

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 3, 2026 vol. 3

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 3, ISSUE 3

SEPTEMBER, 2026



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 3, ISSUE 3 SEPTEMBER, 2026

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “**Journal of Transport**” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organization
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

The magnetocaloric effect as a basis for energy-efficient magnetic refrigeration

F.F. Khasanov¹ 

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The paper presents a systematic thermodynamic description of the magnetocaloric effect as the physical basis of energy-efficient magnetic refrigeration operating near room temperature. The relevance of the direction is determined by the drawbacks of vapour-compression systems, primarily the risk of refrigerant leakage with the associated depletion of the ozone layer and the greenhouse effect. Starting from the decomposition of the total entropy of a magnetocaloric material into magnetic, lattice and electronic contributions, expressions are derived for the adiabatic temperature change and for the isothermal change of the magnetic entropy by means of the Maxwell relation; the applicability of the entropy decomposition is shown to be restricted to second-order phase transitions. The Weiss molecular-field model is used for the quantitative description of ferromagnetism. It is shown that the magnitude of the effect is proportional to the temperature derivative of the magnetisation and inversely proportional to the heat capacity, so that the largest values are attained near the magnetic ordering temperatures. On this basis the requirements imposed on the working body of a magnetic refrigerator are formulated: a magnetic ordering temperature close to the working range, a large temperature derivative of the magnetisation, a low heat capacity and a small magnetic hysteresis.

Keywords: magnetocaloric effect, magnetic refrigeration, adiabatic temperature change, isothermal entropy change, Maxwell relation, Weiss molecular field, magnetic phase transition, energy efficiency, refrigerants

Магнитокалорический эффект как основа энергоэффективного магнитного охлаждения

Хасанов Ф.Ф.¹ 

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В работе изложено термодинамическое описание магнитокалорического эффекта как физической основы энергоэффективного магнитного охлаждения в области комнатных температур. Актуальность направления определяется недостатками парокompрессионных систем, прежде всего риском утечки хладагентов с сопутствующим разрушением озонового слоя и усилением парникового эффекта. Исходя из разложения полной энтропии магнитокалорического материала на магнитную, решёточную и электронную составляющие, с использованием соотношения Максвелла получены выражения для адиабатического изменения температуры и изотермического изменения магнитной энтропии; показано, что разложение энтропии строго применимо лишь для фазовых переходов второго рода. Для количественного описания ферромагнетизма привлечена модель молекулярного поля Вейсса. Показано, что величина эффекта пропорциональна производной намагниченности по температуре и обратно пропорциональна теплоёмкости, вследствие чего наибольшие значения достигаются вблизи температур магнитного упорядочения. На этой основе сформулированы требования к рабочему телу магнитного холодильника: температура магнитного упорядочения вблизи рабочего диапазона, высокая производная намагниченности по температуре, низкая теплоёмкость и малый магнитный гистерезис.

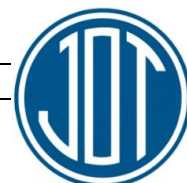
Ключевые слова: магнитокалорический эффект, магнитное охлаждение, адиабатическое изменение температуры, изотермическое изменение энтропии, соотношение Максвелла, молекулярное поле Вейсса, магнитный фазовый переход, энергоэффективность, хладагенты

1. Введение

На сегодняшний день создание компактных, экологически безопасных, энергоэффективных и

надёжных холодильных устройств, функционирующих в области комнатных температур, представляет собой

 <https://orcid.org/0009-0004-6301-9822>



одну из наиболее актуальных научно-технических задач. Актуальность данного направления определяется рядом существенных недостатков, присущих традиционным охлаждающим системам. В частности, эксплуатация современных холодильных установок сопряжена с риском утечки рабочих хладагентов, что приводит к таким экологическим последствиям, как разрушение озонового слоя и усиление парникового эффекта [1, 4]. В числе альтернативных подходов к построению холодильной техники всё большее внимание научного сообщества привлекает технология магнитного охлаждения [1–3].

Достижение высокого КПД магнитных рефрижераторов требует создания эффективных магнитокалорических материалов, пригодных для работы в области комнатных температур. Такие материалы должны характеризоваться малым магнитным гистерезисом, выраженным магнитокалорическим эффектом, высокой намагниченностью и приемлемыми технологическими параметрами [3, 4]. Повышенный интерес к изучению магнитокалорического эффекта обусловлен потребностью в материалах с высокими значениями МКЭ, способных выполнять функцию рабочего тела в устройствах магнитного охлаждения; применение подобных материалов открывает возможность полного отказа от экологически вредных хладагентов [3, 5].

Исследование магнитных и магнитокалорических характеристик даёт дополнительную информацию о природе магнитоупорядоченного состояния вещества и о взаимосвязи магнитных и тепловых свойств [2, 5]. Установлено, что максимальные значения МКЭ наблюдаются вблизи фазовых переходов, что обуславливает особый интерес к изучению именно этой области. Таким образом, исследование магнитокалорического эффекта неразрывно связано с развитием физики фазовых переходов и критических явлений [3, 6].

Целью настоящей работы является систематическое изложение термодинамического описания магнитокалорического эффекта — от определения эффекта и разложения энтропии по подсистемам до выражений для адиабатического изменения

температуры и изотермического изменения энтропии — и сопоставление получаемых соотношений с требованиями, предъявляемыми к рабочему телу магнитного холодильника комнатного диапазона.

2. Методика исследования

2.1. Определение и физическая природа эффекта

Явление магнитного охлаждения основано на способности магнитного материала изменять собственную температуру под действием внешнего магнитного поля. Изменение энтропии в изотермическом процессе либо изменение температуры в адиабатическом процессе, происходящее при изменении магнитного поля, принято называть магнитокалорическим эффектом (МКЭ) [4].

Технология магнитного охлаждения при комнатной температуре, основанная на магнитокалорическом эффекте, является относительно новым научно-техническим направлением. Само явление МКЭ было впервые зафиксировано Варбургом: в 1881 году им было отмечено повышение температуры образца железа при внесении его в магнитное поле и последующее понижение температуры при выведении образца из поля [3, 7, 10]. Таким образом, магнитокалорический эффект представляет собой фундаментальное свойство магнитных материалов, проявляющееся в изменении их температуры под действием приложенного магнитного поля; материалы, обладающие данным свойством, получили название магнитокалорических. МКЭ присущ всем переходным металлам и лантаноидам, способным проявлять ферромагнитные свойства [3, 4, 8]. При снятии магнитного поля магнитные моменты приобретают хаотическую ориентацию, вследствие чего ферромагнетик охлаждается.

Магнитокалорический эффект представляет собой внутреннее свойство магнитных материалов, заключающееся в поглощении либо выделении тепловой энергии под воздействием внешнего магнитного поля [6, 10]. Данное явление сопровождается обратимым нагревом или охлаждением материала, как показано на рисунке 1.

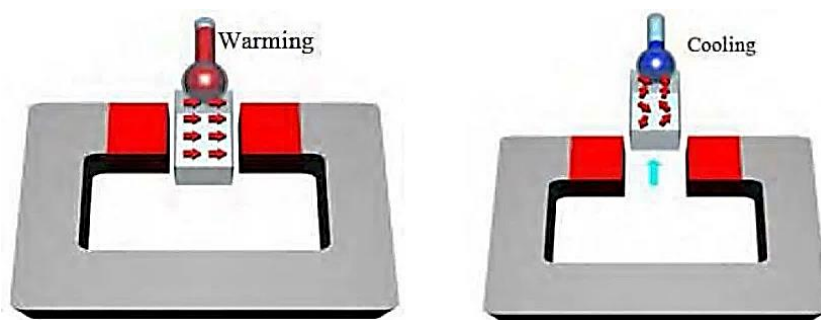


Рис. 1. Магнитокалорический эффект

2.2. Термодинамические соотношения

Абсолютная энтропия магнитокалорического материала, будучи функцией температуры и магнитной индукции, может быть представлена как сумма магнитной составляющей, решёточной составляющей и вклада энтропии электронов проводимости, величиной которого обычно можно пренебречь [6, 7, 9].

Соответствующее выражение имеет вид:

$$S(T, B) = S_m + S_l \quad (1)$$

где S_m и S_l — магнитная и решёточная составляющие энтропии соответственно, T (К) — температура, B (Тл) — магнитная индукция.

Представленное в (1) разложение энтропии справедливо только для материалов, испытывающих

фазовый переход второго рода, для которых характерно плавное изменение намагниченности с температурой. Для фазовых переходов первого рода, сопровождающихся резким изменением намагниченности вблизи температуры перехода, подобное разложение оказывается неточным [6, 9]. В большинстве практических случаев достаточно оперировать полной энтропией, дифференциальная форма которой записывается как:

$$dS(T, B) = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B dT + \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \quad (2)$$

Удельная теплоёмкость C_B (Дж·м⁻³·К⁻¹) материала определяется соотношением:

$$C_B = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B T \quad (3)$$

откуда следует:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B = \frac{C_B}{T} \quad (4)$$

С учётом выражений (2) и (4) можно записать:

$$dS(T, B) = \frac{C_B}{T} dT + \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \quad (5)$$

Для адиабатического процесса ($\Delta S = 0$) изменение температуры, с использованием соотношения Максвелла [6, 9]:

$$dT = \frac{T}{C_B} \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T + \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B \quad (7)$$

где M (А·м⁻¹) — намагниченность, можно записать:

$$dT = -\frac{T}{C_B} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B dB \quad (8)$$

Величину магнитокалорического эффекта (адиабатическое изменение температуры) можно представить в виде:

$$\Delta T_{ad} = -\int_{B_i}^{B_f} \frac{T}{C_B} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B dB = MCE \quad (9)$$

В случае изотермического процесса температура образца в ходе намагничивания остаётся неизменной, а изменение энтропии описывается выражением:

$$dS(T, B) = (\partial S / \partial B)_T dB \quad (10)$$

Используя соотношение Максвелла (7), изменение магнитной энтропии можно представить как:

$$\Delta T = \int_{B_i}^{B_f} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B dB \quad (11)$$

при этом выделяемое тепло переходит в тепловые колебания кристаллической решётки [7, 9].

2.3. Модель молекулярного поля Вейсса

Теоретическое описание МКЭ базируется на молекулярной теории поля (модели Вейсса) и термодинамических соотношениях. Для количественного описания ферромагнетизма Вейсс предложил феноменологическую модель, согласно которой действие внешнего поля B дополняется эффектом молекулярного поля [6, 8, 10], пропорционального объёмной намагниченности:

$$B_v = \lambda \mu_0 M \quad (12)$$

Соответственно, энергия магнитного момента записывается как:

$$E = -\mu(B + B_v) \quad (13)$$

3. Результаты и обсуждение

3.1. Преимущества магнитного охлаждения перед пароконпресссионным

Итоговой целью развития технологии магнитного охлаждения является создание бытового холодильного оборудования нового поколения. По сравнению с

традиционными компрессорными системами, магнитное охлаждение потенциально позволяет снизить как эксплуатационные, так и обслуживающие расходы. Отказ от компрессора устраняет связанные с ним высокие капитальные затраты и энергопотребление, что делает магнитное охлаждение экономически конкурентоспособной альтернативой компрессорным технологиям.

К основным преимуществам магнитного охлаждения перед компрессорным можно отнести: экологическую чистоту — отсутствие выбросов вредных и токсичных газов [1, 4]; бесшумность работы за счёт отсутствия компрессора [2, 3]; более высокую энергетическую эффективность; конструктивную простоту устройств; низкие затраты на техническое обслуживание, а также работу при низком (атмосферном) давлении, что особенно ценно для систем автомобильного кондиционирования и холодильного оборудования [4, 6].

3.2. Требования к магнитокалорическим материалам

Из приведённых соотношений следует, что величина эффекта пропорциональна производной намагниченности по температуре и обратно пропорциональна теплоёмкости материала. Отсюда вытекают требования к рабочему телу: температура магнитного упорядочения должна лежать вблизи рабочего диапазона устройства, производная $(\partial M / \partial T)_B$ в этой области должна быть максимальной, а теплоёмкость — по возможности низкой. Дополнительными требованиями являются малый магнитный гистерезис, обеспечивающий обратимость эффекта при циклировании, высокая намагниченность насыщения, приемлемая теплопроводность и технологичность [3, 4].

В магнитокалорических материалах приложение либо снятие внешнего магнитного поля сопровождается заметным изменением энтропии. Величина МКЭ для конкретного материала определяется исключительно его исходной температурой и напряжённостью магнитного поля, а сам эффект может быть охарактеризован как через изотермическое изменение энтропии, так и через адиабатическое изменение температуры. Это обстоятельство позволяет использовать обе величины как взаимодополняющие характеристики при отборе материалов, однако сопоставлять их следует с учётом того, каким методом — прямым или косвенным — они были получены.

4. Заключение

1. Магнитокалорический эффект является внутренним свойством магнитных материалов и проявляется в изменении их температуры при адиабатическом изменении внешнего магнитного поля либо в изменении энтропии при изотермическом процессе.

2. Термодинамическое описание эффекта, основанное на разложении энтропии по подсистемам и на соотношении Максвелла, приводит к выражениям (9) и (11) для адиабатического изменения температуры и изотермического изменения магнитной энтропии; разложение энтропии на слагаемые строго применимо лишь для фазовых переходов второго рода.



3. Величина эффекта пропорциональна производной намагниченности по температуре и обратно пропорциональна теплоёмкости, вследствие чего максимальные значения МКЭ достигаются вблизи температур магнитного упорядочения.

4. Магнитное охлаждение обладает рядом преимуществ перед парокомпрессионным — экологическая чистота, бесшумность, конструктивная простота, работа при атмосферном давлении, — что определяет перспективность его применения, в том числе в системах автомобильного кондиционирования и холодильного оборудования.

5. Дальнейшее развитие направления связано с поиском материалов, сочетающих температуру магнитного упорядочения вблизи комнатной, высокую производную намагниченности по температуре, низкую теплоёмкость и малый гистерезис.

Использованная литература / References

[1] Gschneidner K.A. The magnetocaloric effect, magnetic refrigeration and ductile intermetallic compounds. *Acta Materialia*. 2009;57:18–28. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.08.048>

[2] Mitsiuk V.I., Mashirov A.V., Koledov V.V., Valkov V.I., Golovchan A.V., Kovalev O.E., Todris B.M., Ari-Gur P. Magnetic-field-induced transitions and the inverse magnetocaloric effect at liquid helium temperatures in the $Mn_{1-x}Co_xNiGe$ system ($0.15 \leq x < 0.80$). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2023;588:171355.

[3] Mityuk V.I., Rimskii G.S., Val'kov V.I., Golovchan A.V., Mashirov A.V., Koledov V.V. Low temperature features of the magnetic and magnetocaloric properties of the $Mn_{1-x}Co_xNiGe$ system ($0.05 \leq x \leq 0.4$). *Physics of Metals and Metallography*. 2022;123:386–391.

[4] Бердиев У.Т., Хасанов Ф.Ф., Каршиев К.Т., Сулаймонов У.Б., Митюк В.И. Исследование магнетокалорического эффекта в манганитах. Вода. Газ. Тепло: материалы международной научно-технической конференции, 15–16 мая 2025 г. Минск: БНТУ, 2025.

[5] Mitsiuk V.I., Zhaludkevich A.L., Val'kov V.I., Golovchan A.V., Mashirov A.V., Anikeev S.G., Pikula T., Tkachenka T.M. Magnetocaloric effect of Zn-containing manganese pnictides. *Physics of Metals and Metallography*. 2024;125:1838–1844.

[6] Mitsiuk V.I., Gurbanovich A.V., Gurbanovich An.V., Tkachenka T.M., Valkov V.I., Golovchan A.V., Mashirov A., Surowiec Z. Magnetic and magnetocaloric characteristics of the $Mn_{1-x}Cu_{0.1}Sb$ alloy. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2023;68:431–435.

[7] Mitsiuk V.I., Govor G.A., Budzyński M. Reversible phase transitions and magnetocaloric effect in $MnAs$, $MnAs_{0.99}Po_{0.01}$ and $MnAs_{0.98}Po_{0.02}$ single crystals. *Inorganic Materials*. 2013;49:14–17.

[8] Govor G.A., Larin A.O., Mitsiuk V.I., Rimskiy G.S., Tkachenka T.M. Magnetocaloric properties of the single crystal $Mn_{0.99}Fe_{0.01}As$. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics Series*. 2019;55:118–124.

[9] Govor G.A., Mitsiuk V.I., Nikitin S.A., Pankratov N.Yu., Smarzhenskaya A.I. Magnetostructural phase transitions and magnetocaloric effect in $Mn(As,P)$ compounds and their composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;801:428–437.

[10] Berdiyev U., Demedenko O., Ashurov M., Hasanov F.F., Sulaymonov U.B. Optimization of the method of oxide coating of metallic iron powder particles. *E3S Web of Conferences*. 2023;383:04039. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304039>.

Информация об авторах/ Information about the authors

Хасанов
Фозил /
Fozil
Khasanov

Ташкентский государственный
транспортный университет,
PhD, доцент
E-mail:

fozilhasanov777@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-6301-9822>



**K. Mustafaeva, Sh. Jumaev, A. Makhkamov,
Sh. Suyunbaev**

*Research on the time norms for performing technological operations
with multi-group trains at railway stations.....234*

F. Khasanov

Study of the magnetocaloric effect in magnetic materials.....242

F. Khasanov

*The magnetocaloric effect as a basis for energy-efficient magnetic
refrigeration.....247*

D. Safaeva, Sh. Tashmuhammedova, D. Zairov

*IR spectroscopic study of the formation of functional groups on the
surface of polymer materials for packaging under the influence of
corona discharge.....251*

A. Azimov

*Improving the cold-start process in fourth-generation gas-cylinder
vehicles operating on compressed natural gas fuel.....255*

A. Beliy, Sh. Kadirova

*Improvement of the method for assessing the need for
electrochemical protection of reinforced concrete bridge piers....260*