

ЗОЛУШКА ЭНЕРГЕТИКИ

Заев Н. Е.

Открытие термоэлектричества Зеебеком в 1821 г. не обошлось без конфуза: автор его не заметил тока в цепи, а счёл, что нагревание одного из спаев приводит лишь к намагничиванию ветвей термоэлектрической цепи. Напомню, что тогда не было ни амперметров, ни вольтметров, ни осциллографов ...

Да – не в сорочке родилось термоэлектричество. А появившаяся на несколько лет позже фарадеевская электромагнитная индукция – как неувядающая Кармен – навсегда полонила мир. Термоэлектричество же по-прежнему ходит в золушках техники, всё больше для термопар, где жарче или постуднее. А ведь ещё в 1823 г. Эрстед и Фурье уже сделали первый термоэлектрический генератор (ТЭГ), задолго до появления электрического генератора.

У открытий, как у людей – свои судьбы. То лёгкие, светлые, то тяжкие, горькие. Лгут и карты, и гороскопы, и цыганская ворожба; кто знал плазму в начале века? А сегодня она предмет общего поклонения. Ей посвящены миллионы статей, тысячи диссертаций. И всё же на нынешнем карнавале науки – она по-прежнему незнакомка, всё ещё не узнана в своей маске. Кто она? Какая она? За минувшие 35 лет – к разгадке лишь чуть приблизились: термояд по-прежнему за горизонтом ... В блеске гипотез, в азарте дискуссий о ней – золушку нашу – как и должно – забыли совсем. И забыли несправедливо, только из-за её природной скромности. Как это знакомо, как это не ново ...

Удивительное дело – где б мы ни учились, о термоэлектричестве говорят так, как будто оно только для измерительных термопар и нужно. Лишь узкие специалисты в укромных лабораториях ещё занимаются особенностями термоэлектричества и термопар. Да и то в основном с целью совершенствования тех же термопар для измерения температур.

Множество безымянных энтузиастов на протяжении последних 100 лет доводили термоэлектрические генераторы до сегодняшнего уровня совершенства. Например, ТЭГ «Ромашка» (с атомным источником нагрева) имел мощность 500÷800 Вт; в США для спутников использовался аналогичный ТЭГ СНАП-10А. КПД этих ТЭГ был на уровне 2%. Имелись ТЭГ и на иных источниках нагрева (газ, солярка); некоторые из них кое-где применяются и сегодня. Ясно, что этот путь – путь «лобового» применения термопар прямым нагревом спая на сегодня кажется исчерпанным в смысле достижения максимума КПД. Нагреваемый спай термоэлектрической цепи очевидно можно уподобить котлу некоего паровоза. И потому все ТЭГ-и – из века пара, архаичны как лучины. О повышении КПД в таких ТЭГ-ах и думать не приходится. А нельзя ли подумать о создании ТЭГ-ов – аналогов двигателям внутреннего сгорания? Оказывается нечто подобное уже исследуется.

В последнее время получают признание ТЭГ с импульсным нагревом. Особенность таких ТЭГ в том, что спай интенсивно нагревают в течение короткого времени, достаточного для достижения максимальной температуры, и в то же время столь малого, чтобы температура холодного спая не повысилась из-за притока тепла от горячего спая. Ясно, что ТЭГ выдаст импульс термоэдс с крутым передним фронтом и растянутым задним. Благодаря этому приёму КПД повышается – в отдельных случаях – до 30%, а весовые и габаритные характеристики улучшаются почти втрое. И это понятно. В обычных ТЭГ, с установившимся значением разности температур между холодным и горячим спаями (Δt) – существует значительный теплоток между ними, поток потерь. И всё же импульсный нагрев спая хотя и нов – остаётся в рамках традиционного цикла Карно, со всеми его ограничениями и последствиями. А ведь термоэлектрическая цепь

способна не только создавать термоток. Его возникновение в цепи сопровождается другими интересными эффектами и понятными всем, и понятными не всем, и совсем никому не понятными. Это и эффект Зеебека и Пельтье, и Томсона, и Ленца-Джоуля.

Когда горячий спай нагрет, то при замкнутой термоэлектрической цепи в холодном спае, вследствие протекания тока выделяется тепло. Одна часть его и есть тепло Пельтье (1834). Оно равно произведению коэфф. Пельтье (Π) на силу термоэлектрического тока (I). Другая часть – обычное ленц–джоулево тепло, равное произведению сопротивления спая (ρR) на квадрат силы тока. Это тепло несложно регулировать, увеличивая или уменьшая величину ρR путём увеличения или уменьшения площади спая.

Если термоэлектрическая цепь составлена из двух веществ А и Б, то в холодном спае термоэлектрический ток течёт, например, от А к Б: тогда в горячем – наоборот от Б к А. Когда мы сказали, что тепло Пельтье в холодном спае добавляется к ленцу–джоулеву теплу и ток идёт от А к Б ($+I_x$), а в горячем спае соответственно ($-\Pi_r$) и ($-I_r$) – то имели в виду малое Δt . Эта картина, в общем–то, всем известна, всем понятна. Её правда, надо дополнить теплотокками, текущими по материалам ветвей термоцепи А и Б из-за эффекта Томсона. Он возникает, как дополнительный перенос тепла (к обычной теплопроводности), вследствие разности концентрации носителей зарядов и их распределения по энергиям в холодном и горячем спае. Итогом этого эффекта является кажущееся изменение теплопроводности А и Б, зависящее от направления тока. Вот как-будто и всё о явлениях в спаях. Всё-ли?

... В добрых старых учебниках физики – начиная с О. Д. Хвольсона и кончая курсом К. А. Путилова – одно упоминание о которых заставляет снобов «науки» недовольно протирать очки – сообщались подробные сведения о термоэлектричестве. Основную часть закономерностей термоэлектрических цепей ещё в 1863 г. установил киевский учёный Авенариус. Его имя носит закон – уже не упоминаемый в сегодняшних курсах, как не упоминается и сам Авенариус. Видно составители «современных» курсов всерьёз полагают, что термоэлектричество – пройденный этап физики. Уверен, что большинству читателей, кому меньше 35 – закон Авенариуса попросту неизвестен. А ведь он отвечает на вопрос – который – как мне кажется – должен возникнуть у всякого, кто начинает знакомиться с термопарами.

Термо-эдс – растёт (обычно) прямо пропорционально разности температур:

$$E = \alpha \cdot \Delta t.$$

Сразу же хочется знать – в каком интервале температур, и до каких температур? Поскольку ответа нет – надо ставить опыт. Но не спешите к милливольтметрам, нагревателям, дьюарам с тающим льдом. То новое, что вы найдёте в измерениях – лишь подтвердит давнее ироничное правило: *новое – это основательно забытое старое...* Ибо именно **Авенариус** ответил на этот вопрос:

термо-эдс ратёт по параболическому закону с ростом разности температур.

Это значит, что при некоторой температуре горячего спая t_m – достигается максимум термо-эдс. А далее термо-эдс падает, вплотную до нуля при так называемой температуре инверсии $t_i \approx 2t_m$, а затем и меняет знак. С теплотой Пельтье – в горячем спае в это время происходят удивительные метаморфозы. Дело в том, что наблюдаемая термо-эдс не просто функция разности температур, а разность функций от температуры того и другого спая. Это постоянно подчёркивал Авенариус. И коэффициент Пельтье в спае:

$$\Pi_r = \frac{dE}{dt} \cdot t$$

Поэтому он обращается в ноль при t_m , так что в горячем спае нет теплоты Пельтье; при $t > t_m$ – тепло Пельтье, поменяв знак, греет горячий спай (как и холодный).

При температуре горячего спая $t = t_i$ – в обоих спаях тепло Пельтье пропадает, ибо исчезает термоэлектрический ток. А далее, при $t > t_i$ – начинают охлаждаться оба спая, но с разной интенсивностью, поддающейся регулировке. В горячем спае можно обеспечить максимум джоулева тепла:

$$I^2 \cdot R_r \gg \pi_r \cdot I,$$

а в холодном:

$$I^2 \cdot R_x \ll \pi_x \cdot I.$$

И тогда можно увидеть необычное: холодный спай охлаждается всё сильнее и сильнее, а температура горячего спая возрастает и возрастает, становится затем выше температуры нагревателя ... Убираем нагреватель – а горячий спай так и остаётся горячим (при соответственно малых теплотерях с него). Именно это имелось в виду, когда выше говорилось о явлениях, сегодня никому не понятных.

Для сведения приводим значения t_i некоторых термопар определённые экспериментально. Платина–алюминий: 151°C; кобаль–никель: 100°C; кадмий–медь: - 20°C; серебро–цинк: 64°C; кадмий–олово: - 70°C.

Значения t_m . Свинец–алюминий: 32°C; серебро–железо: 230°C; цинк–медь: 30°C; платина–кадмий: 10°C; свинец–висмут: 222°C.

Интересно отметить, что опасения роста теплотер (из-за теплопроводности ветвей А и Б при $t > t_i$), обычно не оправдываются, так как теплопроводность металлов, как правило, снижается с ростом температуры.

После всех этих необходимых пояснений зададимся вопросом, не противоречит ли описанная ситуация «саморазогрева» горячего спая и «самоохлаждения» холодного – канонам термодинамики в их современном понимании? И что может дать применение явления саморазогрева?

Ответ на последний вопрос очевиден: запустив такую термоэлектрическую цепь однократным нагревом горячего спая – далее можно на горячем спае греть воду, варить суп, печь оладьи. Холодный спай при этом – должен покрываться инеем, или, по крайней мере (если площадь рёбер на нём достаточно большая), – стать мокрым от конденсирующейся влаги, которая будет стекать вниз.

Ясно, что это будет *электроплита*, а нижняя часть установки – конечно же *холодильник*. Закон сохранения энергии – безусловно соблюден, так как на горячем спае выделяется энергии джоулева тепла столько, сколько её поглощается на холодном спае (из материала спая, а в конечном счёте – из окружающей среды). Сегодня хорошо известно, что наличие в электрической цепи полупроводника (а спай – это полупроводник с очень малой шириной запрещённой зоны) – приводит к переносу тепла из одной части её в другую, что и используется для генерации холода в известных термоэлектрорхолодильниках. Не нарушается и второе начало: поток тепла идёт от более нагретой окружающей среды к менее нагретому холодному спаю. От холодного спая энергия переносится к горячему в виде электрической, где вновь преобразуется в джоулево тепло и тепло («холод») Пельтье. Однако, последнего много меньше, чем джоулева тепла – и спай саморазогревается до какой-то равновесной температуры, когда тепловыделение сравняется с теплотерями.

Может быть большие мощности в одной термоэлектрической цепи пока и не реальны, но для $I^2 \cdot R_r \sim 100$ Вт нужно обеспечить вполне достижимые $I \sim 100$ А, $R_r \sim 0,01$ Ом, термо-эдс должна быть около 10 В, что возможно при $\Delta t \sim 500^\circ$ если $\alpha \sim 0,002$ В/град. Во всяком случае, этого можно достичь после проведения целеустремлённых исследований. Такие же исследования обеспечат повышение мощности до 3–10 кВт в установке.

Такой, вот, видится завтрашняя судьба *Золушки энергетики*. Как и сказочная – наша *Золушка* уже много натерпелась и перенесла всё, уготовленное ей судьбой. На сегодняшнем балу науки – она давно потеряла туфельку – и кто-то её найдет. Ведь всё идёт к лучшему в этом лучшем из миров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поздняков Б. С, Коптелов Е. А. Термоэлектрическая энергетика. – М., Атомиздат, 1974.
2. Вайнер А. А. Каскадные термоэлектрические источники холода. – М., Сов. радио, 1976.
3. Преобразование энергии МГД и термоэлектрическим методами. Сб. – Киев, 1981.

Москва, октябрь 1984 г.

Заев Николай Емельянович, – кандидат технических наук, действительный член Русского Физического Общества, лауреат Премии Русского Физического Общества.



ЭПИГРАММА № 11

*Мне, в размышлении глубоком,
Сказал однажды Лизимах:
«Что зрячий зрит здоровым оком,
Слепой не видит и в очках!»*



Опубликовано: журнал «Русская Мысль», 1994, № 1-6