

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.

Study of the magnetocaloric effect in magnetic materials

F.F. Khasanov¹ ^a

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The paper considers the physical basis of the magnetocaloric effect (MCE), the prospects of using magnetic phase transitions for widening the working temperature range, and the design solutions of magnetic refrigeration systems. It is shown that the efficiency of magnetic cooling is governed by the magnitude of the magnetocaloric effect, the frequency of the working cycle, the amount of the working body and the efficiency of heat exchange. The operation of a magnetic refrigerator with a gadolinium-based working body is examined and the prospects of MnAs-based compounds are analysed. Particular attention is paid to the influence of pressure and of the structural contribution on the magnitude of the effect: for MnAs under a pressure of 2.23 kbar an isothermal entropy change of 267 J/(kg·K) is reported, while for an MnAs–PVA composite in a field of 1.2 T the adiabatic temperature change reaches 1.2–1.3 °C against 0.87 °C for the prototype. The results indicate that magnetic materials with pronounced magnetostructural phase transitions are promising for the design of highly efficient magnetic refrigeration systems.

Keywords: magnetocaloric effect, magnetic materials, magnetic cooling, magnetic refrigerator, heat exchange, magnetic phase transition, gadolinium, MnAs, polymer matrix, pressure

Исследование магнетокалорического эффекта в магнитных материалах

Хасанов Ф.Ф.¹ ^a

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В статье рассмотрены физические основы магнетокалорического эффекта (МКЭ), перспективы применения магнитных фазовых переходов для расширения температурного рабочего диапазона, а также конструктивные решения магнитных холодильных систем. Показано, что эффективность магнитного охлаждения определяется величиной магнетокалорического эффекта, частотой рабочего цикла, количеством рабочего тела и эффективностью теплообмена. Рассмотрены особенности работы магнитного холодильника с рабочим телом на основе гадолиния и проанализированы перспективы применения соединений на основе MnAs. Особое внимание уделено влиянию давления и структурного вклада на величину МКЭ: для MnAs под давлением 2,23 кбар приведено изотермическое изменение энтропии 267 Дж/(кг·К), а для композита MnAs–ПВА в поле 1,2 Тл адиабатическое изменение температуры достигает 1,2–1,3 °С против 0,87 °С у прототипа. Представленные результаты указывают на перспективность использования магнитных материалов с выраженными магнитно-структурными фазовыми переходами для создания высокоэффективных магнитных холодильных систем.

Ключевые слова: магнетокалорический эффект, магнитные материалы, магнитное охлаждение, магнитный холодильник, теплообмен, магнитный фазовый переход, гадолиний, MnAs, полимерная матрица, давление

1. Введение

Для исследования фундаментальных физических свойств веществ во многих случаях необходимы высококачественные монокристаллы, поскольку использование монокристаллических образцов позволяет изучать анизотропию свойств, уменьшать влияние поверхностных эффектов и повышать точность измерений [2, 7]. Особый интерес представляют халькогениды и пниктиды переходных металлов, характеризующиеся широким спектром

функциональных свойств, включая полупроводниковые, магнитные, сверхпроводящие и каталитические характеристики [1, 3]. Эти соединения рассматриваются как перспективные материалы для современной электроники, энергетики и спинтроники. Кроме того, сульфидные соединения входят в состав природных полиметаллических руд, что определяет их прикладное значение [2, 4, 5].

Одним из распространённых методов получения кристаллов подобных соединений является метод раствор-расплава, основанный на медленном

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



охлаждении многокомпонентного расплава. При классической реализации данного подхода возможно формирование зонально неоднородных кристаллов [4, 7]. Применение стационарного температурного градиента позволяет стабилизировать условия роста, уменьшить изменение активности компонентов расплава и повысить воспроизводимость результатов. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов синтеза высококачественных функциональных материалов с контролируемыми структурными и физическими характеристиками [6, 8].

С развитием методов синтеза высококачественных кристаллов интенсивно развивается исследование магнетокалорических материалов, что обусловлено перспективностью создания магнитных холодильных систем, способных эффективно работать вблизи комнатной температуры [1, 8]. Магнитное охлаждение рассматривается как потенциальная альтернатива традиционным парокомпрессионным установкам благодаря возможности повышения энергетической эффективности и снижению экологической нагрузки. Физической основой данной технологии является магнетокалорический эффект — изменение температуры магнитного материала при его намагничивании и размагничивании в адиабатических условиях [3, 6].

Современные магнитные холодильные системы развиваются от установок со сверхпроводящими магнитами к более компактным конструкциям на основе постоянных магнитов. Одним из ключевых направлений повышения холодопроизводительности является увеличение частоты рабочего цикла, поскольку производительность системы определяется не только величиной МКЭ, но и количеством рабочего материала и эффективностью теплопередачи [5, 7]. При этом объём магнетокалорического материала ограничивается геометрическими размерами магнитной системы, формирующей внешнее магнитное поле. Поэтому увеличение частоты рабочего цикла рассматривается как один из способов повышения охлаждающей мощности без существенного увеличения габаритов установки [8, 9].

Высокочастотная работа магнитного холодильника предъявляет повышенные требования к организации теплообмена. Быстрая передача теплоты между магнетокалорическим материалом и теплоносителем возможна при использовании теплообменников с развитой поверхностью и рациональной геометрией рабочего тела. Перспективными являются многослойные конструкции из тонких параллельных пластин или стержней толщиной порядка 0,1–0,3 мм с небольшими межпластинчатыми зазорами, обеспечивающими интенсивный теплообмен при ограниченных гидродинамических потерях [6, 10].

Дополнительным фактором, влияющим на эффективность магнитного холодильника, является размагничивающее поле, величина которого определяется геометрией магнетокалорического материала. Согласно рассмотренным данным, демагнитизационные эффекты уменьшаются в тонких и удлинённых элементах, ориентированных вдоль направления внешнего магнитного поля, что способствует более эффективному использованию магнитного поля и повышению энергетической эффективности системы [7, 8].

Интерметаллические соединения, рассматриваемые как перспективные магнетокалорические материалы, характеризуются хрупкостью и относительно низкой технологичностью. Это затрудняет изготовление из них теплообменных структур сложной геометрии. Поэтому важное значение приобретает разработка способов получения материалов с контролируемой структурой, обеспечивающей эффективный теплообмен, а также исследование влияния термических и механических воздействий на их структурные и магнетокалорические характеристики [11, 13].

Целью настоящей работы является анализ факторов, определяющих эффективность магнитного охлаждения, — величины магнетокалорического эффекта, температуры магнитного фазового перехода, частоты рабочего цикла, геометрии рабочего тела и условий механического воздействия, — а также оценка перспектив применения соединений на основе MnAs в качестве рабочего тела магнитной холодильной системы [11, 12].

2. Методика исследования

2.1. Физические основы магнитного охлаждения

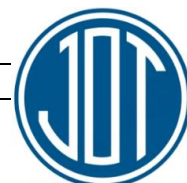
Магнитное охлаждение основано на способности магнитного материала изменять свою температуру и энтропию под воздействием внешнего магнитного поля. По аналогии с процессами сжатия и расширения газа в традиционных холодильных машинах изменение напряжённости магнитного поля вызывает изменение термодинамического состояния магнитного материала. Данное явление называется магнетокалорическим эффектом [4, 9]. Изменение температуры обусловлено перераспределением внутренней энергии между системой магнитных моментов атомов и кристаллической решёткой. Максимальные значения МКЭ наблюдаются в магнитоупорядоченных материалах, в частности в ферромагнетиках и антиферромагнетиках, в области магнитных фазовых переходов — температур Кюри, Нееля и других температур магнитного упорядочения [2, 7, 9].

2.2. Объект и источники анализируемых данных

В качестве объектов анализа рассмотрены две группы материалов: металлический гадолиний как классическое рабочее тело магнитного холодильника комнатного диапазона и соединения на основе арсенида марганца MnAs, обладающие магнитно-структурным фазовым переходом первого рода. Анализ выполнен по опубликованным экспериментальным данным о величине МКЭ, температуре фазового перехода и влиянии гидростатического давления, а также по данным о конструктивных решениях магнитных холодильных систем. Сопоставляемыми величинами являлись изотермическое изменение энтропии ΔS (Дж/(кг·К)), адиабатическое изменение температуры ΔT (°С) и значение приложенного магнитного поля (Тл). Значения приводятся в том виде, в каком они опубликованы в исходных источниках; собственные измерения в настоящей работе не выполнялись.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Конструктивная реализация магнитного холодильника



Рассматриваемая конструкция предусматривает вращение рабочего колеса через рабочий зазор магнита, в котором сосредоточено магнитное поле (рисунок 1). При входе сегмента с гадолинием в область магнитного поля в материале возникает МКЭ, сопровождающийся повышением его температуры. Образовавшаяся теплота отводится теплообменником, охлаждаемым водой. При выходе гадолиния из зоны магнитного поля возникает

МКЭ противоположного знака, вследствие чего материал дополнительно охлаждается и отводит теплоту от второго потока воды. Этот поток используется для охлаждения полезной нагрузки магнитного холодильника. Такая конструкция характеризуется компактностью и отсутствием механических вибраций, связанных с традиционным парокомпрессионным циклом [9, 11].

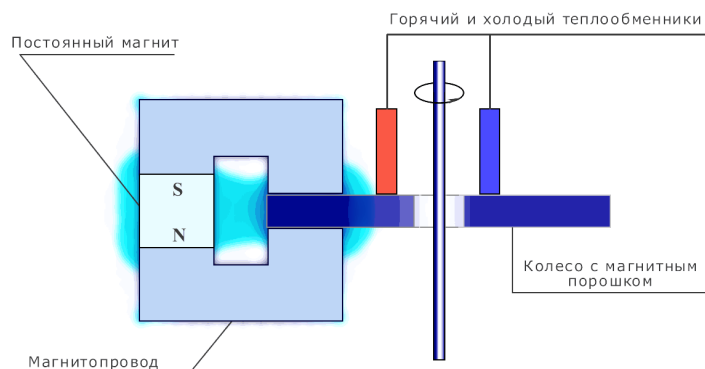


Рис. 1. Схема работы магнитного холодильника

По приведённым в исходном материале данным, магнитное охлаждение может обеспечивать энергетическую эффективность на 20–30 % выше по сравнению с парокомпрессионным охлаждением. Дополнительным преимуществом является отсутствие необходимости использования озоноразрушающих и парниковых хладагентов, что повышает экологическую привлекательность технологии [13].

3.2. Магнетокалорические свойства MnAs

Сплавы на основе арсенидов переходных металлов, в частности арсенид марганца (MnAs), представляют интерес вследствие наличия магнитно-структурного фазового перехода первого рода и высокой величины

магнетокалорического эффекта. В рассматриваемых исследованиях для MnAs под давлением 2,23 кбар при комнатной температуре приведено значение изотермического изменения энтропии 267 Дж/(кг·К) (рисунок 4).

Для композита на основе MnAs в полимерной матрице ПВА, выдержанного в течение суток под давлением 10 кбар, в исходных данных приведены максимальные изменения температуры $\Delta T = 1,2^\circ\text{C}$ при нагреве и $\Delta T = 1,3^\circ\text{C}$ при охлаждении (рисунок 2). При изменении магнитного поля до 1,2 Тл эти значения превышают указанное в работе значение для прототипа — $0,87^\circ\text{C}$ [7, 12]

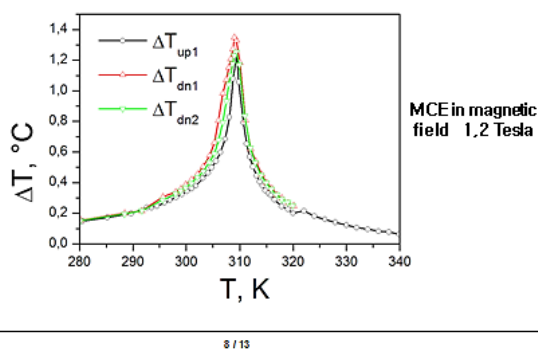


Рис. 2. Магнетокалорический эффект композита на основе MnAs в полимерной матрице ПВА при магнитном поле 1,2 Тл

При температурном переходе без приложения давления величина изменения энтропии, согласно исходным данным, составляет около 40 Дж/(кг·К). Предполагается, что увеличение структурного вклада в МКЭ MnAs может привести к росту изменения

температуры с $\Delta T \approx 18^\circ\text{C}$ до диапазона $50\text{--}60^\circ\text{C}$, что создаёт предпосылки для разработки высокоэффективных магнитных холодильных систем [10].

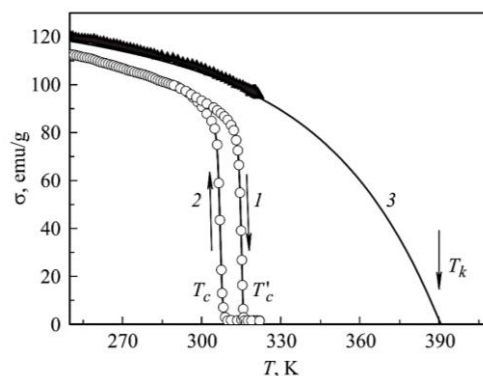
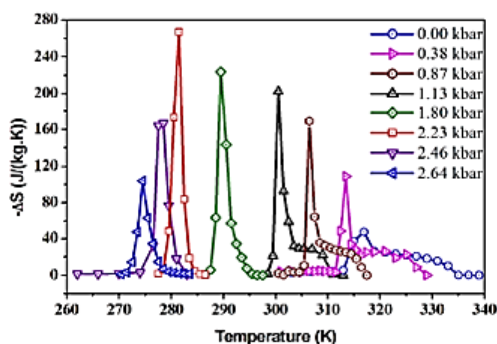


Рис. 3. Температурные зависимости удельной намагниченности вдоль ОЛН ($H \perp c$) для монокристалла арсенида марганца в магнитном поле $H = 10$ кЭ при нагреве (1) и охлаждении (2), а также в поле $H = 140$ кЭ при нагреве (3)

Приведённые зависимости подтверждают перспективность управления магнетокалорическим откликом MnAs посредством изменения внешних условий. В частности, повышение структурного вклада рассматривается как один из путей увеличения

изменения температуры и повышения эффективности магнитного холодильного цикла. Сопоставление данных для нормальных условий и для условий приложенного гидростатического давления приведено на рисунке 4.



MCE for MnAs under pressure much higher than for MnAs in normal condition Plan is to realize pressure in MnAs composites

11 / 13

Рис. 4. Магнетокалорический эффект MnAs под давлением и в нормальных условиях

3.3. Обсуждение и ограничения

Сопоставление рассмотренных данных показывает, что эффективность магнитного охлаждения определяется не одним параметром, а совокупностью взаимосвязанных факторов: величиной магнетокалорического эффекта, положением температуры магнитного фазового перехода относительно рабочего диапазона, частотой рабочего цикла, геометрией рабочего тела, интенсивностью теплообмена и условиями механического воздействия. Приложение гидростатического давления смещает температуру перехода и увеличивает структурный вклад в эффект, что делает его дополнительным управляющим параметром наряду с составом и магнитным полем.

Ограничения выполненного анализа состоят в следующем. Во-первых, приводимые значения заимствованы из опубликованных источников и получены в различных экспериментальных условиях, вследствие чего их прямое сопоставление имеет ограниченную корректность. Во-вторых, оценка возможного роста ΔT до 50–60 °C носит прогнозный характер и требует экспериментальной проверки. В-

третьих, влияние циклирования поля и давления на обратимость эффекта в рамках настоящей работы не рассматривалось, хотя именно циклическая величина эффекта определяет пригодность материала для устройства.

4. Заключение

1. Эффективность магнитного охлаждения определяется совокупностью взаимосвязанных факторов: величиной магнетокалорического эффекта, температурой магнитного фазового перехода, частотой рабочего цикла, геометрией рабочего тела, интенсивностью теплообмена и условиями механического воздействия.

2. Конструкция магнитного холодильника с вращающимся рабочим колесом и рабочим телом на основе гадолиния обеспечивает компактность и отсутствие механических вибраций, характерных для пароконпресссионного цикла; по приведённым данным энергетическая эффективность такой схемы на 20–30 % выше.



3. Для MnAs в рассмотренных источниках отмечены значительные величины магнетокалорического эффекта — до 267 Дж/(кг·К) под давлением 2,23 кбар — и возможность усиления структурного вклада при воздействии давления; для композита MnAs–ПВА при поле 1,2 Тл приведены значения $\Delta T = 1,2\text{--}1,3^\circ\text{C}$, превышающие значение прототипа $0,87^\circ\text{C}$.

4. Увеличение изменения температуры до диапазона $50\text{--}60^\circ\text{C}$ за счёт роста структурного вклада рассматривается как перспективное направление для создания высокоэффективного магнитного холодильника; данная оценка требует экспериментального подтверждения.

5. Дальнейшее развитие технологии требует комплексной оптимизации состава и структуры магнитных материалов, геометрии теплообменных элементов и параметров рабочего цикла, а также исследования обратимости эффекта при многократном циклировании.

Использованная литература / References

[1] Gschneidner K.A. Jr., Pecharsky V.K. Magnetocaloric materials. *Annual Review of Materials Science*. 2000;30:387–429.

[2] Phan M.-H., Yu S.-C. Review of the magnetocaloric effect in manganite materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007;308:325–340.

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

[4] Бердиев У.Т., Хасанов Ф.Ф., Авазов Б.К., Кутбитдинов О.М. Магнитоструктурные фазовые переходы в арсениде марганца. *Journal of Transport*. 2025;2(3):79–82.

[5] Хасанов Ф.Ф., Кутбитдинов О.М., Бердиев У.Н. Исследование магнетокалорического эффекта металлов. *Journal of Transport*. 2025;2(3):76–78.

[6] Berdiyev U.T., Suloymonov O'B., Hasanov F.F. Marganets pniktidlari asosidagi magnetokalorik materiallar. *Journal of Transport*. 2026;3(1):147–149.

[7] Phan M.H., Tian S.B., Yu S.C., Ulyanov A.N. Magnetic and magnetocaloric properties of $\text{La}_{0.7}\text{Tb}_{0.3}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ compounds. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2003;256:306–310. [состав и индексы уточнить по оригиналу]

[8] Li Z.Q., Liu H., Liu X.D., Wu P., Bai H.L., Sun C.Q., Jiang E.Y. Competition between the double exchange and charge ordering interactions in bandwidth-controlled manganites. *Physica B*. 2004;351:114–120.

[9] Berdiyev U., Berdiyev U., Toshpulatova M. Problems and tasks of creating energy-saving electric machines. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2432:020002.

[10] Berdiyev U., Demedenko O., Ashurov M., Hasanov F.F., Sulaymanov U.B. Optimization of the method of oxide coating of metallic iron powder particles. *E3S Web of Conferences*. 2023;383:04039.

[11] Ebert H., Ködderitzsch D., Minár J. Calculating condensed matter properties using the KKR-Green's function method — recent developments and applications. *Reports on Progress in Physics*. 2011;74:096501.

[12] Никитин С.А., Овченкова Ю.А., Блинова М.Е., Терёшина И.С. Магнитокалорический эффект в соединениях $\text{GdMn}_{1-x}\text{T}_x\text{Si}$ ($T = \text{Ti, Fe, Co}$). Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2022;(4):47–53.

[13] Berdiyev U.T., Vechev A.K., Khasanov F.F. Investigation of the frequency characteristics of composite iron powders with insulating oxide coatings. *Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering (CONMECHYDRO 2021)*, Tashkent, Uzbekistan, 1–3 April 2021.

Информация об авторах/ Information about the authors

Хасанов	Ташкентский государственный
Фозил /	транспортный университет, PhD,
Fozil	доцент
Khasanov	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.....254*

A. Beliy, Sh. Kadirova

*Improvement of the method for assessing the need for
electrochemical protection of reinforced concrete bridge piers259*