

# ТЕРМОМАГНИТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ: РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ И ОПЫТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕРМОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО МЕТАЛЛА ДИСПРОЗИЯ

*Т.В. Сухарева, В.А. Финкель*

*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,  
Харьков, Украина*

*E-mail: sukhareva@kipt.kharkov.ua*

Цель работы – разработка физических основ и опытная реализация термомагнитного метода преобразования тепловой энергии в электрическую, основанного на использовании в качестве рабочего тела редкоземельного металла диспрозия – вещества, испытывающего в интервале температур  $\Delta T_{AF \leftrightarrow FM}$  фазовый переход первого рода геликоидальный антиферромагнетизм  $\leftrightarrow$  коллинеарный ферромагнетизм (AF $\leftrightarrow$ FM). Изучено поведение гистерезисных эффектов в окрестности температуры AF $\leftrightarrow$ FM фазового перехода. Показано, что в качестве рабочего тела термомагнитного генератора следует использовать монокристаллы диспрозия, ориентированные осью легкого намагничивания **a** вдоль вектора напряженности магнитного поля **H**.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Поиск, теоретическое и экспериментальное изучение и опытная реализация новых источников и преобразователей энергии относятся к числу наиболее актуальных проблем современной науки и техники. Для многих отраслей современной техники несомненный интерес представляет термомагнитный генератор (ТМГ) – устройство, в котором за счет изменения намагниченности (*M*) рабочего тела происходит прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

Принципы работы ТМГ были сформулированы еще в конце XIX столетия крупнейшими учеными того времени Т. Эдисоном [1] и Н. Тесла [2]: при изменении во времени намагниченности ферромагнетика, помещенного во внешнее магнитное поле **H**, при периодическом нагреве и охлаждении (“термоциклировании”) в интервале температур, в котором зависимость *M(T)* достаточно сильна, изменяется магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий некий контур **L**. В контуре в соответствии с первым уравнением Максвелла индуцируется э.д.с. ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) ТМГ составляет [3]

$$\eta = \frac{\pi}{4\sqrt{2}} \frac{T_2 - T_1}{T_2}, \quad (2)$$

где  $T_2 \leftrightarrow T_1$  – диапазон “термоциклирования”.

Обычно в качестве интервала температур, в котором зависимость *M(T)* достаточно сильна, выступает окрестность точки Кюри  $T_c$  ферро- или ферримагнетика [4].

Иной принцип обеспечения работоспособности термомагнитного генератора с высокими выходной мощностью и коэффициентом полезного действия предлагается в настоящей работе. Целью работы

является разработка физических основ и опытная реализация нового метода преобразования тепловой энергии в электрическую, основанного на использовании в качестве рабочего тела вещества, испытывающего в достаточно узком интервале температур,  $\Delta T_{AF-FM}$ , фазовый переход первого рода геликоидальный антиферромагнетизм $\leftrightarrow$ коллинеарный ферромагнетизм (AF $\leftrightarrow$ FM), а именно – представителя иттриевой подгруппы РЗМ диспрозия ( $T_{AF \leftrightarrow FM} \sim 85$  K).

Проведенные ранее исследования кристаллической и магнитной структуры, электрических, магнитных, тепловых и других свойств диспрозия (см., например, [5 - 11]) дают основания полагать, что этот редкоземельный металл весьма перспективен в качестве рабочего тела ТМГ, обеспечивающего достаточно высокие значения выходной мощности и коэффициента полезного действия. Действительно, температура AF $\leftrightarrow$ FM фазового перехода находится в области, очень удобной для реализации ТМГ, скачок удельной намагниченности монокристаллов Dy (**a** || **H**) при этом переходе максимален, а критическое поле AF $\leftrightarrow$ FM-перехода невелико. В силу этого э.д.с., индуцируемая в контуре, окружающем рабочее тело, при прочих равных параметрах ТМГ в случае Dy должна быть максимальной.

Как нетрудно показать, расчетное среднее значение э.д.с. ( $\bar{\varepsilon}$ ), индуцированной в электрической катушке, которая намотана на бесконечно длинный образец, помещенный в постоянное магнитное поле, составляет

$$\bar{\varepsilon} = \frac{4\pi}{c} \cdot \frac{S \cdot N \cdot \Delta M}{\tau_{eff}}, \quad (3)$$

где *S* – площадь поперечного сечения образца; *N* – число витков измерительной катушки;  $\tau_{eff}$  – эффективное время фазового перехода.

Очевидно, что экспериментальное среднее значение э.д.с. ( $\overline{\varepsilon^{\text{exp}}}$ ), снимаемое в условиях эксперимента по “термоциклированию”, составляет

$$\overline{\varepsilon^{\text{exp}}} = k\overline{\varepsilon}, \quad (4)$$

где  $k < 1$  – коэффициент, учитывающий рассеяние магнитного поля в рабочем теле ТМГ.

Для достижения цели настоящей работы – разработки физических основ и опытной реализации нового метода преобразования тепловой энергии в электрическую на основе диспрозия – необходимо решение ряда конкретных задач, а именно:

1 - изучить температурный гистерезис AF↔FM фазового перехода;

2 - изучить кинетику и тепловой эффект AF↔FM фазового перехода;

3 - изучить характер кривых изотермического намагничивания при температуре холодильника ТМГ  $T_1 = 77.3$  К;

4 - изучить характер кривых изотермического намагничивания при температуре нагревателя ТМГ  $T_2 > T_{AF \leftrightarrow FM}$ ;

5 - экспериментально реализовать способ термомагнитного преобразования энергии, сделать оценки КПД и выходной мощности ТМГ.

## 2. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Все перечисленные выше исследования проводились на трех типах образцов диспрозия с

остаточным электросопротивлением  $\frac{\rho_{273K}}{\rho_{4.2K}} \sim 10$ :

а - монокристалл (ось легкого намагничивания а расположена вдоль оси цилиндрического образца);

б - текстурированный поликристалл [плоскость легкого намагничивания (001) параллельна оси образца];

в - изотропный поликристалл.

Для изучения гистерезисных эффектов при AF↔FM фазовом переходе, снятия кривых изотермического намагничивания и т. п. был разработан и изготовлен специальный криостат, имеющий два сосуда Дьюра: наружный, заполненный жидким азотом, и внутренний, содержащий исследуемый образец и заполненный жидким кислородом. Изменение температуры жидкого кислорода позволяло устанавливать и стабилизировать температуру в интервале  $77 \leq T \leq 98$  К с точностью  $\delta T \sim 0.025$  К.

Для изучения магнитных свойств [главным образом – для снятия кривых изотермического намагничивания  $M(H)$ ] исследуемых образцов применяли баллистический метод. Для питания источника магнитного поля – соленоида длиной 220 мм и диаметром 50 мм ( $H_{\text{max}} \sim 3$  кЭ) – применяли специально разработанный генератор постоянного тока.

Измерения электросопротивления при  $H = 0$  в интервале температур  $77 \leq T \leq 98$  К, а также измерения продольного магнитосопротивления при

$0 \leq H \leq 3$  кЭ проводили по стандартной четырехточечной схеме.

Для изучения кинетики и определения теплового эффекта AF↔FM фазового перехода был разработан и изготовлен простой калориметр, не требующий предварительной калориметрии его частей. Методика калориметрии основана на измерении джоулева тепла, необходимого для осуществления AF↔FM фазового перехода. Схема установки показана на рис. 1.

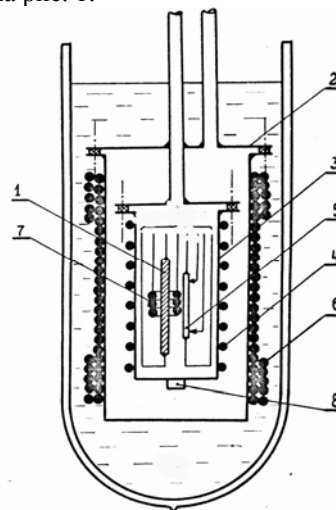


Рис. 1. Схема установки для изучения кинетики и определения теплоты AF↔FM фазового перехода в диспрозии: 1 – образец; 2 – наружный сосуд Дьюра; 3 – внутренний сосуд Дьюра; 4 – нагреватель; 5 – Pt-термометр сопротивления; 6 – соленоид из Si-проволоки; 7 – измерительная катушка; 8 – тоководы

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 3.1. Гистерезис AF↔FM фазового перехода в диспрозии

Гистерезис AF↔FM фазового перехода в диспрозии изучали по характеру поведения температурных и полевых зависимостей параметров кристаллической решетки на  $T$ - $H$ -плоскости, электросопротивления при  $H = 0$ , намагниченности и гальваномагнитных эффектов при повышении и понижении температуры. Хорошо коррелирующие между собой результаты изучения гистерезиса приведены в табл. 1.

Как видно из таблицы, на фазовой диаграмме диспрозия присутствуют области магнитогетерогенного состояния ( $\delta T_{FM \rightarrow AF}$  и  $\delta T_{AF \rightarrow FM}$ ), т. е. области сосуществования коллинеарной ферромагнитной и геликоидальной антиферромагнитной фаз. Отметим, что наиболее веским аргументом в пользу сосуществования этих фаз в окрестности температуры фазового перехода является одновременное присутствие дифракционных линий обеих фаз на дифрактограмме диспрозия в соответствующей области  $T$ - $H$ -плоскости [8].

Таблица 1

Образец	$T_{FM \rightarrow AF}^{beg}$ , К	$T_{FM \rightarrow AF}^{end}$ , К	$\Delta T_{FM \rightarrow AF}$ , К	$T_{AF \rightarrow FM}^{beg}$ , К	$T_{AF \rightarrow FM}^{end}$ , К	$\Delta T_{AF \rightarrow FM}$ , К	$T_{FM \rightarrow AF} - T_{AF \rightarrow FM}$ , К
Монокр.	90.3	90.9	$0.6 \pm 0.05$	88.0	87.6	$0.4 \pm 0.05$	$2.8 \pm 0.1$
Текстур.	90.6	92.5	$1.9 \pm 0.1$	87.9	86.6	$1.3 \pm 0.1$	$4.3 \pm 0.2$
Изотропн.	90.8	94.8	$4.0 \pm 0.10$	85.6	82.7	$2.9 \pm 0.1$	$8.6 \pm 0.2$

Из полученных данных следует, что в области температурного гистерезиса ( $T_{FM \rightarrow AF} - T_{AF \rightarrow FM}$ ) процесс изотермического намагничивания из AF-состояния является необратимым – после сброса поля материал остается в FM-состоянии. При температурах же  $T > T_{FM \rightarrow AF}^{end}$  процесс изотермического намагничивания является полностью обратимым.

Гистерезис AF $\leftrightarrow$ FM фазового перехода имеет место не только по температуре, но и по магнитному полю. Ширина петель магнитного гистерезиса составляет при  $T > T_{FM \rightarrow AF}^{end} \sim 270$  Э для монокристалла,  $\sim 600$  Э для текстурированного поликристалла и  $\sim 1000$  Э для изотропного поликристалла. Данные табл. 1 построены на основании измерений магнитных, электрофизических и других свойств образцов Ду при  $H = 0$ ; на основе же аналогичных измерений, проведенных при  $H > 0$ , удалось построить контуры фазовой  $H$ - $T$ -диаграммы диспрозия в различных структурных состояниях [9].

В плане разработки ТМГ на основе диспрозия из результатов изучения гистерезиса фазового перехода следует, что для обеспечения устойчивости работы термомагнитного генератора при “термоциклировании” необходимо выполнение условий:

$$a - \text{температура холодильника } T_{cool} = T_1 \leq T_{AF \rightarrow FM}^{beg},$$

$$b - \text{температура нагревателя } T_{heat} = T_2 \geq T_{FM \rightarrow AF}^{end}.$$

Очень существенно то обстоятельство, что это условие наиболее легко выполняется в случае монокристалла с осью легкого намагничивания  $a$ , расположенной вдоль оси цилиндрического образца, для которого величина гистерезиса минимальна.

### 3.2. Кинетика и тепловой эффект AF $\leftrightarrow$ FM фазового перехода в диспрозии

Значение величины теплоты AF $\leftrightarrow$ FM фазового перехода первого рода необходимо знать для оценки эффективности ТМГ рассматриваемого типа, в котором съем электрической энергии производится с рабочего тела – образца диспрозия, подвергаемого “термоциклированию”.

На рис. 2 показаны типичные кривые временной зависимости мгновенного значения э.д.с., полученные при пропускании через образец импульса тока плотностью  $j \sim 200$  А/см<sup>2</sup> в магнитном поле напряженностью  $H \sim 600$  Э. Как видно из рисунка, кинетика FM $\rightarrow$ AF фазового

перехода существенно зависит от структурного состояния диспрозия.

На основании данных (см. рис. 2), относящихся к образцам практически одной геометрии, получены величины эффективных времен,  $\tau_{eff}$  и эффективной теплоты,  $\lambda_{eff}$ , FM $\rightarrow$ AF фазового перехода (табл. 2).

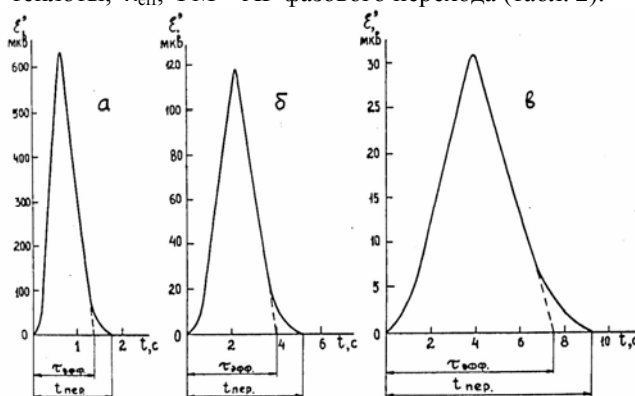


Рис. 2. Изменение э.д.с. в процессе FM $\rightarrow$ AF фазового перехода: а – монокристалл; б – текстурированный поликристалл; в – изотропный поликристалл

Таблица 2

Образец	$\tau_{eff}$ , с	$\lambda_{eff}$ , кал/моль
Монокристалл	1.4	$5.3 \pm 0.3$
Текстурированный	4.0	$13.4 \pm 0.7$
Изотропный	7.6	$21.8 \pm 0.7$

Минимальное время фазового перехода в сочетании с минимальной величиной энергетического барьера между FM- и AF-состояниями свидетельствует в пользу применения монокристалла с осью легкого намагничивания  $a||H$  в качестве оптимального рабочего тела для ТМГ на основе диспрозия.

### 3.3. Изотермическое намагничивание диспрозия

$$\text{при } T_{cool} = T_1 \leq T_{AF \rightarrow FM}^{beg}$$

На рис. 3 приведены кривые намагничивания для всех трех типов исследуемых образцов диспрозия при температуре холодильника ТМГ  $T_{cool} = 77.3$  К. Для монокристаллического образца ( $a||H$ ) намагниченность технического насыщения  $M_s$ , составляющая  $\sim 2650$  Гс, достигается уже в относительно слабом поле  $H \sim 1$  кЭ, в то время как для поликристаллов насыщение не достигается даже в магнитных полях  $H \sim 3$  кЭ.

Это немаловажное обстоятельство опять же свидетельствует в пользу использования монокристаллов диспрозия в качестве рабочего тела ТМГ.

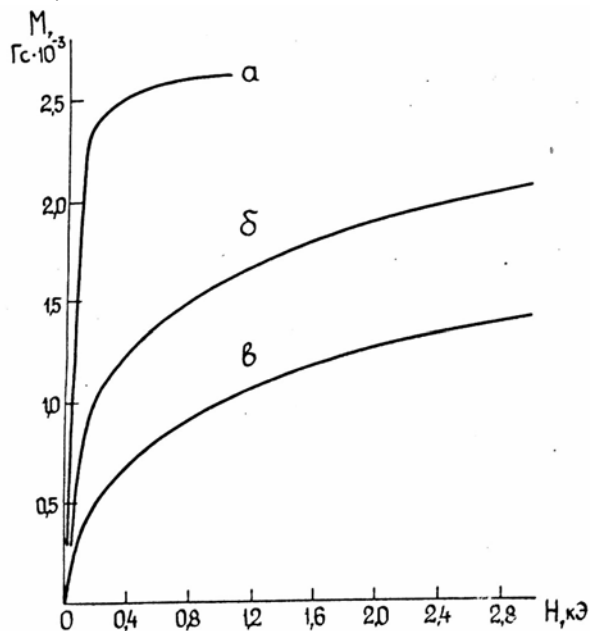


Рис. 3. Изотермы намагничивания диспрозия при  $T = 77.3$ : 1 – монокристалл; 2 – текстурированный поликристалл; 3 – изотропный поликристалл

### 3.4. Изотермическое намагничивание диспрозия

$$\text{при } T_{\text{heat}} = T_2 \geq T_{FM \rightarrow AF}^{\text{end}}$$

На рис. 4 показаны кривые изотермического намагничивания,  $M(H)$ , монокристалла диспрозия из исходного ферромагнитного состояния при температурах, соответствующих области размытия  $FM \rightarrow AF$  фазового перехода (см. табл. 1).

На приведенных кривых  $M(H)$  для монокристалла (так же, как и на соответствующих кривых для текстурированного и изотропного поликристаллов) при  $T < T_{FM \rightarrow AF}^{\text{beg}}$  наблюдается ход, типичный для ферромагнетика (см. рис. 3). При  $T > T_{FM \rightarrow AF}^{\text{end}}$  начальный ход зависимости  $M(H)$  типичен для АФ-состояния; при критическом значении напряженности магнитного поля  $H = H_{AF \rightarrow FM}$ , происходит скачок намагничённости, и ход кривых становится типичным для FM-состояния.

Данные, приведенные в разд. 3.1–3.4, однозначно указывают на то, что сочетание больших значений намагничённости при температуре холодильника ТМГ  $T_1 = 77.3$  К и температуре нагревателя  $T_2 = 92$  К  $> T_{FM \rightarrow AF}^{\text{end}}$ , небольшого гистерезиса  $FM \leftrightarrow AF$  фазового перехода по температуре ( $\sim 2.8$  К) и по магнитному полю ( $\sim 270$  Э), а также малых значений теплоты  $FM \rightarrow AF$ -перехода для монокристаллов диспрозия, ориентированных осью легкого намагничивания вдоль магнитного поля  $H$  ( $a \parallel H$ ), приводят к тому, что монокристаллы с такой ориентацией являются оптимальными объектами для реализации термомагнитного генератора.

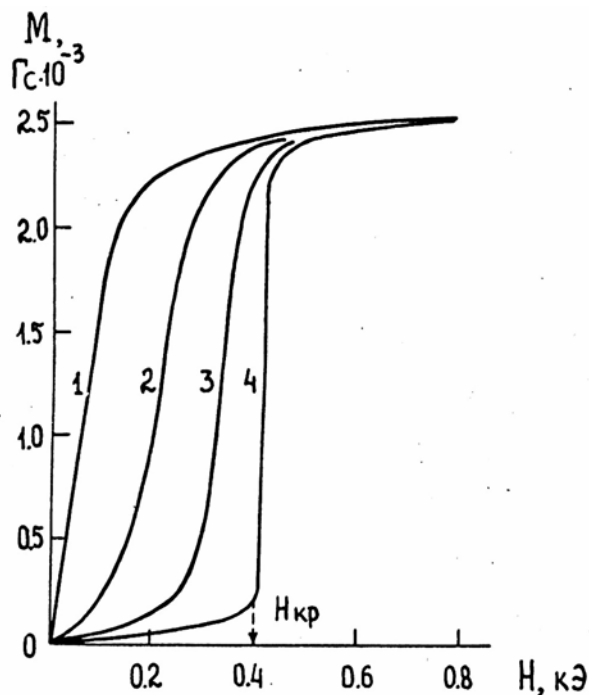


Рис. 4. Кривые намагничивания монокристалла Dy из исходного FM-состояния:

$$1 - T = 89.9 \text{ K}, T < T_{FM \rightarrow AF}^{\text{beg}};$$

$$2 - T = 90.5 \text{ K}, T_{FM \rightarrow AF}^{\text{beg}} < T < T_{FM \rightarrow AF}^{\text{end}};$$

$$3 - T = 90.7 \text{ K}, T_{FM \rightarrow AF}^{\text{beg}} < T < T_{FM \rightarrow AF}^{\text{end}};$$

$$4 - T = 91.1 \text{ K}, T > T_{FM \rightarrow AF}^{\text{end}}$$

### 3.5. Экспериментальная реализация способа термомагнитного преобразования энергии, основанного на “термоциклировании” диспрозия

Для моделирования работы ТМГ на основе диспрозия разработана и изготовлена установка, схематически приведенная на рис. 5.

Рабочее тело 1 действующего макета ТМГ – монокристалл Dy размером  $2.05 \times 2.05 \times 7.2$  мм с осью  $a \parallel H$  – располагалось вдоль оси соленоида 2 с обмоткой из медной проволоки. Соленоид позволял создавать магнитное поле напряженностью  $H$  до  $\sim 600$  Э при воздушном охлаждении обмотки. Для создания более сильных магнитных полей соленоид дополнительно охлаждался жидким азотом. “Термоциклирование” осуществлялось путем охлаждения образца в сосуде Дьюара 3, заполненном жидким азотом, который играет роль холодильника ТМГ ( $T_1 = T_{N_2}^{\text{boil}} < T_{AF \rightarrow FM}^{\text{end}}$ ), с последующим отогревом в окружающую среду, служащую нагревателем ( $T_2 > T_{FM \rightarrow AF}^{\text{end}}$ ). Нагрев и охлаждение рабочего тела осуществлялось путем перемещения сосуда Дьюара.

Индукцируемая в измерительной катушке 4, изготовленной из медной проволоки диаметром 0.1 мм, э.д.с. подавалась на усилитель постоянного тока И-37 и затем записывалась на ленте самописца Н-391.

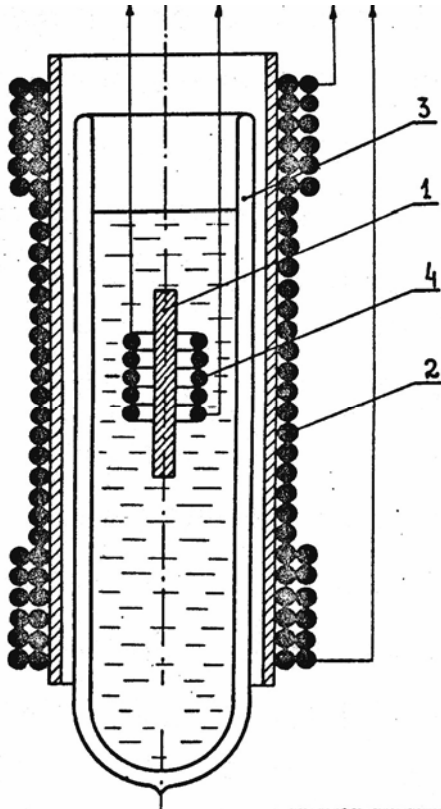


Рис. 5. Схематическое изображение действующего макета термомагнитного генератора

На рис. 6 представлена типичная диаграммная кривая временной зависимости мгновенного значения э.д.с. (см. формулы 3, 4) в процессе "термоциклирования" монокристалла диспрозия (сечение  $S = 3.3 \text{ мм}^2$ , число витков измерительной катушки  $N = 40$ ,  $H = 600 \text{ Э}$ ).

Экспериментально среднее значение э.д.с. на каждом полцикле (нагрев или охлаждение рабочего тела) можно определить из обычного соотношения [в работе установлено, что величина коэффициента рассеяния магнитного потока  $k$  в формуле (4) практически равна единице; это означает, что рассеяние магнитного потока в рабочем теле ТМГ не происходит]:

$$\overline{\varepsilon}^{\text{exp}} = \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} \int_0^{\tau_{\text{eff}}} \varepsilon^{\text{exp}}(t) dt \quad (5)$$

путем определения площади под кривой  $\varepsilon^{\text{exp}}(t)$ .

Хотя времена полциклов нагрева и охлаждения были существенно различными, площади под кривыми  $\varepsilon^{\text{exp}}(t)$  практически совпадали.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценим коэффициент полезного действия термомагнитного преобразователя энергии на основе диспрозия. Для определения КПД ТМГ необходимо рассчитать величину электрической энергии  $W$ , выделяемой во внешней цепи (на нагрузке) за один цикл работы преобразователя, и отнести ее к теплоте фазового перехода. Как

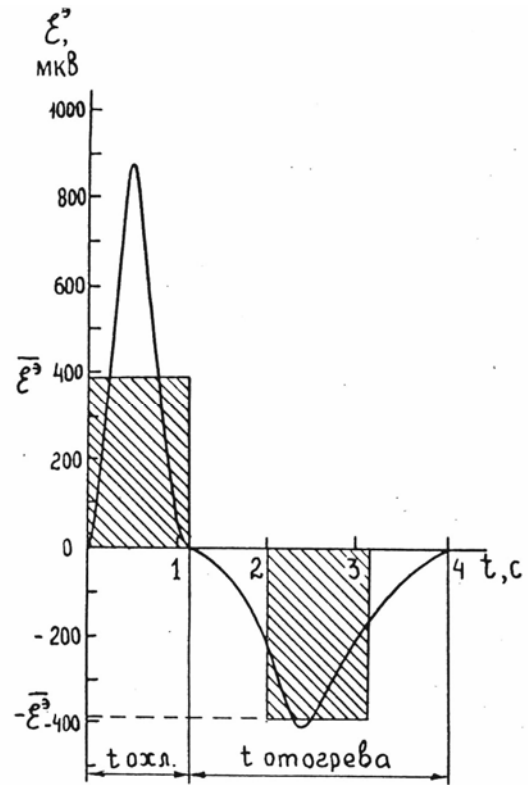


Рис. 6. Изменение э.д.с. в процессе "термоциклирования" монокристалла диспрозия

нетрудно показать, максимальная электрическая энергия, выделяемая на нагрузке

$$W_{\text{max}} = \frac{1}{2R_{\text{int}}} \int_0^{\tau_{\text{eff}}} \varepsilon^2(t) dt, \quad (6)$$

где  $R_{\text{int}}$  – внутреннее сопротивление ТМГ, т.е. сопротивление измерительной катушки (см. на рис. 5).

Считая, что  $\varepsilon(t)$  является гармонической функцией, можно записать

$$\varepsilon(t) = \frac{2\pi \cdot S \cdot N \cdot M_s \cdot \varpi \cdot e^{i\varpi t}}{c \cdot \tau_{\text{eff}}}, \quad (7)$$

где  $M_s$  – намагниченность насыщения рабочего тела. Тогда

$$W_{\text{max}} = \frac{\pi^4 S^2 N^2 M_s^2}{2c^2 \cdot R_{\text{int}} \cdot \tau_{\text{eff}}}. \quad (8)$$

Если измерительная электрическая катушка (см. рис. 5) выполнена в  $n$  слоев проводом круглого сечения диаметром  $d$ , то максимальное значение КПД  $\eta_{\text{max}}$  составляет

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\pi^4 M_s^2 S \cdot n \cdot d}{S \cdot c^2 \cdot \tau_{\text{eff}} \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \overline{D}}, \quad (9)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала катушки;  $\overline{D}$  – средний диаметр катушки.

Подставив в формулу (9) полученные в эксперименте значения  $S = 0.05 \text{ см}^2$ ,  $n = 100$ ,

$d=0.01$  см,  $\overline{D}=2$  см,  $\tau_{eff}=1.3$  с,  $\rho_{Cu}=2\cdot 10^{-7}$  Ом·см  
( $T=77.3$  К),  $M_s=2450$  Гс,  $\lambda=8.3$  кал/моль, получим  
максимальное значение КПД  $\eta_{max}\sim 1.2\cdot 10^{-3}$ .

Предельно достижимое значение КПД ТМГ, когда  $W_{max}$  равно значению теплоты перехода, составляет около 50 %. Реальное же значение КПД ТМГ даже при использовании ИК с бесконечным числом витков не должно превышает 0.2 %. Столь низкое значение КПД является следствием большого внутреннего сопротивления ТМГ на основе Dy. Замена материала рабочего тела на такие РЗМ иттриевой подгруппы, как Ho, Er, Tm, обладающие приблизительно теми же, что и диспрозий величинами удельной намагниченности вдоль осей легкого намагничивания, но достаточно низкими значениями температур AF $\leftrightarrow$ FM фазовых переходов ( $\sim 20$  К), позволит повысить КПД ТМГ до 30...35 % (в первую очередь за счет снижения удельного электросопротивления материала обмоток - меди в  $\sim 200$  раз).

Основным итогом настоящей работы является установление работоспособности термомагнитного генератора, основанного на "термоциклировании" рабочего тела в интервале температур, включающем температуру фазового перехода первого рода антиферромагнетизм $\leftrightarrow$ ферромагнетизм, и определение путей повышения коэффициента полезного действия ТМГ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. T. Edison. *British Patent*. 1987, # 16709.
2. N. Tesla. *US Patent*. 1890, # 428057.

3. L. Brillouin, H.P. Iskenderian. Thermomagnetic generator // *Elect. Commun*. 1948, v. 25, p. 300 – 311.

4. J.P. Elliott. Thermomagnetic generator // *J. Appl. Phys*. 1959, v. 30, p. 1774 – 1777.

5. В.А. Финкель. *Структура редкоземельных металлов*. М.: «Металлургия», 1978.

6. В.А. Финкель, В.В. Воробьев. Кристаллическая структура диспрозия при 77–300 К // *ЖЭТФ*. 1966, т. 51, с. 786 – 790.

7. В.А. Финкель, В.С. Беловол. Влияние магнитного поля на кристаллическую структуру диспрозия // *ЖЭТФ*. 1969, т. 56, с. 774 – 780; *ЖЭТФ*. 1971, т. 60, с. 1044 – 1054; *ЖЭТФ*. 1973, т. 64, с. 173 – 180.

8. В.В. Воробьев, М.Я. Крупоткин, В.А. Финкель. Магнитные фазовые переходы в монокристалле диспрозия в слабых магнитных полях // *ЖЭТФ*. 1985, т. 88, с. 1780 – 1786.

9. И.С. Петренко, В.А. Финкель. Магнито-гетерогенное состояние и фазовая *H-T*-диаграмма диспрозия // *ФТТ*. 1986, т. 28, с. 910 – 912.

10. V.M. Arzhavitin, V.V. Derevyanko, T.V. Sukhareva, V.A. Finkel. Anomalies of kinetic, magnetic and relaxation properties of Dysprosium in the region of helicoidal antiferromagnetic structure // *Functional Materials*. 2006, v. 13, p. 30 – 34.

11. V.V. Vorobev, V.S. Belovol, V.A. Finkel. X-ray diffraction study of magnetostriction and phase transition in a magnetic field in Rare Earth Metals and some alloys // *Physica status solidi (b)*. 1977, v. 82, p. 213 – 219. т. 52, с. 822 – 825; *ЖТФ*. 1980, т. 53, с. 952 – 954.

Статья поступила в редакцию 01.10.2008 г.

### ТЕРМОМАГНІТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ: РОЗРОБКА ФІЗИЧНИХ ОСНОВ І ДОСВІДНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕРМОМАГНІТНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНОГО МЕТАЛУ ДИСПРОЗІУ

*Т.В. Сухарева, В.О. Фінкель*

Мета роботи – розробка фізичних основ і досвідна реалізація термомагнітного методу перетворення теплової енергії в електричну, заснованого на використанні в якості робочого тіла рідкісноземельного металу диспрозію – речовини, що випробовує в інтервалі температур  $\Delta T_{AF\leftrightarrow FM}$  фазовий перехід першого роду гелікоїдальний антиферромагнетизм  $\leftrightarrow$  колінеарний ферромагнетизм (AF $\leftrightarrow$ FM). Вивчена поведінка ефектів гістерезису поблизу температури AF $\leftrightarrow$ FM фазового переходу. Показано, що як робоче тіло термомагнітного генератора слід використовувати монокристали диспрозію, орієнтовані віссю легкого намагнічення **a** уздовж вектора напруженості магнітного поля **H**.

### THERMAGNETIC TRANSFORMATION OF ENERGY: DEVELOPMENT OF PHYSICAL BASES AND EXPERIMENTAL REALIZATION OF THERMAGNETIC GENERATOR ON BASIS OF RARE EARTH METAL DYSPROSIUM

*T.V. Sukhareva, V.A. Finkel*

A purpose of the work is development of physical bases and experimental realization of the thermomagnetic method of transformation of the thermal energy to the electric energy, based on the use as a working body of rare earth metal Dysprosium, i. e. the matter, testing in the interval of temperatures  $\Delta T_{AF\leftrightarrow FM}$  the phase transition of the first kind from the helicoidal antiferromagnetism to the collinear ferromagnetism (AF $\leftrightarrow$ FM). The conduct of effects of hysteresises is studied in neighbouring of temperature of AF $\leftrightarrow$ FM phase transition. It is shown that as a working body of thermomagnetic generator it is necessary to use Dy single crystal, oriented the axis of the easy magnetizing **a** along the vector the magnetic field **H**.