

Е. А. Дей, Г. Ю. Тюменков

Факультет физики и информационных технологий,
кафедра теоретической физики

О НАПРАВЛЕНИЯХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРЕПОДАВАНИЯ КУРСА ТЕРМОДИНАМИКИ В ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННОМ ПОДХОДЕ

Курс «Термодинамика и статистическая физика» является впечатляющим примером дисциплины, имеющей важное значение и для фундаментального образования, и для практической деятельности.

Действующим стандартом предусмотрено в ходе изучения дисциплины «формирование профессиональных компетенций для проведения работ теоретического и экспериментального характера, направленных на изучение, анализ и практическое использование физических процессов в различных областях производственной деятельности». Изучение курса направлено на формирование умения решать практически важные задачи термодинамики и физической кинетики и овладение приемами решения задач термодинамики и статистической физики, методами расчета идеальных и неидеальных систем.

В целях дальнейшего повышения практической направленности обучения и развития самостоятельности студентов нами выделены следующие направления в рамках курса термодинамики:

1) расширение арсенала уравнений состояния, описывающих свойства реальных газов, применительно к различным физическим свойствам газов;

2) самостоятельное теоретическое исследование различных уравнений состояния на основе использования приведенных переменных в рамках управляемой самостоятельной работы студентов (УСР);

3) внедрение элементов вычислительного практикума с использованием вычислительного пакета Mathcad в качестве заданий по УСР. Самостоятельное численное исследование студентами в среде Mathcad различных уравнений состояния с использованием экспериментальных данных, имеющихся в справочной литературе;

4) использование новейших экспериментальных данных на основе справочных интернет-сайтов;

5) самостоятельное изучение научных публикаций по отдельным разделам курса термодинамики.

В данной работе рассмотрены первые два направления работы по совершенствованию учебного материала при изучении термодинамики.

Теоретическое описание свойств реальных газов имеет существенное практическое значение для многочисленных инженерных приложений. В учебниках по термодинамике (например, [1], [2]) при рассмотрении свойств реальных газов используется стандартный набор полуэмпирических уравнений состояния: уравнение Ван-дер-Ваальса, уравнение Бертло, первое и второе уравнения Дитеричи. При этом подчеркивается, что эти уравнения позволяют лишь качественно предсказать ряд экспериментально подтвержденных результатов. В то же время, одним из лучших вариантов уравнения состояния неидеального газа вплоть до настоящего времени остается уравнение Редлиха-Квонга [3], в котором явным образом введена зависимость слагаемого, учитывающего межмолекулярное отталкивание, от температуры:

$$P = RT / (V - b) - a / (\sqrt{TV}(V + b)).$$

Именно это уравнение и его модификации (уравнение Соаве-Редлиха-Квонга, уравнение Пенга-Робинсона) наиболее широко используются в настоящее время в профессиональных расчетах.

Существенным является и тот факт, что уравнение Редлиха-Квонга является единственным уравнением, корректно описывающим и поведение реальных газов в процессе Джоуля-Томсона, имеющем важное практическое значение [4]. Мы считаем необходимым включение в учебный курс изучение двухпараметрического уравнения состояния Редлиха-Квонга.

Еще один аспект расширения множества уравнений состояния, описывающих свойства реальных газов, связан с расширением количества индивидуальных вариантов заданий. С этой точки зрения в задачах можно использовать несколько десятков различных уравнений, перечисленных, например, в книге [3].

Практическое использование каждого уравнения состояния в ходе УСР предполагает, во-первых, получение аналитических выражений для ряда физических параметров реальных газов, во-вторых, последующее использование этих соотношений для численного расчета параметров и, в-третьих, сопоставление полученных численных значений с результатами эксперимента. Только комплексное использование всех этих этапов работы обеспечит и понимание физической сути термодинамического метода, и практическое освоение теоретического материала.

Этап теоретического исследования заданного варианта уравнения состояния реальных газов предполагает самостоятельное решение следующей последовательности задач (используются уравнения состояния для количества вещества, равного одному молю):

1) используя математические условия реализации критического состояния $(\partial P / \partial V)_{кр} = 0$, $(\partial^2 P / \partial V^2)_{кр} = 0$, выразить характеристики критического состояния газа (критическую температуру $T_{кр}$, критическое давление $P_{кр}$ и критический объем $V_{кр}$ через параметры уравнения;

2) вычислить такую важную характеристику феноменологического уравнения состояния газа как критический коэффициент сжимаемости $Z_{кр} = P_{кр} V_{кр} / (RT_{кр})$;

3) используя связь с критическими параметрами, выразить параметры уравнения через параметры уравнения Ван-дер-Ваальса;

4) выполнить переход к приведенным, или относительным безразмерным переменным $\tilde{P} = P / P_{кр}$, $\tilde{T} = T / T_{кр}$, $\tilde{V} = V / V_{кр}$ и получить приведенную форму уравнения состояния в виде $\tilde{P} = \tilde{P}(\tilde{V}, \tilde{T})$.

5) на основании уравнения состояния получить аналитическое выражение для коэффициента изотермического сжатия газа $k_T = -(\partial P / \partial V)_T^{-1} / V$;

6) получить соотношение для разности изобарной и изохорной молярных теплоемкостей $c_p - c_v = T(\partial P / \partial T)_V (\partial T / \partial V)_P^{-1}$, учитывая главные слагаемые и пренебрегая величинами старших порядков малости с учетом физических условий применимости уравнения состояния ($V \gg b$);

7) определить полный дифференциал энтропии, соответствующий уравнению состояния $dS = (c_v / T)dT + (\partial P / \partial T)_V dV$;

8) интегрируя полный дифференциал и пренебрегая возможной слабостью температурной зависимостью молярной изохорной теплоемкости, получить выражение для самой энтропии реального газа;

9) получить выражение для полного дифференциала внутренней энергии реального газа, используя дифференциальную форму первого начала термодинамики $dU = TdS - PdV$ и само уравнение состояния;

10) интегрируя полный дифференциал, получить выражение для внутренней энергии реального газа;

11) получить явное выражение для энтальпии реального газа на основании определения $W = U + PV$ и с учетом уже полученного выражения для внутренней энергии;

12) найти явный вид свободной энергии F , используя определение $F = U - TS$;

13) найти явный вид термодинамического потенциала Гиббса Φ , используя определение $\Phi = U - TS + PV = W - TS = F + PV$.

14) применить уравнение состояния реального газа для исследования изоэнтальпического подсистемно-равновесного процесса прокачки реального газа сквозь пористую перегородку. При этом процессе наблюдается изменение температуры газа (эффект Джоуля-Томсона). Математически это изменение характеризуется коэффициентом Джоуля-Томсона $\lambda = P_{кр} \tilde{\lambda}$, где приведенный коэффициент $\tilde{\lambda} = \left[\tilde{V} \left(\frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{V}} \right)_{\tilde{T}} + \tilde{T} \left(\frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{T}} \right)_{\tilde{V}} \right]$;

15) решить уравнение $\tilde{\lambda}(\tilde{V}, \tilde{T}_i) = 0$ (аналитически или численно) и получить выражение для приведенной температуры инверсии $\tilde{T}_i(\tilde{V})$;

16) используя полученный результат и уравнение состояния, получить выражение для поведения давления в точках инверсии $\tilde{P}_i(\tilde{V})$;

17) используя соотношение $\tilde{T}_i(\tilde{V})$ и уравнение состояния $\tilde{P} = \tilde{P}(\tilde{V}, \tilde{T})$, получить уравнение кривой инверсии знака эффекта Джоуля-Томсона в $\tilde{P}\tilde{T}$ -плоскости $\tilde{P} = \tilde{P}(\tilde{T}_i)$;

18) определить характерные точки кривой инверсии: минимальную и максимальную температуры инверсии и координаты точки максимума кривой;

19) построить график кривой инверсии в $\tilde{P}\tilde{T}$ -плоскости и выделить область положительного эффекта (газ остывает), исходя из условия $\tilde{\lambda} > 0$.

Важно отметить, что степень достоверности уравнения при описании не только критических параметров и изотерм, но и эффекта Джоуля-Томсона можно рассматривать как согласованный критерий адекватности уравнения.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе уравнения состояния для описания конкретных газов в заданных диапазонах температур и давлений.

Следует отметить, что для большинства уравнений состояния невозможно явно выразить температуру инверсии через давление в виде аналитического выражения кривой инверсии $\tilde{P}_i(\tilde{T})$ или $\tilde{T}_i(\tilde{P})$. В этом случае график кривой инверсии можно построить по точкам, изменяя в широком диапазоне значения аргумента \tilde{V} и вычисляя соответствующие значения \tilde{P}_i и \tilde{T}_i на основании аналитических соотношений или в путем численного решения возникающих нелинейных уравнений. При этом наиболее удобным как раз и является использование соотношений, записанных в приведенной форме, так как результат имеет

общий для большинства реальных газов характер, и решение достаточно выполнить только один раз.

Список использованной литературы

1 Кириченко, П. А. Термодинамика, статистическая и молекулярная физика / П. А. Кириченко. – 3-е изд. – М.: Физматкнига, 2005. – 176 с.

2 Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник для академического бакалавриата / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 442 с.

3 Уэйлес, С. Фазовые равновесия в химической технологии: в 2 ч. – Ч. 1. / С. Уэйлес – М.: Мир, 1989. – 304 с.

4 Дей, Е. А. Расчет параметров изоэнтальпического охлаждения газов Редлиха – Квонга / Е. А. Дей, О. В. Новикова, Г. Ю. Тюменков // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2012. – № 6(75). – С. 39–42.