

# ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Кандидат физико-математических наук И.В. СГИБНЕВ,  
А.П. КОПЫЛОВ  
(АО «НПП “КВАНТ»)

## История открытия

К термоэлектрическим явлениям относятся такие эффекты, как эффект Зеебека, эффект Пельтье и др. В 1821 г. немецкий физик Томас Иоганн Зеебек открыл эффект, объяснить который удалось несколько позже. Он заключался в том, что в цепи, составленной из разнородных полупроводников, при поддержании на их контактах разности температур возникла термоэлектродвижущая сила  $E$ , а при замыкании цепи появлялся электрический ток, который фиксировался с помощью магнитной стрелки. В 1823 г. Фурье и Эрстед доказали, что термоэлектрический эффект обладает свойством суперпозиции, и в том же году ими была построена первая термоэлектрическая батарея, состоящая из нескольких чередующихся сурьмяных и висмутых пластин.

В 1834 г. в ходе экспериментальных исследований проводимости сурьмы и висмута Жан Шарль Пельтье определил, что в местах спаев разных металлов при пропускании тока резко меняется температура, в том числе и в отрицательную сторону, однако такие учёные, как Беккерель и Де ля Рив отнесли к опытам с недоверием (до тридцати лет Пельтье был часовщиком, и его считали в науке случайным человеком).

В дальнейшем с помощью других опытов им было подтверждено это открытие. Эффект Пельтье, являющийся обратным эффектом Зеебека, состоял в том, что в местах соединения разнородных материалов наблюдался эффект нагрева или охлаждения, в зависимости от направления электрического тока, а количество выделяемой или поглощаемой теплоты (теплоты

Пельтье) было прямо пропорционально коэффициенту Пельтье и величине тока<sup>1</sup>.

## Механизмы возникновения термоэлектрических эффектов

Причина возникновения эффекта Пельтье заключается в том, что средняя энергия электронов, участвующих в переносе тока, в разнородных проводниках различна. Если, например, в одном проводнике энергия свободных электронов выше энергии электронов в другом проводнике, то при движении их из первого проводника во второй в месте их соединения будет происходить выделение тепла, а в случае противоположного движения – его поглощение. (Место соединения двух разнородных проводников называется спаем, а соединённые проводники – термопарой).

Эффект Зеебека возникает при наличии в проводнике разности температур, при этом в месте нагрева энергия и концентрация носителей заряда выше, чем в других областях проводника, что приводит к возникновению термоЭДС.

Эти эффекты впервые были обнаружены в металлах, в которых термоэлектрическая эффективность невысока, и потому первоначально они не получили широкого применения. Практическое их использование стало возможным после того, как были открыты и разработаны полупроводниковые материалы, обладающие высокой термоэлектрической эффективностью.

Полупроводниковые материалы, применяемые в термоэлектрических устройствах, подразделяются на электронные

<sup>1</sup>М. Льюэци. “История физики”. М.: Мир, 1970 г.

и дырочные. Это полупроводники с различным типом проводимости, применяющиеся в качестве материалов для ветвей термопары – материалы  $n$ - и  $p$ -типа проводимости ( $n$ -тип проводимости – проводимость, обусловленная движением свободных электронов;  $p$ -тип проводимости – дырочная проводимость, обусловленная непрерывным и беспорядочным перемещением дырки, т.е. недостачи в атомах электрона, перемещающейся в кристаллической решётке от атома к атому).

### Развитие термоэлектричества

Бурное развитие термоэлектричества в ведущих странах мира началось с середины 30-х гг. прошлого столетия. В нашей стране полупроводниковые материалы, обладающие высокой термоэлектрической эффективностью, были разработаны академиком А.Ф. Иоффе и его сотрудниками в Лаборатории полупроводников АН СССР, позднее преобразованной в Институт полупроводников АН СССР. Это позволило создать на их основе термоэлектрические генераторы, холодильные устройства, соперничающие с традиционными охлаждающими установками, а также малогабаритные устройства для понижения и стабилизации температуры в малых объёмах, нашедших своё применение в медицине, метрологии, астрономии, сельском хозяйстве, ядерной физике, в электронике и др.<sup>2</sup>

Первый термоэлектрический генератор ТГ-1 был создан ещё в 1940 г. для питания полевых радиостанций, а затем широко использовался в годы войны партизанами. Хотя мощность генератора была невысокая (несколько ватт), её вполне хватало для питания радиоаппаратуры (генератор имел КПД порядка 2%; в настоящее время достигим КПД в 8–10%).

<sup>2</sup> А.Ф. Иоффе. "Полупроводниковые термоэлементы", М.-Л.: АН СССР, 1960 г.

В 1956 г. в Великих Луках началось производство первого термоэлектрического холодильника "Морозко" (впоследствии термоэлектрическое охлаждение в холодильной промышленности заняло свою нишу наряду с другими способами получения холода); одновременно в печати появляется множество работ, посвящённых методикам расчёта термоэлектрических устройств<sup>3</sup>. Устройства, выполненные с использованием подобных полупроводниковых преобразователей, обладают такими преимуществами, как простота конструкции, надёжность, долговечность, отсутствие в них движущихся частей, экологическая чистота. В настоящее время промышленностью выпускается множество типов термоэлектрических батарей с широким набором параметров, предназначенных как для охлаждения, а так и для генерирования электроэнергии.

В общих чертах термоэлектрическую батарею можно представить в виде соединённых между собой последовательно (скоммутированных) полупроводниковых ветвей с  $n$ - и  $p$ -типом проводимости, ограниченных двумя теплообменными площадками, например, из керамики (рис. 1). При работе в режиме охлаждения при пропускании тока на одной теплообменной площадке выделяется тепло, на другой – холод. Существуют и многокаскадные батареи, позволяющие значительно расширить температурный диапазон их работы и КПД.

<sup>3</sup> А.И. Бурштейн. "Физические основы расчёта термоэлектрических устройств", М.: Физматгиз, 1962 г.

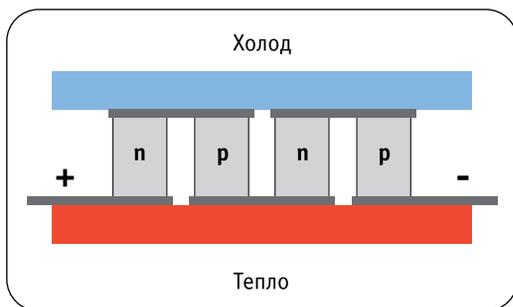


Рис. 1. Термоэлектрическая батарея.



**Рис. 2.**  
**Автономные источники питания.**

В конце 1950-х гг. во Всесоюзном научно-исследовательском институте источников тока под руководством Н.С. Лидоренко получили интенсивное развитие работы в области термоэлектрического метода преобразования энергии, было создано термоэлектрическое отделение, которое в 1968 г. возглавил д.т.н. Н.В. Коломеец, ученик А.Ф. Иоффе. В институте были разработаны высокоэффективные полупроводниковые соединения для низко-, средне- и высокотемпературных областей применения, создавались конструкции термобатарей, в том числе и многокаскадных, проводились их ресурсные испытания, шли работы по созданию термоэлектрических устройств для различных областей применения.

### **Термоэлектрические генераторы**

Широкое развитие в мире получило термоэлектричество в области генерации электроэнергии благодаря своей надёжности, минимуму обслуживания, сравнительной простоте устройств. Особенно незаменимы подобные устройства для питания автономных систем в космосе, в качестве источников питания в труднодоступных районах.

В 1970-х гг. Институт источников тока (переименованный в НПО "Квант") стал головной организацией в области термоэлектричества; здесь начались ин-

тенсивные работы по созданию термоэлектрических преобразователей широкого профиля. Были созданы переносные термоэлектрические генераторы "Тундра", "Искра" и др., проведены работы по усовершенствованию первого серийно выпускаемого термоэлектростанции УГМ-80 (генераторы этого типа успешно работают на трассах газопровода), создан каскадный термоэлектростанции УГМ-200, характеризующийся повышенной экономичностью и ресурсом.

В последние годы на основе разработанного ранее термоэлектрического генератора ГТГ-150 (рис. 2) в НПО "Квант" был создан ряд источников автономного питания различной мощности, от 150 до 1500 Вт. Так, например, автономный источник питания АИП-900, установленный на трассе газопровода "Голубой поток", имел мощность 900 Вт, напряжение 24 В, автономность работы – 1 год, ресурс – 10 лет.

Разрабатывались также генераторы, предназначенные для утилизации тепловой энергии ядерных реакторов, для работы в космосе.

### **Термоэлектрическое охлаждение**

Обширные работы проводились также в области термоэлектрического охлаждения. Были разработаны термостаты вместимостью от 0.7 до 3 л, холодильник для регулирования и поддержания температуры крови в системе искусственного кровообращения, созданы и другие приборы медицинского назначения. Для исследований в области космической медицины, в частности, для экспериментов по выращиванию в условиях невесомости биокристаллов, был разработан термоэлектрический термостат, позволивший получить уникальные результаты.

В конце 1990-х гг. на предприятии были разработаны и начали серийно изготавливаться термоэлектрические кондиционеры для подвижного состава, предназначенные для создания комфортного микроклимата в кабине машиниста. По сравнению с традиционными способами охлаждения эти устройства отличаются

экологической безопасностью (т.е. отсутствием угрозы отравления в кондиционируемом объекте жидкими или газовыми хладагентами), что особенно важно при использовании в подвижном составе; высокой надёжностью (в связи с отсутствием движущихся частей непосредственно в источнике холода), возможностью использования последовательно-параллельного соединения полупроводниковых батарей, что значительно увеличивает ресурс работы таких устройств.

Ещё одним преимуществом термоэлектрического метода преобразования является реверсивность работы, т.е. возможность как охлаждать, так и нагревать кондиционируемый объём путём изменения полярности питающего напряжения, что особенно важно для поддержания заданной температуры в кабине машиниста с помощью системы "климат-контроль". В качестве охлаждающих элементов были применены серийно выпускаемые термоэлектрические модули, используемые в различных областях техники. Конструктивное исполнение предусматривает применение воздуха в качестве теплоносителя как для охлаждаемого, так и для нагревательного контура (по схеме "воздух-воздух"), исключая промежуточные теплоносители, типа фреона, антифриза и других жидкостей.

Выбранная для работы кондиционера схема "воздух-воздух" позволила упростить конструкцию, исключив такие узлы, как герметичные кожухи и магистрали с циркулирующей жидкостью, выносные охлаждающие радиаторы и др., что также значительно повысило в целом его надёжность. Подобные устройства способны работать в режиме охлаждения, обогрева и вентиляции.

Разработанный на предприятии термоэлектрический кондиционер холодопроизводительностью 1 кВт для кабины машиниста поезда "Яуза" московского метрополитена состоит из двух идентичных охлаждающих блоков по 500 Вт, каждый из которых содержит 48 термоэлектрических модулей, соединённых последовательно-параллельно, контактирующих теплообменными площадками с "холод-



**Рис. 3.**  
**Термоэлектрический кондиционер для кабины машиниста поезда "Русич" московского метрополитена.**

ными" и "горячими" радиаторами, обдуваемыми вентиляторами. В режиме охлаждения воздушный поток, прошедший кондиционирующий (охлаждаемый) контур, поступает в кабину машиниста, а с охлаждающего контура воздушный поток, осуществив съём тепла с горячих радиаторов, выводится наружу. Поскольку тепло, выводимого наружу из охлаждающего контура, в два-три раза больше чем выделенного холода, "горячие" вентиляторы, а также обдуваемые ими радиаторы имеют большую мощность, чем "холодные" (тепловыделение численно равно холодопроизводительности кондиционера плюс потребляемая мощность). Кондиционер обеспечивает расход воздуха в кондиционирующем контуре 400 м<sup>3</sup>/ч при разности температур воздушного потока на входе в контур и выходе из него 12–14 °С.

Более производительный кондиционер, имеющий холодопроизводительность 1.5 кВт, разработанный для кабины машиниста поезда "Русич" московского метрополитена, состоит из трёх аналогичных охлаждающих блоков холодопроизводительностью более 500 Вт, содержащих по 48 термоэлектрических модулей, и обладает аналогичными функциональными возможностями – работой в режиме охлаждения, обогрева и вентиляции (рис. 3). По сравнению с предыдущей разработкой, благодаря снижению тепловых потерь между термоэлектрическими модулями и радиа-



**Рис. 4.**  
**Термоэлектрический кондиционер для кабины машиниста тепловоза ТЭП70.**

торами, использованию более производительных вентиляторов и лучшей компоновке, удалось повысить холодопроизводительность кондиционера.

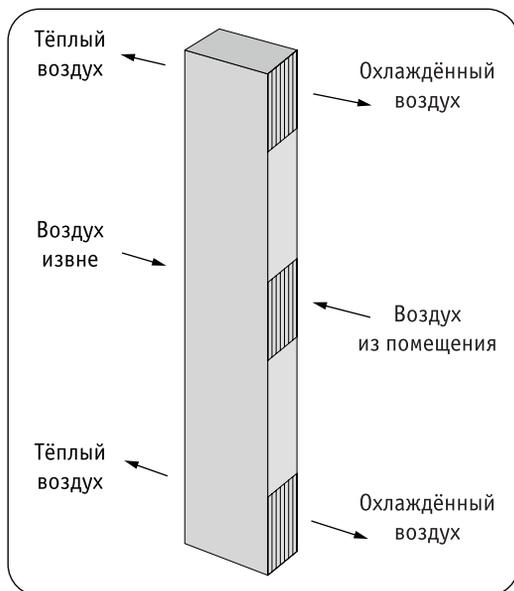
Термоэлектрический кондиционер холодопроизводительностью 3 кВт и более поздняя модель на 4 кВт предназначены для создания комфортных условий в кабине машиниста на тепловозах и электровозах, выпускаемых ОАО "Коломенский завод" (рис. 4). Кондиционер состоит из двух идентичных блоков, содержащих по 96 термоэлектрических модулей. Для повышения надёжности и получения высокой холодопроизводительности при сравнительно небольшой потребляемой мощности выбран щадящий режим работы модулей кондиционера (рабочий ток модуля составил 1/3 от номинального). Это позволило реализовать режим работы термобатарей, близкий к режиму максимального холодильного коэффициента (т.е. отношения холодопроизводительности к затраченной мощности, которое составило 0.95–0.96), а также увеличить срок службы модулей<sup>4</sup>. Расход воздуха в кондиционирующем контуре составляет 1600 м<sup>3</sup>/ч, разность температуры между входом и выходом кондиционирующего конту-

<sup>4</sup>Авилов В.З., Копылов А.П. и др. "Термоэлектрический кондиционер". М.: Автономная энергетика, 2010. № 27.

ра составляет порядка 8°С (в результате циркуляции воздуха, т.е. многократного прохождения его через кондиционирующий контур, охлаждение кабины машиниста может составить 15°). На этих кондиционерах реализована система "климат-контроль", позволяющая поддерживать температуру внутри кабины как в ручном, так и в автоматическом режиме. В автоматическом режиме на датчике температуры устанавливается нужное значение (20, 22 или 24°С) и автоматически, путём включения необходимого режима (охлаждения, обогрева или вентиляции), в кабине поддерживается заданная температура.

В последнее время на предприятии проводились оценки возможности применения термоэлектричества в качестве устройств локального охлаждения в кабинах грузовых автомобилей, лифтах и т.д. Возможной областью применения термоэлектрических устройств является создание малогабаритных термоэлектрических кондиционеров, работающих по схеме "воздух-воздух", обеспечивающих локальное охлаждение, например, в на-

**Рис. 5.**  
**Оконный термоэлектрический кондиционер.**



## Примеры применения термоэлектричества в измерительной технике

стольном варианте. В случае использования таких устройств, обладающих незначительными мощностями, вывод отработанного тёплого воздуха за пределы помещения не обязателен (т.к. в целом на температуру в помещении устройство влиять не будет), а сам кондиционер будет формировать холодные и тёплые воздушные потоки в противоположных направлениях. Подобное устройство может работать также в режиме обогрева или в режиме вентиляции, создавая комфортные условия на рабочем месте.

Ещё одна область применения термоэлектрических устройств – возможное использование их в оконном варианте по схеме “воздух-воздух”, обеспечивающее подогрев наружного воздуха в зимнее время и охлаждение тёплого воздуха в летнее. Устройство позволяет также охлаждать или подогревать воздух, поступающий только из помещения, или же смешанный, причём в различных пропорциях, воздух из помещения и наружный (рис. 5). Ширина или высота окна вполне достаточна для набора необходимого температурного градиента и холодопроизводительности, а незначительная толщина устройства (60 мм) не будет затенять оконного проёма. Такой кондиционер, имеющий размеры, например, 1200 × 180 × 60 мм и содержащий восемь охлаждающих модулей, будет иметь холодопроизводительность 250–300 Вт и теплопроизводительность 400 Вт. Расход кондиционированного воздуха, составляющий 100 м<sup>3</sup>/ч, достаточен для обновления состава воздуха в большом помещении, однако указанной мощности не будет хватать, чтобы существенно влиять на температуру в целом. Для существенного изменения температуры в помещении необходимо либо устанавливать несколько таких устройств, либо увеличивать их мощность.

Многообещающая область применения термоэлектричества – в качестве обогревающих устройств, например, для обогрева жилища. При этом перенос тепла осуществляется из среды с более низкой температурой в среду с более высокой.

Ещё одна область применения термоэлектричества – измерительная техника для контактного и дистанционного измерения температуры. Если для контактного измерения температуры можно применить обыкновенную проволочную термопару, то бесконтактный метод подразумевает регистрацию теплового излучения измеряемого объекта с помощью датчиков температуры. Простейший датчик излучения представляет собой два заострённых стерженька из *p*- и *n*-полупроводника, которые контактируют с зачернённой приёмной площадкой, выполненной из тонкой фольги, а с помощью инфракрасной оптики на приёмную площадку проецируется тепловой поток от измеряемого объекта. (Такие датчики, весьма чувствительные к тепловому потоку, используются в пирометрах – бесконтактных измерителях температуры). На предприятии были разработаны датчики, представляющие собой тонкую гибкую перфорированную изолирующую ленту, с нанесёнными с помощью вакуумного напыления *p*-*n*-ветвями и коммутацией, сложенную зигзагообразно по перфорации таким образом, чтобы одни спаи были обращены к регистрируемому тепловому потоку, а другие – к эталонной термостатируемой поверхности. Размещение на приёмной площадке нескольких сотен ветвей позволило получить прибор с высокой чувствительностью и точностью.

Возможно также и множество других областей применения термоэлектричества. В настоящее время в мире большое внимание уделяется созданию более эффективных термоэлектрических материалов с использованием наноразмерных структур и сверхрешёток, что позволит значительно повысить КПД термопреобразователей. Ведутся также работы по созданию батарей с изменяющимися термоэлектрическими свойствами полупроводника по длине ветви, что позволяет исключить многокаскадность устройств.