

УДК 537, 536

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТЫХ ЦИКЛОВ МАГНИТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И ЦИКЛОВ С РЕГЕНЕРАТОРОМ БРАЙТОНА И ЭРИКСОНА

**А. Ю. Карпенков^{1,2}, К. П. Скоков^{1,2}, Д. Ю. Карпенков¹,
Ю. Г. Пастушенков¹, О. Gutfleisch²**

¹ Тверской государственный университет, *кафедра магнетизма*

² Институт материаловедения, IWF, г. Дрезден

В работе были разработаны модели простых и регенеративных циклов Брайтона и Эриксона, которые используются в магнитных холодильниках, работающих при комнатной температуре. Модели использовались для расчета теоретического предела температурного интервала охлаждения, мощности охлаждения и эффективности моделируемых циклов. Полученные результаты наглядно демонстрируют функциональные возможности магнитных холодильников, работающих по циклам Брайтона и Эриксона. Предложенный метод моделирования может быть использован в качестве наглядного способа оценки пригодности магнитокалорического материала в качестве рабочего тела магнитного холодильника.

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

В последнее время для устранения недостатков газокompрессорных холодильников исследуется альтернативный метод охлаждения, основанный на адиабатическом размагничивании магнитного материала (магнитокалорический эффект (МКЭ)). МКЭ условно выражается в изменении температуры магнетика при его адиабатическом намагничивании. Магнитное поле выравнивается спины атомов, тем самым понижая их вклад в общую энтропию системы. При адиабатических условиях это означает, что энтропия решетки должна увеличиваться, соответственно вызывая повышение температуры материала. Во время удаления магнитного поля температура материала уменьшается. Таким образом, основываясь на МКЭ, возможно создание магнитных холодильников – машин, где магнитные материалы выступают в качестве рабочих тел вместо газа, а процессы намагничивания или размагничивания используется вместо процессов сжатия или расширения. Заинтересованность в магнитных холодильниках связана с их энергетически и экономически выгодным потенциалом, высокой эффективностью и надежностью [1].

Любой холодильник должен одновременно удовлетворять трем основным критериям, а именно, максимумам температурного диапазона охлаждения, мощности охлаждения и эффективности. На практике эти три параметра должны быть оптимальными. Максимальный тепловой диапазон охлаждения для простых циклов (Брайтона и Эриксона) соответствует величине адиабатического изменения температуры магнитокалорического (МК) материала и может быть легко найден из соответствующих измерений, однако оценка мощности охлаждения и эффективности, которые имеют большое значение для характеристики динамических параметров магнитного холодильника (МХ), является затруднительной.

Следует так же отметить, что использование технологии магнитного охлаждения при создании магнитных рефрижераторов, работающих по простым циклам и использующих в качестве источника магнитного поля системы из постоянных магнитов с максимальной величиной магнитной индукции 1.5 Тл, в самых реалистичных сценариях способно обеспечить охлаждение необходимого объема всего на несколько градусов. Это означает, что в целях получения полезного охлаждения больше нескольких градусов, магнитокалорический материал должен использоваться в качестве активного компонента в циклах с регенератором.

Сегодня существует три основных параметра, используемые для оценки потенциальных материалов для хладагента: величина хладоемкости (RCP), пик изменения магнитной энтропии ΔS_M и адиабатическое изменение температуры ΔT_{ad} [2].

Хладоемкость характеризует магнитокалорические свойства и определяет пригодность магнитного материала в качестве рабочего тела магнитной холодильной машины. Данный параметр RCP (относительная охлаждающая мощность) определяется из температурных зависимостей ΔS_H и ΔT при постоянном магнитном поле. Параметр RCP определяется произведением значений в пике ΔS_H и ΔT на ширину температурного интервала при половине максимума от данных величин δT . Однако, основываясь на вышеописанных параметрах, можно сделать лишь относительную оценку о применимости МК материала для использования в МХ. В связи с этим метод моделирования является более предпочтительным для такой оценки, так как дает точную численную информацию работы МХ, использующего в качестве хладагента исследуемый материал.

В связи с вышесказанным в работе были проведены расчеты по определению теоретического предела температурного интервала охлаждения, мощности охлаждения и эффективности магнитного холодильника с гадолинием в качестве рабочего тела и работающего по

простым циклам и регенеративным циклам Брайтона и Эриксона. Холодильная мощность определяется как количество тепла, передаваемое 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 [3]. 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. В связи с этим были разработаны численные модели обратимых циклов Брайтона и Эриксона, которые позволяли исследовать, как изменяется холодильная мощность, если масса холодного теплообменника много меньше массы горячего (окружающая среда), а также давали возможность проследить в деталях изменение температуры реальной холодильной камеры при различных условиях.

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 [4, 5]. Тем не менее, интересно знать верхний предел холодильной мощности рефрижератора, который использует определенный МК материал в качестве рабочего тела и работает по циклу Брайтона или Эриксона. Для того, что бы найти эту максимальную холодильную мощность, мы должны рассматривать только обратимый теплообмен, идеальный тепловой контакт и движение частей холодильника без трения. Хотя, обратимые циклы охлаждения являются идеализированными, важной особенностью обратимых циклов и процессов является то, что они однозначно вычисляются и не один реальный холодильник, перекачивающий тепло между двумя теплообменниками, не может иметь более высокий коэффициент полезного действия, чем холодильник, работающий по обратимому циклу. В связи с этим температурный диапазон охлаждения и мощность охлаждения в отношении таких 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 ($T_c = 293 \text{ K}$) [6]. 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 [6, 7]. С

целью исключения эффектов размагничивания экспериментальные измерения ΔT_{ad} и C_p были проведены на образцах одинаковой формы и одного состава [8]. На рис. 1 представлены температурные зависимости C_p для Gd измеренных в нулевом магнитном поле и в поле 1,5 Тл.

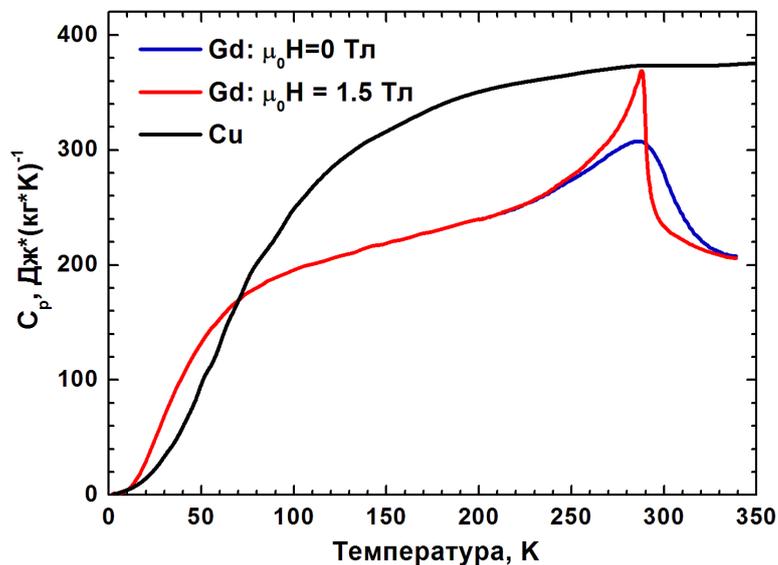


Рис. 1. Температурная зависимость теплоёмкости гадолиния и меди

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

Квазистатические процессы выделения или поглощения тепла 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 (РТ) 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 (рис. 1), 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 .

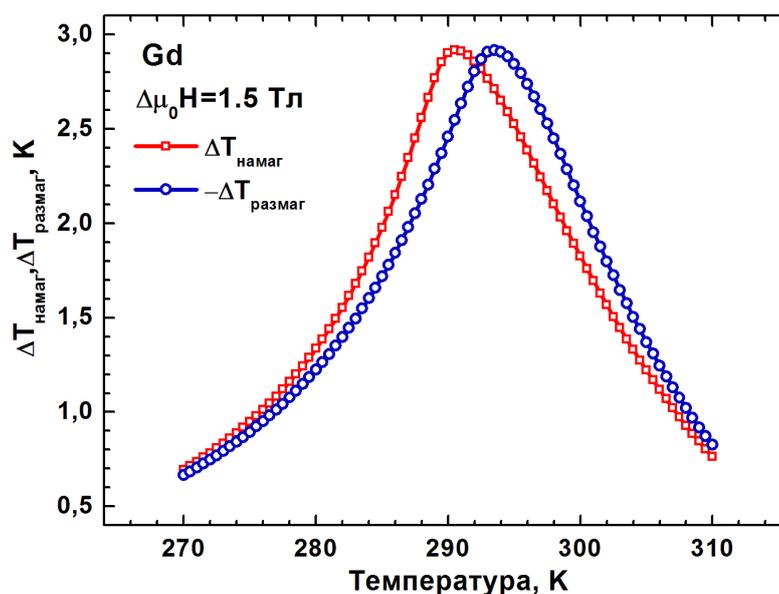


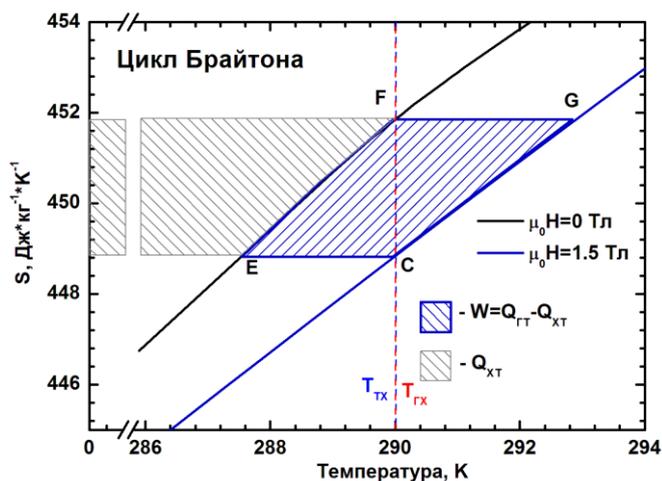
Рис. 2. Температурная зависимость МКЭ для гадолиния при намагничивании и размагничивании образца

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.

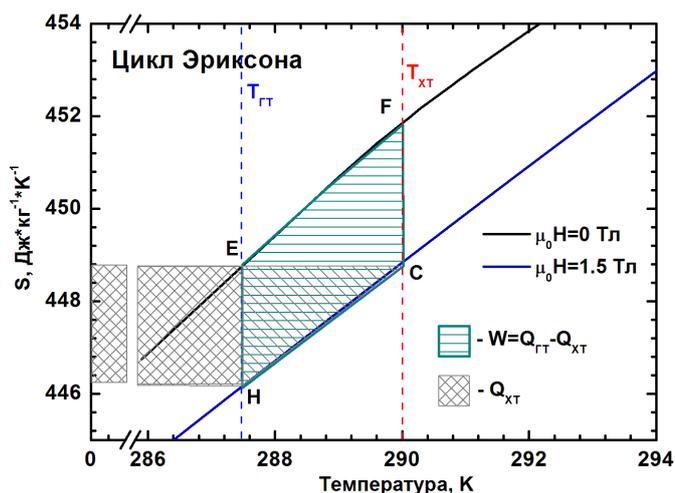
Результаты исследований. Используя экспериментальные данные по теплоемкостям и МКЭ, а так же следующие параметры системы: масса рабочего тела 1 кг, масса холодного теплообменника 10 кг, масса горячего теплообменника 10^4 кг, масса регенератора 10 кг, максимальное прикладываемое магнитное поле 1.5 Тл, были смоделированы циклы магнитного охлаждения Брайтона и Эриксона, S-T диаграммы которых представлены на рис. 3 (а, б).

Рис. 3, а иллюстрирует случай, при котором холодильник, работающий по идеальному циклу Брайтона, совершает максимальную работу, т.е. когда температуры горячего и холодного теплообменников равны. Данный цикл состоит из четырех основных процессов: адиабатическое намагничивание РТ, в результате которого его температура повышается на величину прямого МКЭ (отрезок FG); тепловой контакт с горячим теплообменником в магнитном поле, в ходе данного процесса РТ выделяет тепло и его температура уменьшается (отрезок GC); адиабатическое размагничивание РТ, вследствие чего его температура уменьшается на величину обратного МКЭ (отрезок CE);

тепловой контакт РТ с холодным теплообменником, в ходе которого РТ поглощает тепло ХТ и его температура увеличивается (отрезок EF).



а)



б)

Р и с. 3. S-T диаграммы циклов магнитного охлаждения
а) цикл Брайтона, б) цикл Эриксона

Вычисления показывают, что при стартовой температуре 290 К температурный интервал охлаждения холодильника, работающего по идеальному циклу Брайтона, составил 2.45 К, 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.

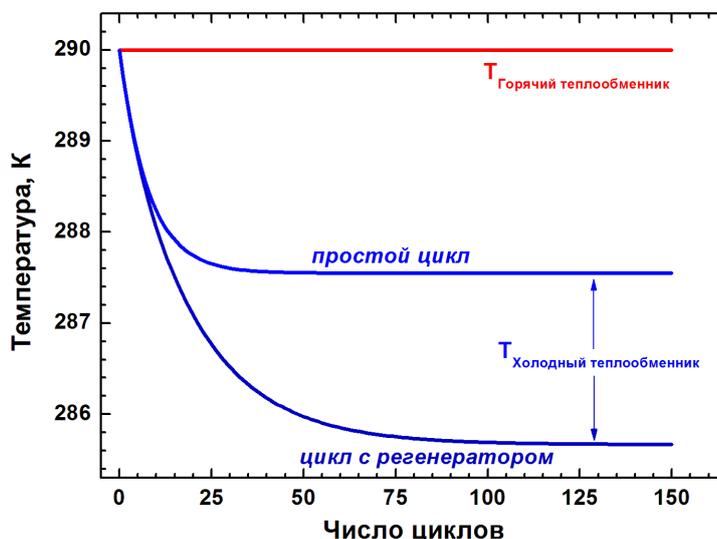


Рис. 4. Эволюция температуры холодного теплообменника в ходе работы простых и регенеративных циклов

В дальнейшем была смоделирована работа холодильника, работающего по циклу Эриксона. На рис. 3, б представлен идеальный цикл Эриксона, соответствующий максимальной совершаемой работе, т.е. когда разница между температурами горячего и холодного теплообменников равна обратному МКЭ материала, используемого в качестве рабочего тела. Цикл состоит из следующих процессов: изотермическое намагничивание РТ в контакте с ГТ (отрезок FC), в результате которого РТ выделяет тепло; тепловой контакт РТ с ХТ в магнитном поле, при котором ХТ поглощает тепло от РТ (отрезок CH); изотермическое размагничивание РТ в тепловом контакте с ХТ, в ходе которого РТ поглощает тепло (отрезок HE); тепловой контакт с ГТ без поля, вследствие чего ГТ поглощает тепло от РТ (отрезок EF).

Данные моделирования представлены на рис. 4. Видно, что максимальный температурный интервал охлаждения для данного цикла при стартовой температуре 290 К составляет 2,45 К и температурное равновесие системы наступает так же как и для цикла Брайтона через 50 циклов.

В соответствии с первым началом термодинамики, при осуществлении кругового цикла, из-за возвращения рабочего тела в исходное состояние, его внутренняя энергия за цикл не изменяется. Поэтому совершенная рабочим телом механическая работа равна разности подведенной и отведенной теплоты. В холодильной машине за

счет совершения внешними телами работы W над рабочим телом происходит отвод теплоты $Q_{ХТ}$ от охлаждаемого тела и передача теплоты $Q_{ГТ}$ тепловому резервуару, в качестве которого обычно выступает окружающая среда, следовательно работа, совершаемая за цикл холодильной машиной равна

$$W = Q_{ГТ} - Q_{ХТ} \quad (2),$$

Так же работа равна площади фигуры на S-T диаграмме, отображающей цикл. Для каждого из циклов на рис. 3 (а, б) обозначены процессы и количество теплоты, при которых РТ находится в тепловом контакте с холодным теплообменником и переносит тепло (серые области): для цикла Брайтона – площадь под отрезком FE, для цикла Эриксона – площадь под отрезком СН и площадь под отрезком ЕН. Результаты по расчету работы, совершаемой смоделированными циклами и отнесенной к массе рабочего тела, представлены на рис. 6.

Максимальный температурный интервал холодильника можно достичь, если холодное тело совершенно изолировано. Но для реального применения важно знать, насколько быстро будет снижаться тепловой диапазон, если в каждом цикле подводить к ХТ некоторое количество тепла. Таким образом, зная тепло, откачиваемое от ХТ, и рабочую частоту холодильника, можно найти охлаждаемую мощность холодильника. Для рабочей частоты 1 Гц, мощность охлаждения в зависимости от температуры ХТ для моделированных циклов представлена на рис. 5.

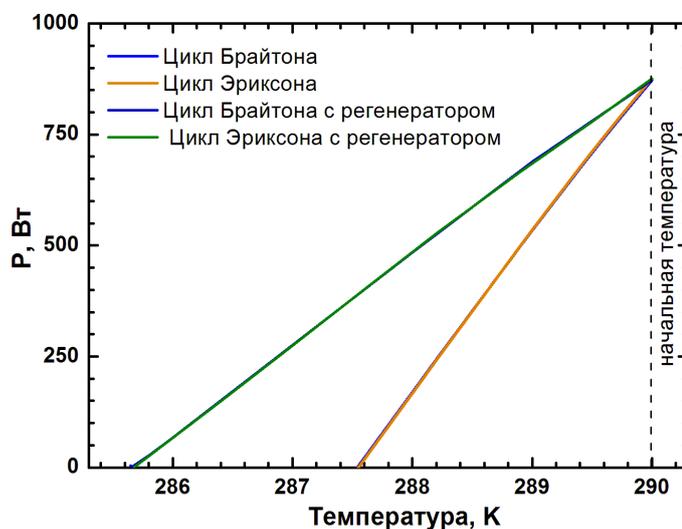


Рис. 5. Зависимость мощности охлаждения от температурного интервала охлаждения для простых и регенеративных циклов

Коэффициент полезного действия или холодильный коэффициент холодильной машины можно определить как отношение отнятой от охлаждаемого тела теплоты $Q_{ХТ}$ к затраченной для этого механической работе W :

$$\eta = \frac{Q_{ХТ}}{W} \quad (3)$$

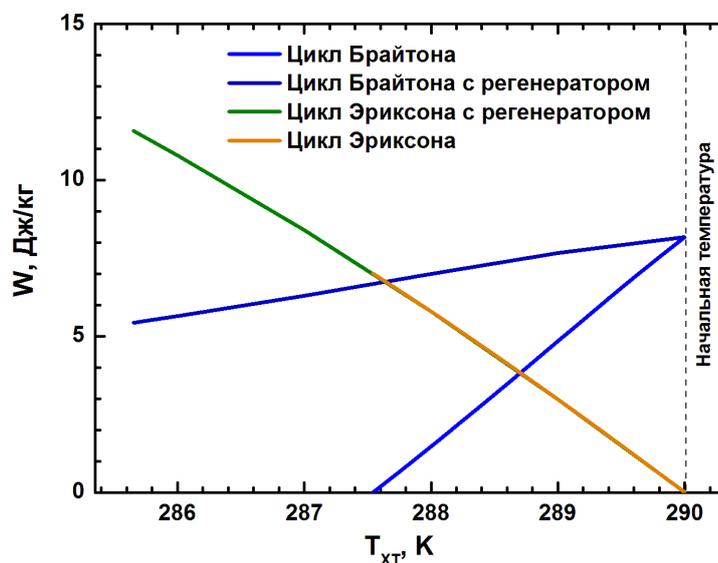


Рис. 6. Зависимость работы, производимой смоделированными циклами, от температуры холодного теплообменника при постоянной температуре горячего теплообменника (массы обоих теплообменников бесконечны)

Данные по вычислению КПД смоделированных циклов представлены на рис. 7.

В подтверждение сказанному во введении видно, что достичь большого охлаждения, используя простые циклы Брайтона и Эриксона невозможно, в связи с тем, что температурный интервал охлаждения в данных циклах определяется МКЭ материала, используемого в качестве хладагента. Поэтому необходимо использовать циклы с регенератором – тепловым устройством, которое переносит тепло между частями регенеративного термодинамического холодильного цикла в противоположных направлениях.

С целью исследования теоретических пределов основных характеристик холодильных циклов использующих регенератор, были смоделированы циклы Брайтона и Эриксона, в которых операциям намагничивания и размагничивания РТ предшествует процесс теплового контакта РТ с регенератором.

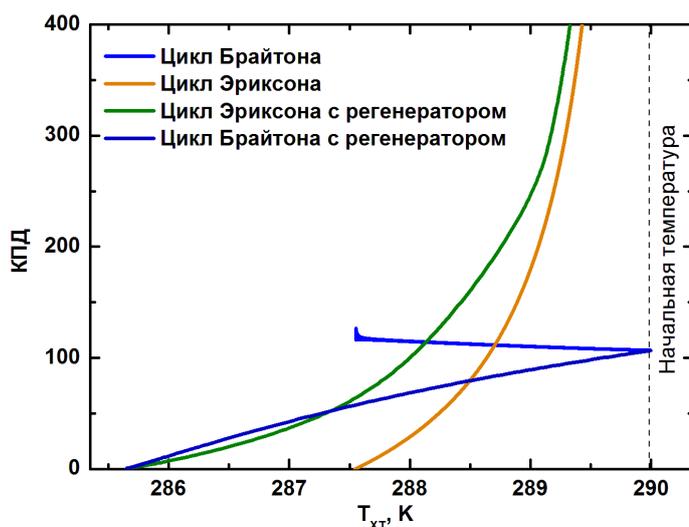


Рис. 7. Зависимость КПД смоделированных циклов, от температуры холодного теплообменника при постоянной температуре горячего теплообменника (массы обоих теплообменников бесконечны)

Результаты вычислений для циклов Брайтона и Эриксона с регенератором представлены на рис. 4–7. По сравнению с простыми циклами, в регенеративных циклах температурный интервал охлаждения увеличился более чем на 50 % и составил 4.33 К. Так же возросла и производимая работа, однако эффективность таких холодильных машин уменьшилась, это видно по данным КПД и количеству циклов необходимых для максимального охлаждения заданного объема, которое возросло до 125. Уменьшение эффективности таких циклов связано с тем, что при увеличении температурного интервала охлаждения и производимой работы, мощность охлаждения осталась неизменной (рис. 5)

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 реальные циклы магнитного охлаждения с гадолинием в качестве рабочего тела были заменены на обратимые циклы, и путем численного моделирования на основе экспериментальных данных $\Delta T_{ад}$ и C_p найдены тепловой диапазон, мощность охлаждения и эффективность для таких идеализированных циклов. Результаты наглядно демонстрируют функциональные диапазоны простых и регенеративных циклов Брайтона и Эриксона.

Использование в магнитных холодильниках циклов с регенератором увеличивает их температурный интервал охлаждения, но приводит к уменьшению эффективности. Данный подход может быть применен для расчета более сложным циклов магнитного охлаждения: такие как цикла активного магнитного регенератора, каскадного цикла и т.д., а также использован как простой и эффективный метод для оценки пригодности МК материала для использования в качестве хладагента в МХ.

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. Gschneidner K.A., Pecharsky Jr. and V.K. Magnetocaloric materials // *Annu. Rev. Mater. Sci.* 2000. V. 30. P. 387–429.
3. Kuz'min M.D. and Tishin A.M. // *Cryogenics.* 1993. V. 33 N. 9. P. 868–882.
4. 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.
5. 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.
6. Tishin A.M., Spichkin Y.I. *The Magnetocaloric Effect and Its Applications.* Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia. 2003. P. 475.
7. 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.
8. Kuz'min M.D., Skokov K.P., Karpenkov D.Y., Moore J.D., Richter M., Gutfleisch O. Magnetic field dependence of the maximum adiabatic temperature change // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 99. P. 012501.

SIMULATING OF SIMPLE BRAYTON AND ERICSSON COOLING CYCLES AND CYCLES WITH REGENERATOR

**A. Yu. Karpenkov^{1,2}, K. P. Skokov^{1,2}, A. Yu. Karpenkov¹,
Yu. G. Pastushenkov¹, O. Gutfleisch²**

¹Tver State University, *Chair of magnetism*

²IFW Dresden, Institute for Metallic Materials, Dresden

A models for simple and regenerative Brayton and Ericsson cooling cycles used in magnetic refrigeration near room temperature were developed. Models were used to calculate a theoretical limit of temperature span, cooling power, efficiency of simulated cycles. The obtained results clearly demonstrate the functional ranges of Bryton and Ericsson-cycle refrigerators. The proposed modeling method can be used as method of assessing the suitability of the magnetocaloric material as the working body of magnetic refrigerators.

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

Об авторах:

КАРПЕНКОВ Алексей Юрьевич – аспирант кафедры магнетизма ТвГУ, 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;

КАРПЕНКОВ Дмитрий Юрьевич – аспирант кафедры магнетизма ТвГУ, *e-mail:* karpenkov_d_y@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.