

- [3] Андреев В.Н., Гофман В.Г., Гурьянов А.А., Чудновский Ф.А. // ФТТ. 1983. № 9. С. 2636-2646.
- [4] Евсеев Б.С. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 8. С. 1543-1545.
- [5] Гиваргизов Е.И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. Наука, 1977. С. 117-118, 170-199.
- [6] Гегузин Я.Е. Капля. Наука, 1977. С. 117-118.
- [7] Исаенко Л.И., Канаев И.Ф., Малиновский В.К., Тюриков В.И. // ФТТ. 1988. Т. 30. В. 2. С. 348-356.

Поступило в Редакцию
21 декабря 1988 г.
В окончательной редакции
21 марта 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 16 26 августа 1989 г.
01; 03

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

А.С. Зильбергейт и Г.В. Скорняков

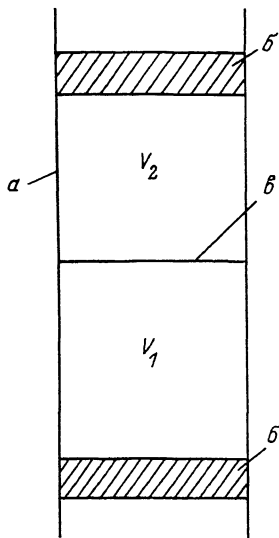
Применение изометрических перегородок – удобный метод создания многопараметрических систем [1]. Если все компоненты многопараметрической системы – идеальные газы, принцип адиабатической недостижимости выполняется. Но если неподвижная изотермическая перегородка разделяет идеальный газ и паро-жидкостную систему, ситуация коренным образом меняется.

Состояние двухфазной системы в области давлений и температур значительно меньших критических с высокой степенью точности описывается уравнениями Клапейрона и Клайпейрона – Клаузиса, причем объемом жидкой фазы в этих условиях можно пренебречь. Всем величинам, относящимся к идеальному газу, припишем индекс 1, а к двухфазной системе – индекс 2. В качестве независимых термодинамических переменных примем температуру T и объемы V_1 и V_2 .

Закон сохранения энергии имеет вид:

$$\delta Q = \left\{ c_{\text{жк}} N_0 - (c_{\text{жк}} - c_{V_2}) N_2 + \frac{q}{T} \left(\frac{q}{T} - 1 \right) N_2 + c_{V_1} N_1 \right\} dT + p_2 \left(\frac{q}{T} + 1 \right) dV_2 + p_1 dV_1, \quad (1)$$

Рис. 1. Схематическое устройство двух-параметрической системы. а - цилиндр, б - подвижные поршни, в - неподвижная изотермическая перегородка. На изотермической стадии процесса цилиндр и перегородка находятся в тепловом контакте с термостатом. На адиабатической стадии процесса система теплоизолирована.



где δQ - количество поступающего в систему тепла, P - давление, N - число молекул газа, N_0 - полное число молекул в гетерогенной системе, c_V - теплоемкость газа при постоянном объеме, $c_{ж}$ - теплоемкость жидкости, q - теплота фазового перехода (все три величины - в расчете на одну молекулу).

Постоянная Больцмана принята равной единице.

Ввиду практической независимости теплоемкости и теплоты фазового перехода от температуры в рассматриваемой области условие Фробениуса [2] сводится к требованию

$$c_{ж} - c_{V_2} = 1. \quad (2)$$

Это требование, как правило, не выполняется [3], интегрирующий множитель пфафовой формы в (1) не существует, следовательно принцип адиабатической недостижимости [1] оказывается нарушенным.

Нарушение принципа адиабатической недостижимости приводит к возможности преобразования тепла в работу с использованием лишь одного термостата. Продемонстрируем это на конкретном примере с помощью термодинамических диаграмм, число которых для двух-параметрической системы равно двум.

Обратимый циклический процесс включает три этапа: 1) адиабатическое ($\delta Q = 0$) сжатие насыщенного пара вплоть до его полной конденсации при неизменном объеме идеального газа ($dV_1 = 0$), сопровождающееся нагревом системы; 2) адиабатическое ($\delta Q = 0$) расширение идеального газа вплоть до исходной температуры при неизменном (нулевом) объеме жидкости ($dV_2 = V_2 = 0$); 3) возвращение обеих частей системы к исходному состоянию в результате изометрического сжатия газа и изометрического расширения двух-фазной системы, производимых в условиях теплового контакта с термостатом, имеющим исходную температуру системы T_0 .

Число молекул в газовой фазе гетерогенной части системы при ее адиабатическом сжатии определяется уравнением

$$\frac{dN_2}{dT} = \frac{1}{q+T} \left\{ \left(\frac{q}{T} + c - 1 \right) N_2 - c_{ж} N_0 - c_{V_1} N_1 \right\}, \quad (3)$$

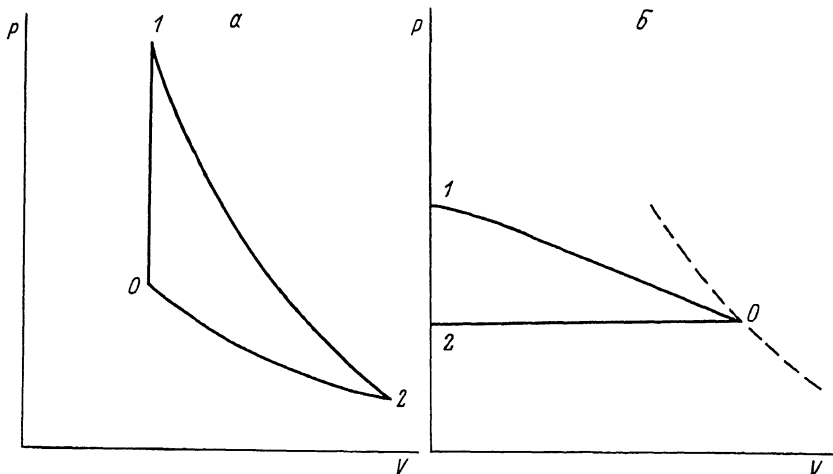


Рис. 2. а) (PV) – диаграмма процесса в газовой составляющей системы. б) (PV) – диаграмма процесса в двухфазной составляющей системы. Пунктиром обозначена кривая фазового равновесия.

где $c = c_{жк} - c_{V2}$. Конденсация происходит, если правая часть уравнения (3) в начальной точке ($T = T_0$, $N_2 = N_0$) отрицательна. Это накладывает следующее условие на параметры системы:

$$\lambda(\theta + c - 1) < 1, \quad (4)$$

где $\theta = \frac{q}{T_0}$, а $\lambda = \frac{N_0}{c_{жк}N_0 + c_{V1}N_1}$. Решение уравнения (3), соответствующее первой стадии процесса, имеет вид:

$$N_2(T) = N_0 \frac{T}{T_0} \left(\frac{q + T}{q + T_0} \right)^{c-2} \left[1 - \frac{T_0}{\lambda} (q + T_0)^{c-2} \int_{T_0}^T \frac{dx}{x(q+x)^{c-1}} \right]. \quad (5)$$

С помощью (1) и (5), а также уравнения Клапейрона, определяется произведенная за цикл работа, равная разности площадей треугольников на термодинамических диаграммах цикла. Эти площади суть:

для идеального газа

$$S_1 = \frac{N_0 T_0}{\lambda} (t_1 - 1 - \ln t_1), \quad (6)$$

для двухфазной системы

$$S_2 = \frac{N_0 T_0}{\lambda} \cdot \frac{\theta [\ln t_1 - \lambda(\theta + 1)]}{c - 1}, \quad (7)$$

Произведенная за цикл работа при $\theta=10$.

$\lambda \backslash c$	0	1	2	3
0.01	0.05818	0	0.05803	0.06168
0.05	0.3149	0	0.5055	0.6292
0.09	0.6179	0	1.6044	-

где t_1 – отношение максимальной температуры системы, достигаемой в результате первого этапа, к температуре термостата, равное корню трансцендентного уравнения:

$$\int_1^{t_1} \frac{dt}{t(\theta+t)^{c-1}} = \lambda(\theta+1)^{2-c}. \quad (8)$$

Значения произведенной за цикл работы (в единицах $N_0 T_0$) при различных значениях параметров системы приведены в таблице.

Таким образом, в рамках квазистатических процессов никаких принципиальных ограничений на преобразование тепла в работу, кроме закона сохранения энергии, не существует. Рассмотренный процесс, пожалуй, наиболее наглядная демонстрация возможностей использования многопараметрической системы [4], вытекающих из общего анализа основных понятий термодинамики [5].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Каратеодори К. Об основах термодинамики. В сб.: Развитие современной физики. М.: Наука, 1964 С. 188–222.
- [2] Математическая энциклопедия. М.: СЭ, 1984. Т. 4. С. 775–777.
- [3] Таблицы физических величин. Справочник под редакцией академика Кикоина И.К. Атомиздат, 1976. 1008 с.
- [4] Скорняков Г.В. // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 3. С. 579–581.
- [5] S k o r n y a k o v G.V. On Thermodynamics. Proc. A.F. Ioffe Phys. – Thech. Inst. v. 2, Math. Phys., Appl. Math., Inform. New York, Nova Science, 1989.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
28 июня 1989 г.