

УДК 621.57

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ  
ELECTROMAGNETIC REFRIGERATION UNITS**

А. П. Каменко, Е. А. Русакевич

Научный руководитель – З. Б. Айдарова, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь

А. Kamenko, E. Rusakevich

Supervisor – Z. Aidarova, Senior Lecturer  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** изучение процесса магнитного охлаждения, в котором в качестве хладагента используются твердые материалы, такие как соединения гадолиния с кремнием и др.

**Abstract:** the study of the magnetic cooling process, in which solid materials such as gadolinium compounds with silicon, etc. are used as a refrigerant.

**Ключевые слова:** магнитокалорический эффект, магнитное охлаждение, компрессорное охлаждение, теплопередача.

**Keywords:** magnetocaloric effect, magnetic refrigeration, compressor refrigeration, heat transfer.

**Введение**

Магнитное охлаждение представляет собой передовую технологию, способную произвести революцию в системах охлаждения. Основанная на концепции магнитокалорического эффекта, она обеспечивает превосходную энергоэффективность и экологическую чистоту по сравнению с традиционными методами охлаждения.

Принцип магнитного охлаждения – магнитокалорический эффект – представляет собой явление, при котором температура материала изменяется под воздействием магнитного поля. Впервые этот эффект был замечен в начале XX века, но в последние годы он привлек к себе значительное внимание благодаря перспективному применению в холодильных системах [1].

**Основная часть**

Впервые данный эффект наблюдал в 1881 году немецкий физик Эмиль Варбург, затем французский физик П. Вейс и швейцарский физик А. Пиккар в 1917 году. Фундаментальный принцип был предложен П. Дебай (1926) и В. Гиаук (1927). Первые работающие магнитные холодильники были построены несколькими группами начиная с 1933 года. Магнитное охлаждение было первым методом, разработанным для охлаждения ниже 0,3 К (температура, достижимая при накачке паров  $^3\text{He}$ ) [2].

На рис. 1 показано как гадолиниевый сплав нагревается в магнитном поле и теряет тепловую энергию в окружающую среду, поэтому, выходя из поля, он становится холоднее, чем при входе в него.

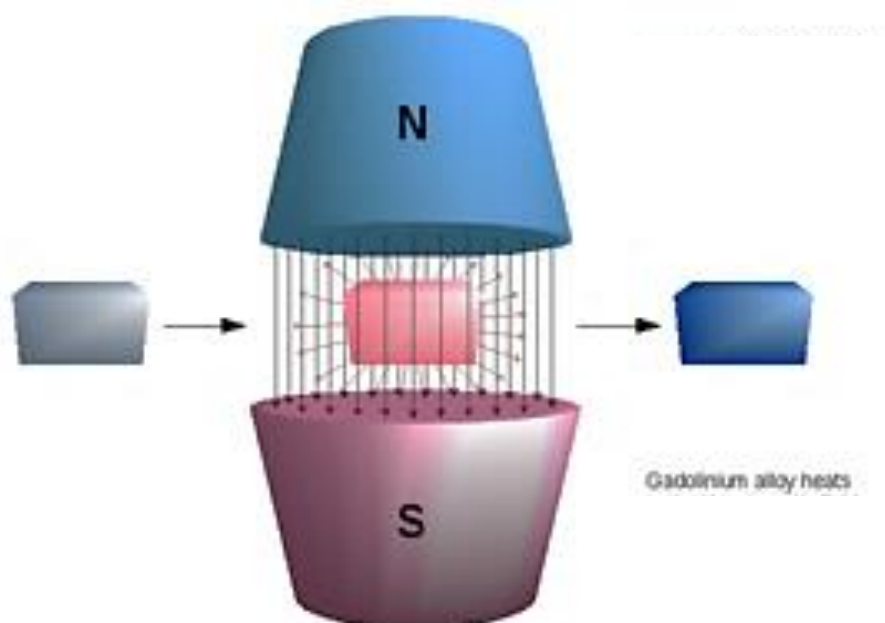


Рисунок 1 – Магнитное охлаждение гадолиниевого сплава [2]

Основным термодинамическим циклом электромагнитной холодильной установки является цикл Эрикссона, который работает между двумя адиабатическими и двумя изомагнитными линиями поля. Магнитную холодильную систему можно разделить на четыре основных этапа (рис. 2). Температура горячего и холодного теплообменников оказывает большое влияние на производительность холодильника [3].

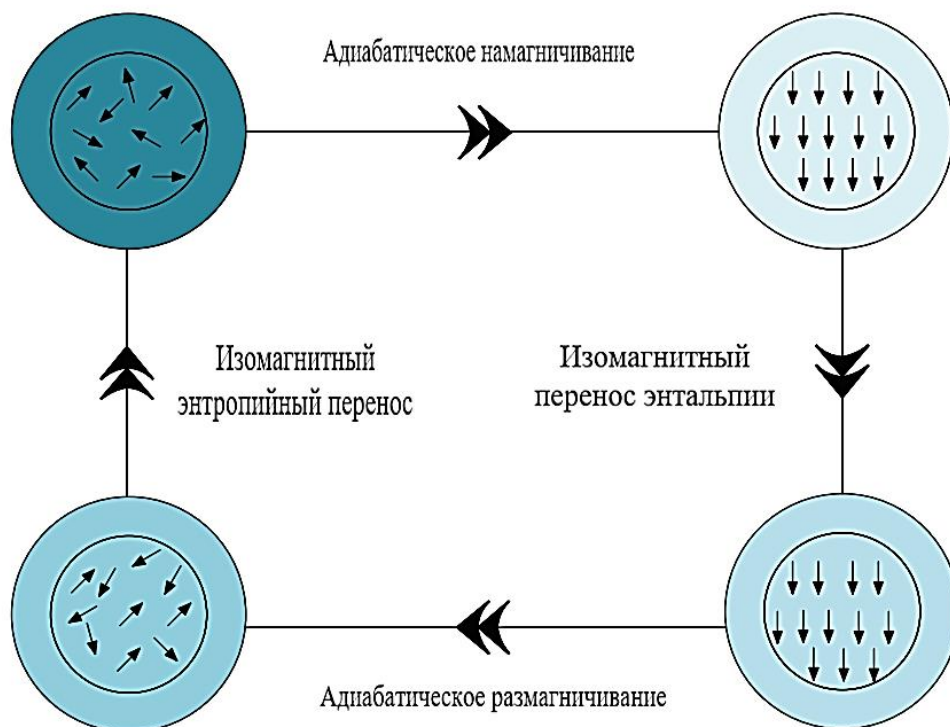


Рисунок 2 – Термодинамический цикл электромагнитной холодильной установки [3]

*Адиабатическое намагничивание:* магнитокалорический материал, если его поместить в изолированную среду ( $Q = 0$ ) и увеличить внешнее магнитное поле ( $+H$ ), заставляет магнитные диполи атомов выравниваться, тем самым уменьшая магнитную энтропию и теплоемкость материала.

*Изомагнитный перенос энтальпии:* магнитное поле поддерживается постоянным в течение этого процесса ( $H = 0$ ), а тепло, полученное во время адиабатического намагничивания, отводится ( $-Q$ ) жидкостью или газообразным веществом, чтобы предотвратить повторное поглощение тепла диполями.

*Адиабатическое размагничивание:* вещество возвращается к другому адиабатическому процессу ( $Q = 0$ ), и, следовательно, общая энтропия остается постоянной. Однако на этот раз магнитное поле уменьшается, тепловая энергия заставляет магнитные моменты преодолевать поле, и таким образом образец охлаждается, т. е. происходит адиабатическое изменение температуры.

*Изомагнитный энтропийный перенос:* магнитное поле поддерживается постоянным, чтобы предотвратить обратный нагрев материала.

Источниками магнитного поля, которые могут быть использованы в магнитокалорических устройствах, являются постоянные магниты и электромагниты. Исходя из теории, магнитные холодильные системы можно разделить на холодильные системы с движущимися частями (роторные, линейные) и без движущихся частей. В качестве магнитокалорической суспензии в данной машине используется рабочая жидкость.

Преимущества электромагнитных холодильных систем:

- экологичность – используемый хладагент твердый и нелетучий, а значит, не имеет парникового эффекта. В обычных установках используются хладагенты, содержащие фреон или гексафреон, которые связаны с разрушением озонового слоя и глобальным потеплением. Некоторые хладагенты, например, аммиак, токсичны и огнеопасны;

- низкие эксплуатационные расходы – в магнитных холодильных установках отсутствует компрессор, который является самой неэффективной и дорогостоящей частью. Это приводит к меньшему потреблению энергии и, следовательно, к низким эксплуатационным расходам;

- высокая эффективность – благодаря отсутствию необходимости расширения и сжатия жидкости магнитный холодильник потребляет меньше энергии и может работать с эффективностью порядка 60 %;

- надежность – более компактное устройство с меньшим количеством движущихся частей по сравнению с традиционными системами;

- бесшумная работа – данный тип установок работает значительно тише, чем традиционные холодильные системы;

- компактность – возможно достижение высокой энергетической плотности компактным устройством. Это связано с тем, что в магнитном холодильнике рабочим веществом является твердый материал (например, гадолиний), а не газ, как в парокомпрессионных циклах;

Недостатки электромагнитных холодильных систем:

- первоначальные инвестиции очень высоки по сравнению с традиционным охлаждением;
- магнитокалорические материалы являются достаточно редкими для массового использования;
- защита электронных компонентов рядом стоящего оборудования от магнитных полей. Однако следует отметить, что данные поля статичны, имеют малый радиус действия и могут быть экранированы;
- постоянные магниты имеют ограниченную силу поля, а электромагниты и сверхпроводящие магниты очень дороги;
- температурные изменения ограничены. Многоступенчатые машины теряют эффективность из-за теплообмена между ступенями;
- холодильные системы с движущимися частями требуют высокой точности, чтобы избежать уменьшения магнитного поля из-за зазоров между магнитами и магнитокалорическим материалом [3].

### **Заключение**

Несмотря на многочисленные преимущества магнитного охлаждения, прежде чем оно получит широкое распространение, необходимо решить несколько проблем. Во-первых, очень важно найти подходящий магнитокалорический материал – эффективный и доступный по цене. Во-вторых, технология требует сильных магнитных полей, которые могут оказаться достаточно дорогими и сложными для поддержания.

Однако исследователи прилагают все усилия, чтобы преодолеть эти препятствия. В настоящее время ведутся исследования по открытию новых магнитокалорических материалов, работающих в различных температурных диапазонах, включая комнатную температуру. Кроме того, предпринимаются усилия по оптимизации конструкции магнитных холодильных систем, чтобы сделать их более практичными и экономически эффективными.

Магнитное охлаждение представляет собой убедительное видение будущего систем охлаждения. Благодаря присущей ему энергоэффективности и экологическим преимуществам, оно способно заменить традиционные методы охлаждения. Несмотря на то, что на пути к широкому распространению этой технологии остаются нерешенные проблемы, проводимые исследования и разработки вселяют оптимизм. По мере того как мы все больше осознаем, что потребляем энергию и влияем на окружающую среду, такие технологии, как магнитное охлаждение, несомненно, будут приобретать все большее значение.

В условиях глобального потепления и острой необходимости экономии энергии можно с уверенностью сказать, что магнитное охлаждение – это не просто интересная концепция, оно может стать важной частью нашего устойчивого будущего.

### Литература

1. Refrigeration industry [Электронный ресурс] / Magnetic Cooling. – Режим доступа: <https://refindustry.com/articles/articles/magnetic-cooling/>. – Дата доступа: 31.03.2024.
2. Wikipedia [Электронный ресурс] / Magnetic refrigeration. – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_refrigeration](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_refrigeration). – Дата доступа: 31.03.2024.
3. Dorin, B. The efficiency of magnetic refrigeration and a comparison with compressor refrigeration systems / B. Dorin, J. Avsec // Journal of energy technology, 2018. – 70 p.