

## СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРИОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ

Д. А. Суслов<sup>1,a</sup>, В. Г. Шавров<sup>1,b</sup>, В. В. Колецов<sup>1,c</sup>, А. В. Маширов<sup>1,d</sup>,  
Ю. А. Терентьев<sup>1,e</sup>, А. О. Петров<sup>1,f</sup>, А. П. Каманцев<sup>1,g</sup>, А. В. Самвелов<sup>2,h</sup>,  
С. Г. Ясев<sup>2,i</sup>, С. В. Таскаев<sup>3,4,j</sup>, К. А. Колесов<sup>1,k</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Оптико-механическое конструкторское бюро «АСТРОН», Лыткарино, Россия

<sup>3</sup> Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

<sup>4</sup> Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>a</sup> sda\_53@mail.com, <sup>b</sup> shavrov@cplire.ru, <sup>c</sup> victor\_koledov@mail.ru,

<sup>d</sup> alexey.mashirov@gmail.com, <sup>e</sup> teren\_y@mail.ru, <sup>f</sup> alexandrPetrov@gmail.com,

<sup>g</sup> kaman4@gmail.com, <sup>h</sup> samv-andrej@yandex.ru, <sup>i</sup> tagul-s@mail.ru,

<sup>j</sup> tsv@csu.ru, <sup>k</sup> kolesovkka@mail.ru

Рассматриваются и сравниваются известные криогенные термодинамические циклы на основе газообразного рабочего тела и твердотельных, обладающих магнитными фазовыми переходами и магнитокалорическим эффектом, в контексте их термодинамической эффективности и принципиальной возможности их объединения в одном устройстве для создания гибридных каскадных криогенных машин.

**Ключевые слова:** термодинамический цикл, криокулер, магнитокалорический эффект, сверхпроводящий магнит.

В последние годы прогресс во многих областях техники связывают с внедрением революционных физических принципов, основанных на достижениях квантовой механики, например, в компьютерной технологии, информатике и даже на транспорте [1; 2]. Эти и многие другие прорывные технологии в фотонике, медицинской диагностике и прочих направлениях требуют для широкого внедрения принципиально новых систем криостатирования, миниатюрных, экономичных и надёжных. Самым эффективным циклом охлаждения является обратный цикл Карно, имеющий максимально возможный эксергетический КПД ( $\eta_{EK} = 1$ ) и состоящий из изэнтропийных циклов сжатия/расширения и циклов изотермического теплообмена в «холодной» и «горячей» зонах. Несмотря на многочисленные попытки, практические устройства с «идеальной» эффективностью пока не созданы. Вероятно, цикл с КПД, близким к  $\eta_{EK} = 1$ , будет реализован лишь на основе твердотельного рабочего тела с калорическим эффектом, таким, как магнитокалорический эффект (МКЭ), эластокалорический, электрокалорический или др. В настоящее время технология газовых криогенных машин (ГКМ) «криокулеров» быстро развивается. В них чаще всего используют обратные циклы Стирлинга, Эриксона или Гиффорда —

МакМагона. В отличие от цикла Карно в них вместо изоэнтروпийного процесса используются либо изохорический (циклы Стирлинга, Гиффорда — МакМагона), либо изобарический (цикл Эриксона) (см. рис. 1). Теоретически предельная эффективность этих циклов та же, что и в цикле Карно. Однако при реализации циклов ГKM имеют место неравновесность протекания процессов, неизотермичность сжатия, недорекуперация, потери от перетечек рабочего газа, тепловые и другие [3].

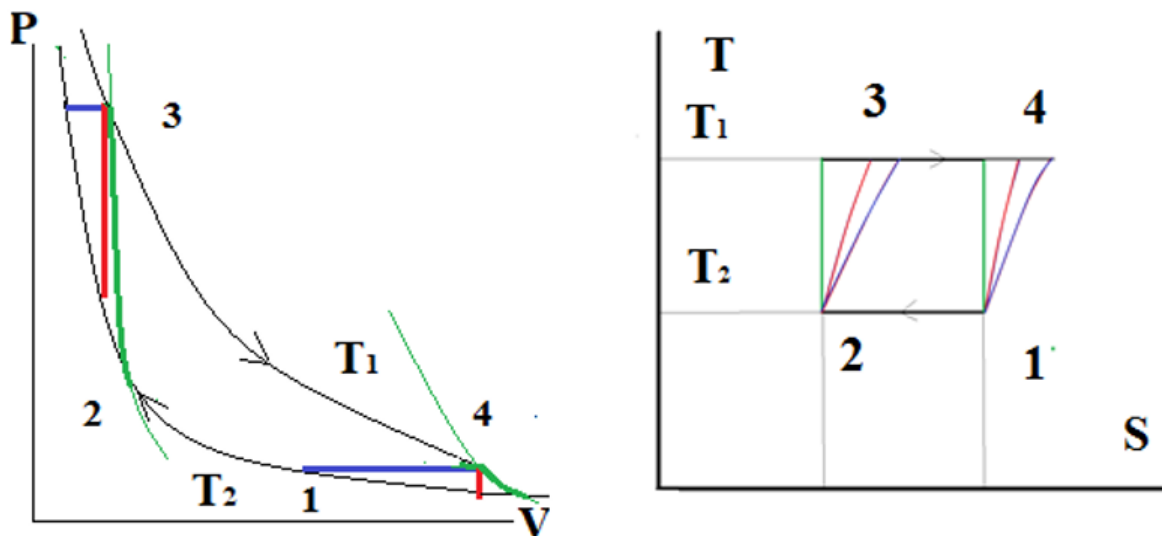


Рис. 1. Три идеальных обратных цикла: Карно, Стирлинга, Эриксона. Они основаны на изотермах расширения/сжатия  $T_1 > T_2$  (черные кривые). Идеальный обратный цикл Карно замыкают адиабаты (зелёные кривые), цикл Стирлинга — изохоры (красные прямые), цикл Эриксона — изобары (синие прямые). На левом рисунке изображены циклы в координатах  $P - V$ , на правом — циклы в координатах  $T - S$

Для конструктивного воплощения ГKM необходимым составным узлом машин служит регенератор — узел кулера, аккумулирующий и возвращающий тепло в течение каждого полуцикла. От регенератора, главным образом, зависит эффективность ГKM, реально составляющая на сегодняшний день не более 40 % от цикла Карно [4]. Хотя им свойственна недостаточно высокая эффективность, для них характерна возможность работать в наибольшем диапазоне температур. Напротив, твердотельные холодильные машины, реализующие МКЭ, работают в весьма узком диапазоне температур. Циклы охлаждения удобно описывать, пользуясь термодинамической аналогией между магнитными и газообразными телами, понятной из формул для записи первого начала термодинамики:

$$U = T\Delta S - P\Delta V,$$

$$U = T\Delta S - H\Delta M.$$

Здесь  $U$ ,  $T$ ,  $S$ ,  $P$ ,  $V$ ,  $H$ ,  $M$  — внутренняя энергия, температура, энтропия, давление, объём, магнитное поле, намагниченность рабочего тела газообразного и твердотельного магнитного соответственно. На рис. 2, а и 2, б показаны диаграммы состояния магнитного рабочего тела в тепловом цикле охлаждения, включающем две адиабаты и две изополевые кривые в координатах  $M - H$  и  $M - T$  соответственно. Этот цикл близок к циклу Карно. Отличие его в том, что изотермы заменены на изополевые процессы охлаждения и нагрева. Подробное описание экспериментального исследования подобного цикла дано в [5].

На рис. 3 показана принципиальная схема перспективного устройства гибридного холодильника, включающего два магнитных каскада и один каскад на газообразном рабочем теле на основе цикла Стирлинга. При температуре газового каскада

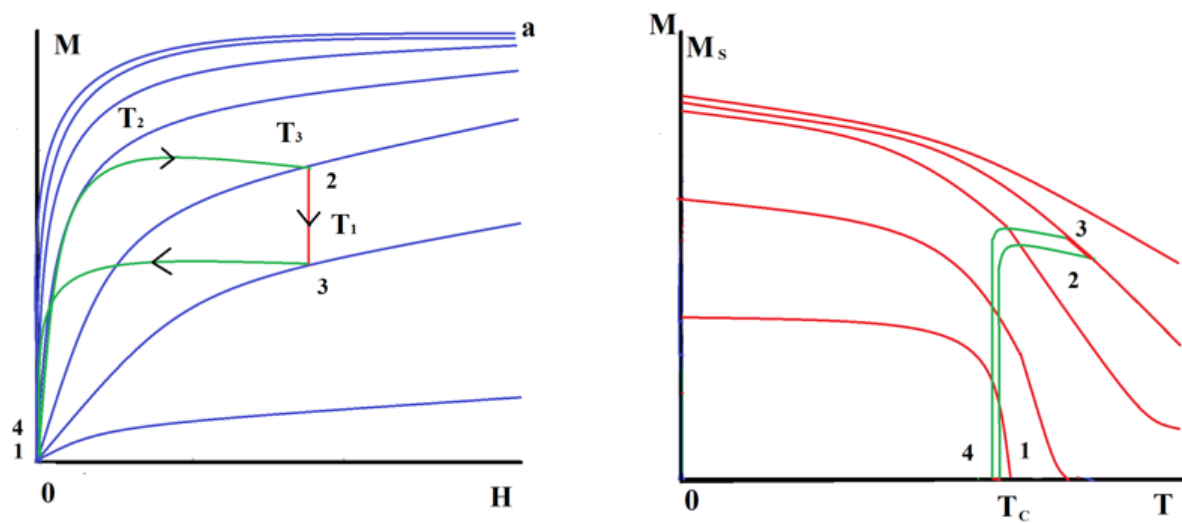


Рис. 2. Схематическое изображение термодинамического цикла твердотельного магнитного охлаждения. (а) Цикл охлаждения в координатах  $M - H$ . (б) Цикл в координатах  $M - T$

ниже критической точки высокотемпературных сверхпроводников (около 90 К) оно может обеспечивать функционирование в полях от нескольких Тл до нескольких десятков Тл в зазорах постоянных сверхпроводящих магнитов. При этом изменение температуры рабочего тела на основе сплавов редкоземельных элементов с МКЭ может составлять от нескольких до 10 градусов, а удельная тепловая мощность рабочего тела может составить около 0.3–3 Дж/г за один цикл в диапазоне 10–80 К.

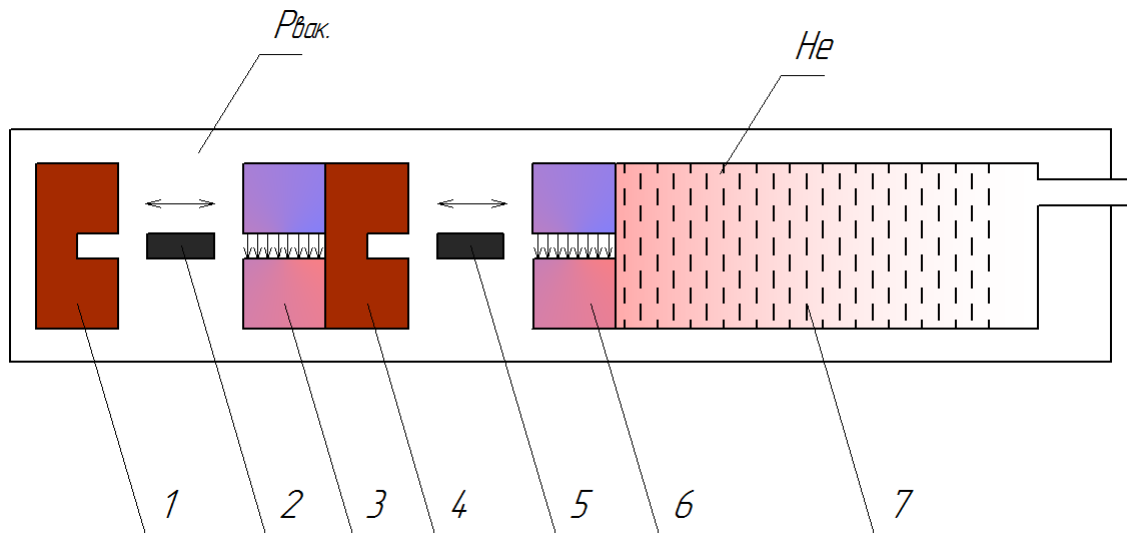


Рис. 3. Принципиальная схема гибридного трёхкаскадного холодильника с одним каскадом на основе газового цикла Стирлинга и двумя каскадами магнитного охлаждения. Элементы гибридного холодильника размещены в вакуумной камере для обеспечения адиабатичности магнитных циклов, охлаждаемый элемент 1 имеет возможность непосредственного теплового контакта с твердотельным рабочим телом первого каскада 2 и с постоянным сверхпроводящим магнитом 3, в котором имеется зазор с сильным магнитным полем и возможностью теплового контакта с рабочим телом с МКЭ 2. Теплообменник 4 второго каскада и постоянный сверхпроводящий магнит имеют ту же конструкцию, но рабочее тело 5 имеет более высокую температуру максимума МКЭ. В качестве третьего каскада использован ГКМ с газообразным рабочим телом (He) и регенератором 7

Несмотря на существенное различие  $\Delta T$  в рассмотренных циклах ГКМ и твердотельных на МКЭ, совмещение в одной гибридной конструкции принципиально возможно при современном уровне технологии. Потенциальный ожидаемый результат такого объединения — повышение суммарного эксергетического КПД всей си-

стемы, снижение потребляемой мощности при уменьшении рабочей температуры охлаждения.

## Список литературы

1. **Бондарев, А. В.** Обзор элементной базы квантовых компьютеров / А. В. Бондарев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. — 2019. — Т. 8, № 3. — С. 96–100.
2. **Терентьев, Ю. А.** Текущее состояние и перспективы развития интегральной транзитной транспортной системы (ИТТС) России на базе вакуумного магнитного левитационного транспорта (ВМЛТ) / Ю. А. Терентьев, В. В. Филимонов, В. Г. Шавров и др. // Транспортные системы и технологии. — 2019. — Т. 5, № 4. — С. 25–62.
3. **Колесников, А. М.** Микроригенные системы Стирлинга в интегральном исполнении с повышенным ресурсом работы / А. М. Колесников, А. В. Самвелов, К. В. Словеснов // Прикладная физика. — 2010. — № 2. — Р. 80–84.
4. **Суслов, А. Д.** Криогенные газовые машины / А. Д. Суслов, Г. А. Гороховский, В. Б. Полтораус, А. М. Горшков. — М. : Машиностроение, 1982. — 213 с.
5. **Дильмиева, Э. Т.** Экспериментальное моделирование цикла магнитного охлаждения в сильных магнитных полях / Э. Т. Дильмиева, А. П. Каманцев, В. В. Коледов, А. В. Маширов, В. Г. Шавров, J. Cwik, И. С. Терешина // Физика твердого тела. — 2016 — Т. 58, № 1. — Р. 82–86.

*Поступила в редакцию 15.09.2020.*

*После переработки 01.11.2020.*

## Сведения об авторах

**Суслов Дмитрий Алексеевич**, ведущий инженер лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия; e-mail: sda\_53@mail.com.

**Шавров Владимир Григорьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией магнитных явлений в микроэлектронике, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия; e-mail: shavrov@cplire.ru.

**Коледов Виктор Викторович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия; e-mail: victor\_koledov@mail.ru.

**Маширов Алексей Викторович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия; e-mail: alexey.mashirov@gmail.com

**Терентьев Юрий Алексеевич**, сотрудник лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия; e-mail: teren\_y@mail.ru

**Петров Александр Олегович**, инженер лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия; e-mail: alexandrPetrov@gmail.com.

**Каманцев Александр Павлович**, младший научный сотрудник лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия; e-mail: kaman4@gmail.com.

**Самвелов Андрей Витальевич**, кандидат технических наук, начальник исследовательского центра «МКС» акционерного общества «ОКБ "АСТРОН"», Лыткарино, Россия; e-mail: samv-andrej@yandex.ru.

**Ясев Сергей Геннадьевич**, руководитель проекта «МКС» акционерного общества «ОКБ "АСТРОН"», Лыткарино, Россия; e-mail: tagul-s@mail.ru.

**Таскаев Сергей Валерьевич**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики конденсированного состояния, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия; старший научный сотрудник инновационного отдела управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия; e-mail: tsv@csu.ru.

**Колесов Константин Андреевич**, аспирант кафедры вакуумной и компрессорной техники, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия; e-mail: kolesovkka@mail.ru.

## COMPARISON OF THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF CRYOGENIC GAS AND SOLID-STATE MAGNETOCALORIC CYCLES

D.A. Suslov<sup>1,a</sup>, V.G. Shavrov<sup>1,b</sup>, V.V. Koledov<sup>1,c</sup>, A.V. Mashirov<sup>1,d</sup>,  
Yu.A. Terentyev<sup>1,e</sup>, A.O. Petrov<sup>1,f</sup>, A.P. Kamantsev<sup>1,g</sup>, A.V. Samvelov<sup>2,h</sup>,  
S.G. Yasev<sup>2,i</sup>, S.V. Taskaev<sup>3,4,j</sup>, K.A. Kolesov<sup>1,k</sup>

<sup>1</sup>*Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*ASTRON Optical and mechanical design Bureau, Lytkarino, Russia*

<sup>3</sup>*South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia*

<sup>4</sup>*Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia*

<sup>a</sup>*sda\_53@mail.com*, <sup>b</sup>*shavrov@cplire.ru*, <sup>c</sup>*victor\_koledov@mail.ru*,

<sup>d</sup>*alexey.mashirov@gmail.com*, <sup>e</sup>*teren\_y@mail.ru*, <sup>f</sup>*alexandrPetrov@gmail.com*,

<sup>g</sup>*kaman4@gmail.com*, <sup>h</sup>*samv-andrej@yandex.ru*, <sup>i</sup>*tagul-s@mail.ru*,

<sup>j</sup>*s.v.taskaev@gmail.com*, <sup>k</sup>*kolesovka@mail.ru*

The article discusses and compares known cryogenic thermodynamic cycles based on a gaseous working fluid and solid-state ones with magnetic phase transitions in the context of their thermodynamic efficiency and design of a hybrid multicascade cooling system.

**Keywords:** *thermodynamic cycle, cryocooler, magnetocaloric effect, superconducting magnet.*

## References

1. **Bondarev A.V.** Obzor elementnoy bazy kvantovykh komp'yuterov [Review of the element base of quantum computers]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego* [XXI century: results of the past and problems of the present], 2019, vol. 8, no. 3, pp. 96–100. (In Russ.).
2. **Terentyev Yu.A., Filimonov V.V., Shavrov V.G. [et al.]** Tekushcheye sostoyaniye i perspektivy razvitiya integral'noy tranzitnoy transportnoy systemy (ITTS) Rossii na baze vakuumnogo magnitnogo levitatsionnogo transporta (VMLT) [Current status and prospects for the development of the integrated transit transport system (ITTS) of Russia on the basis of vacuum magnetic levitation transport (VMLT)]. *Transportnye systemy i tekhnologii* [Transportation systems and technologies], 2019, vol. 5, pp. 25–62. (In Russ.).
3. **Kolesnikov A.M., Samvelov A.V., Slovesnov K.V.** Microcryogenic systems Stirlings integrated with long MTTF. *Applied Physics*, 2010, no. 2, pp. 80–84.
4. **Suslov A.D., Gorokhovskiy G.A., Poltarau V.B., Gorshkov A.M.** *Kriogennyye gazovyye mashiny* [Cryogenic gas machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 213 p. (In Russ.).
5. **Dilmieva E.T., Kamantsev A.P., Koledov V.V., Mashirov A.V., Shavrov V.G., Cwik J., Tereshina I.S.** Experimental simulation of a magnetic refrigeration cycle in high magnetic fields. *Physics of the Solid State*, 2016, vol. 58, pp. 81–85.

*Accepted article received 15.09.2020.*

*Corrections received 01.11.2020.*