

в) *Принцип невозможности создания вечного двигателя второго рода.* Невозможно создать циклически работающую машину, которая производила бы работу за счет поглощения тепла от одного теплового резервуара, не совершая при этом никаких других изменений состояния системы (вечный двигатель второго рода).

г) *Принцип Каратеодори.* Вблизи любого термически равновесного состояния термически однородной системы существует другое состояние, которое как угодно мало отличается от первого, но никогда не может быть достигнуто из него путем адиабатического перехода.

З а м е ч а н и е. Под термином «другие изменения» подразумеваются такие изменения системы, которые сохраняются после завершения процесса. В формулировке «в» существенно условие цикличности машины. Действительно, при изотермическом расширении идеального газа все тепло, взятое от теплового резервуара, можно преобразовать в работу. Однако такой процесс не может быть периодическим. Очевидно, что формулировки «б») и «в») эквивалентны. В задаче 1 будет доказана эквивалентность формулировок «а») и «б»). Несколько сложнее (см. задачу 30) доказывалась эквивалентность формулировки «г») формулировкам «а») и «б»).

§ 4. Коэффициент полезного действия общего цикла Карно

Общий цикл Карно. Хотя можно предложить ряд обобщений несколько узкого определения цикла Карно, приведенного в § 2, мы будем под обобщенным циклом Карно подразумевать цикл, совершаемый тепловой машиной, которая поглощает тепло Q_1 и Q_2 от двух тепловых резервуаров R_1 и R_2 и совершает работу $A = Q_1 + Q_2$ над окружающей средой (фиг. 20). Следовательно, цикл Карно состоит из двух изотермических процессов и двух адиабатических процессов. Если все эти процессы обратимые, мы имеем *обратимый цикл Карно*.

Коэффициент полезного действия. Если R_1 является горячим резервуаром, а R_2 — холодным резервуаром, то $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$, $A = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|$, а к. п. д. η имеет вид

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}; \quad (2.2)$$

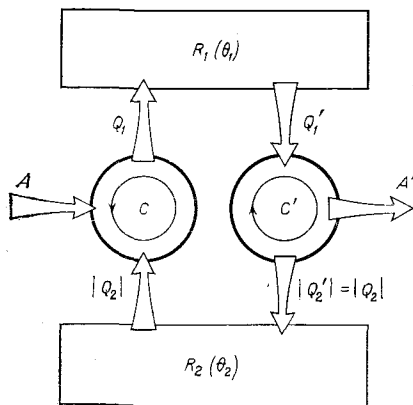
следовательно,

$$1 - \eta = \frac{|Q_2|}{Q_1}. \quad (2.3)$$

Принцип Карно. К. п. д. η обратимого цикла Карно, действующего между тепловыми резервуарами R_1 и R_2 , однозначно определяется температурами θ_1 и θ_2 тепловых резервуаров и не

зависит от рабочего вещества. Более того, к. п. д. η' любого необратимого цикла Карно, действующего между теми же самыми тепловыми резервуарами, меньше η , т. е.

$$\eta = \eta(\theta_1, \theta_2), \quad \eta > \eta'. \quad (2.4)$$



Ф и г. 21.

Доказательство. Рассмотрим два цикла Карно C и C' . Первый из них является обратимым. При этом от теплового резервуара R_1 берется количество тепла Q_1 , резервуару R_2 передается количество тепла $|Q_2|$ и совершается работа $A = Q_1 - |Q_2|$. Цикл C' может быть обратимым или необратимым. В этом цикле от резервуара R_1 берется количество тепла Q_1' , резервуару R_2 передается количество тепла $|Q_2'| = |Q_2|$

и совершается работа $A' = Q_1' - |Q_2'|$. Если цикл C производить в обратном направлении (фиг. 21), то в результате выполнения обоих циклов поглощается тепло $Q_1' - Q_1$ из резервуара R_1 и совершается работа

$$A' - A = Q_1' - |Q_2'| - (Q_1 - |Q_2|) = Q_1' - Q_1.$$

Согласно принципу Томсона, при этом должно выполняться неравенство

$$A' - A \leq 0 \quad \text{или} \quad Q_1' \leq Q_1.$$

Следовательно,

$$\eta' = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1'} \leq 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = \eta.$$

Если цикл C' является обратимым, то циклы C и C' можно заставить действовать в противоположных направлениях ¹⁾, откуда будет следовать, что $\eta' \geq \eta$, а поэтому $\eta = \eta'$.

¹⁾ Если циклы C и C' обратимы на каждой своей стадии, то они могут осуществляться в обратном направлении. Если же эти циклы обратимы в широком смысле слова, то возможно, что их нельзя производить в обратном направлении. Однако можно указать такие процессы \bar{C} и \bar{C}' , которые приводят к противоположному эффекту для каждого цикла. Таким образом, мы приходим к прежнему результату.