

01

©1995

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛА В РАБОТУ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

Г.В.Скорняков

Преобразование тепла в работу обычно производится посредством циклического изменения параметров рабочего тела. В ходе этого циклического процесса рабочее тело периодически приводится в тепловой контакт с двумя термостатами — нагревателем и холодильником, получая тепло от нагревателя и частично преобразуя его в работу, а частично — передавая холодильнику для поддержания баланса энтропии. Максимальным значением КПД преобразования тепла в работу оказывается при этом КПД обратимого цикла Карно.

Принципиально новые возможности преобразования тепла в работу открывает использование термически неоднородных систем в качестве промежуточного теплового резервуара. Термически неоднородным промежуточным тепловым резервуаром служит замкнутый цилиндр, объем которого разделен свободно скользящим адиабатическим поршнем на две части, наполнителями которых могут быть газы или двухфазные системы газ-жидкость.

Термически неоднородную систему можно использовать как своего рода буфер между нагревателем и рабочим телом преобразователя. Основная идея использования термически неоднородной системы в качестве промежуточного

теплового резервуара заключается в том, что при производстве работы она дает возможность рабочему телу черпать энергию из обеих частей буфера, находясь в тепловом контакте лишь с одной из них. В результате производство работы за счет тепла, поступающего из одной части буфера, сопровождается производством холода и подготовкой холодильника, которым служит другая часть буфера, используемая в этом качестве в дальнейших стадиях цикла.

Система преобразования тепла в работу содержит нагреватель, имеющий температуру T_0 , промежуточный тепловой резервуар и двигатель, использующий в качестве рабочего тела, например, идеальный газ. Двигатель и нагреватель могут быть приведены в тепловой контакт с промежуточным тепловым резервуаром. В исходном состоянии обе части промежуточного теплового резервуара приводятся в тепловой контакт с нагревателем, а двигатель — с одной из них. Все части системы находятся при температуре T_0 . На первой стадии цикла тепловой контакт промежуточного теплового резервуара с нагревателем прекращается, и происходит расширение рабочего тела двигателя при сохранении его теплового контакта с одной из частей промежуточного теплового резервуара. Этот процесс сопровождается охлаждением не только части резервуара, находящейся в тепловом контакте с двигателем, но и адиабатически отделенной части в результате ее расширения. Хотя при уменьшении температуры T_1 части резервуара, находящейся в тепловом контакте с рабочим веществом двигателя, температура T_2 адиабатически отделенной части убывает, при заполнении обеих частей резервуара идеальными газами T_2 всегда больше, чем T_1 . Действительно, нетрудно показать, что в этом случае

$$\frac{dT_2}{dT_1} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{\gamma_2 - 1}{1 + \gamma_2 \cdot \frac{N_1 T_1}{N_2 T_2}}, \quad (1)$$

где N_1 и N_2 — числа молекул газа в соответствующих частях системы, γ_2 — показатель адиабаты. Если в исходном состоянии температуры обеих частей промежуточного теплового резервуара одинаковы, при любых N_1/N_2 правая часть (1) меньше единицы. Но даже если в результате уменьшения T_1 правая часть (1) станет больше единицы, T_2 не сможет стать меньше T_1 , так как при $T_2 = T_1$ правая часть (1) меньше единицы.

Положение коренным образом меняется, если часть промежуточного теплового резервуара, находящаяся на первой стадии цикла в тепловом контакте с рабочим веществом двигателя, представляет собой двухфазную систему.

В этом случае в силу уравнений Клапейрона и Клапейрона-Клаузиуса

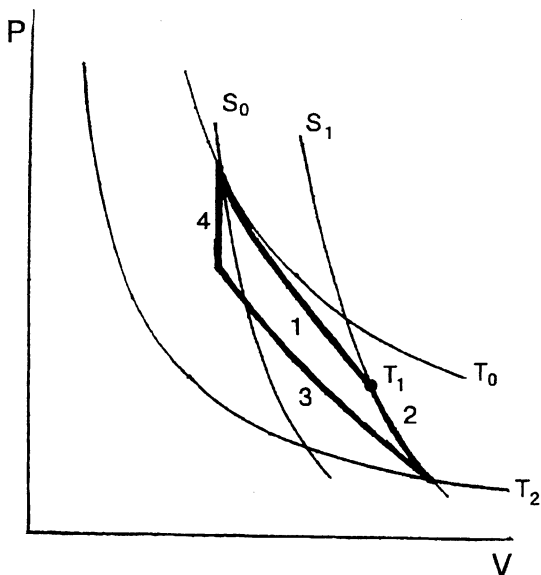
$$\frac{dT_2}{dT_1} = \frac{\gamma_2 - 1}{\gamma_2} \cdot \frac{q_p T_2}{T_1^2}, \quad (2)$$

где q_p — теплота фазового перехода. Поскольку $q_p/T_1 \gg 1$, при охлаждении двухфазной системы отделенный от нее адиабатическим поршнем газ охлаждается быстрее. Характерно, что этот результат не зависит от количеств вещества в газовой фазе и в двухфазной системе. Поэтому теплоемкости частей промежуточного теплового резервуара могут быть должным образом согласованы между собой и с теплоемкостью рабочего вещества двигателя.

На второй стадии цикла прекращается тепловой контакт двигателя с промежуточным тепловым резервуаром, и происходит адиабатическое расширение рабочего тела двигателя и его охлаждение до температуры адиабатически расширившейся части резервуара. На третьей стадии устанавливается тепловой контакт двигателя с этой частью резервуара, и рабочее вещество сжимается до исходного объема. В результате при достаточно большой теплоемкости частей резервуара по сравнению с теплоемкостью рабочего вещества температуры рабочего вещества и обеих частей резервуара оказываются ниже исходной. Цикл замыкается путем установления теплового контакта обеих частей промежуточного теплового резервуара с нагревателем и возвращения к исходному состоянию системы. Этот цикл заведомо необратим, но ввиду отсутствия холодильника в его итоге тепло полностью переходит в работу.

Столь парадоксальный результат обусловлен тем, что термически неоднородная система является, вообще говоря, неинтегрируемой [1-4] (неголономной, по терминологии автора [5]). Более того, в ходе теплового процесса термодинамические характеристики рабочего вещества изменяются. Действительно, на первой стадии цикла происходит по существу адиабатическое расширение идеального газа, находящегося в тепловом контакте с одной частью промежуточного теплового резервуара, на третьей — адиабатическое сжатие того же газа, но находящегося в тепловом контакте с другой его частью, а в промежутке между ними — собственно адиабатическое расширение газа. Приведение рабочего вещества по ходу процесса преобразования тепла в работу в тепловой контакт с различными объектами можно рассматривать как один из способов управления его термодинамическими характеристиками [6].

В результате само понятие термодинамической энтропии по отношению к системе в целом оказывается неприменимым. Для пояснения этого вопроса рассмотрим



(PV)-диаграмму рабочего вещества двигателя. По отношению к этой части системы применимы все обычные термодинамические категории. Первая стадия цикла отображается на (PV)-диаграмме кривой, промежуточной между изотермой и адиабатой. Эта кривая тем ближе к изотерме, чем больше теплоемкость двухфазной части промежуточного теплового резервуара. Термодинамическая кривая, описывающая вторую стадию цикла, совпадает с адиабатой идеального газа. Кривая, соответствующая третьей стадии, тем ближе к изотерме, чем больше теплоемкость газовой части промежуточного теплового резервуара. В результате трех стадий цикла энтропия рабочего вещества двигателя оказывается меньше исходной. Поскольку все они проходили в условиях термоизоляции от нагревателя, казалось бы, энтропия промежуточного теплового резервуара должна быть больше исходной, но на заключительной стадии цикла все части системы нагреваются. Поэтому и энтропия системы растет, а не возвращается к исходному значению. Решение этого парадокса в том, что энтропия термически неоднородной системы вообще не определена и не может "доопределяться" с помощью суммы энтропий составляющих ее частей, как это предложено в [5].

Неполное установление теплового равновесия между рабочим веществом двигателя и частями термически неоднородной системы приведет к тому, что термодинамические кривые первой и третьей стадий цикла пойдут более круто, так что производимая за цикл работа уменьшится, но

преобразование тепла в работу не станет от этого менее полным.

Рассмотренный пример является, пожалуй, самым наглядным свидетельством несостоятельности второго начала термодинамики. Никаких принципиальных ограничений для преобразования тепла в работу, кроме закона сохранения энергии, не существует.

Список литературы

- [1] Скорняков Г.В. О термодинамике анизотропных магнетиков // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 3. С. 579-581.
- [2] Silbergleit A.S., Skornyakov G.V. The New Concept of Thermodynamics. Heat into Work Conversion in Multiparameter Systems. In: Balances in the Atmosphere and the Energy Problem. Proc. of the 59th WE-Heraeus Seminar. EPS, Geneva, 1990. P. 193-204.
- [3] Зильберглейт А.С., Скорняков Г.В. Преобразование тепла в работу с помощью потенциальных систем // ЖТФ. 1992. Т. 62. В. 2. С. 190-195.
- [4] Silbergleit A.S., Skornyakov G.V. Non-Integrable Thermodynamic Systems and Intelligent Ways for the Conversion of Heat into Work. In: Using Energy in an Intelligent Way. Proc. of the 111th WE-Heraeus Seminar. EPS, Geneva, 1993. P. 71-84.
- [5] Афанасьева-Эренфест Т.А. Необратимость, односторонность и второе начало термодинамики // Журнал прикладной физики. 1928. Т. 5. В. 3-4. С. 3-30.
- [6] Скорняков Г.В. Об управлении термодинамическими характеристиками тел // ЖТФ. 1982. Т. 52. В. 6. С. 1259-1260.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
1 ноября 1995 г.