

Решение задач энергетического обеспечения автономных объектов на основе термоэлектрических модулей



А. Э. Лемминг,
финансовый директор,



П. Г. Шостаковский,
зам. генерального директора по проектам
pshost@ecogentech.ru

ООО «Экоген», г. Санкт-Петербург

Термоэлектрические источники электрической энергии занимают нишу уникальных промышленных приложений, где применение стандартных источников электрической энергии затруднительно или невозможно. Устранение технологического барьера по доступности источников электрической энергии для автономных объектов морской инфраструктуры и морских автономных обитаемых аппаратов позволяет развить новые направления подводной робототехники в областях гидрологических и экологических исследований, поиска и разработки полезных ископаемых, обеспечить высокую автономность обитаемых газо- и нефтедобывающих оффшорных платформ в Арктике.

Создание производства термоэлектрических генераторных модулей новой конструкции для автономных объектов морской инфраструктуры при поддержке Фонда содействия инновациям поможет преодолеть технологический барьер доступности альтернативных источников энергии программы «Развитие Национальной технологической инициативы» (направление «Маринет»).

Ключевые слова: энергетическое обеспечение автономных объектов, термоэлектричество, Национальная технологическая инициатива.

Эффект возникновения термоЭДС был открыт без малого два века назад в 1821 г. Т. И. Зеебеком (Th. J. Seebeck). Значимость открытия необоснованно занижена в силу ускоренного развития других альтернативных способов генерации электрической энергии.

Сегодня термоэлектрические источники занимают нишу уникальных приложений, где применение стандартных источников электроэнергии затруднительно или невозможно. Термоэлектрические генераторы все чаще находят применение в качестве основных или дублирующих источников электроэнергии для обеспечения бесперебойного питания ответственных электронных устройств и управляемых ими исполнительных механизмов. Отсутствие движущихся деталей обеспечивает уникально высокий уровень надежности (до 25 лет эксплуатации) при минимальном сервисе (раз в год и реже). Несмотря на очевидные преимущества, термоэлектричество ограничено в эффективности и обеспечивает преобразование тепловой энергии в электрическую с КПД не выше 8%. Это не является

ограничением в случае, если основным назначением тепловой энергии является обогрев (суммарный КПД в этом случае равен 100%) или используется тепловая энергия, отводимая от различных механических и электрических устройств (например, двигателей). В этом случае КПД генератора добавляется к КПД устройства.

Явление термоЭДС заключается в следующем: если соединить два разнородных проводника и поддерживать разную температуру места их соединения (спая) и внешних концов проводников, то за счет разной концентрации носителей заряда возникает разность потенциалов, называемая термоЭДС. Конструкция, состоящая из спая разнородных металлов, называется термопарой (рис. 1).

Разность температур на нагреваемом спае T_h и охлаждаемых концах проводников T_c обеспечивает тепловой поток Q . Разность величин потока тепла на входе (Q_h) и выходе (Q_c) в соответствии с законом сохранения энергии для приведенной конструкции даст значение электрической мощности P в нагрузке R_L .

В металлах концентрации свободных электронов очень велики и не зависят от температуры, энергия и скорости электронов также слабо зависят от температуры. Поэтому коэффициент термоЭДС α металлов (также именуемый коэффициентом Зеебека) очень мал (порядка нескольких мкВ/К) и не зависит от температуры в широком ее диапазоне:

$$E_s = \alpha (T_h - T_c);$$

где E_s — термоЭДС; α — коэффициент термоЭДС; T_h и T_c — температура горячего и холодного спаев термопары. Совсем иная картина получается в случае соединения двух разнородных полупроводников. На рис. 1 изображена термопара, состоящая из полупроводниковых ветвей с электронной (n -тип) и ионной (p -тип) проводимостями. Для указанной конструкции термопары значения α может превышать 1000 мкВ/К.

А. Ф. Иоффе положил начало практическому применению термоэлектричества для генерации энергии, под его руководством освоен в производстве термоэлектрический генератор «партизанский котелок», с успехом заменивший гальванические батареи, имевшие в то время малый ресурс и время жизни.

Простая конструкция обеспечивала несколькими ваттами электрической энергии, вырабатывавшейся за счет разности температур между кипящей водой и пламенем костра.

Конструктивное увеличение площади контакта позволяет увеличить ток в нагрузке при постоянной величине термоЭДС. Последовательное электрическое соединение термоэлектрических пар позволяет увеличить суммарную термоЭДС. Конструктивно ветви термопар представляют собой параллелепипеды из полупроводникового материала. С помощью пайки они соединяются последовательно между двумя керамическими пластинами с коммутационными проводниками (рис. 2), образуя наиболее распространенную конструкцию термоэлектрического генераторного модуля (ТГМ), в которой электрический ток в ветвях (при наличии внешней нагрузки) протекает последовательно, а тепловой поток — параллельно. Число последовательно соединенных термопар может достигать нескольких сотен, что приводит к увеличению внутреннего электрического сопротивления. В этой связи принято считать ТГМ источником тока.

Для простоты изложения здесь не рассмотрены другие термоэлектрические эффекты (Томсона и Пельтье), играющие роль важную, но не первостепенную.

В настоящее время широкую популярность приобрели низкотемпературные ТГМ с диапазоном рабочих температур до 200 °С, ведутся поставки генераторных модулей с максимальной рабочей температурой до 250 °С. Данная температура является предельно высокой для сплавов теллурида висмута — основы полупроводниковых ветвей подавляющего большинства выпускаемых ТГМ. Длительная эксплуатация ТГМ на основе указанного материала при температурах свыше 300 °С невозможна.

Именно это и определяет категорию ТГМ на основе данного полупроводника, как «низкотемпературные

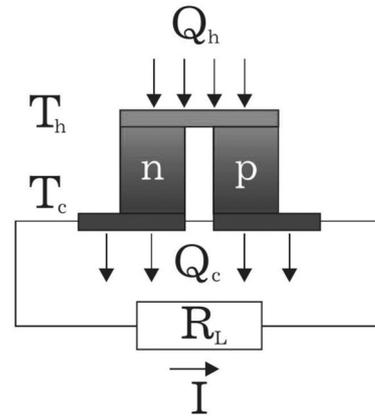


Рис. 1. Термопара с тепловым потоком Q и внешней электрической нагрузкой R_L

ТГМ». Показатель эффективности (часто называемый добротностью) термоэлектрического преобразования полупроводникового вещества имеет нелинейную зависимость от температуры с точкой максимума при некоторой температуре. Правильный выбор этой точки определяет эффективность термоэлектрического преобразования в модуле. Для расчета эффективности термоэлектрического преобразования применяют выражение:

$$Z = \alpha^2 \sigma / k;$$

где α — коэффициент термоЭДС (В/К); σ — удельная электропроводность (См/м); k — удельная теплопроводность (Вт/(м · К)).

Для данного представления добротность имеет размерность K^{-1}

На практике, для получения безразмерной величины добротности применяют величину ZT . Результаты измерений добротности стандартного низкотемпературного генераторного модуля представлены на рис. 3.

Изготовление полупроводниковых термопар из термоэлектрического вещества с максимальной эффективностью преобразования, лежащей вблизи средней температуры эксплуатации (исходя из предположения, что температура равномерно распределяется вдоль ветвей) позволяет получить наивысший КПД генераторной системы. Это существенное по-



Рис. 2. Термоэлектрический генераторный модуль (ТГМ) в разрезе

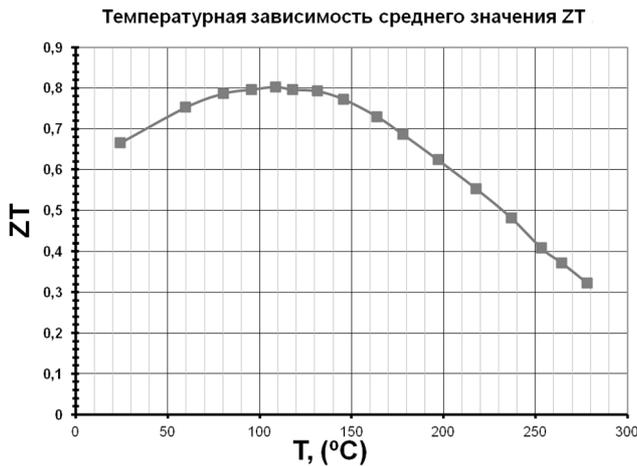


Рис. 3. Зависимость добротности низкотемпературного ТГМ от рабочей температуры

ложительное отличие ТГМ, разрабатываемых и выпускаемых высокотехнологичными отечественными компаниями от аналогичной продукции азиатских компаний.

Для эффективной работы ТГМ необходима не только оптимизированная для рабочих температур эффективность термоэлектрического вещества, но и оптимальное сочетание минимального электрического внутреннего сопротивления с максимальным тепловым сопротивлением. Последнее достигается специальными добавками редкоземельных металлов, обеспечивающих ионную и электронную типы проводимости и придающие желаемые свойства полупроводниковому веществу.

Наименьшая теплопроводность требуется для создания максимального падения температуры на термопарах. Уменьшить теплопроводность ТГМ можно за счет увеличения высоты термоэлектрических элементов, однако при этом происходит нежелательное пропорциональное увеличение внутреннего электрического сопротивления и снижение вырабатываемой мощности.

В зависимости от доступной мощности (плотности) теплового потока, а также от способа отвода тепла от охлаждаемой стороны ТГМ в окружающую среду, конструкция термоэлектрического генератора меняется. Стандартно тепло отводится с помощью жидкостного или воздушного радиатора. Жидкостный радиатор имеет минимальное тепловое сопротивление и позволяет получить максимальный перепад температур, но требует дополнительных устройств (насос, внешний радиатор). Воздушный радиатор может

эксплуатироваться с естественной конвекцией или с усиленной дополнительным обдувом (за счет тяги вытяжной трубы или вентилятора, запитываемого от ТГМ).

Термоэлектрический генераторный модуль выбирается исходя из технически доступного способа отвода тепла в окружающую среду, причем для воздушного радиатора с натуральной конвекцией применяют ТГМ с максимальным тепловым сопротивлением, соответствующим тепловому сопротивлению радиатора. Для жидкостного способа отвода тепла, как правило, применяются ТГМ с небольшой высотой ветви термопары и, соответственно меньшим внутренним электрическим сопротивлением и большей вырабатываемой мощностью при сопоставимых условиях. ТГМ с наибольшим числом термопар позволяет получить большее вырабатываемое напряжение. Это немаловажно при необходимости запуска DC/DC преобразователя напряжения при малых перепадах температур.

Компания «Экоген Технолоджи» для дальнейшего увеличения эффективности термоэлектрического преобразования разработала и внедрила в серийное производство среднетемпературные генераторные модули. Отличительной особенностью среднетемпературных генераторных модулей является оптимизация эффективности термоэлектрической пары по длине термоэлектрических элементов (ветвей), входящих в нее в качестве основного элемента. Оптимизация произведена за счет применения многослойной конструкции термоэлектрического элемента. Каждому слою соответствует свой диапазон температур. Термоэлектрические материалы подобраны таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность в своем интервале температур (рис. 4).

Среднетемпературные генераторные модули типа «Марс» вырабатывает от 35 до 65 Вт электрической мощности при разности температур в 380-500°C и предназначены для применения совместно с источниками тепла, обеспечивающими температуру до 570°C.

Генераторный модуль является основным элементом в конструкции термоэлектрических газовых генераторов серии ГТЭГ.

Сегодня компания «Экоген Технолоджи» является не только наследником традиций, заложенных школой академика А. Ф. Иоффе, но и инновационным производством, разрабатывающим и выпускающим серийно новые виды надежной высокоэффективной термоэлектрической продукции промышленного применения.

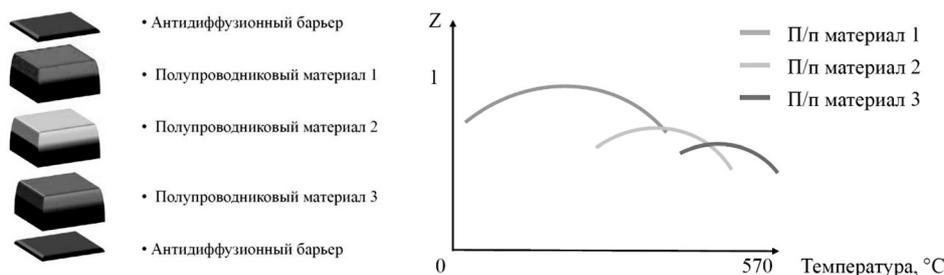


Рис. 4. Структура среднетемпературного термоэлектрического элемента

Система менеджмента качества соответствует требованиям отечественных и международных стандартов и охватывает весь производственный цикл.

Это позволяет поставлять свою продукцию в ведущие страны мира, постоянно увеличивая объем производства, эффективности совместной работы с партнерами.

«Экоген Технолоджи» является резидентом Особой экономической зоны (ОЭЗ) «Санкт-Петербург» (площадка «Новоорловская»). Общий объем инвестиций компании в рамках действующего соглашения резидента составил более 200 млн руб. На территории ОЭЗ построен производственный комплекс общей площадью 5164,8 м².

С 2014 г. по настоящее время при участии средств Фонда содействия инновациям реализован ряд проектов, среди которых:

1. Организация производства среднетемпературных термоэлектрических генераторных батарей (программа «Коммерциализация»).

Средства Фонда были направлены на создание современного участка по выпуску среднетемпературных термоэлектрических генераторных батарей (СТГБ). СТГБ служит для преобразования тепловой энергии в электрическую энергию.

За счет средств Фонда был завершен цикл от проектирования и изготовления до поставки оборудования на участок СТГБ, запущена зона по выращиванию полупроводниковых кристаллов.

На данный момент производственный участок СТГБ функционирует в штатном режиме, обеспечен необходимой оснасткой и комплектацией для создания продукции, а также нормативной, технологической и методической документацией.

Выручка от реализации инновационной продукции за 2017 г. превысила 40 млн руб. При этом общий объем инвестиций на реализацию проекта составил 31,5 млн руб., в том числе средства Фонда 9,2 млн руб.

Проект «Коммерциализация» был реализован в рамках иного стратегически важного для компании проекта «Разработка и производство термоэлектрических систем охлаждения и генерации энергии на собственной полупроводниковой элементной базе» на территории Особой Экономической Зоны (ОЭЗ) «Санкт-Петербург», участок «Новоорловская».

2. Кольцевой термоэлектрический генераторный модуль аксиальной конструкции для автономных объектов морской инфраструктуры и морских автономных необитаемых аппаратов и зондов (Программа «Маринет»).

В настоящее время в мировой практике накоплен значительный методологический и практический опыт создания и использования подводных робототехнических систем для решения научно-исследовательских и прикладных задач в интересах различных отраслей. Прогресс в данной области заключается в создании совершенных систем, применении современных технологий и разработке многофункциональных комплексов, обеспечивающих решение широкого спектра задач в условиях сложной подводной среды. Надежное и высокоэффективное энергетическое обеспечение автономных объектов

морской инфраструктуры и морских автономных необитаемых аппаратов и зондов является приоритетной задачей.

Выполнение НИОКР позволит создать высоконадежный генераторный модуль, отличительной особенностью которого является твердотельная конструкция, обеспечивающая максимальную надежность и долговечность свыше 10 лет за счет отсутствия движущихся частей. Модуль проектируется с применением высокоэффективного полупроводникового термоэлектрического вещества, обеспечивающего требуемую механическую прочность с учетом возникающих механических напряжений и максимальную эффективность за счет радиальной конструкции. Специальная конструкция среднетемпературных полупроводниковых термоэлектрических элементов модулей и их структуры, применение антидиффузионных барьеров позволяют получить максимальную эффективность преобразования в сочетании со стабильностью термоэлектрических параметров во времени на рабочей температуре до 580°С.

Общий объем инвестиций на реализацию проекта составит 21,4 млн руб., в том числе средства Фонда 15 млн руб.

Ключевые цели проекта:

- Создание автономного источника электрической энергии, используемого для энергетического обеспечения с вырабатываемой мощностью 150 кВт и периодом автономности свыше 10 лет.
- Устранение технологического барьера по доступности источников электрической энергии для автономных объектов морской инфраструктуры и морских автономных необитаемых аппаратов и зондов с вырабатываемой мощностью свыше 40 кВт и периодом работы без обслуживания более 24 месяцев.

Перспектива создания нового продукта открывает широкий круг дополнительных применений:

1. В качестве основного узла термоэлектрических генераторов с суммарной мощностью 40 кВт, работающих на попутном газе и обеспечивающих автономность необитаемых газо- и нефтедобывающих оффшорных платформ в Арктике.
2. В составе термоэлектрических генераторов подводного размещения, работающих на геотермальной энергии и позволяющие обеспечивать электроэнергией автономные объекты морской инфраструктуры и морские автономные необитаемые аппараты и зонды с суммарной мощностью до 40 кВт.

Применение термоэлектрических технологий позволяет развить целый ряд новых, актуальных направлений по разработке подводной робототехники, проведению гидрологических и экологических исследований, поиску и разработке полезных ископаемых.

Выполнение данных проектов позволяет расширить сферы применения продукции компании:

- Нефтегазовая отрасль. Электроснабжение: защиты газопроводов от коррозии, изолированных от стационарного электроснабжения узлов учета, средств радиорелейной связи, средств автоматики и телемеханики.

- Государственные проекты. Создание источников питания в космических и подводных аппаратах.
- Промышленность. Источники питания, работающие от обрабатываемого тепла двигателя.
- Общее применение. Создание энергонезависимых систем отопления и обеспечения электроэнергией.

Широкий спектр областей применения обеспечивается технологическими возможностями компании, в частности полным перечнем полупроводниковой термоэлектрической продукции:

- 1) полупроводниковые термоэлектрические материалы;
- 2) термоэлектрические модули охлаждения для широкого спектра применений;
- 3) термоэлектрические модули низкотемпературной генерации энергии;
- 4) термоэлектрические модули среднетемпературной генерации энергии;
- 5) термоэлектрические системы охлаждения (термоэлектрические сборки);
- 6) термоэлектрические генераторы с выходной мощностью от 2 Вт до 1 кВт.

Каждое из направлений основано на обширной научной базе, созданной за многие десятилетия работы. Все этапы технологического процесса оснащены современным высокоэффективным оборудованием и приборами. Вся перечисленная продукция имеет

высокий приоритет для развития отечественного и мирового машиностроения, медицинского оборудования, телекоммуникационного оборудования, лазерной техники и других отраслей.

Solution for power supply of autonomous objects based on thermoelectric modules

A. E. Lemming, chief financial officer.

P. G. Shostakovskiy, VP projects management (Ecogen Technology, Saint-Petersburg)

Thermoelectric power sources occupy a niche of unique industrial applications where the use of standard electric power sources is difficult or impossible. Removing the technological barrier to the availability of electric power sources for Autonomous marine infrastructure facilities and marine Autonomous unmanned vehicles makes it possible to develop new areas of underwater robotics in the areas of hydrological and environmental research, search and development of minerals, ensure high autonomy of uninhabited gas and oil offshore platforms in the Arctic.

The production of thermoelectric generator modules of a new design for Autonomous marine infrastructure with the support of the innovation promotion Foundation will help to overcome the technological barrier to the availability of alternative energy sources of the program «Development of the National Technological Initiative» (MARINET sector).

Keywords: power supply of autonomous objects, thermoelectricity, National technological initiative.

Приглашаем вас принять участие в конкурсе «Лучший инновационный продукт Санкт-Петербурга»!

Комитет по промышленной политике и инновациям Санкт-Петербурга информирует вас о проведении в 2018 году конкурса на присуждение премии Правительства Санкт-Петербурга за лучший инновационный продукт и приглашает вас принять в нем участие.

Информационное агентство INFOline в 2018 году вновь выбрано оператором конкурса и уже в четвертый раз будет консультировать участников и организовывать все конкурсные мероприятия.

Премия Правительства Санкт-Петербурга за лучший инновационный продукт присуждается по четырем номинациям:

- строительство, ЖКХ и композиционные (полимерные) материалы;
- медицина, биотехнология и фармацевтика;
- информационные технологии и радиоэлектроника;
- машиностроение и энергетика.

Общий призовой фонд конкурса в 2018 году составляет более 6 млн руб.

В качестве участников конкурса могут выступать организации независимо от организационно-правовой формы (за исключением государственных (муниципальных) учреждений), зарегистрированные и осуществляющие свою деятельность на территории Санкт-Петербурга.

Прием заявок начнется в мае и продлится 45 дней.

Награждение победителей конкурса пройдет в ноябре 2018 года в рамках Петербургского международного инновационного форума.

Информацию о конкурсе и процедуре подачи заявок можно получить:

- у организатора конкурса – Комитет по промышленной политике и инновациям Санкт-Петербурга по тел: +7(812)576-00-28;
- у оператора конкурса – ООО «ИНФОЛайн-Аналитика» по электронной почте: lip@infoline.spb.ru или тел.: +7(812)322-68-48 доб. 310 или 407;
- на портале «Инновационный Санкт-Петербург».