный барьер внутреннего вращения метиловой группы $V_0 = 3400$ ккал/моль.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Обозначения основных величин	5
Введение	9

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ТЕОРИЯ И МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ГАЗОВ

I. Основные определения и соотношения	12
1. Общие уравнения и определения теплоемкостей	12
2. Внутренняя энергия газов	14
3. Энтальпия	14
4. Энтропия	16
5. Другие термодинамические функции	17
6. Понятие о химической реакции и константе равновесия	19
7. Выражение константы равновесия через парциальные давления	21
8. Константа равновесия и степень диссоциации	22
9. Зависимость константы равновесия от термодинамических функций и теплоемкость диссоциирующего газа	28
10. Основные физические константы и соотношения между энергетическими единицами измерения	30
II. Понятие об энергии молекул	33
1. Кинетическая теория теплоемкости	33
2. Волновое уравнение; квантование энергии	34
3. Понятие о нулевой энергии	36
III. Энергия молекул	37
1. Общие сведения	37
2. Энергия поступательного движения	37
3. Энергия колебаний двухатомной молекулы	38
4. Энергия колебаний трех- и многоатомных молекул	48
5. Вращательная энергия двухатомной молекулы	64
6. Вращательная энергия трех- и многоатомных молекул	65
7. Энергия свободных и заторможенных внутренних вращений	69
8. Электронная энергия	71
9. Статистический вес	72
IV. Общие уравнения для теплоемкости и термодинамических функций газа	74
1. Метод суммирования энергии молекул; сумма состояний	74
2. Уравнение для теплоемкости и термодинамических функций	76
V. Методы вычисления теплоемкости и термодинамических функций газов	79
1. Способ непосредственного суммирования	79
2. Приближенные методы расчета	81
VI. Метод вычисления теплоемкости, энтальпии и энтропии двухатомных газов	83
1. Общие соображения по вычислению колебательной энергии	83
2. Гармонические колебания	84
3. Простые ангармонические колебания	91
4. Сложные ангармонические колебания	95
5. Вращательная энергия несимметричных молекул	98
6. Вращательная энергия симметричных молекул	102
7. Взаимодействие между колебанием и вращением	104
8. Электронная энергия и ее взаимодействие с другими видами энергии	107
VII. Метод вычисления теплоемкости, энтальпии и энтропии многоатомных газов	121
1. Колебательная энергия гармонических колебаний	121
2. Колебательная энергия ангармонических колебаний	123

3. Вращательная составляющая термодинамических величин многоатомных газов	126
4. Термодинамические функции при внутреннем вращении	128
5. Приближенные формулы для вычисления теплоемкости	133
VIII. Зависимость теплоемкости от давления	135
1. Влияние давления на теплоемкость и методы вычисления корректирующего члена	135
2. Использование термического уравнения состояния для вычисления корректирующего члена	139
3. Определение энтальпии и энтропии реального газа	147
4. Вычисление корректирующего члена по экспериментальным данным	148

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ТАБЛИЦЫ ЗНАЧЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ОДНО-, ДВУХ-, ТРЕХ- И МНОГОАТОМНЫХ ГАЗОВ, ГОРЮЧИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ И ИХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

I. Описание таблиц	149
1. Общие замечания	150
2. Таблицы теплоемкостей, энтальпий и энтропий газов неорганического состава	151
3. Таблицы теплоемкостей, энтальпий и энтропий углеводородов	152
4. Таблицы теплоемкостей, энтальпий и энтропий газообразных топлив и их продуктов сгорания	156
5. Таблицы теплоемкостей, энтальпий и энтропий продуктов сгорания бензина	160
6. Таблицы вязкости и теплопроводности газов	161
II. Теплоемкости, энтальпии и энтропии одноатомных, двухатомных и трехатомных газов (таблицы 44—79)	165
III. Теплоемкости, энтальпии и энтропии углеводородов метанового ряда C_mH_{2m+2} (таблицы 80—95)	187
IV. Теплоемкости, энтальпии и энтропии углеводородов этиленового ряда C_mH_{2m} (таблицы 96—178)	197
V. Теплоемкости энтальпии и энтропии углеводородов ацетиленового ряда C_mH_{2m-2} (таблицы 179—192)	241
VI. Теплоемкости, энтальпии и энтропии углеводородов группы диолефинов (таблицы 193—212)	251
VII. Теплоемкости, энтальпии и энтропии этилового спирта, бензола, углеводородов группы стирола и метилстиролов (таблицы 213—222)	263
VIII. Теплоемкости, энтальпии и энтропии углеводородов ряда циклопентанов (таблицы 223—256)	271
IX. Теплоемкости, энтальпии и энтропии углеводородов ряда циклогексанов (таблицы 257—290)	291
X. Теплоемкости, энтальпии и энтропии горючих газов (таблицы 291—304)	311
XI. Теплоемкости, энтальпии и энтропии продуктов сгорания горючих газов (таблицы 305—325)	319
XII. Теплоемкости, энтальпии и энтропии продуктов полного и неполного сгорания бензина (таблицы 326—337)	341
XIII. Коэффициенты вязкости и теплопроводности различных газов (таблицы 338—341)	355
<i>Приложение. Основные спектроскопические константы для газов</i>	359
I. Одноатомные газы	359
II. Двухатомные газы	361
III. Трехатомные газы	363
IV. Углеводороды метанового ряда	365
V. Углеводороды ацетиленового ряда	367
VI. Углеводороды этиленового ряда	370

Технический редактор *Б. И. Модель*
Корректоры: *Е. А. Давыдкина,*
О. К. Добровольская и
Л. Ф. Никифорова

Обложка художника *А. Л. Бельского*

Сдано в производство 4/XII 1952 г.
Подписано к печати 11/VII 1953 г.
Т-05033. Тираж 15000 экз. Печ. л. 23,5
Уч.-изд. л. 30,5 Бум. л. 11,75
Формат 70×108¹/₁₆. Заказ 3382.

1-я типография Машгиза,
Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать	По чьей вине
25	Табл. 1, графа 5-я (заголовок)	$K = \frac{p_{2O}}{p_O}$	$K_p = \frac{p_{2O}}{p_{O_2}}$	Тип.
27	7-я снизу	типа $X_2Y \rightleftharpoons$	типа $XY \rightleftharpoons$	Корр.
29	2-я графа, 5-я снизу	$+ 9 \cdot CO_2 =$	$+ 9 \cdot O_2 =$	Тип.
31	Табл. 12, графа 6-я, 2-я снизу	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$2,3450 \cdot 10^{-3}$	"
40	Табл. 14, графа 1-я, 3-я сверху	$Al^{27}Br^8$	$Al^{27}Br^{81}$	"
42	Табл. 14, графа 2-я, 3-я снизу	$1\Sigma_d +$	$1\Sigma_g +$	"
87	Табл. 18, графа 7-я, 16-я снизу	-0,00587	-0,00567	Авт.
90	Табл. 19, графа 3-я, 11-я снизу	-0,0330	-0,0350	Корр.
104	8-я снизу (в числителе)	$0 \left(1 - \frac{\beta_0}{D_0} v \right)$	$D_0 \left(1 - \frac{\beta_0}{D_0} v \right)$	"
118	Табл. 21, графа 2-я, 6-я сверху	0,15001822	0,15401822	Корр.
119	Табл. 21, графа 5-я, 5-я сверху	-0,091511407	-0,091514407	Тип.
120	Табл. 21, графа 5-я, 14-я сверху	-0,021469930	-0,021469980	Корр.
158	Табл. 37, графа 6-я (заголовок)	CO	CO ₂	Тип.
159	Табл. 39, графа 1-я, 12-я снизу	газификации угля:	газификации подмо- сковного угля:	Корр.
175	Табл. 62, графа 5-я, 5-я снизу	6, 83	6,383	Тип.
209	Табл. 119, графа 5-я, 2-я снизу	7,99	71,99	"
225	Табл. 151, графа 9-я, 2-я сверху	0,4 36	0,4036	"
229	Табл. 159, графа 13-я, 1-я сверху	2,588	2,538	"
244	Табл. 183, графа 12-я, 2-я сверху	0,927	0,9275	"
278	Табл. 235, графа 4-я (заголовок)		μc_{pT}	"
320	Табл. 305, графа 9-я, 3-я снизу	0,1 4	0,184	"
320	Табл. 306, графа 5-я, 1-я снизу	0,3 5	0,385	"
356	Табл. 338, графа 4-я, 7-я снизу	1,631	1,621	"
359	8-я сверху	водорода $1S:2S'_{1/2}$	водорода $1S:2S_{1/2}$	Корр.

