

УДК 621.56

## Магнитокалорические системы охлаждения работающие вблизи комнатных температур и их систематизация

*Д-р.техн.наук, проф. Карагусов В.И.*

**Маянков И.В.** *i.v.mayankov@mail.ru*

*Омский государственный технический университет  
644050, Омская область, г. Омск, просп. Мира, д. 11*

*В данной статье была собрана информация о существующих магнитных охладителях работающих вблизи комнатных температур, на основе анализа найденной информации был выявлен и подробно описан ряд признаков, характеризующих работу магнитных охладителей. К таким признакам относятся: циклы, осуществляемые в рабочем теле, способы создания и изменения магнитного поля, способы передачи теплоты между рабочим телом и теплообменниками. Используя полученные признаки, была проведена систематизация магнитных охладителей работающих вблизи комнатных температур. Данная систематизация поможет заметно сократить время, необходимое для создания схем магнитных охладителей с требуемыми характеристиками (перепад температур, холодопроизводительность), а так же выявить преимущества и недостатки, тех, или иных конструктивных решений.*

*Ключевые слова:* магнитокалорический, магнитное охлаждение, термодинамические циклы, систематизация.

---

## Magnetocaloric cooling systems operating near room temperature and their systematization

**Maiankov I.V.** *i.v.mayankov@mail.ru*

**Karagusov V.I.**

*Omsk State Technical University  
644050, Omsk region, Omsk, Mira Avenue, 11*

*This article deals with magnetic cooling working near temperature rooms. The author identified and described in details a number of properties concerning the work of magnetic coolings. Working body cycles, the ways of creating and magnetic field converting, and also the ways of heat transfer between the working body and heat exchangers can be referred to such characteristics. It should be stressed that the properties obtained gave way to present a systematization of magnetic coolings working near temperature rooms. The given systematization will help significantly to reduce the time which is necessary for magnetic coolings patterns developing with the required characteristics such as temperature difference and cooling capacity. It also should be emphasized that this systematization will reveal advantages and disadvantages of these magnetic cooling patterns*

*Keywords:* magnetocaloric, magnetic refrigeration, thermodynamic cycle, systematization.

В настоящее время существует около 30 магнитных охладителей работающих вблизи комнатных температур (См. табл. 1). Выбор оптимальной конфигурации магнитокалорического охладителя (далее МКО), является залогом её эффективности. Для определения общих черт и различий МКО, требуется провести систематизацию магнитных охладителей [1].

Для систематизации магнитных охладителей использованы следующие признаки:

1. термодинамические циклы, осуществляемые в рабочем теле;
2. способы организации передачи теплового потока от теплоприемника к рабочему телу и от рабочего тела к теплоотдатчику;
3. способы создания циклически меняющегося магнитного поля.

Все перечисленные признаки положены в основу классификации магнитных охладителей представленной на рис. 2.

Рассмотрим каждый признак подробно:

#### 1. Термодинамические циклы

Наиболее распространенные в магнитном охлаждении циклы – это обратные циклы Карно, Брайтона, Эрикссона (см. рис. 1). Циклы могут проходить как с процессом регенерации, так и без него. Циклы без регенерации имеют малый перепад температур  $\Delta T_{\text{МК}} = 7...10 \text{ К}$  (при изменении магнитного поля  $\Delta B = 5 \text{ Тл}$ ), обусловленный лишь магнитокалорическим эффектом рабочего материала (для увеличения перепада температур в таких случаях требуется использовать каскадирование). Циклы с регенерацией требуют использования теплоемкой насадки, аккумулирующей теплоту в одной фазе цикла и возвращающей теплоту в другой фазе цикла, перепад температур в таких циклах может достигать значений  $\Delta T = 25...50 \text{ К}$  (при изменении магнитного поля  $\Delta B = 5 \text{ Тл}$ ). Рассмотрим в качестве примеров магнитный цикл Брайтона с процессом регенерации и магнитный цикл Эрикссона.

Магнитный цикл Брайтона состоит из следующих процессов (рис. 1 а): процесс 2 - 3 – отвод теплоты от рабочего тела к теплоносителю при постоянном магнитном поле  $B_1$  с изменением температуры от  $T_2$  до  $T_3$  и снижением энтропии от  $s_2$  до  $s_3$  ( $B_1 > B_0$ ), процесс 4 - 1 – подвод теплоты к рабочему телу от теплоносителя при постоянном магнитном поле  $B_0$  с изменением температуры от  $T_4$  до  $T_1$  и увеличением энтропии от значений  $s_4$  до  $s_1$  ( $B_0 \geq 0$ ), процесс 1 - 2 – адиабатное намагничивание рабочего тела от значения магнитного поля  $B_0$  до значения магнитного поля  $B_1$  с повышением температуры от  $T_1$  до  $T_2$ , процесс 3 - 4 – процесс адиабатного размагничивания от значения магнитного поля  $B_1$  до значения магнитного поля  $B_0$  с понижением температуры от  $T_3$  до  $T_4$ .

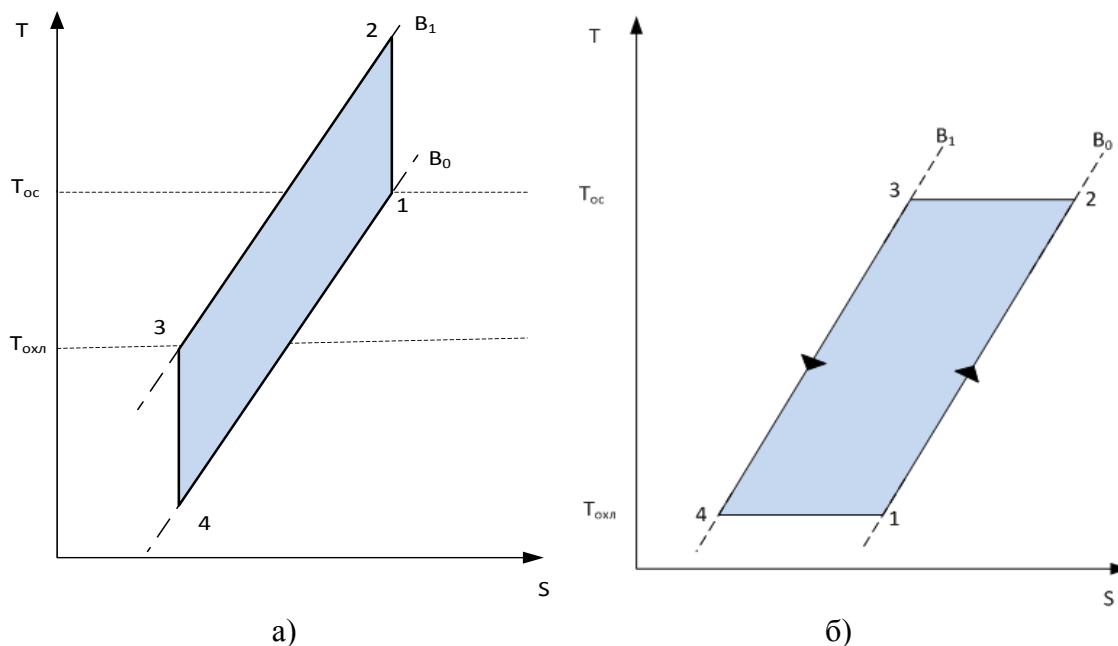


Рис. 1 а) обратный термодинамический магнитный цикл Брайтона в T,s-диаграмме.  
 Рис. 1 б) обратный термодинамический магнитный цикл Эрикссона в T,s-диаграмме.  
 $T_{oc}$  – температура окружающей среды,  $T_{охл}$  – температура охлаждения,  
 $B_1, B_0$  ( $B_1 > B_0$ ) – индукции магнитного поля.

Магнитный цикл Эрикссона (рис. 1 б) ) так же состоит из четырех процессов: Процесс 1-2 происходит при постоянном магнитном поле с подводом теплоты от теплоносителя к магнитному рабочему телу с изменением температуры от  $T_1$  до  $T_2$  и энтропии от  $s_1$  до  $s_2$ . Процесс 2-3, изотермическое намагничивание рабочего тела от  $B_0$  до  $B_1$  сопровождаемое отводом теплоты в окружающую среду с изменением энтропии от  $s_2$  до  $s_3$ . Процесс 3-4 происходит при постоянном магнитном поле с отводом теплоты от рабочего магнитного материала к теплоносителю с изменением температуры от  $T_3$  до  $T_4$  и энтропии от  $s_3$  до  $s_4$ . Процесс 4-1, изотермическое размагничивание рабочего тела от  $B_1$  до  $B_0$  сопровождаемое отводом тепла от охлаждаемого объекта к рабочему материалу с изменением энтропии от  $s_4$  до  $s_1$ .

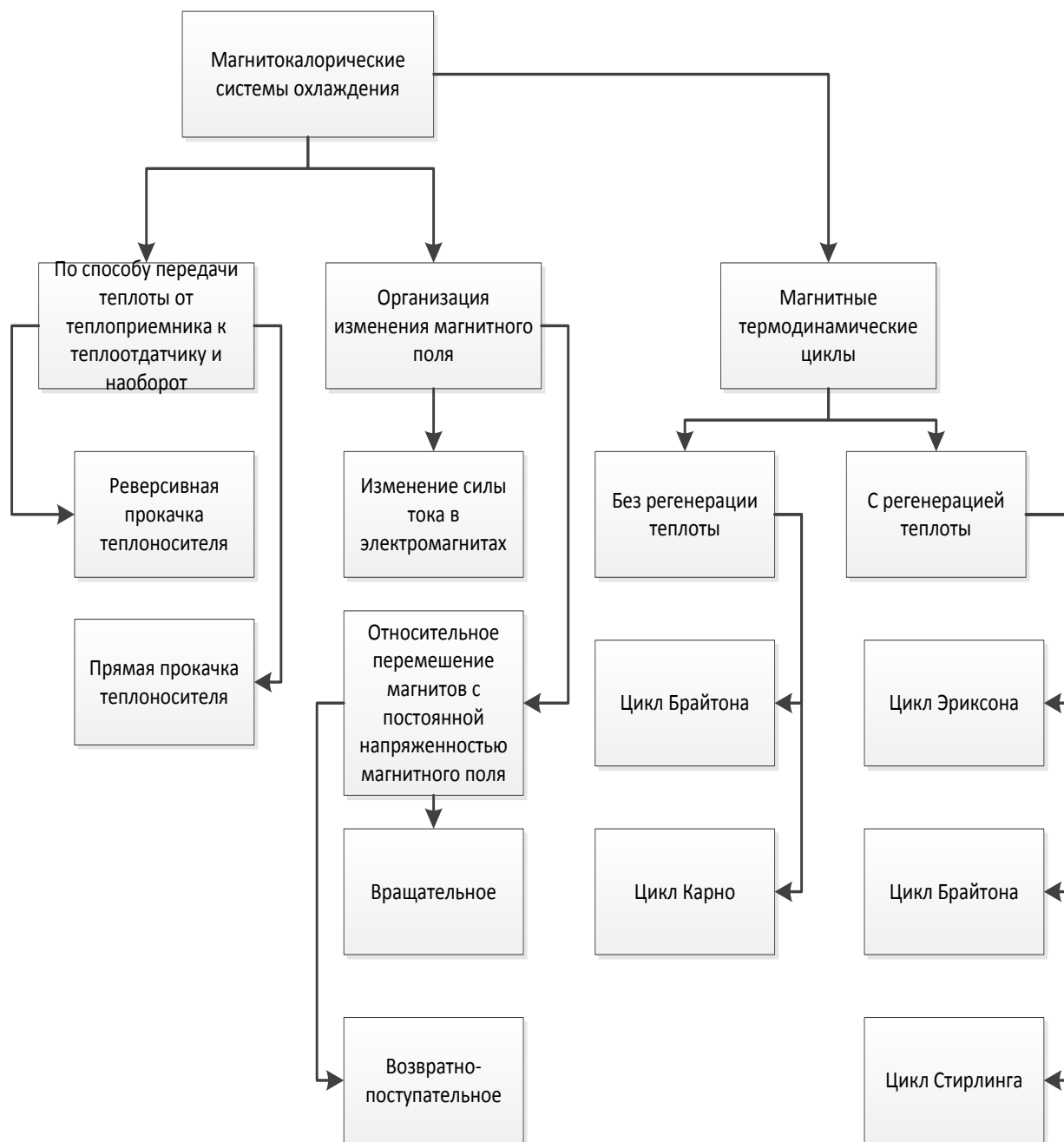


Рис. 2. Систематизация магнитных охладителей, работающих вблизи комнатных температур

## 2. Способы организации передачи теплоты

В отличие от парокомпрессионных холодильных машин, рабочее тело в магнитных охладителях находится в твердом состоянии, а для передачи теплоты от рабочего тела к теплообменникам приходится использовать жидкий или газообразный теплоноситель, в

качестве такого теплоносителя при комнатных температурах может выступать вода, или этиловый спирт.

Организация передачи теплового потока от теплоприемника к рабочему телу и от рабочего тела к теплоотдатчику может происходить двумя различными способами – реверсивная прокачка и прямая прокачка теплоносителя (см. рис. 3).

- при реверсивной прокачке теплоносителя не требуется перемещение рабочего тела, прокачка может осуществляться различными способами, например вытеснителем с возвратно поступательным движением, синхронизированным с изменением (снятием, наложением) магнитного поля на рабочее тело.

- прямая прокачка теплоносителя через рабочее тело. Так как в твердом рабочем теле осуществляется полная последовательность процессов цикла, то стационарная прокачка теплоносителя не подходит и требуется прерывистое осуществление теплообмена, которое достигается путем механического перемещения рабочего тела (вращением магнитного ротора).

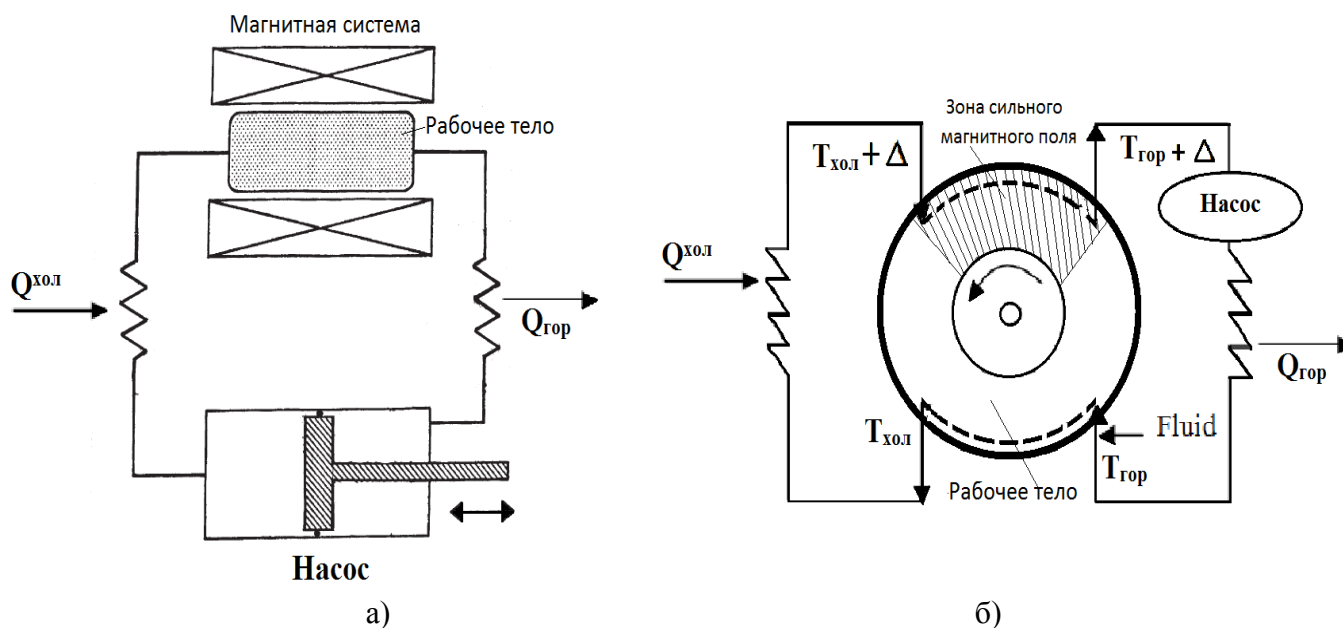


Рис.3 Способы организации передачи теплоты:  
 а) реверсивная прокачка теплоносителя;  
 б) прямая прокачка теплоносителя

### 3. Способы создания циклически меняющегося магнитного поля.

Способы создания циклически меняющегося магнитного поля могут быть следующие:

- изменение силы тока в электромагнитах, в которых создаваемым магнитным полем можно управлять с помощью тока, протекающего в обмотках. Минусами таких систем являются большие габариты магнитов, их вес, необходимость внешнего источника энергии и высокое энергопотребление.

Если, в качестве источника магнитного поля использовать сверхпроводящие магниты (сила тока текущего по сверхпроводнику на порядок, два больше, чем в обычных проводниках), то можно получить большое значение магнитной индукции. Но при этом понадобится охлаждать обмотку до температур, ниже фазового перехода проводник – сверхпроводник, что требует больших затрат электроэнергии, использования криогенного оборудования. Такой способ является нецелесообразным для использования при комнатных температурах.

- относительное перемещение постоянных магнитов относительно рабочего тела.

Перемещение постоянных магнитов может быть как поступательное, так и вращательное. Недостатком данного способа регулирования является необходимость установки привода для перемещения магнитов.

Наиболее перспективным на сегодняшний момент является использования магнитных систем на основе постоянных магнитов, принцип работы которых предложен Хэльбахом, с помощью таких магнитных систем возможно получение магнитного поля до 5 Тл, при комнатных температурах, но такие системы сложны и дороги в изготовлении.

В данной статье были структурированы и упорядочены существующие системы магнитного охлаждения, работающие вблизи комнатных температур, их систематизация представлена на Рис. 2. Были рассмотрены и описаны основные признаки МКО, выявлены преимущества и недостатки тех, или иных конструктивных решений.

Таблица 3. Существующие магнитокалорические системы охлаждения

Год	Лаборатория	Страна	Тип	Перепад температур	Измен. магн. поля, Тл	Холодо-производительность, Вт	Материал	Литература
1976	NASA	США	поступ.	254-334	0-7	7	Gd	2
1978	Los Alamos	США	вращ.	289-298	0-3,5	-	Gd	2
1983	МВТУ	Россия	поступ.	291-294	0-1	-	Gd	1
1986	Los Alamos	США	поступ.	287-301	0,5-4,5	-	Gd	1
1987	INL	США	вращ.	11	0-0,9	-	Gd	2
1990	DTRC	США	поступ.	292-268	0-7	5	Gd,Tb	2
1998	NASA	США	поступ.	10	0-5	600	Gd	3
2000	Material science	Испания	поступ.	5	0-0,95	-	Gd	4
2000	Chubu electric	Япония	поступ.	21	0-4	100	Gd	5
2001	NASA	США	вращ.	20	0-1.5	95	Gd	5
2000	University of Victoria	Канада	поступ.	14	0-2.0	2	Gd	5
2002	Sichuan Ins. Tech	Китай	поступ.	23	0-0.95	-	Gd	5
2002	Chubu	Япония	поступ.	27	0-0.6	40	Gd	5
2002	Los Alamos	США		15	0-1.7	3	Gd	5
2003	Chubu	Япония	вращ.	10	0-0.76	60	Gd	5
2004	Quebec Univ.	Канада	поступ.	14	0-2.0	2	Gd	5
2005	Washington Univ.	США	поступ.	5	0-2.0		Gd	5
2005	Nanjing	Китай	поступ.	25	0-1.4	40	Gd	5
2005	Tokiop Ins. Tech	Япония	вращ.	4	0-0.77	60	Gd	5
2005	University of Victoria	Канада	поступ.	50	0-2.0	10	Gd, GdTb, GdEr	5
2005	NASA	США	вращ.	25	0-1.5	50	Gd	5
2007	Ames Laboratory	США	вращ.	19	0-1.4	844	Gd	2
2007	Sichuan	Китай	вращ.	11.5	0-1.5	40	Gd	5
2007	University of Victoria	Канада	вращ.	13	0-1.4	-	Gd	5
2007	Sichuan	Китай	вращ.	6,2	0-0,78	-	Gd	5
2007	Челябинский Государственный университет	Россия	вращ.		0-0.9	-	Gd и сплавы Гейслера	6
2007	Tokiop Ins Tech	Япония	вращ.	7.5	0-1.1	540	Gd	5
2007	Ljubljana univ.	Словения	вращ.		0-0,97	-	Gd	5
2009	CoolTech		поступ.	16.1	0-1.1	-	Gd	6
2009	Grenoble EEL	Франция	поступ.	6	0-0.8	-	Gd	6
2009	Ljubljana univ.	Словения	поступ.	7	0-0.98	-	Gd	7
2009	Korea advanced institute	Корея	поступ.	16	0-1.58	-	Gd	8
2010	University of Applied Sciences of Western Switzerland	Швейцария	поступ.	22	0-1.45	-	Gd	2
2011	University of Victoria	Канада	поступ.	45	0-1.4	50	Gd,Tb	9
2012	Technical University of Denmark	Дания	вращ.	18.9		1000	Gd	10

## Список литературы

1. Синявский Ю.В., Карагусов В.И. Систематизация схем магнитокалорических рефрижераторов // Известия ВУЗов. –Энергетика. -1988, № 1. -с. 84–90.
2. Roudaut, J. Magnetic refrigeration at room temperature : Doctor dissertation thesis. – Grenoble, 2011. – P. 228
3. Zimm, C. B. Description and performance of a near room temperature magnetic refrigerator / C. B. Zimm, A. Jastrab, A. Sternberg, V. Pecharsky, K. Gschneidner Jr., M. Osborne, I. Anderson // Adv. Cryog. Eng., 43(B), 1998. - P.1759–1766.
4. Bohigas, X. Room-temperature magnetic refrigerator using permanent magnets / X. Bohigas, E. Molins, A. Roig, J. Tejada, X. X. Zhang // IEEE Trans. Magn., 36(3), 2000. - P. 538–544.
5. Gedik, E. Magnetic refrigeration technology applications on near room temperature / E. Gedik, M. Kayfec, A. Kecebas, H. Kurt // 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), May 13-15, 2009.
6. Borbolla, I.M. Assessment of Magnetic Cooling for Domestic Applications: Master of Science Thesis. / I.M. Borbolla - Stockholm, 2012. P -156.
7. Tušek, J. Development of a rotary magnetic refrigerator / J. Tušek, S. Zupan, A. Šarlah, I. Prebil, A. Poredoš // 3rd International conference on magnetic refrigeration, Iowa, 2009.
8. Kim Y. Investigation on the room temperature active magnetic regenerative refrigerator with permanent magnet array/ Y. Kim, S. Jeong // 3rd International conference on magnetic refrigeration, Iowa, 2009.
9. Tura, A. Permanent magnet magnetic refrigerator design and experimental characterization / A. Tura, A. Rowe // Int. J. Refrigeration 34, 2011. - P. 628-639
10. Bahl, C.R.H. Development and experimental results from a 1 kW near continuous prototype AMR / C.R.H. Bahl, K. Engelbrecht, D. Eriksen, J.A.Lozano, R. Bjørk, J. Geyti, K.K. Nielsen, A. Smith, N. Pryds // 5th Int. Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, 2012