

УДК 621.315.592

Коржуєв М.А., Кретова М.А., Катін І. В.

Інститут металургії й матеріалознавства ім. А.А. Байкова РАН,
Ленінський просп., 49, Москва 119991, Росія

ВНЕСОК АКАДЕМІКА Е. Х. ЛЕНЦА В РОЗВИТОК СУЧАСНОЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ

Розглянуті роботи академіка Петербурзької Академії Наук Е.Х. Ленца (1804 – 1865) і його учнів – Х.Е. Ленца (сина) (1833 – 1903) і М.П. Авенаріуса (1835 – 1895), що внесли вклад у розвиток сучасної термоелектрики (ТЕ).

Ключові слова: термоелектрика; академік Е.Х. Ленц; правило індукції Ленца, закон Джоуля-Ленца, ефект Пельтьє, максимальна потужність термопар, автомобільні термоелектричні генератори.

The paper is concerned with the works of academician of St. Petersburg Academy of Sciences E.Ch.Lenz (1804 – 1865) and his students – Ch.E. Lenz (son) (1833-1903) and M.P. Avenarius (1835-1895) that contributed to the development of modern thermoelectricity (TE).

Keywords: thermoelectricity, academician E. Ch. Lenz, Lenz's induction rule, Joule-Lenz's law, the Peltier effect, maximum thermocouple power, automobile thermoelectric generators.

Вступ

Санкт-Петербурзька Академія наук (СПб АН) із часів свого заснування (1724) спеціалізувалася на природничо – наукових дослідженнях, багато з яких проводилися на стику різних наук [1 – 3]. Зокрема, в 1745 – 1803 співробітниками СПб АН були досліджені перехресні ефекти «електрика – тепло», що спостерігалися в термоелектриці – активних середовищах – деяких діелектриках і рідких електролітах [4 – 7]. Акад. Г-В. Ріхман (1711 – 1753) докладно досліджував термоелектретний ефект у сірці й смолах (1746). Акад. М.В. Ломоносов (1711 – 1765) описав складні термоелектричні явища в атмосфері Землі, що визначають заряд хмар (1753) [4, 5]. Акад. Ф.Т.У. Епінус (1724 – 1802), запрошений для роботи в СПб АН з Німеччини (1757), пояснив піроелектричний ефект у турмаліні, виявлений ним в 1756 [6]. У свою чергу, акад. В.В. Петров (1763 – 1814) спостерігав (1804) термоелектричні ефекти в гальванічних елементах (ГЕ) систем, що представляють собою метал- електроліт- метал зі змішаною електронно-іонною провідністю [7].

На початку XIX сторіччя науково-технічна революція в Європі охопила енергетику, засоби зв'язку (телеграф) і транспорт (залізниці) [8]. Відповідно загострився інтерес дослідників до нових областей вчення про електрику – електромагнетизму, електродинаміки, електромагнітної індукції. Новий імпульс розвитку одержало також вчення про термоелектрику [9, 10].

У 1821 році Т.І. Зеєбек (1770 – 1831), працюючи в Йені (Німеччина), виявив термоелектричний ефект у металевих термопарах ($Bi - Cu$ і $Bi - Sb$), що виникає при нагріванні

одного зі спаїв термопар. Виявлення термоелектрики в провідних середовищах¹ підвищило інтерес до проведення подальших досліджень у даній області [8 – 13]. В 1834 Ж. Пельтьє (1785 – 1845) (Франція), досліджуючи термопари *Bi-Sb*, установив, що при пропусканні електричного струму через термопару залежно від напрямку струму її робочий спай міг не тільки нагріватися, але й охолоджуватися [8 – 10]. Нарешті, в 1856 У. Томсон (Кельвін) (1824 – 1907) виявив третій термоелектричний ефект (ефект Томсона), пов'язаний з виділенням (поглинанням) додаткового тепла в провідниках зі струмом при наявності в них градієнтів температури [8 – 10].

Дана робота є продовженням досліджень по історії розвитку термоелектрики в Росії [4 – 7]. Нижче розглянуті роботи в області термоелектрики, виконані в 1833 – 1884 акад. СПб АН Е.Х. Ленцем (1804 – 1865)[180416] і його учнями - чл. кор. Спб АН-Х.Е. Ленцем (сином) (1833 – 1903) і М.П. Авенаріусом (1835 – 1895) [9,12, 17].

Коротка історична довідка

Емілій Христіанович Ленц (рис. 1) народився в родині обер-секретаря міського магістрату Дерпта (Юр'єв, нині Тарту, Естонія) Християна Гейнріха Фрідріха Ленца († 1817). Родина належала до стародавнього остзейського роду. Після смерті батька за підтримки лютеранської громади Дерпта він в 1821 вступив на природничо - науковий факультет місцевого університету, відкритого в 1802 імператором Олександром I [3, 12, 15].²



Рис. 1. Ленц Емілій Христіанович (нім. Heinrich Friedrich Emil Lenz) (1804, Дерпт – 1865, Рим). Навчався в Дерптському університеті. В 1827 захистив дисертацію в Гейдельберзькому університеті. С 1828 – ад'юнкт, а з 1834 р. – академік СПб АН. Завідуючий Фізичним кабінетом СПб АН (1830 – 1865). Професор кафедри фізики та фізичної географії СПб університету. (1836 р.), Декан фізико-математичного факультету (1840 р.), Ректор (1863 р.) [11, 12]. Тасмний радник [2]. (Офіційний портрет РАН [3]).

Учителем і наставником Е.Х. Ленца був ректор університету – відомий фізик, Е.І. Паррот (рис. 2), що перебував у дружніх відносинах з імператором Олександром I.³ В 1823 Паррот, що оцінив здатності Ленца до наук, рекомендував його як фізика – дослідника в кругосвітню

¹ «Цієї чудової форми електрики» – за словами М. Фарадея [14]. На відміну від термоелектриків – діелектриків і ГЕ, які працюють в режимі «зарядка – розрядка», джерела струму на основі металевих термопар працюють в безперервному режимі, що становить значний практичний інтерес [13].

² Дерптський університет (колишня. Academia Gustaviana) був заснований в 1644 шведським королем Густавом I Адольфом і припинив своє існування після Північної війни в 1712. Відновлено за розпорядженням (1799) імператора Павла I (1754 – 1801) у зв'язку з заборонаю російським студентам навчатися за кордоном.

³ Є.І. Паррот вперше описав явище осмосу, розробив конструкції медичних термометрів, широко використовуваних дотепер. Реорганізував фізичний кабінет СПб АН (1830 – 1840) [1, 12].

експедицію капітана Отто Євстафієвича (Оттона Августовича) фон Коцебу (1788-1846) на військовому шлюпі «Підприємство» (1823 – 1826) [18]. Для потреб експедиції Паррот і Ленц у короткий строк спільно розробили нові наукові прилади: лебідку глибиномір і батометр (прилад для узяття проб води й визначення її температури на різних глибинах) [15].⁴

За час експедиції Ленц провів безліч океанографічних, метеорологічних і геофізичних досліджень. Він брав проби води з різних глибин, займався визначенням її солоності, густини, температури, вивчав океанічні течії. У результаті ним отримані залежності солоності морської води від сили вітрів і кількості сонячного світла: наприклад, на екваторі, при найбільшій кількості сонячного світла, вітри не сильні. пари, що утворювалися при випарі води, залишаються над поверхнею моря й перешкоджають подальшому випару. Тому на екваторі солоність води менше, ніж до півночі й до півдня від нього, де дують пасати [15].

Також Ленц установив, що причиною виникнення океанічних течій є не тільки вітри, як уважалося раніше, але й відмінності в густині води в різних широтах. Крім того, удалося показати, що глибинні води можуть прохолоджуватися до температур нижче +4 °С. При вивченні атмосферних процесів Ленц особливу увагу приділяв дії енергії сонячного світла, яке називав їхньою головною причиною [15].



*Рис. 2. Паррот Єгор Іванович (нім. Parrot
Георг Фрідріх фон) (1767 герцогство
Вюртемберг – 1852, Гельсінгфорс), ректор
Дерптського (Юр'ївського) університету
(1801), член-кореспондент (1811) і академік
СПб АН з прикладної математики (1826) і з
фізики (1830), почесний член (1840). Завідувач
Фізичним кабінетом СПб АН (1830 – 1840).
Дійсний статський радник. (З літографії в
Юр'ївському університеті).*

Ленц повернувся з експедиції досвідченим і вмілим фізиком – експериментатором. Він поселився в СПб і присвятив наступний рік обробці отриманих результатів. Океанографічні дослідження вченого стали темою дисертації, яка була успішно захищена ним в 1827 році в Гейдельберзькому університеті. У лютому 1828 року вчений подав у СПб АН доповідь: «Фізичні спостереження, зроблені під час кругосвітньої подорожі під командуванням капітана Отто фон Коцебу в 1823, 1824, 1825 і 1826 рр.» [11, 15], у результаті в травні 1828 Ленца одногосно обрали ад'юнктом СПб АН по фізиці. В 1829 – 1830 Ленц взяв участь в експедиції на Ельбрус. Через глибокий сніжний покрив досягти вершини не вдалося (залишилося 600 футів). Однак у досягнутій точці підйому Ленц зробив виміри атмосферного тиску, по яких приблизно встановив висоту вершини (5642 м). У травні 1830 року Ленц повернувся в СПб, де був вибраний екстраординарним академіком [11, 15].

⁴ Відомий відгук С.І. Паррота про Е.Х. Ленца: «Для старості відрадно підготувати молодих вчених, які нас заміщають і допомагають нам з таким мистецтвом і люб'язністю, які неодноразово вже проявив Е.Х. Ленц» (1840).

До експериментальних досліджень в області електрофізики Е.Х. Ленц приступив в 1831, роботи проводилися у Фізичному кабінеті СПб АН [1, 11, 15]. Основні роботи Е.Х. Ленца в області електрофізики представлені в табл.1. Знаком (*) у табл.1 відзначені роботи, що мають безпосереднє відношення до термоелектрики, інші відносяться до джерел струму, які широко використовуються для живлення термопар.

Основні результати робіт Е.Х. Ленца в області електрофізики

Перевірка закону Ома. В 1831 Ленцем був сконструйований чутливий гальванометр, що дозволив підтвердити справедливість основного закону електричних кіл – закону Ома, виявленого Г.С. Омом (1787 – 1854) в 1826 (1, табл.1). Вважається, що багато в чому завдяки результатам високоточних вимірів, проведених Ленцем, закон Ома одержав остаточне визнання серед фізиків [12, 15].

Правило індукції Ленца. В 1831 М. Фарадей (1791 – 1867) відкрив явище електромагнітної індукції [14]. Довідавшись про це відкриття, Ленц відразу ж почав дослідження, метою яких було визначення загальних закономірностей цього явища. (2, табл. 1) [15]. Ленца цікавило встановити загальне правило для напрямку індукційного струму, яке М. Фарадей визначив стосовно до різних окремих випадків взаємодії магнітів, що рухаються, із провідниками, а також провідників зі струмом один з одним.

Таблиця 1

Основні результати робіт Е.Х. Ленца (1804 – 1865) по електромагнетизму й термоелектриці ⁵

№	Рік	Роботи	Формула	Посилання
1	1831	Перевірка закону Ома*	$I=U/R$	[15]
2	1833	Правило індукції Ленца*	$E=-\Delta\Phi/\Delta t$	[8, 15]
3	1833	Принцип еквівалентності електричних машин	-	[11]
4	1835	Температурна залежність електроопору металів (Cu, латунь, Fe, Pt, Ag, Au, Pb, Sn) *	$R \sim R_0 \cdot \Delta T$	[8, 15]
5	1838	Підтвердження існування ефекту Пельтьє й примороження води за допомогою термопари $Bi - Sb^*$	-	[16]
6	1842 1843	а) Закон Джоуля - Ленца * б) Правило Ленца ($1/2$) для максимального виділення тепла на навантаженні*	$Q = I^2 R$ $R = r$	[10,15] [10, 15]
7	1847	Реакція якоря електромагнітних машин (Разом з Б.С. Якобі (1801 – 1804))	-	[15]
8	1847	Досліди по поляризації електродів ГЕ (Разом з А.С. Савельєвим (1820 – 1860))	-	[15]

Ленц повторив досліди М. Фарадея (рис. 3) і знайшов правило, пізніше назване його іменем.⁶

⁵Тут: I , U і R – струм, напруга і опір кола; E – напруга індукції; Φ і t – магнітний потік і час; R_0 – опір металу при кімнатній температурі; ΔT – зміна температури; Q – тепло, що виділяється на навантаженні; r – внутрішній опір джерела струму.

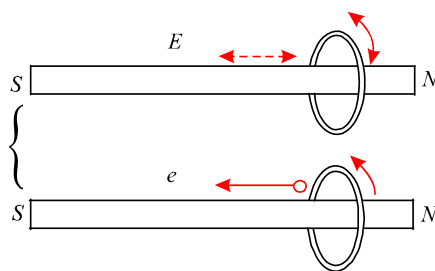


Рис. 3. Схеми дослідів Ленца по індукції з постійними магнітами й круговими провідниками, що складаються з 20 витків оплетеного мідного дроту [15].

Згідно із правилом Ленца (2, табл. 1), індукційний струм має такий напрямок, що створений ним потік магнітної індукції через площу, обмежену контуром, прагне компенсувати зміну потоку $\Delta\Phi$, яку викликає даний струм. Пізніше з'ясувалося, що правило Ленца має більший ступінь спільності й пов'язане із законом збереження й перетворення енергії, а також із принципом стійкості термодинамічних систем.

В 1847 Г.Л.Ф. Гельмгольц (1821 – 1894) математично обґрунтував закон збереження енергії й показав, що правило Ленца є наслідком цього закону в області електромагнітних явищ. В 1884-1887 правило Ленца було узагальнено А. Ле-Шательє (1850 – 1936) на хімічні реакції, а К.Ф. Брауном (1850 – 1918) – на різні фізичні явища [12]. Згідно із принципом Ле-Шательє - Брауна (ЛШБ), якщо на систему, що перебуває в стійкій рівновазі, впливати ззовні, змінюючи яке-небудь із умов рівноваги (температуру, тиск, електромагнітне поле), то в системі підсилюються процеси, спрямовані на компенсацію зовнішнього впливу. Принцип ЛШБ застосований до рівноваги будь-якої природи – механічної, теплової, хімічної, електричної. Він широко використовується також в області термоелектрики [9].

Принцип оборотності електричних машин. В 1833 Ленц виявив можливість оборотного перетворення магнітоелектричної машини в електродвигун (3, табл. 1) [11]. Перетворення електричної машини (генератора) в електродвигун здійснюється її простим підключенням до джерела струму, зворотне перетворення – механічним обертанням ротора електродвигуна. Оборотність електричних машин пояснюється однаковим обладнанням перетворювачів електричної енергії в механічну енергію й механічної енергії в електричну енергію. Зараз це відкриття Ленца широко використовується в електротехніці, наприклад, для електродинамічного гальмування поїздів.

Температурна залежність електричного опору металів. В 1835 Ленц провів високоточні виміри температурної залежності електричного опору R ряду металів. (Латуні, Cu , Fe , Pt , Ag , Au , Pb , Sn) (4, табл.1) [8, 11]. Він показав, що при збільшенні температури вище кімнатної опір R металів збільшується, а при охолодженні – зменшується за лінійним законом. Згідно М. Лауе [8], зменшення опору R металів при зниженні температури, виявлене Ленцем, було новим і несподіваним відкриттям в області електропровідності, що стимулює наступні дослідження у фізиці низьких температур. Пізніше Г. Камерлінг – Онесом (1853 – 1926) було показано, що в Au , Ag , і Cu є деякий «залишковий» опір R_0 , нижче якого він не падає зі зниженням температури. З іншого боку, в Hg , Pb , Sn , Tl і деяких інших металів було виявлене явище надпровідності - зникнення опору електричному струму ($R = 0$) нижче деякої критичної температури T_c (1913) [8, 10, 12].

⁶М. Фарадей в своїх роботах по електромагнітній індукції ніколи не посилався на роботи Ленца [14].

Перевірка ефекту Пельтьє. В 1834 м. Жан Шарль Пельтьє (1785 – 1845) виявив новий термоелектричний ефект, зворотний ефекту Зеебека. Ефект полягав в одночаснім нагріванні й охолодженні різних спаїв термопар при пропусканні через неї електричного струму [8, 10]. Для дослідів Пельтьє використовував термопару у вигляді хреста (рис. 4а), спаяну з різнорідних металів *n-n- Bi* і *p-p- Sb*. (Тут *n-n-* і *p-p-* позначають електронний і дірковий тип провідності матеріалів). Через кінці *A* і *C* хреста (рис. 4а) Пельтьє пропускав електричний струм, зміну температури спаю він визначав за показниками гальванометра *G*, приєднаного до вільних кінців хреста в точках *BD*. Залежно від напрямку робочого струму в контурі *AC* показання гальванометра *G* указували або на нагрівання, або на охолодження робочого спаю.

Сучасники Пельтьє – А.С. Беккерель (1788 – 1878), А.О. Де ла Рів (1801 – 1873) і ін. віднеслися з недовірою до його дослідів [9]. Сумнів викликали мала величина ефекту (перепад температур $\Delta T \sim 1$ К), а також нестандартна схема виміру ΔT , зібрана без необхідної електричної розв'язки робочих і вимірювальних кіл (рис. 4а). Ленц вирішив повторити досліди Пельтьє з використанням стандартного ртутного термометра (рис. 4б). Результати своїх дослідів (5, табл. 1) він виклав у журналах СПб АН «Bulletin Scientifique de l'Academie Imperiale des Sciences» [15] і «Бібліотека для читання» (рис. 5) [16].

Для своїх дослідів Ленц використовував прямокутні зразки *Bi* і *Sb* довжиною $4\frac{1}{2}$ англійських дюйма (12.7 см), шириною й висотою 4 лінії (10,16 мм), маса термопар досягала 215.8 р. Термоелектричні характеристики віток термопар *Bi / Sb* наведені в табл.2 [19]. На першому етапі досліджень використовувалася схема вимірів Пельтьє (рис. 4а), для чого вітки термопар *Bi* і *Sb* спаювалися оловом по середині. Джерелом струму в цьому досліді слугував гальванічний елемент (ГЕ) Вольти з електродами з *Zn* і *Pt*, подібний по параметрах з ГЕ, використаним Пельтьє (ЕРС $E = 1.1$ В). Ефекти охолодження й нагрівання робочого спаю термопар фіксувалися гальванометром, а також за допомогою ртутного термометра Реомюра з кулькою невеликого діаметра ($D = 2$ лінії ($\sim 5, 12$ мм)) (рис. 4). Результати досліджень (табл. 3) показали, що ефект охолодження, що спостерігався Пельтьє за допомогою схеми (рис. 4а), дійсно існує, однак він досить малий ($\Delta T_{охл} \sim 0.84$ К). При зміні напрямку струму I робочий спай термопар нагрівався ($\Delta T_{нагр} \sim 3.96$ К) (табл. 3).

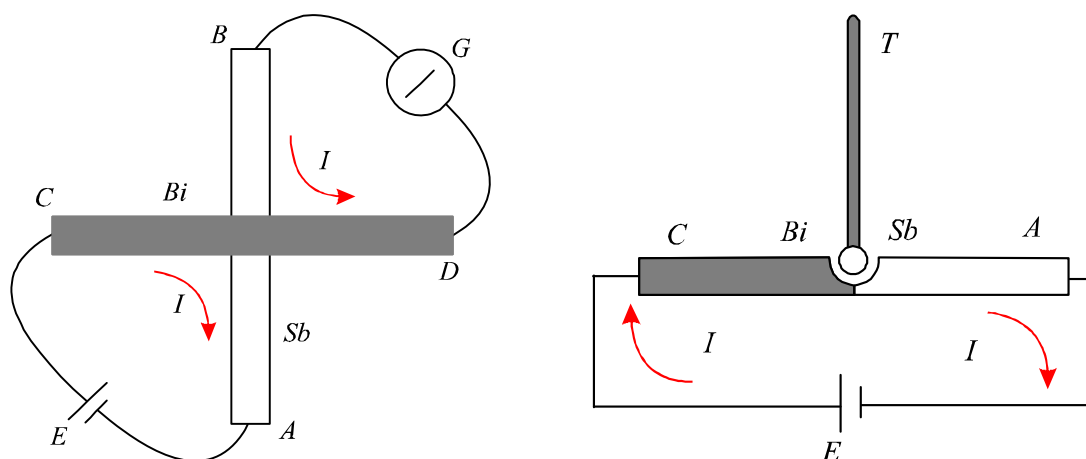


Рис. 4. Термоелектричний хрест Пельтьє (*Bi – Sb*) (а) [9] і схема Ленца з ртутним термометром *T*(б), відновлена нами за словесним описом, даним в [16]. Полярність напруг і напрямок струмів в контурах (стрілки) схем відповідає ефекту охолодження робочого спаю термопар.

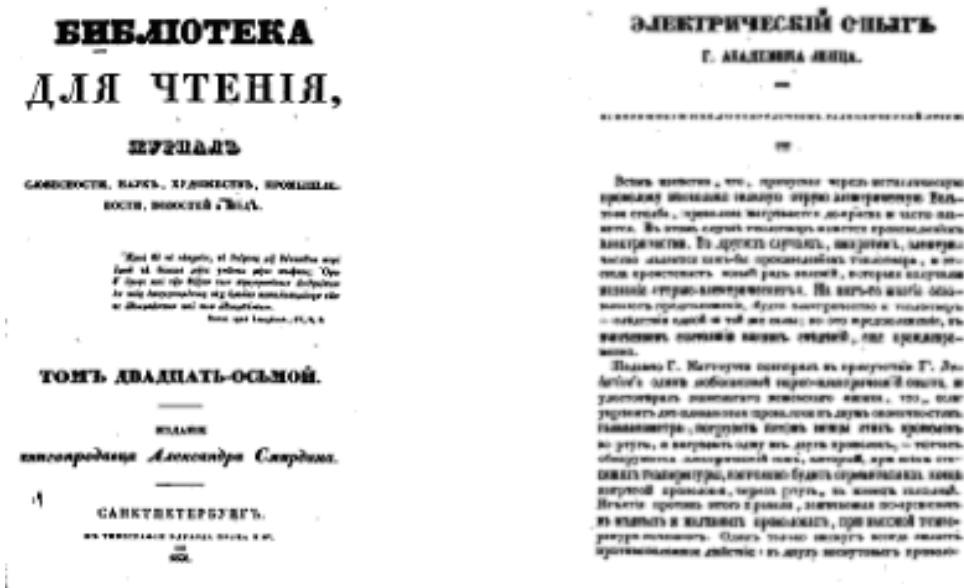


Рис. 5. Перші сторінки статті «Електричний дослід п. академіка Ленца. Заморожування води гальванічним струменем», опублікованої в журналі «Бібліотека для читання» (1838) [16].

Ленц пояснив малі значення $\Delta T_{охл}$ підведенням тепла до робочого спаю термопарі з боку вимірювальних кінців хреста (рис. 4а). У результаті він відмовився від вимірювальної схеми (рис. 4а) і запропонував свою оригінальну схему вимірів ефекту Пельтьє, де вітки термопарі спаювалися торцями (рис. 4б). У районі робочого спаю отриманої термопарі висвердлювалося поглиблення для термометра (рис. 4б). Живлення схеми проводилося від елемента Вольти з електродами з Zn і Pt підвищеної потужності (площа пластин становила 1 квадратний фут ($\sim 900 \text{ см}^2$)). За допомогою схеми (рис. 4б) Ленцу вдалося підвищити $\Delta T_{охл}$ до $\sim 3.5 \text{ К}$ (табл. 3) і вперше продемонструвати приморозку краплі води за допомогою ефекту Пельтьє. Для цього крапля води містилася в поглибленні на робочому спаї термопарі (рис. 4б). Вітки термопарі прохолоджувалися за допомогою снігу до температури $T \sim 0^\circ \text{R}$ (0°C) і витримувалися при цій температурі протягом 10 хв. Потім включався струм необхідного напрямку, час замерзання краплі води після включення струму становив 3 хв [16].

Становить інтерес порівняти результати дослідів Ленца з теоретичними оцінками величини ефектів охолодження в досліді (рис. 4) у рамках сучасної теорії термоелектричних охолоджувачів [20]. Максимальну величину $\Delta T_{охл}$ розраховували по формулі $\Delta T_{охл}^{\max} = \frac{1}{2} Z_0 T_{12}$, де $Z_0 = (\alpha_{Sb} - \alpha_{Bi}) / [(\rho_{Sb} \kappa_{Sb})^{1/2} + (\rho_{Bi} \kappa_{Bi})^{1/2}]^2$ – термоелектрична добротність термопарі, α і ρ – термоЕРС і питомий електроопір віток, T_1 – абсолютна температура холодного спаю (табл. 1). Оптимальний робочий струм термопар визначали зі співвідношення $I_0 = \alpha T / R$, де $R_0 = L(\rho_{Sb} / S_{Sb} + \rho_{Bi} / S_{Bi})$ – електроопір термопарі, L – довжина віток, S_{Sb} і S_{Bi} – їх поперечний переріз. Струми в термопарах (рис. 4) оцінювали за законом Ома: $I = E / R$. Тут $E = 1.1 \text{ В}$ – ЕРС. ГЕ, $R = r_{ГЕ} + R_0$ – повний опір електричного кола, R_0 – опір термопар, $r_{ГЕ} = l / (\sigma s)$ – опір електроліту, $l \sim 5 \text{ см}$ – відстань між пластинами (Zn і Pt) ГЕ, $\sigma = 1 / \rho = 0.653 \text{ Ом.см}$ ($20\% \text{ H}_2\text{SO}_4$) – питома провідність електроліту [21], s – площа пластин ГЕ, яка покладалася рівною 20 см^2 у досліді (рис. 4а) і становила квадратний фут (929 см^2) у досліді (рис. 4б) [16].

Таблиця 2

Термоелектричні характеристики віток термопар
Bi-Sb, дослідженої Ленцем [19]

Зразок	термоЕРС α , мкВ/К	Питомий опір, $\rho \cdot 10^6$, Ом.см	Питома теплопровідність, κ , Вт/(м К)	Термоелектрична добротність матеріалів, $Z \cdot 10^{-3}$, 1/К
Bi	-68	110	7.9	0.53
Sb	35	39	24	0.13

Таблиця 3

Ефекти Пельтьє, досліджені Ленцем на термопарі Bi-Sb [16],
у порівнянні з теорією [20].

№	Експеримент і теорія	Ефект охолодження, $\Delta T_{охл}$, $^{\circ}R$ (К)	Ефект нагрівання. $\Delta T_{нагр}$, $^{\circ}R$ (К)	Термоелект- рична добротність термопар, $Z_0 \cdot 10^3$, 1/К	$r_{ГЕ}$, Ом	Умови оптимізації	
						Робочий струм, I , А	Пере- різ $S_{Sb}/$ S_{Bi}
1	Дослід Ленца за схемою Пельтьє (рис.4а)	0.7 (0.84)	3.3 (3.96)	0.019	0.38	2.8	1
2	Дослід Ленца за схемою (рис. 4b)	2.9 (3.48)	48 (57.6)	0.088	0.033	29.7	1
3	Теорія [20]	10.7 (12.8)	-	0.284	-	17	0.35

Проведені оцінки показують, що відносно малі значення $\Delta T_{охл}$, котрі спостерігалися Ленцем у досліді (рис. 4), пов'язані з порушенням умов оптимізації термопар по перерізу S_{Sb}/S_{Bi} і по робочому струму I (табл. 3). Згідно табл. 3, робочий струм термопар I , використаний Ленцем при охолодженні в досліді (рис. 4а), був менше, а в досліді (рис. 4b) – більше оптимального. В останньому випадку термопара працювала в «імпульсному режимі» [20], тому згодом величина $\Delta T_{охл}$ зменшувалася [16]. Це пояснює, чому при приморожуванні краплі води в досліді (рис. 4b) Ленц фіксував температуру спаю поблизу $T \sim 0^{\circ}R$ ($^{\circ}C$). У свою чергу, через порушення оптимізації по перерізу (табл. 3) вісмутова вітка термопар сильно нагрівалася в порівнянні із сурм'янистою віткою [16]. Це знижувало величину $\Delta T_{охл}$ і суттєво збільшувало $\Delta T_{нагр}$ (табл. 3). Усі ці ефекти помітив і описав Ленц [16].

У процесі проведення дослідів (рис. 4) Ленц установив напрямки струму I , при якому на робочому спаї термопар спостерігався ефект охолодження, або нагрівання [16]. Згідно [16], охолодження робочого спаю термопар спостерігалася, коли гальванічний струм ішов від вісмуту (n -тип) до сурми (p -тип) (рис. 4). При проходженні струму в протилежному напрямку робочий спай термопар нагрівався. При цьому напрямком струму I , необхідний для спостереження ефекту охолодження робочого спаю термопар (рис. 4), збігався з напрямком

струму, що виникає в замкненому колі термопари при нагріванні її робочого спаю. Цей збіг не був випадковим, він пояснюється принципом Ле-Шательє – Брауна, згідно з яким струм I , викликаний нагріванням робочого спаю термопари, викликає охолодження цього спаю [22].

Закон Джоуля – Ленца. В 1842 – 1843 Ленц провів серію експериментів по вивченню теплової дії електричного струму (6, табл. 1). Досліди проводилися з мідним, залізним, платиновим й нейзильберовим дротом на установці (рис. 6). Результатом цієї роботи стала стаття: «Про закони виділення тепла гальванічним струмом», у якій Ленц виклав встановлений ним закон теплової дії струму [15]. Згідно із цим законом:

1. «Нагрівання дроту гальванічним струмом пропорційне опору дроту».
2. «Нагрівання дроту гальванічним струмом пропорційне квадрату величини струму для нагрівання». ([15], с. 441).
3. «При найвигіднішому для виділення тепла обладнанні опір дроту, що нагрівається, R повинен бути рівним опору гальванічної батареї r », що становить $\frac{1}{2}$ від повного опору ланцюга. («Виділення тепла в дротах». Повідомлено 11 серпня 1843 р., с. 443).

$$R = r = \frac{1}{2}(R + r). \quad (1)$$

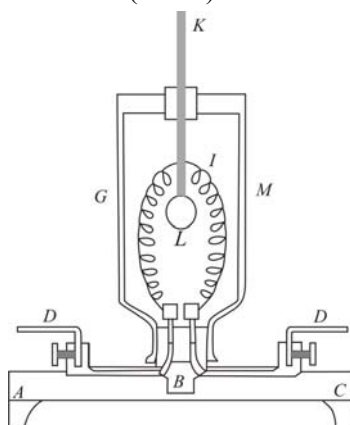


Рис. 6. Установка Ленца для дослідження виділення тепла в дротах.

A, B, C – деталі основи; D – струмопідводи (Pt);

GM – скляна колба з спиртом; KL – ртутний термометр;

I – досліджуваний дріт. Живлення установки здійснювалось від батареї Даніеля (24 пари) через Вольт-агометр (реостат) [15].

Висновки Ленца 1 і 2 по тепловій дії струму були вже відомі науковій громадськості, до них в 1841 прийшов англійський фізик Д. П. Джоуль (1818 – 1889) [8, 10]. Ці висновки Джоуля Ленц підтвердив з високою точністю. Із цієї причини закон теплової дії струму має ім'я обох учених [15]. У свою чергу, висновок 3 і співвідношення (1), отримані Ленцем при дослідженні виділення тепла в дротах, були найвищою мірою оригінальними [10]. Ленц припустив, що правило ($\frac{1}{2}$) (1) носить універсальний характер і його «можна довести для всієї області гальванізму» ([15], с. 443).

Пізніше було встановлено, що правило ($\frac{1}{2}$) (1) пов'язане з екстремальними принципами термодинаміки, що визначають максимальну корисну потужність W_{\max} , яку можна одержати від джерела струму в замкнутому електричному колі (рис. 7) [22]. В [23 – 24] правило Ленца ($\frac{1}{2}$) було узагальнено на теплові кола ($\Psi = \zeta_i / \zeta_j = 1$, тут ζ і ζ_i – опір теплового навантаження й внутрішній опір джерела тепла), а в роботах [20 – 21] – одночасно на електричні й теплові кола

термоелектричних генераторів (ТЕГ). Було показано, що при роботі ТЕГ у режимі максимальної потужності (W_{\max}) оптимальні співвідношення їх електричних і теплових опорів можуть суттєво відхилятися від правила Ленца ($1/2$) - ($R/r \geq 1, \zeta / \zeta_i \geq 1$) (тут $\zeta_i = \zeta_u + \zeta_{sm} + \zeta_{xm}$) через їхню взаємодію один з одним. У результаті й електричні, і теплові параметри ТЕГ вимагають додаткової оптимізації. При цьому в оптимізованому режимі W_{\max} у ТЕГ зберігаються два інваріанти правила Ленца: $U^{xx}/2$ і $\Delta T^{xx}/2$ – перепади напруги й температури на вітках термопар, відповідні до режиму х.х. ТЕГ.⁷ Застосування узагальненого правила Ленца до автомобільних термоелектричних генераторів (АТЕГ) дозволило зв'язати їхню низьку ефективність із труднощами теплообміну на границі «вихлопні гази / АТЕГ» [25].

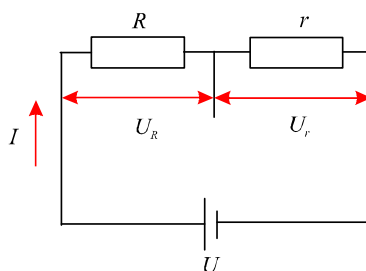


Рис.7. Електрична схема, що ілюструє застосування правила Ленца ($1/2$) до замкнутих кіл, що працюють в режимі максимальної потужності:
 $R = r, U_R = U_r = U / 2$. Тут: U і r – ЕРС і внутрішній опір джерела струму, R – опір навантаження.

Таблиця 4

Розрахунки параметрів ТЕГ у різних режимах без врахування (I) і з врахування (II) теплового правила Ленца ($1/2$) [24, 25]⁸

№	Режим	$\Delta T'$	$M = R/r$	U_R	I	W
I	Х. х.	ΔT	∞	U	0	0
	К. з.	ΔT	0	0	U/r	0
	W_{\max}	ΔT	1	$U/2$	$U/(2r)$	$U^2/(4r)$
II	Х. х.	$\Delta T_{xx} = 1/2 \Delta T$	∞	U	0	0
	К. з.	$\Delta T_{xx}/A$	0	0	U/r	0
	W_{\max}	$1/2 \Delta T$	$A = \Psi = M_0$	$U/2$	$U/(2r M_0)$	$(U)^2/(4r M_0)$

Реакція якоря електромагнітних машин. Особливе місце в науковій діяльності Е.Х. Ленца займало співробітництво з академіком Б.С. Якобі, результатом якого стала їхня

⁷ Режими роботи ТЕГ: 1) «короткого замикання» (к.з.) ($R = 0$); 2) «холостого ходу» (х.х.) ($R = \infty$); 3) «максимальна птужність» W_{\max} ($R = r$); 4) максимальний ККД $\eta_{\max} = (W/Q_g)_{\max}$ (тут W – корисна потужність, Q_g – вхідний тепловий потік ТЕГ).

⁸ Розрахунки виконані для $(Z \bar{T}) = 1$, де Z – термоелектрична добротність ТЕГ; $\bar{M}_0 = (1 + Z \bar{T})^{1/2}$; $\bar{T} = (T_2 + T_x)/2$; $\Delta T = T_2 - T_x$; T_2 і T_x – температура горячого і холодних спаїв; $r = \Sigma r_k$, r – повний електричний опір ТЕГ (віток, контактів і арматури); U і U_R загальна напруга в колі і його частина, падаюча на навантаженні; $A = 1 + Z T_2 (\zeta_u + \zeta_{sm})/\zeta + Z T_x \zeta_{xm}/\zeta$; $\zeta = \zeta_u + \zeta_{sm} + \zeta_{sm} + \zeta_{xm}$ – повний тепловий опір ТЕГ; $\zeta_u, \zeta_{sm}, \zeta_{xm}$ і ζ_{sm} – горячого і холодного теплообмінників і напівпровідникових віток ТЕГ, і нагрівача, $\Psi = \zeta_{sm}/\zeta_i$; $\zeta = (\zeta_u + \zeta_{sm} + \zeta_{xm})$ – тепловий опір джерела тепла і теплопереходів.

спільна робота « Про закони електромагнітів» (1838 – 1844), де викладені методи розрахунків електромагнітів в електричних машинах (6, табл. 1) [15]. Працюючи разом, учені встановили існування в магнітоелектричних машинах так званого «ефекту реакції якоря» (ЕРЯ). Причиною ЕРЯ було явище електромагнітної індукції, що виникає при розмиканні колектора електричного генератора [15]. У результаті дії ЕРЯ струм, вироблюваний генератором, виявлявся нестабільним, що робило генератори мало придатними для цілей гальванопластики, що активно розвивалась в той час Б.С. Якобі. Для боротьби з ЕРЯ Ленц і Якобі запропонували зрушувати щітки генератора відносно центру пластин колектора. Це дозволило суттєво знизити перешкоди й наблизити вироблюваний струм до постійного струму [15].

Досліди по поляризації електродів гальванічних елементів. До 70- х років ХІХ століття найпоширенішими джерелами струму при фізичних дослідженнях були гальванічні елементи, що відрізняються своєю нестабільністю. Причина нестабільності була довгий час незрозумілою сучасникам. Дійсно, з одного боку, у результаті хімічної реакції на клемах розімкнутого ГЕ встановлювалася напруга $U \sim 1$ В, яка залишалася постійною протягом тривалого часу. Однак, при замиканні кола ГЕ на зовнішнє навантаження величина ЕРС E швидко зменшувалася. Як виявилось, усередині ГЕ починав посилено виділятися водень, що покриває поверхню пластинок шаром пухирців. Цей шар у результаті поляризації пластин зменшував напругу на клемах ГЕ. Було показано, що чим більше розрядний струм, тим сильніше розвивається поляризація й тим швидше зменшується напруга ГЕ. Перший слабко поляризований ГЕ в 1829 запропонував А.С. Беккерель (1788 – 1888) [12]. В 1847 Е.Х. Ленц разом з А.С. Савельєвим продовжили дослідження поляризації ГЕ. Для усунення поляризації було запропоновано вводити в ГЕ речовини – деполяризатори, здатні поглинати водень. Зараз деполяризатори – обов'язкові компоненти всіх хімічних джерел струму.

Висновок

Академік Е.Х. Ленц вважається одним з найвидатніших російських учених ХІХ століття в області електрики й магнетизму [1, 11]. Найголовніші результати його досліджень викладаються у всіх підручниках фізики [10 – 12]. Успіхи Е.Х. Ленца в наукових дослідженнях визначалися рядом факторів. Це високий рівень теоретичної підготовки в комбінації з експериментальною майстерністю, а також педагогічний талант, що дозволяв Ленцу викладати свої роботи в гранично короткій і зрозумілій формі. Ленц не був ученим – одинаком, до своїх робіт він залучав співробітників Фізичного кабінету, професорів Університету (А.С. Савельєва й ін.), академіків СПб АН (Є.І. Паррота, Б.С. Якобі й ін.) [1, 11, 12].

У процесі роботи Ленц концентрував зусилля на вузькій області досліджень, що дозволяло йому глибоко проникати в суть досліджуваної проблеми. У підсумку багато результатів його досліджень носили характер наукових відкриттів, безсумнівний пріоритет яких визнавався не тільки в Росії, але й за кордоном [8, 10, 11]. Велику кількість друзів і шанувальників свого наукового таланта Ленца мав у Німеччині, де він друкував свої наукові статті в журналі «Анали фізики й хімії», видаваному в Берліні академіком Берлінської АН (1839) і іноземним членом СПб АН (1868) І.Х. Поггендорфом (1796 – 1877) [12, 15].

Будучи прекрасним педагогом, Е.Х. Ленц виховав велику кількість учнів, що працювали у різноманітних галузях науки. Найбільш відомі серед них – хімік Д.І. Менделєєв (1834 – 1907), натураліст К.А. Тімірязєв (1843- 1920), географ і ботанік Н.Н. Семенов - Тянь-Шанський (1824- 1914) і ін. [12, 15]. У додатку 1 наведені роботи двох учнів Е.Х. Ленца – Р.Е. Ленца

(сина) і М.П. Авенаріуса, що продовжили дослідження свого вчителя в області термоелектрики [9, 17]⁹.

Додаток 1

Учні й послідовники Е.Х. Ленца в області термоелектрики

Р.Е. Ленц (син) (рис. 8) провів високоточні дослідження впливу температури на теплопровідність металів (1869) [3, 9]. В 1883 він показав можливість використання термопар для дистанційного вимірювання температур на великих відстанях (до 5 км). Досліди проводилися із дрововими термопарами Fe/ Ag, точність вимірювання різниці температури становила ~ 0.01 К. У цей час аналогічний метод застосовується, наприклад, для дистанційного вимірювання температур у глибоких шахтах і шпарах. [9]. М.П. Авенаріус (рис. 9) в 1863 одержав емпіричним шляхом формулу для ЕРС металевих термопар при великих ΔT [9, 17]:

$$E = (t_2 - t_1)[b + c(t_1 + t_2)] = \alpha(t_2 - t_1) + \beta(t_{22} - t_{12}) \quad (2)$$

Потім він вивів свою формулу теоретично, вважаючи, що ЕРС. E термоелектричного кола визначається тільки контактними різницями потенціалів металів $e = a + bt + ct^2$ на спаях диференційної термопари, що перебувають при різних температурах $t_1 < t_2$. (Тут: $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$, α_p і α_n – коефіцієнти Зеебека термопари й віток p - і n - типів провідності, b, c, β - коефіцієнти, різні для різних матеріалів).



Рис. 8. Ленц Роберт Еміль (1833 – 1903) – фізик, син Е.Х. Ленца. Закінчив СПб університет, читав фізику в технологічному інституті і університеті. Ступінь магістра фізики отримав за дисертацію "Про магнітні аномалії в Фінській затоці" (1862), ступінь доктора – за "Дослідження про вплив температури на теплопровідність металів" (1869). Член-кореспондент СПб АН (1876). У 1889 призначений керуючим експедицією заготовлення державних паперів. (Офіційний портрет РАН [3]).

⁹ Восени 1864 р. у Е.Х. Ленца різко погіршився зір. Для лікування він поїхав до Риму. Зір почав відновлюватися і Е.Х. Ленц вже міг читати і писати. Але 10 лютого 1865 р. вчений раптово помер від крововилив у мозок. Він похований на одному з лютеранських кладовищ у Римі [15].

Пізніше у своїй роботі « Про електробуджуючу силу термоелектричних елементів з погляду механічної теорії тепла» Авенаріус при виведенні формули (2) урахував ефект Томсона у вітках термопар [17]. На необхідність такого врахування першим звернув увагу (1874) П.Т. Тет (1831 – 1901) – професор Королівського коледжу в Белфасті (1854 – 1860).



Рис. 9. Авенаріус Михайло Петрович (1835, Царське Село – 1895 Київ), фізик, в 1858 закінчив СПб університет. У 1862 – 1864 стажувався у Магнуса в Берліні і Кірхгоффа в Гейдельберзі. У 1865 захистив магістерську дисертацію: "Про термоелектрику" і був призначений на кафедру фізики в Київський університет. У 1866 захистив докторську дисертацію: "Про електричні різниці металів при різних температурах". Член-кореспондент СПб АН (1876). Засновник київської школи фізиків [12,17]. (Офіційний портрет РАН [3]).

Згідно з формулою Авенаріуса (2), залежно від величини й знака коефіцієнта β термопар, спостерігаються температурні залежності $E = f(T)$ трьох типів. При $\beta = 0$ з виразу (2) одержуємо лінійну залежність $E = \alpha(t_2 - t_1)$ (закон А.С. Беккереля (1788 – 1878)) (приклад – термопари $Ni, Ir, Au - Fe$ поблизу кімнатної температури). При $\beta > 0$ для залежності $E = f(T)$ маємо « J » – образну криву (приклад – термопари нейзільбер – залізо), а при $\beta < 0$ – « \cap » - образну криву з максимумом при температурі t_m , і зі зміною знака E в області високих температур (термопари $Cu-Fe, Mo-Fe$ і ін.). В останньому випадку формула (2) могла бути перетворена у вираз $E = \alpha(t_2 - t_1)[t_m - (t_2 + t_1)/2]$, що показує, що при $(t_2 + t_1)/2 \sim t_m$ величина E і напрямок струму I у короткозамкненій термопарі міняють знак.

Перевіркою формули Авенаріуса й визначенням констант у ній займалися багато вчених у різних країнах світу [9, 17]. У підсумку було встановлено, що формула Авенаріуса (2) виконується для більшості термоелектричних кіл в області нормальних і високих температур [9].

Література

1. Вавилов С.В. Физический кабинет. Физическая лаборатория. Физический институт Академии Наук за 220 лет. УФН. 1947. Т.28. №1. С. 1 – 50.
2. Модзалевский Б.Л. Список членов императорской Академии наук (1725 – 1907). СПб: Типография АН. 1908. 404 с.

3. Персональный состав АН СССР (1724-1917). Москва. 1974. 480 с.
4. Коржуев М.А., Темяков В.В. Исследования Рихмана и Ломоносова в области термоэлектричества (1745 – 1753). *Термоэлектричество*. 2014. №1. С. 90 – 104.
5. Коржуев М.А., Тихомирова О. Ф., Темяков В.В. Работа сотрудников Физического кабинета Петербургской академии наук по исследованию термоэлектрических эффектов в различных диэлектрических средах. Ч. I – Старт и выход на «мировой уровень». *В сб.: Термоэлектрики и их применения*. Под ред. М.И. Федорова, Л.Н. Лукьяновой. Санкт-Петербург. 2015. С. 535 – 540.
6. Коржуев М.А., Тихомирова О. Ф., Темяков В.В. Работа сотрудников Физического кабинета Петербургской академии наук по исследованию термоэлектрических эффектов в различных диэлектрических средах. Ч. II – На «переднем фронте» науки. *В сб.: Термоэлектрики и их применения*. Под ред. М.И. Федорова, Л.Н. Лукьяновой. Санкт-Петербург. 2015. С. 541 – 546.
7. Коржуев М.А., Тихомирова О. Ф., Темяков В.В. Работа сотрудников Физического кабинета Петербургской академии наук по исследованию термоэлектрических эффектов в различных диэлектрических средах. Ч. III – Период застоя» и новый подъем. *В сб.: Термоэлектрики и их применения*. Под ред. М.И. Федорова, Л.Н. Лукьяновой. Санкт-Петербург. 2015. С. 547- 552.
8. Лауэ М. История физики. Москва. 1956. 232 с.
9. Буряк А.А., Карпова Н.Б. Очерки развития термоэлектричества. Киев. 1988. 290 с.
10. Льюис М. История физики. Москва. 1970. 464 с.
11. Люди русской науки. Под ред. И.В. Кузнецова. Москва. 1961. 600 с.
12. Храмов Ю.А. Физики. Библиографический справочник. Москва. 1983. 400 с.
13. Коржуев М.А., Катин И.В. О последовательности открытия основных термоэлектрических явлений. *Термоэлектричество*. 2011. №3. С. 79 – 90.
14. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Москва. Т. I. 1947. 848 с. Т. II. 1951. 539 с. Т. III. 1959. 831 с.
15. Ленц Э.Х. Избранные труды. М.: АН СССР. 1950. 521 с.
16. Электрический опыт г. академика Ленца. Замораживание воды посредством гальванической струи. *Библиотека для чтения*. СПб: Изд. А Смирдина. 1838. Т. 28. Раздел «Науки и художества». С. 44 – 48.
17. Гольдман А.Г. Михаил Петрович Авенариус и киевская школа экспериментальной физики *УФН*. 1951. Т. 44. №4. С. 586 – 609.
18. Коцебу О.Е. Новое путешествие вокруг света в 1823. 26 г. Москва. 1981. 352 с.
19. Григорьев И.С., Мейликов Е.З. Физические свойства материалов. Москва. 1991. 1232 с.
20. Анатъчук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев. 1979 767 с.
21. Перельман В.И. Краткий справочник химика. Москва. «Химия». 1964. 623 с.
22. Базаров И. П. Термодинамика. Москва 1991. 292 с.
23. Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. Москва. 1948. 268 с.
24. Коржуев М.А. Правило Ленца для термоэлектрических преобразователей энергии, работающих в режиме максимальной мощности. *В сб.: Термоэлектрики и их применения*. Под ред. М.И. Федорова, Л.Н. Лукьяновой. Санкт-Петербург. 2015. С. 447 – 452.
25. Коржуев М.А., Свечникова Т.Е. Термодинамические ограничения полезной мощности автомобильных термоэлектрических генераторов и перспективы их использования на транспорте. *Термоэлектричество*. 2013. №3. С. 58 – 75.

Надійшла до редакції 20.02.2017