

УДК 37.016:533.24

ОБ ИЗУЧЕНИИ ТЕМЫ «СЖИЖЕНИЕ ГАЗОВ»  
В КУРСЕ ТЕРМОДИНАМИКИ

А. И. СЕРЫЙ

Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина  
Брест, Беларусь

В учебных программах вузовского курса термодинамики для физико-математических и других специальностей присутствует тема «Сжижение газов» [1, с. 408–412]. Из-за сокращения количества аудиторных часов по физике в целом требуются дидактические новации, позволяющие излагать материал сжато, но без ущерба для полноты содержания.

С одной стороны, следуя известному принципу «все познается в сравнении», в качестве разновидности опорных конспектов можно применять сравнительные таблицы. В качестве примеров учебных пособий преимущественно школьного уровня, использующих такой подход, можно назвать [2, 3]; на вузовском уровне данный подход менее распространен. С другой стороны, в случае вывода отдельных формул с промежуточными подстановками и преобразованиями предпочтительнее использовать блок-схемы.

В качестве примера дадим сравнительную характеристику методов сжижения газов, основанных на предварительном охлаждении, с помощью процесса Джоуля – Томсона [1, с. 143] и адиабатического расширения (табл. 1 и 2).

Табл. 1. Методы охлаждения газов

Метод	Адиабатическое расширение (метод Клода)	С эффектом Джоуля – Томсона (дросселирование)
Постоянная величина	Энтропия $S$	Энтальпия $H$
$\Delta T = T_2 - T_1$	$\int_{P_1}^{P_2} \frac{T}{C_p} (\partial V / \partial T)_P dP$	$\int_{P_1}^{P_2} \frac{T (\partial V / \partial T)_P - V}{C_p} dP$
Схема вывода формулы	Рис. 1	Рис. 2 (другие комментарии в табл. 2)
При прочих равных условиях	Охлаждение больше	Охлаждение меньше
Для идеального газа	Возможно	Невозможно
Разработка холодильного цикла	В. Сименс (Германия) запатентовал в 1857 г., Ж. Клод (Франция) получил жидкий воздух в 1902 г.	У. Хемпсон (Англия), К. Линде (Германия) в 1895 г.
Простота	Более сложный: есть подвижные части, нужна смазка (а она может замерзнуть) или прокладки из других материалов	Более простой: нет подвижных частей, не нужна смазка
Элементы схемы, дающие различие между методами	Поршень и детандер	Вентиль (для дросселирования)

Табл. 2. Варианты записи выражения для  $dH$  в блок-схеме на рис. 2

$dH$	$TdS + VdP$	$(\partial H / \partial T)_P dT + (\partial H / \partial P)_T dP$
То есть через дифференциалы	Только «своих» переменных [1, с. 139]	Не только «своей» переменной [1, с. 142]
Для чего используется	Для получения выражений для $(\partial H / \partial T)_P$ и $(\partial H / \partial P)_T$ , далее используемых в столбце справа	Для приравнивания к нулю (после подстановки выражений для $(\partial H / \partial T)_P$ и $(\partial H / \partial P)_T$ , полученных методом, описанным в столбце слева) для установления взаимосвязи между $dT$ и $dP$

Будем использовать обозначения:  $T$ ,  $T_i$  и  $\Delta T$  – абсолютная температура, ее конкретное значение и конечное изменение соответственно;  $P$  и  $P_i$  – давление и его конкретное значение соответственно;  $V$  – объем;  $C_p$  – молярная теплоемкость при постоянном давлении;  $S$  – энтропия;  $H$  – энтальпия;  $\delta Q$  – количество теплоты.

Тонкие стрелки на блок-схемах (рис. 1 и 2) соответствуют подстановкам, жирные стрелки – следствиям. Исходные блоки (с которых можно начинать

рассуждения) закрашены светло-серым цветом, конечные формулы – темно-серым цветом. В обоих случаях используется одно и то же термодинамическое соотношение Максвелла, отдельно доказываемое в теории термодинамических функций [1, с. 142].

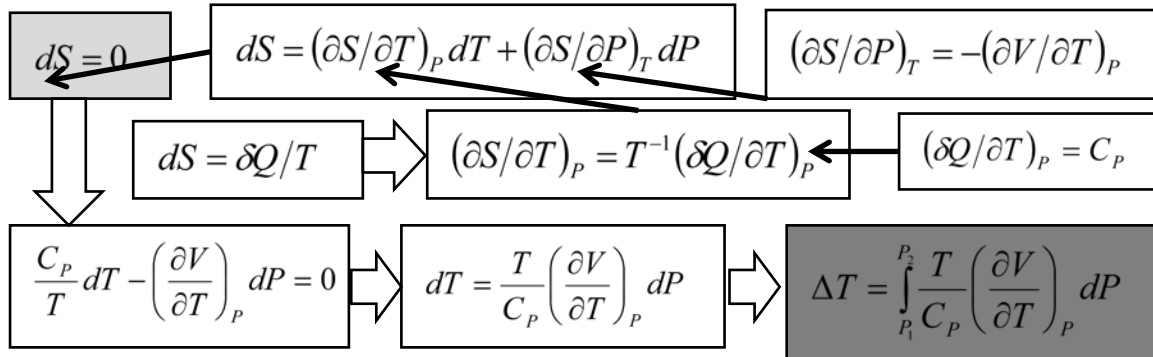


Рис. 1. Блок-схема получения выражения для конечного изменения температуры при адиабатическом расширении газа

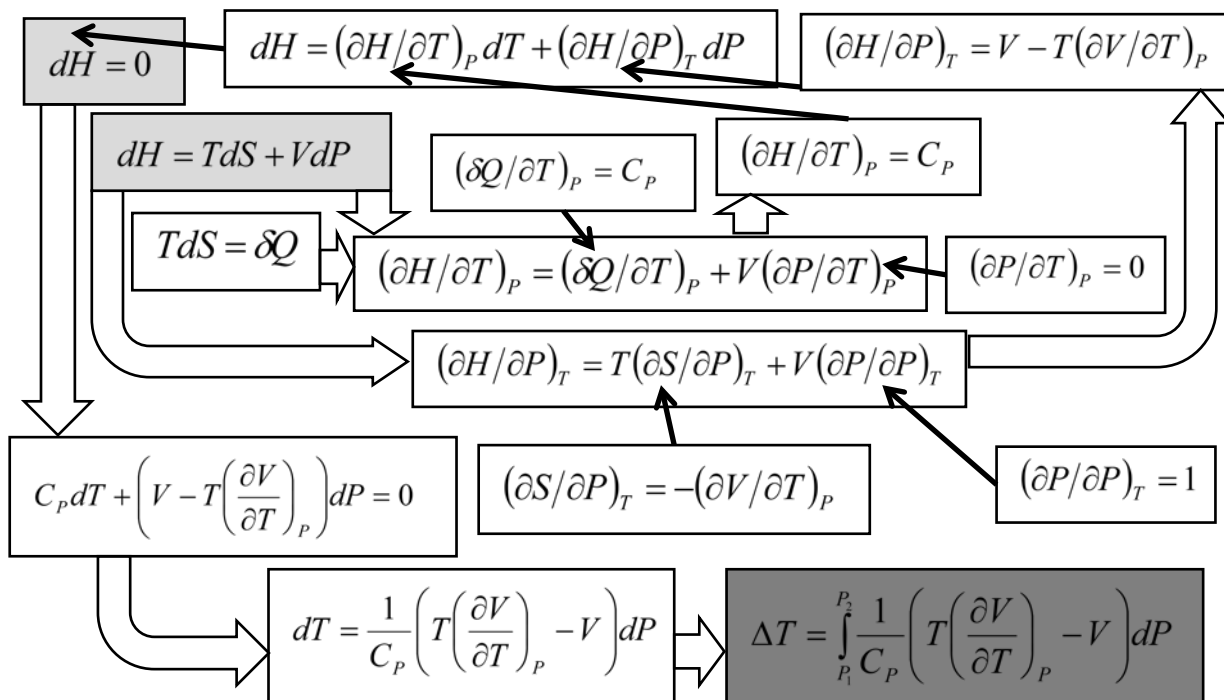


Рис. 2. Блок-схема получения выражения для конечного изменения температуры вследствие эффекта Джоуля – Томсона

Публикация дополняет статьи [4, с. 16–19; 5, с. 8–11], посвященные использованию блок-схем и сравнительных таблиц при изучении термодинамики и статистической физики в вузе.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики : учеб. пособие : в 5 т. Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1975. – 552 с.
2. Физика в таблицах. 7–11 кл.: справ. пособие / авт.-сост. В. А. Орлов. – 11-е изд., стереотип. – М. : Дрофа, 2008. – 63 с. : ил.
3. Физика. Справочник школьника и студента : пер. с нем. / под ред. Р. Гёбеля. – 3-е изд., испр. – М. : Дрофа, 2003. – 366 с.
4. **Серый, А. И.** Об изучении темы «Начала термодинамики» / А. И. Серый // Научный диалог: актуальные вопросы теории и практики : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Наука и Просвещение, 2024. – С. 16–19.
5. **Серый, А. И.** Об изучении темы «Термодинамические функции» / А. И. Серый // Наука и просвещение: актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. ст. XIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Наука и Просвещение, 2024. – С. 8–11.