

## АНАТИЧУК

Лук'ян Іванович — академік НАН України, директор Інституту термоелектрики НАН України та МОН України, президент Міжнародної термоелектричної академії

## ПРО ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ В УКРАЇНІ

За матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 28 вересня 2016 року

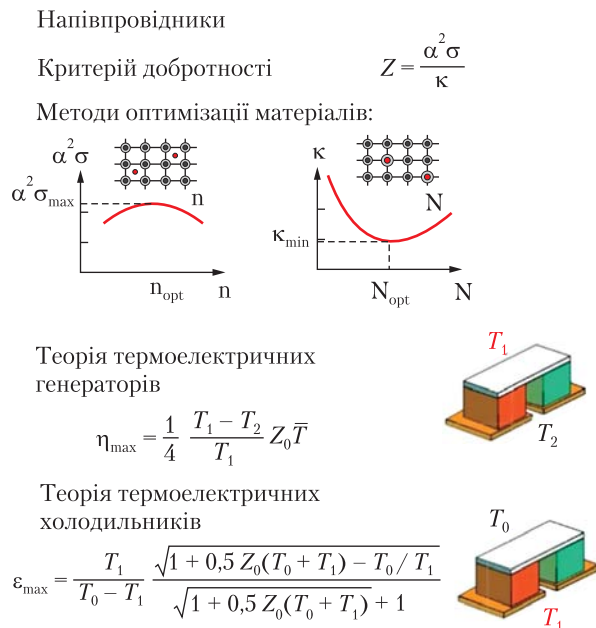
*У доповіді проаналізовано розвиток термоелектрики в Україні та вітчизняні наукові здобутки з цього напрямку. Висвітлено роль українських учених у міжнародній науково-організаційній діяльності з термоелектрики. Наведено опис нових підходів теорії термоелектричного перетворення енергії і термоелектричного матеріалознавства, розглянуто ефективність їх реалізації у практичних застосуваннях термоелектрики, насамперед у приладобудуванні, енергетиці, енергозбереженні, медицині.*

**Ключові слова:** термоелектрика, коефіцієнт корисної дії, генератор, кондиціонер, електропровідність, термоЕРС, теплопровідність.

Термоелектрика є пріоритетним напрямом науки і техніки, що інтенсивно розвивається. Термоелектричні прилади широко використовуються в космічній та оборонній техніці, засобах волоконного та радіозв'язку, різноманітних засобах комп'ютерної техніки, у метрології та вимірювальній техніці, спеціальних кондиціонерах. Все ширшим стає використання термоелектрики у медицині та різноманітній побутовій техніці. Завдяки відсутності рухомих частин термоелектричній апаратурі властиві висока надійність, стійкість до механічних перевантажень та тривалий ресурс роботи.

Властивістю термоелектрики є її використання у напрямках, що формують науково-технічний прогрес, тому вона розвивається передусім у провідних країнах світу.

Термоелектрика заснована на прямому, безмашинному перетворенні теплової енергії на електричну і на зворотному явищі отримання охолодження від дії електричної енергії. Ці явища реалізуються у відомих термоелектричних ефектах Зеебека і Пельтьє, відкритих ще на початку XVIII ст. Однак широке практичне використання термоелектричних ефектів знайшли тільки починаючи з другої половини XX ст. завдяки науковим та технологічним досягненням, отриманим насамперед школою академіка Абрама Федоровича Йоффе, уродженця України.



**Рис. 1.** Важливі досягнення А.Ф. Йоффе:  $Z$  – критерій Йоффе;  $\alpha$  – електрорушійна сила;  $\sigma$  – електропровідність;  $\kappa$  – теплопровідність;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії;  $\varepsilon$  – холодильний коефіцієнт;  $n$  – концентрація носіїв струму;  $N$  – концентрація ізовалентних домішок

А.Ф. Йоффе народився у м. Ромни Сумської області, там здобув середню освіту. Був учнем Рентгена, створив і очолив відомий Фізико-технічний інститут, що носить його ім'я. В останнє десятиріччя своєї діяльності у 1954 р. заснував і очолив Інститут напівпровідників АН СРСР, у якому в основному займалися термоелектрикою. Тут було закладено основи теорії термоелектрики, термоелектричного матеріалознавства, теорії та технології напівпровідникових термоелектричних приладів (рис. 1).

В інституті було встановлено, що для досягнення високої ефективності термоелектричного перетворення енергії слід використовувати напівпровідники. Знайдено критерій добротності термоелектричного матеріалу  $Z$ ; розроблено методи оптимізації матеріалів шляхом легування електроактивними та ізовалентними домішками; знайдено вирази, якими описуються властивості термоелектричних генераторів та холодильників.

Ці результати на десятки років випереджали зарубіжний рівень. Свої досягнення Йоффе опублікував у книгах, що були перекладені кількома мовами і стали широковідомими у багатьох країнах світу [1, 2]. Це істотно сприяло розвитку термоелектрики за кордоном.

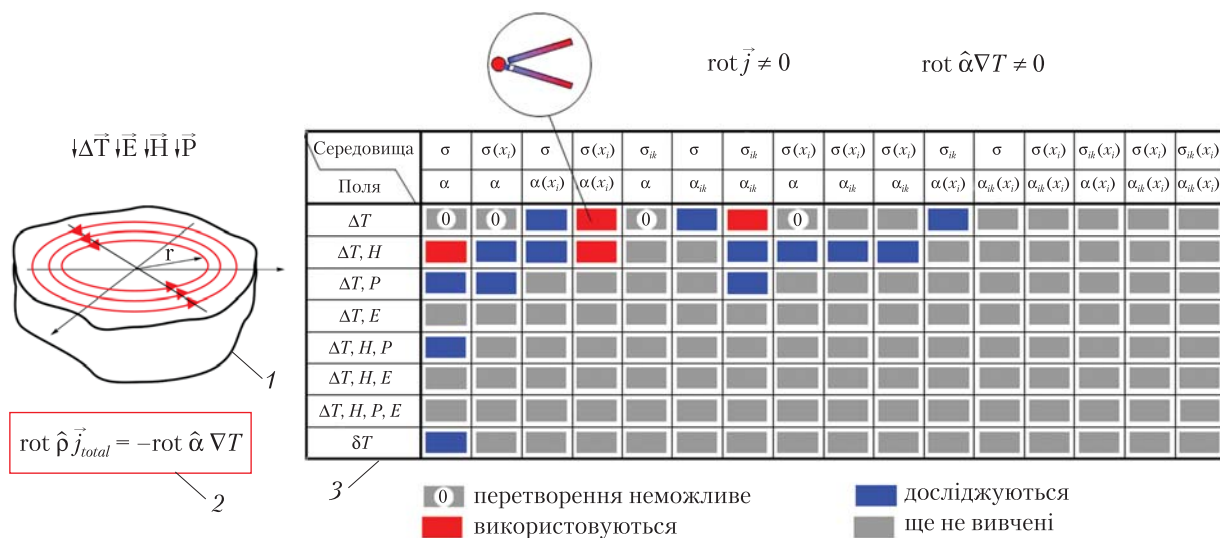
Йоффе сприяв розвитку термоелектрики і в багатьох наукових установах та вишах колишнього Радянського Союзу. Серед них і в організаціях України, насамперед Чернівецькому державному університеті.

Як наслідок, у 1973 р. тут було відкрито першу у світі кафедру термоелектрики. Це було важливо, оскільки термоелектрика виникла на стику різних дисциплін – фізики твердого тіла, термодинаміки, електрофізики, теплофізики, матеріалознавства та ін. Тому для успішного розвитку цього напрямку необхідні були відповідно підготовлені спеціалісти.

Підготовка таких спеціалістів дала свої наслідки. У 1980 р. у Чернівцях було відкрито спеціальне конструкторсько-технологічне бюро термоелектричного приладобудування «Фонон». Воно стрімко розвивалося – чисельність його співробітників досягла приблизно 1000 осіб. КБ «Фонон» стало провідною організацією з термоелектрики в країні. За 10 років у ньому розроблено близько 300 термоелектричних приладів, передусім для оборонної техніки.

Розвитку КБ «Фонон» істотно сприяли Національна академія наук України і особисто її президент академік Борис Євгенович Патон. У 1986 р. було створено секцію термо- та фотоелектричного перетворення енергії НАН України з провідною організацією КБ «Фонон». Секція здійснювала координацію наукової діяльності з відповідних напрямів і сприяла їх розвитку. Завдяки цьому в Україні з'явилося 11 наукових організацій та 13 підприємств, що займалися термоелектрикою. «Центр ваги» в термоелектриці перемістився в Україну.

Слід зауважити, що дослідження з термоелектрики і виробництво термоелектричної продукції збереглися і успішно продовжуються у наш час. Варто відзначити Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова, Національний університет «Львівська полі-



**Рис. 2.** Фрагменти узагальненої теорії термоелектрики: 1 – узагальнена модель термоелектричного перетворення енергії, 2 – закон термоелектричної індукції струмів, 3 – середовища і фізичні поля, що можуть привести до термоелектричного перетворення енергії;  $\Delta T, E, H, P$  – температурне, електричне, магнітне, силове поля,  $\rho$  – електричний опір,  $j$  – густина електричного струму.  $\delta T$  – великий градієнт температури

техніка», НВО «Термоприлад», Луцький приладобудівний завод, НВФ «Модуль», компанію «Терміон».

Незалежність України відкрила нові можливості для розвитку КБ «Фонон». Його було реорганізовано в Інститут термоелектрики подвійного підпорядкування – Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України. Виробнича база КБ «Фонон» реорганізувалася у ТОВ «Алтек-М», яке здійснює впровадження розробок Інституту. Разом з кафедрою термоелектрики Чернівецького національного університету вони створили навчально-науково-виробниче об'єднання «РАПІД». Зарубіжні компанії прагнуть брати участь у цьому об'єднанні. Тому планується його реорганізація у міжнародний термоелектричний центр.

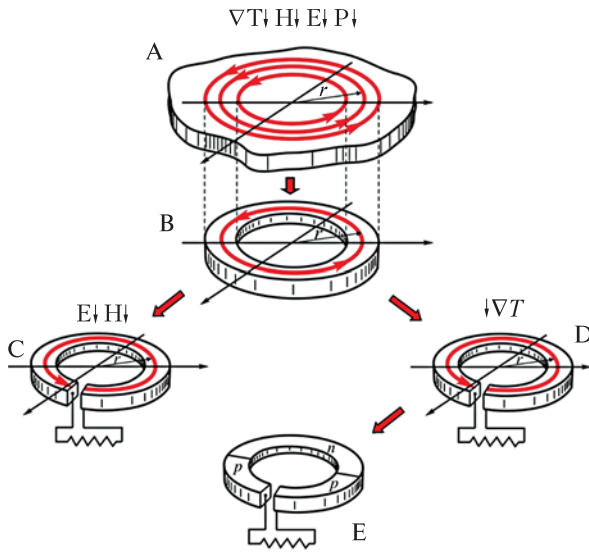
В Інституті термоелектрики були розвинуті фундаментальні та прикладні роботи з феноменологічної та мікроскопічної теорії термоелектрики, теорія приладів, комп'ютерні технології та різні напрями термоелектричного матеріалознавства.

Серед них відкриття закону термоелектричної індукції струмів (рис. 2), що дозволило

по-новому описати явища термоелектричного перетворення енергії і класифікувати всі випадки, при яких таке перетворення може мати місце. Вони наведені у таблиці. Видно, що з 128 варіантів можливостей термоелектричного перетворення енергії зараз на практиці використовуються лише 4, ще 14 досліджуються. Решта, що мають найбільші функціональні можливості і, отже, найбільшу перспективу для практичного використання, ще не досліджувалися. Звідси випливає, що термоелектрика знаходиться ще на початкових етапах свого розвитку. З таблиці видно, що термопара, на якій заснована сучасна термоелектрика, займає тільки одну позицію серед можливостей термоелектричного перетворення енергії [3].

Була розроблена і методика винайдення нових типів термоелементів, заснована на індукції термоелектричних струмів (рис. 3).

Використовуючи цю методику та комп'ютерні методи досліджень, було винайдено понад 20 нових типів термоелементів, відмінних від термопар [4]. Вони запатентовані у провідних країнах світу. Серед них особливо привабливими є спіральні термоелементи, що розвивають



**Рис. 3.** Методика винайдення нових типів термоелементів: А – середовище, в якому збуджено вихрові термоелектричні струми; В – контур з вихровим струмом; С – електромагнітний перетворювач енергії; D – термоелектричний перетворювач енергії; Е – термопара як частковий випадок термоелектричного перетворювача енергії

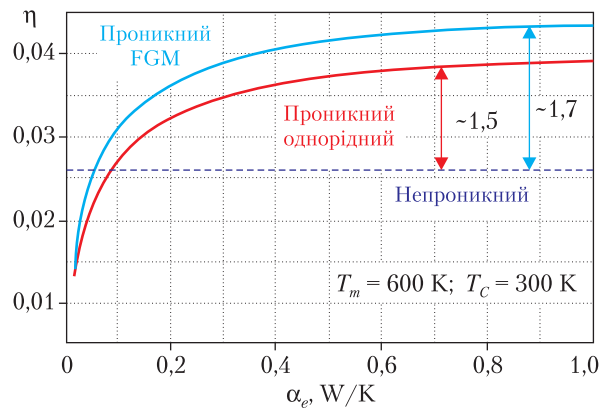
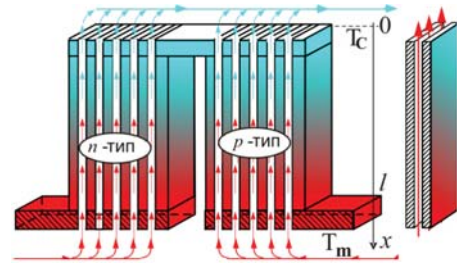


**Рис. 4.** Мікрокалориметр для визначення деградації вибухових речовин

підвищені електричні напруги і є сенсорами теплових потоків підвищеної чутливості. З їх використанням створено надчутливі мікрокалориметри з широким спектром застосування (рис. 4). Знайдено проникні термоелементи, якими досягається підвищення ККД у 1,5–1,7

рази (рис. 5). Розроблено теорію та технологію принципово нових функціонально-градієнтних матеріалів [5], що покращують ефективність термоелементів у 1,1–1,6 рази (рис. 6).

Розроблено комп’ютерні технології оптимізації конструкцій термоелектричних приладів



**Рис. 5.** Модель проникного термоелемента та зростання його ККД

та моделювання їх роботи (рис. 7). Ними здійснюється взаємозв’язаний комп’ютерний опис властивостей термоелектричного матеріалу, виходячи з його структури, процесів перетворення енергії у термоелементах, оптимізація їх конструкцій у термобатареях з урахуванням конструкцій теплообмінників і властивостей джерел тепла. Комп’ютерні програми, що постійно нарощуються, формують бібліотеку, яка розширює можливості оптимального проектування термоелектричної апаратури.

Розроблено теорію термогенераторів для утилізації відходів тепла. На відміну від класичних перетворювачів енергії, де найбільш вагомим фактором їх якості є коефіцієнт корисної дії, у генераторах для утилізації відходів тепла на перше місце стає коефіцієнт окупності

$$K = \frac{mN}{S_0} > 1,$$

де  $m$  – вартість промислової електричної енергії,  $N$  – термін експлуатації,  $S_0$  – питома

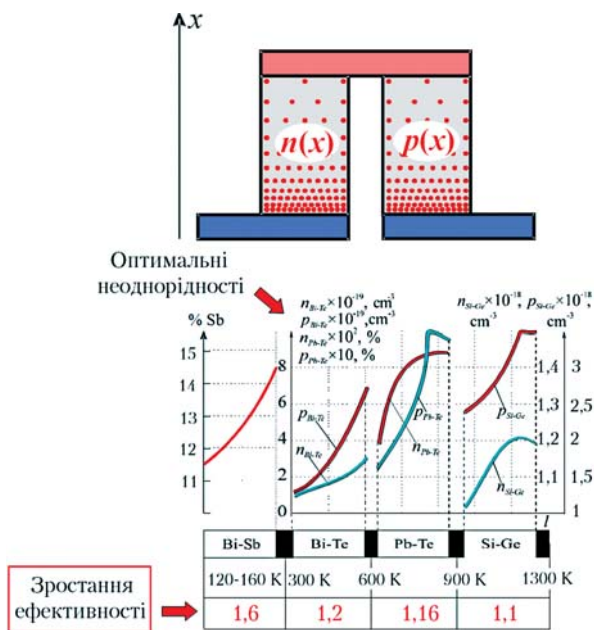


Рис. 6. Термоелемент з функціонально-градієнтних матеріалів

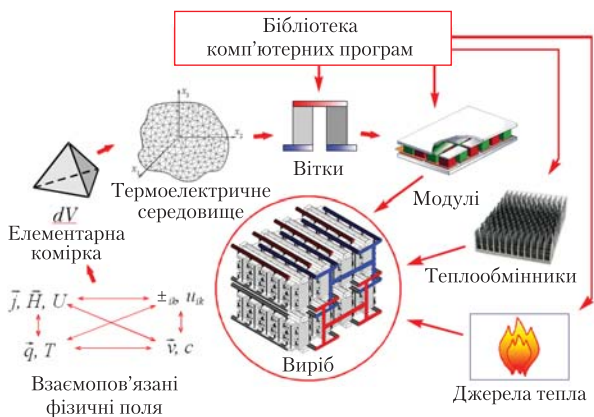


Рис. 7. Комп'ютерні технології у термоелектриці

вартість генератора. Використання термоелектричних генераторів у цьому випадку має сенс при  $K > 1$ . Підтверджено доцільність використання таких генераторів для утилізації промислових теплових відходів та відходів від теплових машин.

На рис. 8 представлено термогенератор для утилізації тепла від дизельного двигуна електростанції потужністю 50 кВт. При пито-

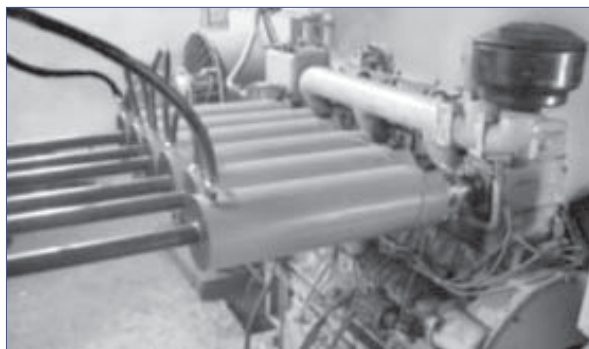


Рис. 8. Зовнішній вигляд дизельного двигуна з термоелектричним генератором для використання теплових відходів, розробленого в Інституті термоелектрики



Рис. 9. Термоелектрична медична апаратура: прилад для вимірювання температури крові у судинах (1) та всередині ока (2); прилади для лікування захворювань шкіри (3); діагностики онкозахворювань молочної залози (4); діагностики хребцевих запальних процесів (5)

вій вартості термогенератора 3 \$/Вт і середній вартості електроенергії в Європі 0,25 \$/кВт·год генератор окуповується за ~2 роки і дає можливість отримувати прибуток близько 3 000 \$ на рік.

За дорученням президента НАН України Б.С. Патона та згідно з постановою Президії Національної академії наук України № 233 від 29.10.2014 «Щодо використання в медицині



**Рис. 10.** Міжнародна конференція, присвячена А. Вольта, на його батьківщині в м. Комо, Італія. 12–16 липня 2005 р.



**Рис. 11.** Відкриття пам'ятника Томасу Йогану Зесбеку на XV Міжнародному форумі з термоелектрики. Таллінн, 20–24 травня 2013 р.



**Рис. 12.** Пам'ятник Жану Шарлю Пельтьє, встановлений на його батьківщині в м. Ам під час XVI Міжнародного форуму з термоелектрики. Париж, 18–22 травня 2015 р.

розробок у галузі термоелектрики» вивчено можливості використання термоелектрики у ряді провідних медичних центрів України. Знайдено близько 60 актуальних застосувань. Частина приладів уже розроблено. Серед них: термоелектричний прилад для вимірювання температури крові у судинах та всередині ока, багатоканальний прилад для діагностики онкозахворювань молочної залози, прилад для лікування захворювань шкіри, прилад для діагностики хребцевих запальних процесів та ін. (рис. 9).

Інститут веде інтенсивну міжнародну діяльність. Були організовані виїзні виставки досягнень Інституту у провідних країнах світу, насамперед у США та Японії. Вони підтвердили високий науковий і технологічний рівень досягнень Інституту, який відповідає міжнародному, а в багатьох випадках його перевершує. Це сприяло залученню Інституту до різних престижних наукових програм та дослідних тем.

Серед них програма з освоєння Місяця. Важливим результатом цієї програми є досягнення ККД 45% сонячних генераторів в умовах Місяця, з яких близько 20% припадає на термоелектричний перетворювач енергії, а 25% – на термоіонний. Такі результати є перспективними для використання і в земних умовах. Інститут протягом 8 років забезпечує космічні програми Євросоюзу системами охолодження для орієнтації супутників по зірках. Вони встановлені на багатьох космічних апаратах. Особливо приємно, що такі прилади функціонують на міжпланетній станції, що летить до поясу астероїдів для передбачення можливостей зіткнень астероїдів з Землею. Разом з НТУУ «Київський політехнічний інститут» розроблено апарат очистки води для космонавтів у рамках програми польоту на Марс. Ведуться спільні роботи зі створення SPS-термоелектричних матеріалів та модулів на їх основі з компаніями LG та Samsung. Спільно з компаніями Daimler Benz і Bosch здійснюються розробки, спрямовані на використання відходів тепла від автомобілів. Разом з тайванським дослідним центром ITRI розробляються рекуператори для використання промислових

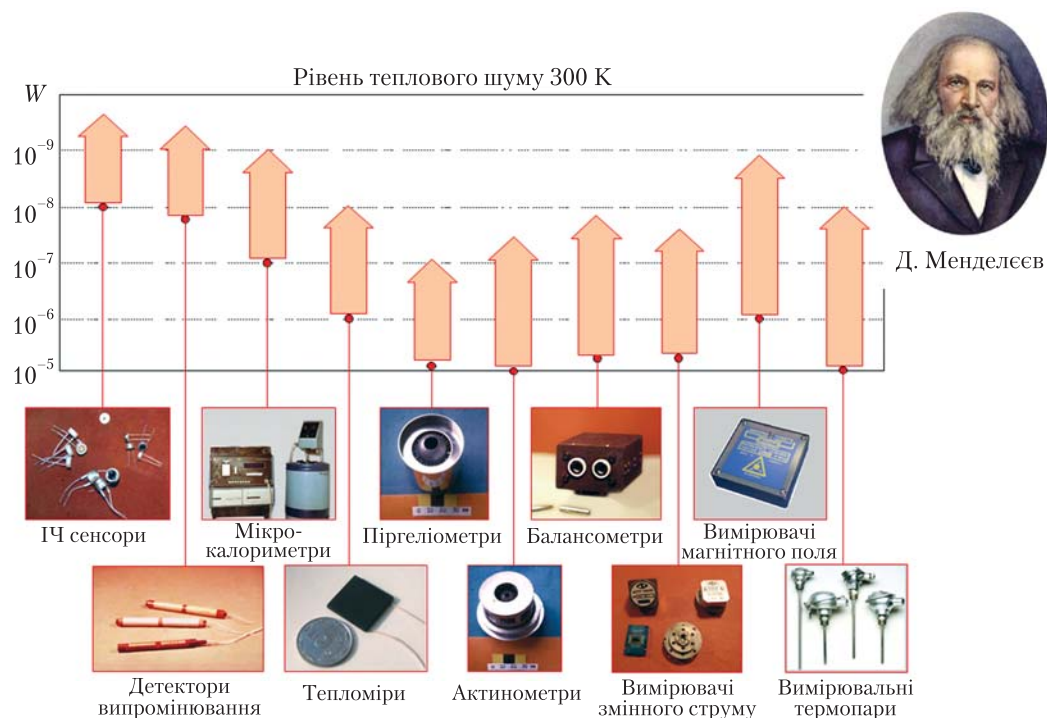


Рис. 13. Можливості зростання інформативності термоелектричної вимірювальної апаратури

теплових відходів. Фахівці Інституту брали участь у розробці кондиціонера для французьких атомних підводних човнів.

За ініціативою Інституту у 1994 р. було створено Міжнародну термоелектричну академію (МТА). Мета академії – об'єднання провідних фахівців світу з термоелектрики для концентрації їх потенціалу на вирішенні пріоритетних задач термоелектрики. За більш ніж 20 років існування МТА кількість її членів зросла з 14 до 98, а географія на сьогодні охоплює 25 країн світу. Президентом МТА незмінно обирається директор Інституту термоелектрики.

Міжнародна термоелектрична академія зареєстрована в Міністерстві юстиції України, що утверджує статус України як провідної країни з термоелектрики у світі.

МТА разом з Інститутом термоелектрики проводить міжнародні форуми, де значна увага приділяється виробленню рекомендацій щодо актуальних напрямів розвитку термоелектрики. МТА заснувала Почесний міжнародний золотий приз за досягнення у термоелектриці.

Сьогодні це найвища нагорода за видатні досягнення у термоелектриці окремих осіб та організацій.

Важливим у діяльності Міжнародної термоелектричної академії є утвердження пріоритетів та увіковічнення пам'яті видатних вчених з термоелектрики (рис. 10–12). Так, науковцями МТА було встановлено, що першовідкривачем термоелектрики є Алессандро Вольта. З цієї нагоди проведено міжнародну конференцію на його батьківщині і встановлено меморіальну дошку у Пантеоні Вольта. XV Міжнародний форум з термоелектрики був присвячений Томасу Йоганну Зеєбеку і проведений у м. Галлінні. Там йому було встановлено пам'ятник. XVI Міжнародний форум, проведений у Парижі, був присвячений Жану Шарлю Пельтьє. Пам'ятник йому було встановлено на його батьківщині в м. Ам у 100 км від Парижа.

На форумах активно обговорюються проекти, спрямовані на глобальне використання термоелектрики. Так, з розгляду енергетичних проблем людства зроблено висновок, що ви-

користання термоелектричних рекуператорів на теплових електростанціях може дати електричну енергію, зіставну з енергією, що виробляється всіма атомними електростанціями. Це формує нові погляди як на майбутнє використання термоелектрики, так і на майбутнє атомних електростанцій.

Надихають можливості термоелектрики у використанні тепла океану для отримання електричної енергії. Цей напрям розглядається як альтернатива сонячним електростанціям. Є важливою і та обставина, що темпи виробництва енергії, як електричної, так і теплової, зростають всього на 8% кожні 2 роки, а інформації — на 100%. Це дає можливість прогнозувати зростаючу роль інформаційних термоелектричних систем, а термоелектрика має у цьому великі резерви. Інформативність термоелектричних вимірювальних сенсорів може бути покращена на 1–2 порядки (рис. 13). Менделєєв, який за професією був

метрологом, стверджував, що зростання якості вимірювальної апаратури на 1 порядок дає підстави чекати нових відкриттів у науці. І це також надихає спеціалістів з термоелектрики на реалізацію цих можливостей.

В Інституті накопичено значний потенціал для впровадження термоелектричних приладів. Розроблено близько 50 зразків термоелектричної продукції, отримано 230 патентів. Орієнтовний очікуваний об'єм випуску термоелектричної продукції становить близько 500–1000 млн грн на рік. Найважливіша проблема — кадри. Їх потреба оцінюється у 30–40 молодих спеціалістів на рік. Кафедра термоелектрики щороку збільшує набір на перший курс. При плані 15 осіб у 2014 р. прийнято 18, у 2015 — 25, у 2016 — 28. Однак ці заходи не є достатніми. Для забезпечення потреби у кадрах планується створення школи-інтернату для обдарованих дітей з професійною орієнтацією з термоелектрики.

## REFERENCES

1. Ioffe A.F. Semiconductor Thermoelements. (Moscow, Leningrad: AN SSSR, 1956).
2. Ioffe A.F. Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling. (London, 1957).
3. Anatyshuk L.I. Thermoelectricity. Vol. I. Physics of Thermoelectricity. (Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 1998).
4. Anatyshuk L.I. Thermoelectricity. Vol. II. Thermoelectric energy converters. (Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2005).
5. Anatyshuk L.I., Vykhov L.M. Functionally Graded Thermoelectric Materials. Vol. IV (Chernivtsi, 2012).

*L.I. Anatyshuk*

Institute of Thermoelectricity of National Academy of Sciences of Ukraine (Chernivtsi)

## ON THE DEVELOPMENT OF THERMOELECTRICITY IN UKRAINE

The report provides the analysis of the development of thermoelectricity and the contribution made by the national scientific achievements to this trend. The role the Ukrainian scientists play in the international scientific and organizational activity in the field of thermoelectricity is highlighted. The description of novel approaches to the theory of thermoelectric energy conversion and thermoelectric material science is presented as well as the efficiency of their implementation into practical applications of thermoelectricity with such priorities as instrument engineering, power engineering, energy saving and medicine.

**Keywords:** thermoelectricity, efficiency, generator, conditioner, electric conductivity, thermo-EMF, thermal conductivity.