

05;12

Исследование термодинамических и физических характеристик термомагнитного двигателя с гадолиниевым рабочим элементом

© К.Н. Андреевский, А.Г. Манджавидзе, И.Г. Маргвелашвили, С.В. Соболевская

Институт физики АН Грузии,
380077 Тбилиси, Грузия

(Поступило в Редакцию 19 августа 1997 г.)

Проведено количественное описание термодинамических характеристик термомагнитных преобразователей. Получены выражения для работы и коэффициента полезного действия магнитотеплового двигателя в зависимости от тепловых и магнитных свойств рабочего вещества. Приведены экспериментальные результаты, полученные на лабораторной модели двигателя.

Введение

Возможность создания термомагнитных генераторов, работающих в режиме периодического нагрева и охлаждения ферромагнетика в присутствии внешнего магнитного поля и преобразующих тепловую энергию нагревателя в электрическую или механическую, рассматривалась в [1–9]. Подавляющее большинство подобных экспериментальных разработок использует в качестве рабочих элементов редкоземельные магнетики, обладающие своеобразными магнитными свойствами [10–12]: сравнительно низкими температурами Кюри θ (от комнатной температуры до 100°C), резкими температурными зависимостями намагниченности во внешнем магнитном поле вблизи точки магнитного фазового перехода и др. Однако указанные работы посвящены преимущественно описанию технических принципов; в то же время в литературе практически отсутствуют работы, посвященные физическим (в частности, термодинамическим) основам термомагнитных генераторов и двигателей.

Термодинамика магнитотеплового двигателя

Для количественной оценки термодинамических характеристик магнитотепловых преобразователей, использующих явление изменения намагниченности ферромагнетика при изменении его температуры под влиянием импульса тепла в присутствии внешнего поляризирующего магнитного поля, выбран следующий цикл (рис. 1). На первом этапе (AB) (адиабатический процесс) быстрое включение поляризирующего магнитного поля H обуславливает выделение тепла за счет магнитокалорического эффекта. Этот эффект во многих редкоземельных магнетиках вблизи точки Кюри намного превышает такие эффекты в Fe, Co и Ni [12], поэтому изменение температуры магнетика в достаточно сильных (порядка нескольких десятых Тесла) полях может быть весьма существенным (на рис. 1 $H_0 = 0$, $T_B > T_A$).

На втором этапе (BC) при $H = \text{const}$ магнетику сообщается количество тепла Q_1 , вследствие чего его

температура возрастает от T_B до T_C , а намагниченность уменьшается от $j(T_B)$ до $j(T_C)$. На третьем этапе (CD) (адиабатический процесс) поляризирующее магнитное поле выключается. При этом происходит обратимое поглощение тепла и температура магнетика падает до T_D .

Наконец, на четвертом этапе цикла (DA) от магнетика отводится излишек тепла Q_2 , его температура уменьшается до T_A — магнетик возвращается в исходное состояние.

Работа, совершаемая магнетиком за один цикл, $A = |Q_1| - |Q_2|$, была вычислена с использованием хорошо известных соотношений между термодинамическими и магнитными характеристиками рабочего вещества [13–15]. Для работы и КПД получены следующие выражения:

$$A = mC_p(T_C - T_B)(1 - \exp[-(kH^2/2C_p)]), \quad (1)$$

$$\eta = A/Q_1 = 1 - \exp(-kH^2/2C_p). \quad (2)$$

Здесь m — масса магнетика, C_p — удельная теплоемкость в отсутствие магнитного поля, k — коэффициент в разложении намагниченности j по малому параметру. Выражение (2) с помощью простых преобразований можно привести к виду

$$\eta = 1 - T_A/T_B = (T_B - T_A)/T_B. \quad (3)$$

Представим работу как функцию температур в самой холодной (T_A) и самой горячей (T_C) точках цикла

$$A = mC_p(1 - \exp[-kH^2/2C_p]) \times (T_C - T_A \exp[-kH^2/2C_p]). \quad (4)$$

Из условия $A > 0$ и положительности выражения в первых скобках получаем неравенство

$$T_C - T_A \exp[kH^2/2C_p] > 0, \quad (5)$$

из которого следует ограничение на величину магнитного поля

$$H < (2C_p/k) \ln(T_C/T_A). \quad (6)$$

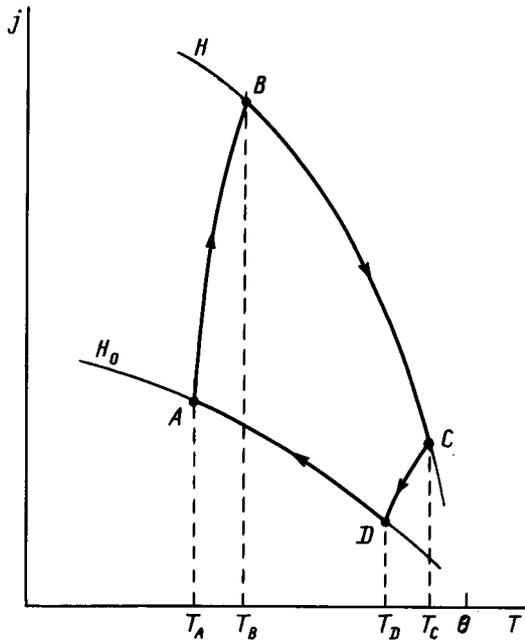


Рис. 1. Зависимость намагниченности ферромагнетика j от его температуры T в полях: $H_0 = 0$ и $H = \text{const}$.

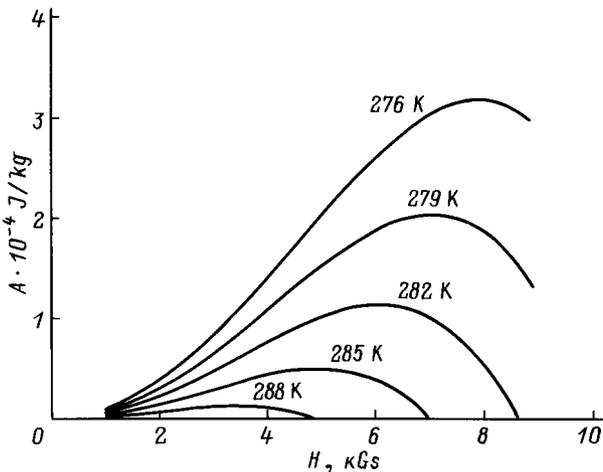


Рис. 2. Кривые зависимости работы (на 1 g Gd) от величины внешнего магнитного поля H при различных температурах холодильника и $T_C = 291$ K, рассчитанные по (4).

Физический смысл этого ограничения в том, что при превышении магнитным полем величины в правой части (6) обратимое выделение тепла за счет магнитокалорического эффекта вызывает нагрев магнетика до температуры $T_B > T_C$, вследствие чего прекращается передача тепла от нагревателя магнетику.

Для количественной оценки величины работы магнетика за один цикл при различных значениях магнитного поля H и температуры холодильника T_A значение k подбиралось эмпирически. Из температурной зависимости удельной намагниченности гадолиния [11] следует, что

при $H = 0.2$ T произведение $kH = -(\partial j / \partial T)_{H,P}$ составляет примерно $2.7 \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K}$ и соответственно $k = 1.33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K}$. В качестве оценочного значения C_p использовалась решеточная теплоемкость, равная, согласно закону Дюлонга и Пти, $25 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$, что для Gd дает $C = 1.6 \cdot 10^2 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

Рассчитанные по (4) кривые зависимости работы (на 1 g Gd) от величины внешнего магнитного поля H при различных температурах холодильника и $T_C = 291$ K приведены на рис. 2. Расчеты показывают, что работа растет с магнитным полем до некоторого значения $H = H^*$, затем с ростом H работа убывает и обращается в нуль при значении H , определяемом (6). Максимальная величина работы $A(H^*)$ оказывается тем больше, чем ниже температура холодильника T_A .

Экспериментальные результаты

Основным рабочим элементом магнитотеплового двигателя является ротор (рис. 3), выполненный в виде диска 1 из теплопроводящего материала (оргстекло), насаженный на дюралевую ось 2 с возможностью вращения в горизонтальной плоскости в шарикоподшипнике 3. На ободе диска расположены плоскопараллельные пластины гадолиния, образующие круговое кольцо толщиной 1 mm. Гадолиниевые пластины при вращении диска проходят между одноименными полюсами постоянных магнитов 4, закрепленных симметрично относительно плоскости вращения и создающих на входе в зазор между ними неоднородное магнитное поле, также симметричное относительно плоскости вращения. В исходном состоянии, когда температура всех гадолиниевых пластин одинакова и равна температуре окружающей среды, на пластины со стороны магнитного поля магнитов 4 действуют две равные по величине и противоположно направленные силы F_1 и F_2 , удерживающие диск 1 в состоянии покоя. Сила, действующая на элемент магнетика

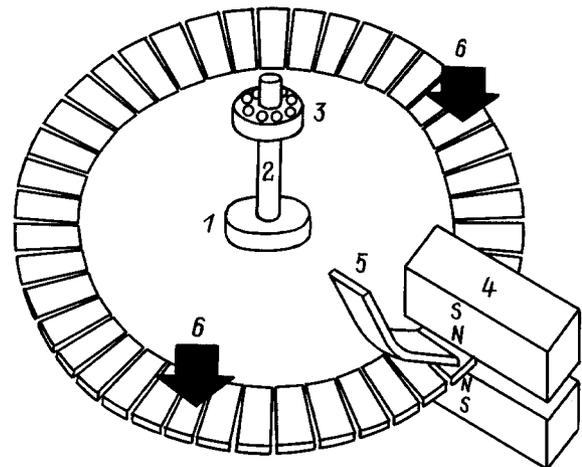


Рис. 3. Схема действующей модели магнитотеплового двигателя: 1 — ротор, 2 — ось, 3 — шарикоподшипник, 4 — магниты, 5 — подача горячей воды, 6 — области охлаждения.

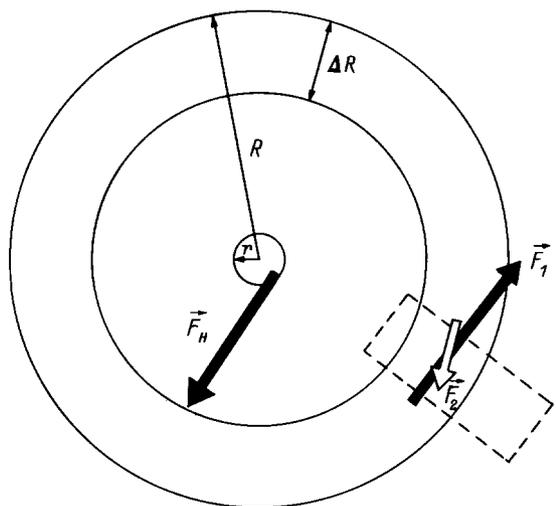


Рис. 4. Силы, действующие на пластины со стороны магнитного поля (\mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2), и сила нагрузки (\mathbf{F}_H), действующая на ось.

массой dm , равна по величине

$$dF = jdm(\partial H/\partial x), \tag{7}$$

где $\partial H/\partial x$ — градиент магнитного поля вдоль силовых линий.

При работе двигателя на пластины гадолиния, проходящие в процессе вращения диска в зазоре между полюсами магнитов, по медным трубкам 5 подается горячая вода. Нагрев пластин уменьшает их намагниченность, в результате чего возвращающая сила \mathbf{F}_2 на выходе из области действия магнитного поля оказывается по модулю значительно меньше силы \mathbf{F}_1 , действующей на магнетик на входе в зазор (рис. 4). Если суммарный момент сил \mathbf{F}_1 , \mathbf{F}_2 и силы нагрузки на оси диска \mathbf{F}_H отличен от нуля, то диск совершает ускоренное вращение, в результате которого в область нагрева вводятся следующие пластины рабочих элементов. Покинувшие же область действия магнитного поля пластины попадают в зону охлаждения холодной водой, также подающейся на поверхность пластин по медным трубкам 6. Поскольку область нагрева расположена лишь в зазоре между полюсами постоянных магнитов, а область охлаждения охватывает практически всю остальную часть диска, то можно считать, что на входе в зазор гадолиниевые пластины равномерно охлаждены до температуры холодной воды T_D . В процессе ускоренного вращения диска сокращается время нахождения пластин в области нагрева. Поэтому пластины нагреваются до меньшей температуры и сила \mathbf{F}_2 , действующая на них на выходе из зазора, увеличивается по модулю. В итоге при постоянном расходе горячей и холодной воды и неизменной силе нагрузки \mathbf{F}_H суммарный момент сил становится равным нулю и устанавливается стационарный режим вращения с практически постоянной угловой скоростью.

В рассматриваемой конструкции двигателя была выбрана такая конфигурация расположения постоянных магнитов, при которой они обращены одноименными полюсами навстречу друг другу. Выбор подобной конфигурации обусловлен следующими соображениями. Для эффективной работы двигателя необходимо неоднородное поле на входе в зазор между магнитами при максимально возможной его однородности в области нагрева. Более того, сила \mathbf{F}_1 , обусловленная неоднородностью поля на входе, должна обладать возможно большей составляющей в требуемом направлении движения рабочих элементов. Практически идеально удовлетворяет этим требованиям поле с соленоидальной структурой.

Рассмотрение различных конфигураций взаимного расположения постоянных магнитов показало, что ориентирование магнитов разноименными полюсами навстречу друг другу не удовлетворяет сформулированным выше требованиям. Действительно, хотя в этом случае удовлетворяется требование однородности поля в области нагрева, однако ориентация силовых линий в направлении, перпендикулярном плоскости вращения диска, создает на входе в зазор силы, направленные под большими углами к плоскости вращения, при этом результирующая сила, лежащая в плоскости вращения, весьма мала.

При расположении постоянных магнитов с параллельно ориентированными магнитными моментами конфигурация магнитного поля сходна с соленоидальной. Однако в этом случае магнитное поле вытесняется из центральной области, прилегающей к плоскости вращения диска как на входе в зазор, так и внутри его, поэтому результирующая сила \mathbf{F}_1 , стягивающая магнитные элементы в зазор, также мала. В случае же расположения постоянных магнитов одноименными полюсами навстречу друг другу (антипараллельная ориентация магнитных моментов), несмотря на значительную неоднородность поля в зазоре, конфигурация поля на входе в зазор близка к соленоидальной и обеспечивает максимальную величину стягивающей силы \mathbf{F}_1 по сравнению с другими способами расположения магнитов.

Радиус диска экспериментального макета магнитотеплового двигателя $R = 0.09$ м при ширине кругового кольца гадолиниевых рабочих элементов $\Delta R = 0.02$ м и радиус оси диска $r = 0.005$ м. Максимальная напряженность магнитного поля на входе в зазор $\sim 1.5-2$ Т. На рис. 5 приведены экспериментальные кривые зависимости стационарной мощности, измеренной при испытаниях макета, от силы нагрузки на оси диска \mathbf{F}_H . Кривые 1 и 2 представляют указанные зависимости для макета, содержащего одну пару постоянных магнитов, ориентированных одноименными полюсами навстречу друг другу, и соответственно одну область нагрева. Температура холодной воды составляла около 16°C , а горячей — 54°C (кривая 1) и 68°C (кривая 2). Увеличение силы нагрузки \mathbf{F}_H , начиная с близких к нулю значений, приводит к росту полезной мощности до некоторой максимальной величины и ее спаду при более высоких значениях \mathbf{F}_H .

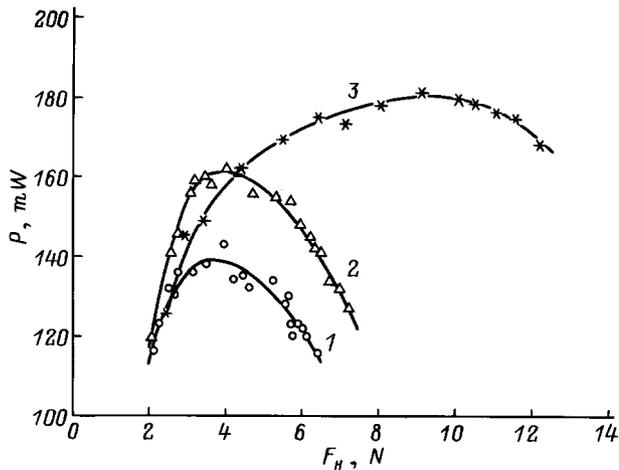


Рис. 5. Зависимость мощности двигателя от величины нагрузки на оси.

Рост мощности с силой нагрузки в области малых значений F_H обусловлен, по-видимому, тем, что с увеличением F_H и соответственно снижением угловой скорости вращения диска рабочие элементы в зазоре между магнитами успевают нагреться до более высокой температуры. При этом распределение температур по толщине пластины более однородно. Кроме того, при снижении скорости вращения уменьшается роль диссипативных факторов.

Спад мощности в области более высоких значений F_H связан, очевидно, с тем, что при уменьшении угловой скорости вращения ω , начиная с некоторого ее значения, пластины в зазоре успевают по всей толщине нагреться до температур, превышающих точку Кюри. Поэтому с дальнейшим уменьшением ω снижается величина работы, совершаемой двигателем за фиксированный промежуток времени.

Кривая 3 на рис. 5 представляет зависимость мощности от нагрузки для того же двигателя, но содержащего две пары магнитов и соответственно две области нагрева рабочих элементов, разнесенных симметрично относительно оси вращения по противоположным концам диаметра диска. Температуры холодной и горячей воды соответственно равны 15 и 66°C. Видно, что введение еще одной пары магнитов увеличивает как полезную мощность двигателя в максимуме, так и протяженность рабочего интервала нагрузок. При этом можно было ожидать удвоения максимальной мощности двигателя; наблюдавшаяся же в эксперименте меньшая величина эффекта обусловлена тем, что суммарный расход горячей воды в расчете на две пары магнитов оставался практически таким же, как и в случае с одной парой, что эквивалентно двукратному снижению расхода горячей воды в расчете на одну пару магнитов.

Выводы

1. На основе известных соотношений термодинамики и магнетизма получены выражения для работы и КПД магнитотеплового преобразователя. Показано, что работа сложным образом зависит от напряженности внешнего магнитного поля: растет с увеличением H до некоторого максимального значения, а затем падает.

2. Проведена оптимизация конфигурации внешнего магнитного поля для получения максимального значения силы, действующей на рабочее вещество.

3. При испытании лабораторной модели двигателя получены зависимости мощности от величины нагрузки при разных температурах нагревателя и холодильника.

Список литературы

- [1] *Stauss H.E.* // J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30. P. 1622–1623.
- [2] *Elliot J.* // J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30. P. 1774–1777.
- [3] *Ohboshi M., Kabayashi H.M., Katayama T.* et al. // J. Appl. Phys. Jap. 1976. Vol. 15. P. 2019–2023.
- [4] *Петренко И.С., Финкель В.А.* // ЖТФ. 1980. Т. 50. С. 2421–2424.
- [5] *Тюрин А.Л.* Автореф. канд. дис. Ашхабад, 1988. 18 с.
- [6] *Бобошко К.К.* Магнитотепловой двигатель. А. С. № 1295027.
- [7] *Николайчук А.П.* Магнитотепловой двигатель. А. С. № 1341377.
- [8] *Манджavidзе А.Г., Бедбенов В.С., Штаерман А.Ю.* Устройство для преобразования солнечной энергии в механическую. А. С. № 1453998.
- [9] *Манджavidзе А.Г., Бедбенов В.С.* Терромагнитный двигатель. А. С. № 1414046.
- [10] *Белов К.П.* Редкоземельные магнетики и их применение. М.: Наука, 1980. 239 с.
- [11] *Белов К.П., Белянникова М.А., Левитин В.З., Никитин С.А.* Редкоземельные ферро- и антиферромагнетики. М.: Наука, 1965. 319 с.
- [12] *Белов К.П.* Магнитотепловые явления в редкоземельных магнетиках. М.: Наука, 1990. 259 с.
- [13] *Шматко С.А., Усов Ю.В.* Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1987.
- [14] *Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш.* Термодинамика, статическая физика и кинетика. М.: Наука, 1977. 552 с.
- [15] *Базаров И.П.* Термодинамика. М.: Высшая школа, 1976. 448 с.