

01

Преобразование тепла в работу с помощью термически неоднородных систем (исправление)

© Г.В. Скорняков

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

Поступило в Редакцию 31 января 1997 г.

Устранена ошибка в построении примера квазистатического циклического процесса полного преобразования тепла в работу с помощью неинтегрируемой термодинамической системы с управляемыми термодинамическими характеристиками.

В работе автора [1] предложен принципиально новый цикл преобразования тепла в работу с использованием термически неоднородных систем в качестве промежуточного теплового резервуара. Промежуточным тепловым резервуаром служит замкнутый цилиндр, объем которого разделен свободно скользящим адиабатическим поршнем на две части, одна из которых заполнена газом, а другая — двухфазной системой газ–жидкость. Наличие адиабатического поршня в промежуточном тепловом резервуаре обеспечивает неинтегрируемость (неголономность) системы. Рабочим телом двигателя служит газ.

Однако в анализе хода термодинамической кривой двигателя в [1] допущена неточность, связанная с тем, что от внимания автора ускользнул тот факт, что по мере роста массы газа в промежуточном тепловом резервуаре уменьшаются пределы изменения его объема на первой стадии цикла, а следовательно и падение температуры на этой стадии. В результате при сжатии рабочего тела, находящегося в тепловом контакте с газом промежуточного теплового резервуара, до исходного объема его температура всегда оказывается выше исходной, а произведенная за цикл работа отрицательной.

В процессе сжатия рабочего тела для его охлаждения использовалась только одна часть промежуточного теплового резервуара. Хотя она и охлаждается на первой стадии процесса до значительно более низких температур, чем двухфазная система, запас холода в ней сравнительно

невелик и в основном сосредоточен в другой его части. К тому же использование разделенных адиабатической перегородкой частей системы исключительно в качестве теплового резервуара ограничивает возможности их применения в процессе.

Для более эффективного использования всего запасенного на первой стадии процесса холода и всех возможностей неинтегрируемой системы с управляемыми термодинамическими характеристиками в процессе полного преобразования тепла в работу как сама система преобразования, так и проводимый цикл должны быть модифицированы следующим образом.

Рассмотрим систему, все три части которой содержат произвольные количества вещества. Единственное условие, которому должны удовлетворять параметры двухфазной системы и газа, заполняющих промежуточный тепловой резервуар, имеет вид:

$$\frac{\gamma_2 - 1}{\gamma_2} \cdot \frac{q_p}{T_0} > 1. \quad (1)$$

Конструктивно система может представлять собой цилиндр с рабочим поршнем, связанным с внешней нагрузкой, причем объем цилиндра разделен на три части двумя теплоизолирующими поршнями. Один из этих поршней служит подвижной адиабатической перегородкой, разделяющей двухфазную систему и газ промежуточного теплового резервуара, а другой, расположенный ближе к рабочему поршню, может быть фиксирован. Заключенный между этими двумя последними поршнями газ, идентичный газу в тепловом резервуаре, можно считать рабочим веществом двигателя. Между всеми тремя частями системы возможно установление и прекращение теплового контакта. Возможно также установление и прекращение теплового контакта системы в целом с нагревателем.

В исходном состоянии система находится в тепловом контакте с нагревателем, оба разделяющие объем цилиндра поршня свободны, давления во всех трех частях системы одинаковы и равны P_0 . При температуре нагревателя T_0 жидкая фаза полностью испарена и соответствующий объем V_1 заполнен насыщенным паром. На первой стадии процесса фиксируется положение поршня, отделяющего промежуточный тепловой резервуар от двигателя, производится термоизоляция системы от нагревателя, и устанавливается тепловой контакт насыщенного пара с газом двигателя, находящимся между фиксированным и рабочим порш-

нем. В результате расширения этого газа с помощью рабочего поршня, сопровождаемого производством работы, пар охлаждается вплоть до полной конденсации. Температура газа и жидкости оказывается равной T_1 . В результате адиабатического расширения газа, заполняющего другую часть промежуточного теплового резервуара, его объем увеличится практически до полного объема резервуара, а температура упадет до $T_2 < T_1$. На второй стадии процесса тепловой контакт двигателя с резервуаром прекращается, и дальнейшее производство работы и расширение газа двигателя происходит адиабатически до температуры T_2 . В дальнейшем, на третьей стадии, устанавливается тепловой контакт двигателя с газовой частью теплового резервуара, и газ двигателя сжимается с затратой работы. Но это сжатие происходит не до исходного объема, как предлагалось в [1], а до достижения температуры T_1 , после чего устанавливается тепловой контакт между всеми частями системы, и на заключительной, четвертой стадии, сжатие продолжается до исходного объема. В результате для охлаждения газа двигателя используется весь запас холода, созданный на первой стадии процесса.

Поскольку в конце первой стадии газ заполняет весь объем теплового резервуара, его нагрев до температуры T_1 происходит при постоянном объеме. Поэтому влияние теплового контакта с ним на ход сжатия газа двигателя сводится к соответствующему увеличению теплоемкости этого газа при постоянном объеме. В результате установления теплового контакта между всеми частями системы при температуре T_1 к этой теплоемкости добавляется еще теплоемкость жидкости. Так как давление насыщенного пара при температуре T_1 равно давлению заполняющего весь объем теплового резервуара газа при температуре T_2 , сжатие газа после установления теплового контакта между всеми частями системы вначале будет происходить при сохранении неизменного количества жидкой фазы. Однако давление насыщенного пара при нагреве растет значительно быстрее давления газа при постоянном объеме. Поэтому вскоре после достижения температуры T_1 начнется испарение жидкой фазы. Основной запас холода при $q_q/T_0 \gg 1$ и сопоставимых массах газа и двухфазной системы в промежуточном тепловом резервуаре сосредоточен именно в жидкой фазе и высвобождается при ее испарении. Особенно ярко это проявляется, если число молекул газа в резервуаре N_2 значительно меньше числа молекул в двухфазной системе N_1 .

Но при любых отношениях масс во всех трех частях преобразователя возвращение газа двигателя к исходному объему приведет температуру

всех частей к исходной. Это обусловлено тем, что все стадии процесса обратимы, а теплообмен между различными частями системы происходит в равновесных условиях. Хотя об энтропии неинтегрируемой системы говорить не приходится, каждая часть системы обладает своей энтропией. На заключительной стадии процесса, как и в исходном состоянии, система термически однородна, и ее энтропия равна сумме энтропий частей системы. В силу сохранения суммы энтропий всех частей системы в обратимом адиабатическом процессе при возвращении объема двигателя к исходному к исходному значению возвращается и его температура.

Очевидно, работа, произведенная при расширении газа двигателя, в точности равна работе, затраченной на его сжатие. Любое уменьшение затрачиваемой на сжатие работы приведет к снижению энергии и конечной температуры системы. Уменьшения работы, затрачиваемой на возврат рабочего поршня в исходное состояние, можно добиться за счет уменьшения объема промежуточного теплового резервуара и, соответственно, увеличения объема двигателя в результате сжатия.

Действительно, по достижении при сжатии газа двигателя равенства давлений во всех частях системы закрепленный ранее поршень, отделяющий промежуточный тепловой резервуар от двигателя, можно освободить. В результате сжимаемость системы возрастет, и при возвращении рабочего поршня к исходному положению объем двигателя будет больше исходного, а резервуара — меньше. В этом случае сохранение суммарной энтропии частей системы не приводит к равенству температуры системы исходной температуре. Затраченная на сжатие работа заведомо уменьшится, в результате возвращения рабочего поршня в исходное состояние температура и давление в системе будут меньше исходных. Исходные объемы частей системы, температура и давление в них восстанавливаются в результате установления теплового контакта всех частей системы с термостатом.

Но если рассмотренный ранее цикл с фиксированным объемом промежуточного теплового резервуара и возвратом к исходной температуре осуществим при любых соотношениях масс вещества в различных частях системы, цикл с охлаждением системы в результате возврата рабочего поршня в исходное состояние накладывает ограничения на параметры системы. Очевидно, хотя полной конденсации пара на первой стадии процесса можно достичь при сколь угодно малой массе газа в двигателе путем достаточно большого увеличения его объема, давление

газа в двигателе в этом случае будет столь малым, что выравнивание давлений в системе до достижения исходного объема двигателя окажется невозможным. Однако при соблюдении условия

$$P(T_1, N, N_1, N_2) > \frac{N_2 T_1}{V_1}, \quad (2)$$

заведомо выполняющегося при достаточно больших $N(N_2 \ll N_1 \ll N)$, давления в системе выравниваются на третьей стадии цикла. Здесь $P(T_1, N, N_1, N_2)$ — давление в двигателе в конце первой стадии, N — число молекул в двигателе. Возврат системы в исходное состояние сопровождается переопределением энтропии.

При изменении объема промежуточного теплового резервуара в ходе процесса преобразования тепла в работу невозможно четко отделить двигатель от части системы, участвующей лишь в процессе теплообмена. В ходе процесса изменяются не только параметры отдельных частей системы, но и ее структура в целом. Поэтому графическое изображение термодинамической диаграммы в пространстве двух переменных, строго говоря, недопустимо.

Автор признателен В.И. Перелю за стимулирующие дискуссии.

Список литературы

- [1] *Скорняков Г.В.* Преобразование тепла в работу с помощью термически неоднородных систем // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 23. С. 1–5.