

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 537.536

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОВ МАГНИТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ БРАЙТОНА

**А. Ю. Карпенков^{1,2}, К. П. Скоков^{1,2}, Ю. Г. Пастушенков¹,
О. Gutfleisch²**

¹Тверской государственный университет, *кафедра магнетизма*

²Институт материаловедения, IWF, г. Дрезден

Была разработана компьютерная модель работы магнитного холодильника, работающего по циклу Брайтона при температурах вблизи комнатных. Данная модель использовалась для расчета теоретического предела рабочей разности температур и мощности охлаждения. Мощность охлаждения была рассчитана для цикла Брайтона с одним и двумя рабочими телами, в которых в качестве рабочих тел использовался редкоземельный металл гадолиний. Полученные результаты наглядно демонстрируют функциональные диапазоны магнитных холодильников, работающих по циклу Брайтона.

Ключевые слова: *магнитокалорический эффект, магнитное охлаждение, численное моделирование*

Магнитное охлаждение является перспективной технологией для производства энергоэффективных холодильников. Данная технология использует магнитные материалы в качестве активных компонентов и экологически чистые жидкости для передачи тепла [1]. Концепция магнитного охлаждения (МО) основана на магнитокалорическом эффекте (МКЭ), который возникает в определенных материалах, при воздействии на них магнитного поля. Магнитное поле выравнивает спины, тем самым снижая их вклад в общую энтропию. При адиабатических условиях это означает, что энтропия решетки должна увеличиваться, что проявляется в повышении температуры. Во время удаления магнитного поля температура материала уменьшается. Такие индуцированные полем изменения температуры позволяют, как передавать тепло от холодного тела (морозильной камеры) в окружающую среду для поддержания низкой температуры холодного тела, так и восстанавливать тепло и производить электроэнергию (тепловые насосы).

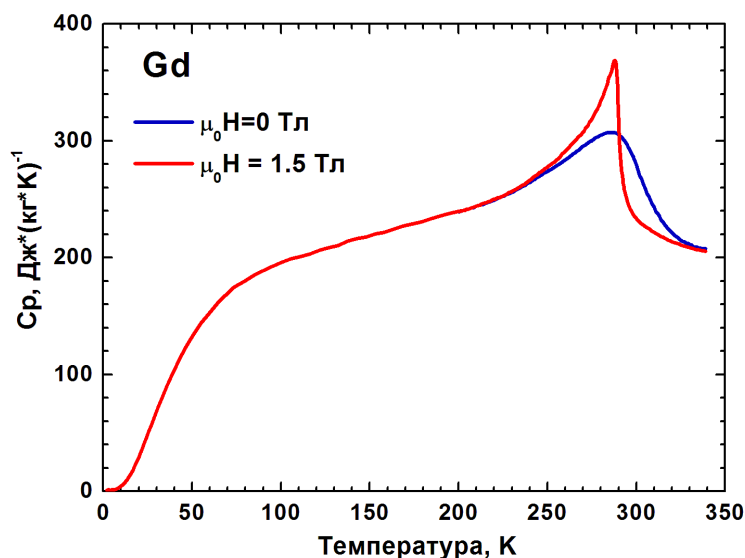
Любой холодильник должен одновременно удовлетворять двум основным критериям, а именно, максимальному значению температурного диапазона охлаждения и мощности охлаждения. В

практических приложениях, оба свойства должны быть оптимизированы. Следует отметить, что максимальный тепловой диапазон для цикла Брайтона соответствует адиабатическому изменению температуры магнитокалорического материала и может быть легко найден из соответствующих измерений. Определение же мощности охлаждения, имеющей важное значение для характеристики динамических параметров магнитного рефрижератора, является затрудненной.

В этой работе были проведены расчеты для определения теоретического предела мощности охлаждения магнитного холодильника, работающего по простому циклу охлаждения Брайтона. Мощность охлаждения холодильников может быть определена как количество тепла, извлеченное за цикл, деленное на время цикла. Если холодный и горячий теплообменники обладают бесконечной массой, и как результат этого, их температура остается неизменной, то количество тепла, передаваемое за цикл, может быть оценено, используя S-T диаграммы [2]. Однако в реальных холодильниках масса холодильной камеры с полезной нагрузкой варьируется в пределах 10–100 кг, что гораздо меньше, чем тепловая емкость окружающей среды. В этом случае метод S-T диаграмм не применим. С этой целью в работе была разработана численная модель обратимого цикла Брайтона, которая позволила исследовать изменение мощности охлаждения в случае, когда масса холодного теплообменника намного меньше, чем горячего (например, окружающая среда), а также позволила проследить в деталях изменения температуры реальной холодильной камеры в различных условиях. Насколько нам известно, такой подход является новым, и такой анализ никогда не производился ранее.

Детали моделирования. В реальных магнитных холодильниках эффективность теплообмена зависит от разности температур между рабочим телом и теплообменной жидкостью, и чем больше эта разница, тем с большими потерями (и менее эффективно) работает холодильник, так как в ходе работы в системе происходит производство энтропии [3, 4]. Тем не менее, интересно знать верхний предел холодильной мощности рефрижератора, который использует определенный МК материал в качестве рабочего тела и работает по циклу Брайтона. Для того, что бы найти эту максимальную холодильную мощность, мы должны рассматривать только обратимый теплообмен идеальный тепловой контакт и движение частей холодильника без трения. Температурный диапазон охлаждения и мощность охлаждения в отношении таких идеализированных холодильников определяют верхний предел эффективности для всех холодильников подобной конструкции.

В качестве хладагента холодильных циклов использовался редкоземельный металл гадолиний, поскольку он является хорошо изученным и имеет относительно большой МКЭ вблизи комнатной температуры ($T_c = 293 \text{ K}$) [5]. При моделировании использовались экспериментальные данные для Gd температурных зависимостей МКЭ (ΔT_{ad}) при $\Delta H = 1.5 \text{ Тл}$ и теплоемкостей (C_p) при $\mu_0 H = 0$ и 1.5 Тл [5, 6]. На рис. 1 представлены температурные зависимости C_p для Gd измеренных в нулевом магнитном поле и в поле $1,5 \text{ Тл}$.



Р и с . 1. Температурная зависимость теплоемкости гадолиния

Температурные зависимости МКЭ Gd для процессов намагничивания (красная линия) и размагничивания (синяя линия) представлены на рис. 2.

Используя экспериментальные данные ΔT_{ad} и C_p , по алгоритму описанному ниже было проведено численное моделирование рабочей последовательности цикла Брайтона. Наш моделируемый идеализированный магнитный холодильник работал по цикл Брайтона, температурный диапазон охлаждения которого, ограничен величиной адиабатического изменения температуры гадолиния при его намагничивании.

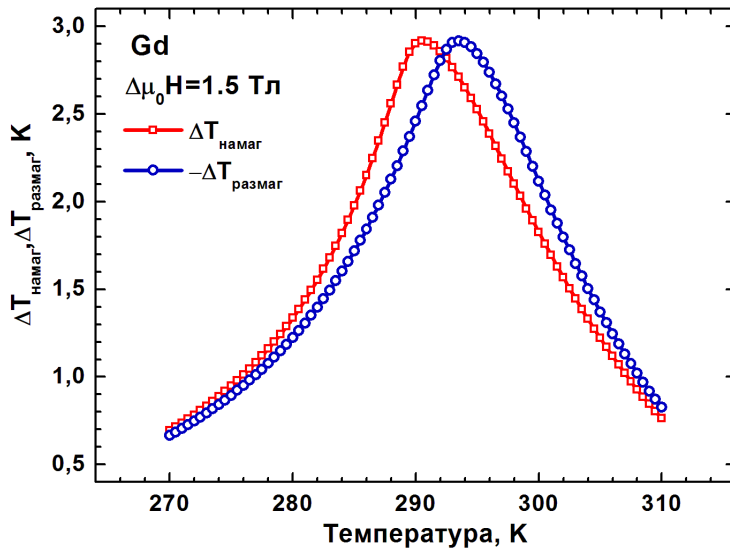


Рис. 2. Температурная зависимость МКЭ для гадолиния при намагничивании и размагничивании образца

Рис. 3 иллюстрирует случай, при котором холодильник, работающий по идеальному циклу Брайтона, совершает максимальную работу, т.е. когда температуры горячего и холодного теплообменников равны.

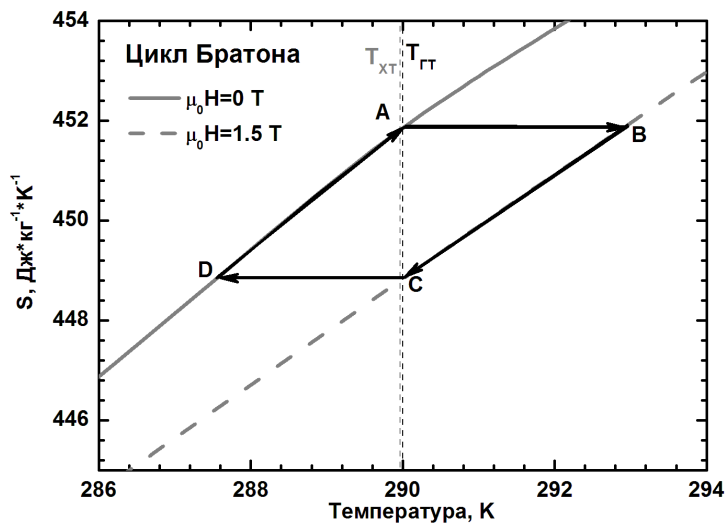


Рис. 3. S-T диаграмма цикла магнитного охлаждения Брайтона

Данный цикл состоит из четырех основных процессов: (I) адиабатическое намагничивание рабочего тела (РТ), в результате

которого его температура повышается на величину прямого МКЭ (отрезок АВ); (II) тепловой контакт с горячим теплообменником (ГТ) в магнитном поле, в ходе данного процесса РТ выделяет тепло и его температура уменьшается (отрезок ВС); (III) адиабатическое размагничивание РТ, вследствие чего его температура уменьшается на величину обратного МКЭ (отрезок CD); (IV) тепловой контакт РТ с холодным теплообменником (ХТ), в ходе которого РТ поглощает тепло ХТ и его температура увеличивается (отрезок DA).

Квазистатические процессы выделения или поглощения тепла (процессы II и IV) могут быть проанализированы в сколь угодно малых участках времени, которые можно представить сплошными линиями на диаграмме состояния. Чтобы удовлетворить этим требованиям процесс передачи тепла к или от рабочего тела был разделен на небольшие шаги. В каждый отдельный шаг двум телам, находящимся в тепловом контакте, передается небольшая порция тепла (dQ) и с помощью уравнения находятся температурные изменения в обоих телах.

$$dT = dQ / (C(T, H) \cdot m) \quad (1)$$

В уравнении (1) $C(T, H)$ – теплоемкость РТ или меди, из которой сделаны регенератор, горячий (ГТ) и холодный (ХТ) теплообменники, m – масса тела, находящегося в тепловом контакте. Расчет теплопередачи завершается, когда температуры соприкасаемых тел сравниваются. Общее количество шагов составляет 10^3 – 10^4 .

Умножая количество тепла, переносимого от ХТ за цикл, на рабочую частоту холодильника, можно вычислить мощность охлаждения. Для расчетов была использована частота 1 Гц, однако, так как в ходе моделирования не использовалось ни одного параметра зависящего от времени, полученный результат можно обобщить на произвольную рабочую частоту.

Результаты исследований. В начале, была смоделирована ненагруженная открытая (тепловой контакт ГТ с окружающей средой) система, которая работала по идеальному циклу Брайтона. Параметры моделируемой системы: масса рабочего тела 1 кг, масса холодного теплообменника 10 кг, масса горячего теплообменника 10^3 кг, максимальное прикладываемое магнитное поле 1.5 Тл. Вычисления показывают, что при стартовой температуре 293 К температурный интервал охлаждения составил 3,1 К (рис. 4), что в свою очередь соответствует величине МКЭ рабочего тела. Как видно из рис. 4 после 50 циклов вся система начинает работать по холостому ходу и переноса тепла не совершается. Следовательно, охлаждение ХТ происходит за первые 50 циклов.

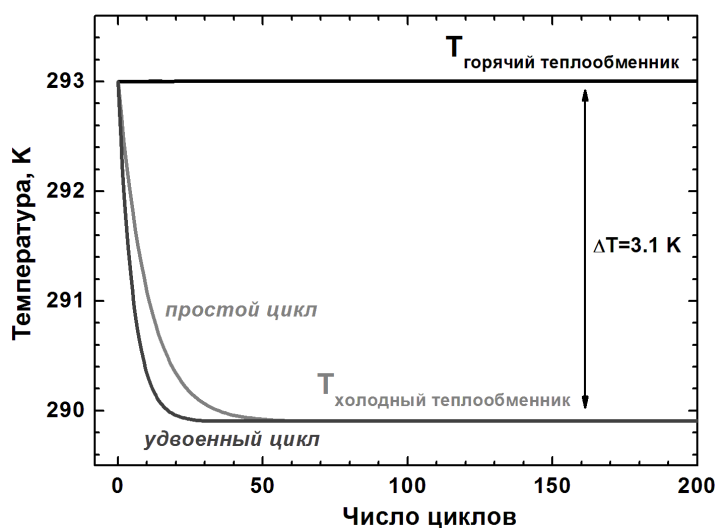
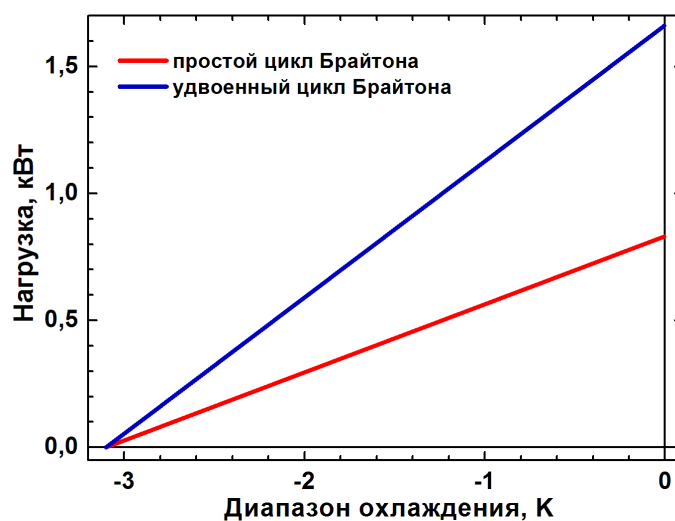


Рис. 4. Эволюция температуры холодного теплообменника в ходе работы простого и удвоенного циклов Брайтона

В дальнейшем была смоделирована открытая ненагруженная система, работающая по удвоенному циклу Брайтона и использующая 2 рабочих тела одинаковой массы. Система работала так, что в момент, когда первое тело намагничивалось, второе размагничивалось. При моделировании использовались те же параметры. В результате было обнаружено удвоение мощности охлаждения в процессе одного цикла. Температурный интервал охлаждения составил так же 3.1 К, однако число циклов для максимального охлаждения заданного объема уменьшилось в двое (рис. 4).

Следует отметить, что максимальное охлаждение при работе холодильника может быть достигнуто, только в случае, когда охлаждаемое тело хорошо изолировано. Но в реальных приложениях важно знать, насколько быстро температурный диапазон охлаждения будет снижаться, если начать вкачивать некоторое количество тепла в холодный теплообменник в каждом цикле. Тепловая нагрузка ХТ может быть предоставлена, например, в виде электрического нагревателя, чье энергопотребление известно. Для работы с частотой Гц, мощность охлаждения в зависимости от температурного диапазона охлаждения представлены на рис. 5. Расчет нагруженных циклов показал, что холодильник, работающий по простому циклу Брайтона при нулевом охлаждении способен произвести 830 Вт мощности охлаждения, в свою холодильник, работающий по удвоенному циклу, 1660 Вт.



Р и с . 5. Зависимость мощности охлаждения от температурного интервала охлаждения для простого и удвоенного циклов Брайтона

Выводы. Для любого холодильника помимо температурного диапазона охлаждения важно знать его максимальную мощность охлаждения, которая, в свою очередь зависит от теплоемкости и МКЭ материала используемого в качестве хладагента и не может быть выведена аналитически. В данной работе реальный цикл магнитного охлаждения Брайтона с гадолинием в качестве рабочего тела был заменен на обратимый цикл, и путем численного моделирования на основе экспериментальных данных ΔT_{ad} и C_p найдены тепловой диапазон охлаждения и мощность охлаждения для такого идеализированного цикла. Результаты наглядно демонстрируют функциональные возможности цикла магнитного охлаждения Брайтона. Этот подход может быть применен к более сложным схемам магнитных холодильников, таких как цикл Эриксона, цикл активного магнитного регенератора и т.д.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-02-00721-а и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры для инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Список литературы

1. Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E., Chen C.H., Sankar S.G., Ping Liu J. Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger,

- Lighter, and More Energy Efficient // *Adv. Mater.* 2011. V. 23. P. 821–842.
2. Kuz'min M.D. and Tishin A.M. // *Cryogenics.* 1993. V. 33 N. 9. P. 868–882.
 3. Yu B., Liu M., Egolf P.W., Kitanovski A. A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year // *International Journal of Refrigeration.* 2010. V. 33. P. 1029–1060.
 4. Nielsen K.K., Bahl C.R.H., Smith A., Pryds N., Hattel J. A comprehensive parameter study of an active magnetic regenerator using a 2D numerical model // *International Journal of Refrigeration.* 2010. V. 33. P. 753–764.
 5. Tishin A.M., Spichkin Y.I. *The Magnetocaloric Effect and Its Applications.* Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia. 2003. P. 475.
 6. Risser M., Vasile C., Engel T., Keith B., Muller C. Numerical simulation of magnetocaloric system behaviour for an industrial application // *International Journal of Refrigeration.* 2010. V. 33. P. 973–981.

NUMERICAL SIMULATION OF BRAYTON MAGNETIC COOLING CYCLE

A.Yu. Karpenkov^{1,2}, K.P.Skokov^{1,2}, Yu.G.Pastushenkov¹, O.Gutfleisch²

¹Tver State University, *Chair of magnetism*

²IFW Dresden, Institute for Metallic Materials, Dresden

A model for Brayton cooling cycles used in magnetic refrigeration near room temperature was developed. This model was used to calculate a theoretical limit of temperature span and cooling power. The cooling power was calculated for single and double Brayton cooling cycles with Gd as the working body. The obtained results clearly demonstrate the functional ranges of Brayton-cycle refrigerators.

Keywords: *magnetocaloric effect, magnetic cooling, numerical simulations*

Об авторах:

КАРПЕНКОВ Алексей Юрьевич – аспирант кафедры магнетизма, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33;
e-mail: karpenkov_alex@mail.ru;

СКОКОВ Константин Петрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры магнетизма ТвГУ, *e-mail*: Skokov_K_P@mail.ru;

ПАСТУШЕНКОВ Юрий Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой магнетизма ТвГУ, *e-mail*: YuPast@mail.ru;

GUTFLEISCH Oliver – PD Dr. Ing. habil., руководитель группы, *e-mail*: O.Gutfleisch@ifw-dresden.de.