

---

## КОМБІНУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЕНЕРГІЇ ЯК МЕТОД ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ СУЧАСНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

*Молодик А.В., Смоляр Г.А., Лозбін Д.В.  
(Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал»,  
вул. Московська, 8, Київ, 01010, Україна)*

---

- *Позитивний досвід забезпечення необхідних теплових режимів приладів широкого спектра застосування в реальних умовах експлуатації виробів спеціального, медичного й енергетичного призначення, досягнутий застосуванням комбінованих СОТ із вбудованими ТЕП, підтверджує перспективність їх застосування. Невисокі значення ступеня термодинамічної досконалості пристроїв на основі ефектів Пельтьє – Зеєбека, Ранка-Хіша й Джоуля-Томсона з успіхом компенсуються високими значеннями їх експлуатаційних характеристик, можливістю введення в різні приладові й схемні розв'язки. У найближчих планах підприємства передбачено застосування ТЕП для термостабілізації мікроболометричних матриць, а також використання в розробках еталонних джерел ІЧ-випромінювання для тепловізійних приладів. Ефективність впровадження комбінованих СОТ до складу створюваних виробів значною мірою визначається рівнем кваліфікації розробників, ступенем володіння сучасними досягненнями техніки й технологій. Застосування ТЕП як складової частини розроблювального виробу припускає можливість застосування штатних джерел електроживлення або створення спеціальних електроперетворювачів для конкретних унікальних термоелектричних модулів. Вважаємо необхідним підтримати рішення керівництва НАНУ про поновлення й розширення практики науково-технічних галузевих нарад фахівців-теплотехніків.*

### **Вступ**

Мета пропонованої праці – на прикладі розробок підприємства в області ІЧ-тематики, медичної й енергетичної техніки показати необхідність і перспективність створення комбінованих середньотемпературних і криогенних охолоджувачів, що містять термоелектричні перетворювачі енергії (ТПЕ).

Основний напрямок робіт науково-виробничого комплексу (НПК) №3 – структурного підрозділу КП УПС «Арсенал» – створення виробів ІЧ-техніки спеціальних приймачів, що базуються на застосуванні ІЧ-випромінювань (ПІ), які дистанційно реєструють теплові випромінювання об'єктів спостереження, контрастних у заданому спектральному діапазоні.

Сучасні ПІ найефективніше працюють лише за середньотемпературного або криогенного рівня охолодження чутливих елементів (ЧЕ) приймачів [1]. Як переконливо свідчить багаторічний досвід робіт підприємства, перспективність розроблювального ІЧ-виробу значною мірою визначається успішністю розв'язку техніко-економічних завдань створення й експлуатації спеціальних систем охолодження його ПІ й теплозахист вузлів, критичних до теплових умов.

Фахівцями НПК-3 напрацьовано технічні рішення створення охолодних і термостатуючих пристроїв (далі СОТ) для низки виробів ІЧ-тематики, призначених для застосування в стаціонарних, транспортних і мобільних умовах, а також для виробів медичної й газової галузей. При цьому проектування СОТ для мобільних ІЧ-виробів є найскладнішим комплексним завданням: необхідно забезпечити виконання теплофізичних умов роботи ПІ – складового елемента виробу, експлуатованого в інтенсивних, тривалих висотно-швидкісних

режимах взаємодії зі швидкісним напором потоку повітря (НП), що набігає.

Примітка: Охолоджувальні пристрої середньотемпературного й криогенного рівнів для медичної й газової галузей розроблялися в ініціативному плані.

Аналіз умов експлуатації, а також вимог до енергетичних характеристик, створених ПЧ-виробів, для приладів (пристроїв) медичної й газової галузі промисловості визначає для реалізації сучасних вимог необхідність залучення досягнень широкого спектра трансформаторів енергії, їх комбінування в найбільш раціональних схемах.

Скажімо, для виробів авіаційної техніки й для енергоперетворювачів газової галузі, що характеризуються проблемами теплообміну із НП і можливістю «спрацьовування» енергії потоку газу високого тиску, відповідно, – доцільно й необхідно використовувати комбінування ефектів Ранка-Хілша й Пельтьє-Зеебека.

Для підвищення експлуатаційних характеристик ПЧ-систем спостереження, а також балонних дросельних систем ПЧ-техніки, перспективно застосування ТПЕ з одночасним вирішенням проблем тепловідводу й теплозахисту.

## 2. Базові технічні розв'язки створення спеціальних охолоджувачів, реалізовані фахівцями підприємства

### 2.1. Автономний теплозахист ЧЕ III

У період 1973 – 1975 рр. для виробу ПЧ-техніки авіаційного базування виконана його кардинальна модернізація, спрямована на підвищення чутливості й теплостійкості в короткочасних режимах інтенсивного кінетнагріву. Модернізація реалізована застосуванням ПІ із уведенням до його складу однокаскадного термоелектричного охолоджувача (ТЕО) і заміною ЧЕ на основі  $PbS$  на матеріал  $PbSe$ . Охолоджувач, уведений у корпус приладу  $\varnothing 8 \times 12$  мм і споживаючий ел. потужність  $P \leq 0.6$  Вт за величини робочого струму до 0.4 А, знижував температуру ЧЕ на 35 – 45 К. Уведення ТЕО в об'єм ПІ, встановленого у вузол, що прокачується в тілесному куті (рис. 1) і що характеризується вкрай обмеженими умовами тепловідводу (рис. 2), вимагало розв'язки низки технологічних і конструкторських

проблем термоелектричного приладобудування. У результаті створено принципово новий технічний розв'язок [2]. Модернізація забезпечила необхідні значення чутливості й теплотривкості виробу як у режимах баражування, так і за короткочасних пікових значень температури потоку повітря, що набігає на виріб. Розробку однієї з перших слабкострумівих серійноздатних конструкцій ТЕО виконали в стислий термін фахівці СКТБ «Фонон» (м. Чернівці) і ОТІХП (м. Одеса). ПЧ-прибор ФРО-ЕС-131 серійно вироблявся заводом «Кварц» (м. Чернівці) й успішно застосовувався в СРСР до 90-х років.

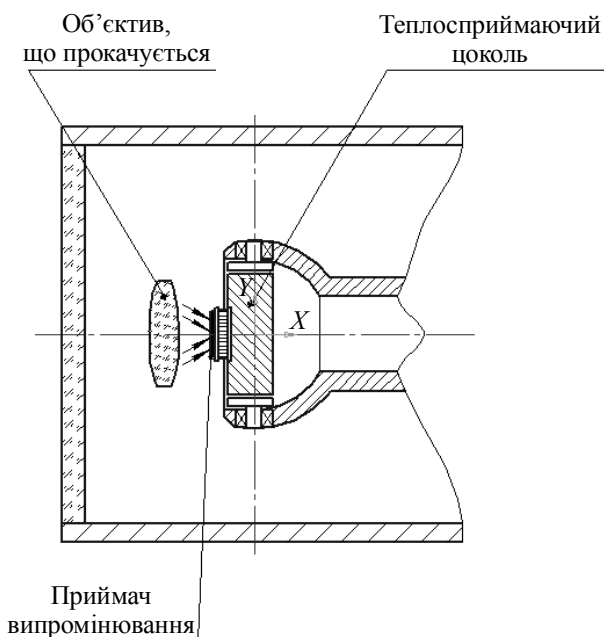


Рис. 1. Принципова схема термостабілізації приймача випромінювання тепловізійного приладу на основі термоелектричного охолоджувача.

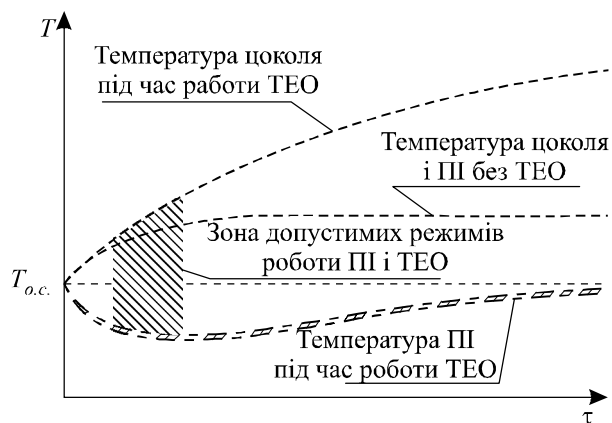


Рис. 2. Динаміка зміни температури елементів термостабілізації приймача випромінювання тепловізійного приладу в процесі роботи виробу.

## 2.2. Автономні середьотемпературні комбіновані охолоджувачі

У плані поглибленої модернізації спеціальної авіаційної ІЧ-техніки, спрямованої на забезпечення застосування в тривалих режимах інтенсивного кінетнагріву в 80-х роках створена комбінована система охолодження на основі ефектів Ранка – Хілша й Пельтьє (далі – КСО–НП). Введена до складу виробу, оснащеного додатковим повітрянозаборним обладнанням, КСО–НП (рис. 3) складається із чотирьохкаскадного ТЕО ПІ, двокаскадної системи вихрових труб (ВТ) і спеціальних теплових мостів (ТМ). ВТ підживлюються швидкісним напором атмосферного повітря, що набігає на виріб. Система охолодження вирішує задачі термостатування на припустимому рівні:

- теплонапружених вузлів оптико-механічного блока (ОМБ) виробу;
- цоколя ПІ, що містить вбудований чотирьохкаскадний ТЕО ( $P \leq 4.2$  Вт за  $I_{роб} \leq 1.2$  А), що й створює  $\Delta T = 117$  К за  $T_{oc} = 333$  К.

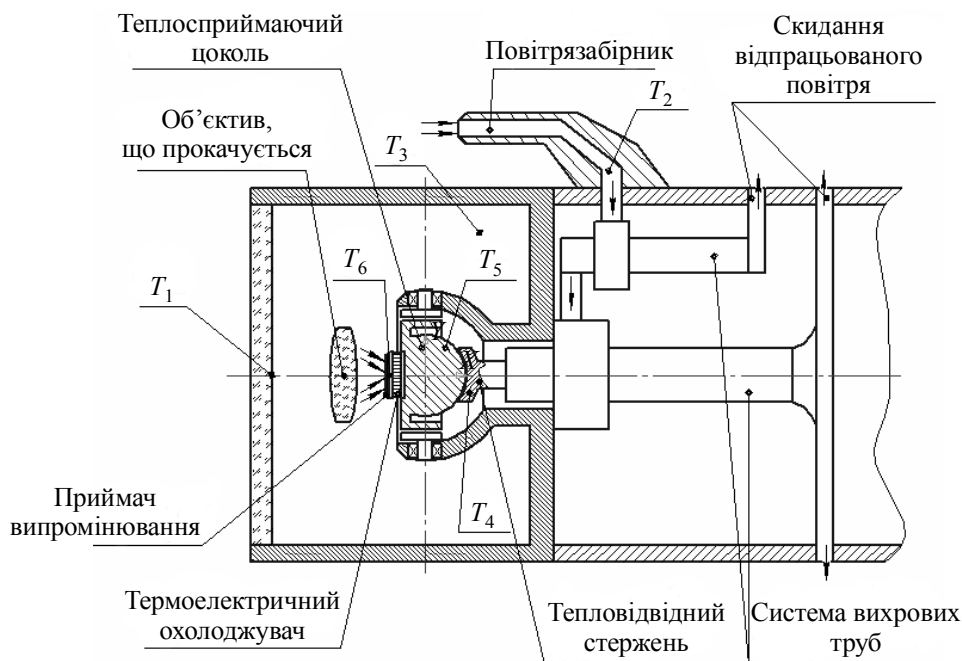


Рис. 3. Принципова схема системи охолодження приймача випромінювання тепловізійного приладу на основі термоелектричного охолоджувача й системи вихрових труб.

Згідно з вимогами до функціонування виробу, його оптична система (ОС) й приймач ІЧ-випромінювання розміщається у герметичному відсіку, заповненому неконденсуючим газовим середовищем. Це створює проблему в частині забезпечення необхідних теплових режимів роботи елементів блока. У запропонованій конструкції термостабуючого відсіку ТМ з'єднують герметичний об'єм відсіку й негерметичний блок, у якому розміщені радіатори ТМ, що обдуваються охолодженим у ВТ атмосферним повітрям.

У результаті літніх випробувань теплового макета створюваного виробу (рис. 4) встановлено: температура загальмованого потоку, що набігає, досягає значень (310 – 330) К в тривалих режимах роботи й (420 – 430) К – у короткочасних режимах інтенсивної експлуатації. При цьому вихровий каскад КСО-НП забезпечує зниження температури ОС і цоколя ПІ, розміщених у герметичному відсіку, до (310 – 330) К. Термоелектричний охолоджувач ПІ стабілізує його чутливі елементи на рівні ~ 200 – 210 К, що забезпечує реалізацію необхідного значення чутливості виробу.

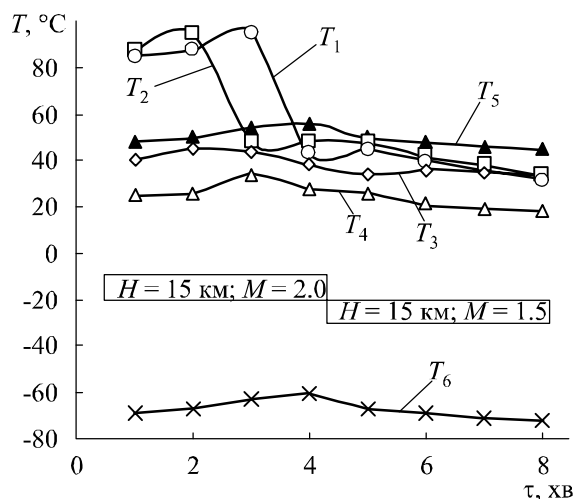


Рис. 4. Динаміка зміни температури елементів термостабілізації приймача випромінювання тепловізійного приладу в процесі роботи виробу в різних режимах експлуатації.

$T_1$  – температура на меніску;  $T_2$  – температура вхідного повітря;  $T_3$  – температура у відсіку;  
 $T_4$  – температура тепловідводу;  $T_5$  – температура цоколя;  
 $T_6$  – розрахункова температура холодних спайів.

КСО-НП створене в кооперації з низкою підприємств РФ, фахівців СГАУ (м. Самара, РФ) і НП «Терміон» (м. Одеса).

У зв'язку з інтенсифікацією робіт зі створення виробів із криоохолоджуючими ПІ впровадження технічних розв'язків по КСО виробів НП у тематику підприємства не було реалізовано.

### 2.3. Автономний комбінований балонний криоохолоджувач збільшеного ресурсу

Стосовно ІЧ-тематики підприємства завдання криостатування сучасних ПІ для спектрального діапазону 5 – 8 мкм із 60-х років успішно вирішується створенням балонних дросельних мікрокриогенних систем (МКС). Балонні МКС (рис. 5) характеризуються високим ступенем надійності роботи всіх елементів, можливістю введення дросельного мікроохолоджувача (МО) безпосередньо до складу герметизованого ОМБ із криостатування ЧЕ ПІ. Це забезпечує найраціональніше використання енергії газу – неконденсуючого криоагента, що запасується в балоні високого тиску (до 35.0 МПа).

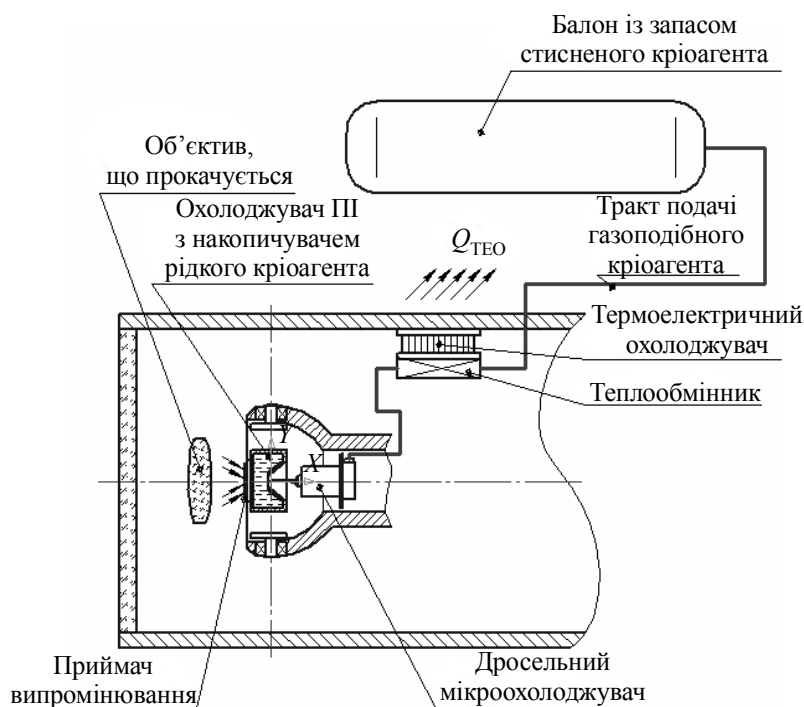


Рис. 5. Принципова схема економічної дросельної баллоної системи охолодження приймача випромінювання тепловізійного приладу (з попереднім каскадом охолодження кріоагента на основі термоелектричного охолоджувача).

Залежно від вимог до тимчасових умов експлуатації виробу й розташовуваних об'ємних обмежень по ОМБ, МОМКС проектується у рефрижераторному або зріджувальному.

Для реалізації необхідної тривалості функціонування МКС, комплектуючою балоном заданих об'ємно-масових характеристик, фахівцями підприємства створюються й успішно впроваджуються спеціальні конструкції МО. Введення в об'єм малорозмірного МО (діаметр теплообмінника  $\leq 6$  мм) термочутливої системи на основі матеріалу з «пам'яттю форми» забезпечило можливість його роботи в режимі саморегульовальної холодопродуктивності.

Ефективність роботи дросельних МКС суттєво залежить від величини ізотермічного дросель-ефекту кріоагента  $\Delta i_T$  [3]. Зі зниженням температури кріоагента на вході в МО  $\Delta i_T$  зростає пропорційно  $\Delta T_{ex}$  газу.

Введення в тракт підведення кріоагента до МО теплообмінника, охолоджуваного системою ТЕО, забезпечує додаткове збільшення ресурсу енергії газу, запасеного в балоні. Проектування системи МКС-ЕО базується на обліку необхідної холодопродуктивності системи ТЕО, умов її компонування у виробі й відводу теплової енергії ( $Q_0 + W_{ТЕО}$ ) у навколишнє середовище (тут  $W_{ТЕО}$  – ел. потужність, споживана системою ТЕО).

На рис. 6 показано термодинамічну модель і блок-схему економічної МКС на основі МО із вбудованим саморегульовальним дросельним вузлом.

Результати експериментального дослідження виробу, комплектуючого МКС-ЕО, виявили збільшення ресурсу системи на 30 – 40% за охолодження потоку кріоагента (азот) на 25 – 30 К. Система ТЕО організована з 4-х спеціальних модулів Altek СПО-К ЕБРИ. 432211.016, (виробник – ІТЕ м. Чернівці). Система споживає  $P_{\Sigma} = 33.8$  Вт по ланцюгу 5.2 В. Тепловідвід від системи здійснюється на НП, омиваючий зовнішній корпус виробу через конструктивно-технологічний тепловий міст.

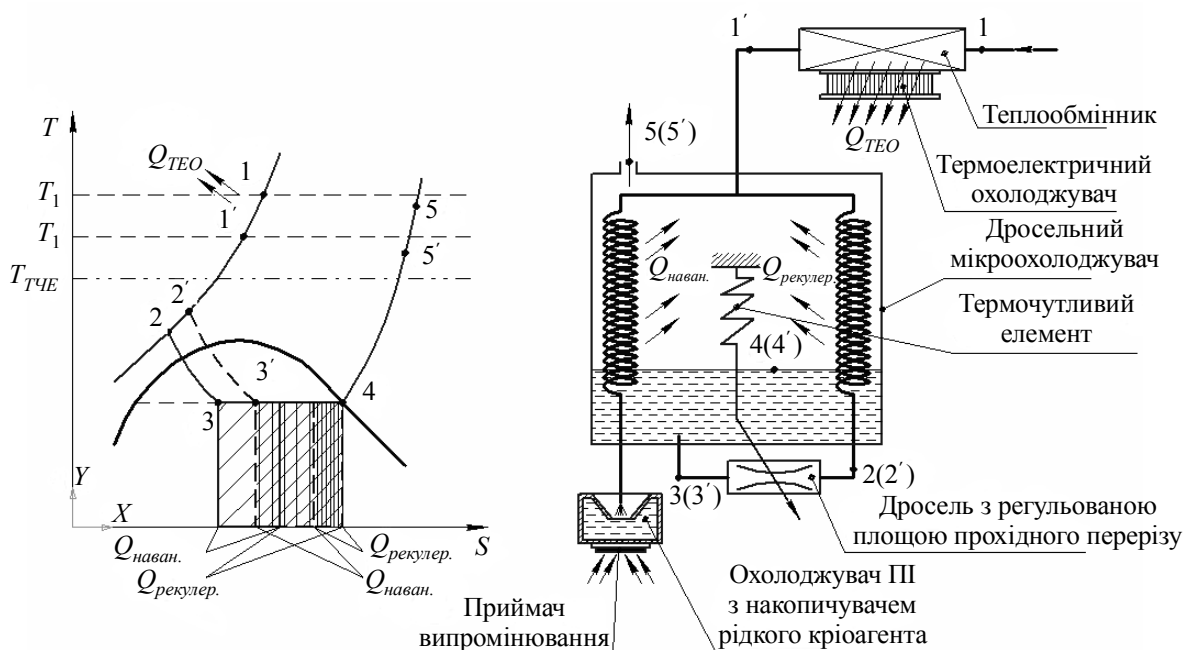


Рис. 6. Термодинамічна модель роботи економічної дросельної балонної системи охолодження приймача випромінювання (з попереднім каскадом охолодження криоагента на основі термоелектричного охолоджувача).

#### 2.4. Автономна система на основі ТПЕ для безперервного теплового калібрування двох еталонних ІЧ-випромінювачів і теплового захисту приймача ІЧ-випромінювання, кріостатууючого ГКМ

У розроблювальному підприємстві квазістаціонарному виробі, призначеному для безперервної селекції об'єкта спостереження за його ІЧ-випромінюванням в діапазоні 8 – 12 мкм за наявності різного роду теплових перешкод, застосована [4] дворівнева термоелектрична система, що забезпечує:

- теплозахист електродвигуна газової криогенної машини (ГКМ), кріостатууючої ЧЕ ПІ на рівні 80 К;
- необхідні темпи зміни температури двох малорозмірних еталонних випромінювачів, що працюють у протифазних режимах.

Моноблочний кріоохолоджувач ДО508 фірми «RICOR» (рис. 7) у складі розроблювального виробу споживає від 13 до 7.5 Вт по ланцюгу 23 В. При цьому необхідно в критичних режимах його застосування здійснювати теплозахист ел. двигуна з  $\Delta T \leq 35$  К. Нами створено систему активного теплозахисту на основі двох типів твердотільних ТЕП. При цьому МТО Altec-71-1.4 × 1.4 × 1.5 забезпечує розв'язок завдання термостатування електродвигуна машинного кріоохолоджувача. Необхідний темп зміни температури калібраторів у діапазонах  $T_h = 305 - 345$  К і  $T_c = 225 - 260$  К зі зміною температури навколишнього середовища  $T_{oc} = 223 - 333$  К забезпечується застосуванням модулів Altec-7-1.2 × 1.5 × 1.5 (розмір 8 × 8 × 4 мм) у кількості 1 шт./калібратор. Модулі споживають до 3 Вт ел. потужності по ланцюгу 12 В; при цьому з гарячого радіатора відводиться 5 Вт теплової енергії. Для виключення заіндеювання робочих поверхонь калібраторів об'єм приладу заповнюється азотом, осушеним до точки роси не вище мінус 40°C.

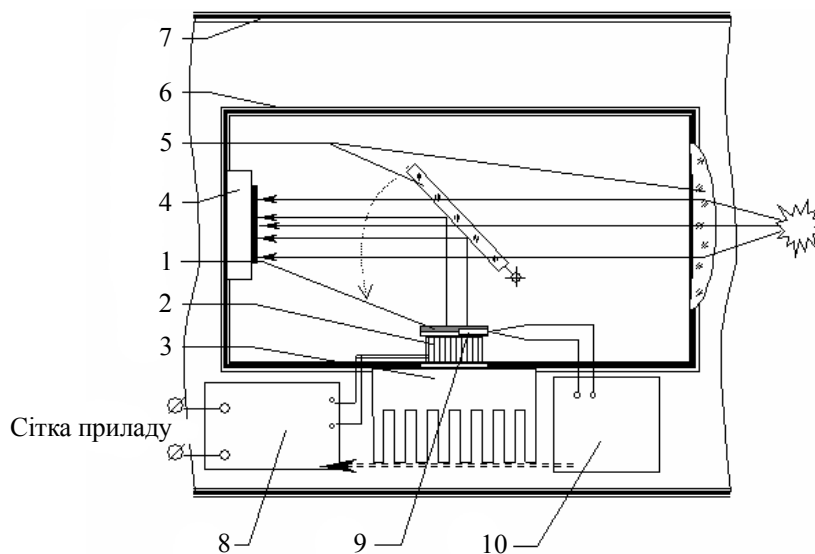


Рис. 7. Принципова схема автономного еталонного джерела випромінювання й схема його установки в приладі. 1 – випромінювач, 2 – термоелектричний модуль, 3 – радіатор, 4 – фотоприймач, 5 – оптична система, 6 – коліматор, 7 – корпус приладу, 8 – блок керування, 9 – датчик температури, 10 – задатчик температури.

## 2.5. Автономна система охолодження газових потоків (АСОГП)

Нашим підприємством разом із НПФ «Паралакс» (м. Київ) для дросельних МКС створюється малогабаритна установка з підготовки кріоагента з навколишнього повітря.

Термоелектрична система (рис. 8), що входить до складу установки, одночасно у двох блоках установки охолоджує на  $\sim 25$  К і  $\sim 30$  К відповідно транзитний потік газу високого тиску (витрата 100 нл/хв,  $P = 33.0$  МПа). Виходячи з вимог до працездатності установки в польових умовах, величині теплового потоку, яка відводиться від термоелектричної системи (1.5 кВт), що забезпечує холодопродуктивність 0.2 кВт у кожному блоці, створена АСОГП.

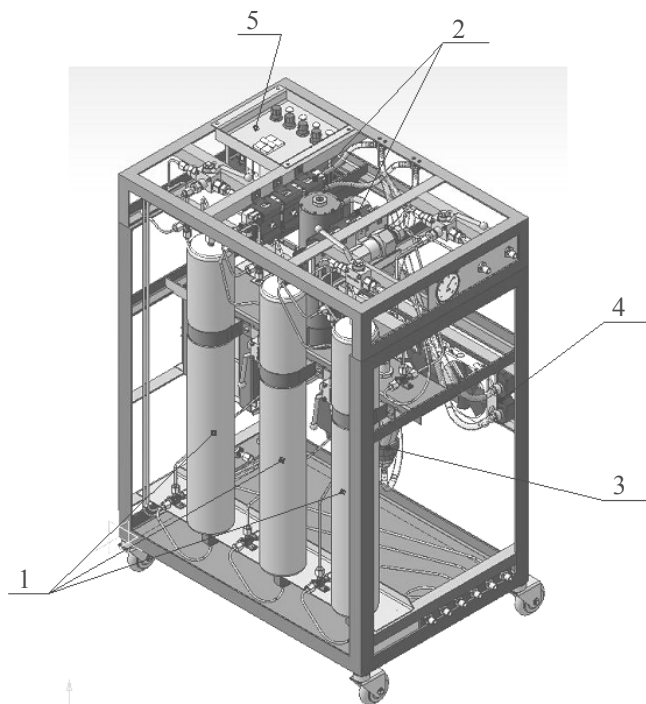


Рис. 8. Малогабаритна установка з підготовки кріоагента зі стисненого повітря. 1 – фільтри адсорбери; 2 – термоелектричні блоки охолодження газу; 3 – циркуляційний насос; 4 – активний водоповітряний теплообмінник; 5 – блок живлення.

АСОГП є двоконтурною системою, що містить газові теплообмінники, охолоджувані першим каскадом ТЕО й контур водяного активного тепловідводу від них; до складу контуру входять система ТЕО другого каскаду й водоповітряні радіатори, що відводять сумарний тепловий потік системи (1.5 кВт) у навколишнє середовище. Система, показана на рис. 4, виконана на основі модулів термоелектричних МТО71-1.5 × 1.5 У кожному газовому теплообміннику (рис. 9) встановлено по 4 модулі, а в складі водоповітряного радіатора – 6 модулів. Система підживлюється по ланцюгу 27 В и 35 В з робочим режимом 3.0 А и 4.5 А відповідно для модулів у газових теплообмінниках і для модулів у складі водоповітряного радіатора.

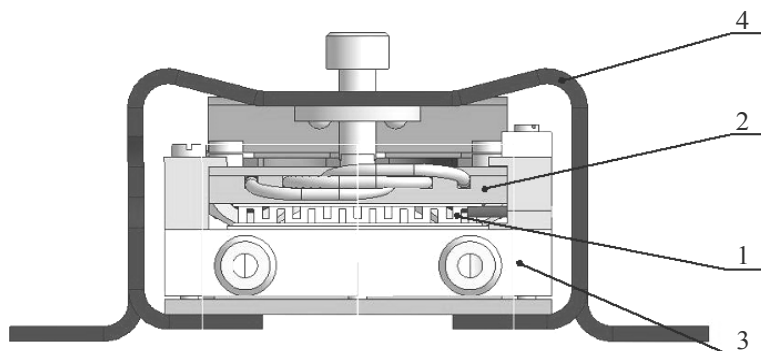


Рис. 9. Термоелектричні блоки охолодження газу.

1 – термоелектричні модулі; 2 – газовий теплообмінник;  
3 – водяний теплообмінник; 4 – притиск.

Сумарне енергоспоживання системи (14 модулів термоелектричних і гідропомпа) ~ 0.6 кВт по ланцюгу 27...35 В.

## 2.6. Електрогенератор на основі ТЕП і ВТ (рис. 10)

Стосовно проблеми електрозабезпечення технологічних обладнань газової галузі розроблено концепція автономної системи електроживлення комплексу ФЛОУТЕК на основі оригінального термоелектричного генератора. Джерелом “тепла” і “холоду” у запропонованому генераторі є вихрова труба, що перетворює енергію стислого природного газу в теплову шляхом його редукування, наприклад, на газорозподільних станціях.

Запропонований генератор перспективний з точки зору:

- економічності (не вимагає спалювання газу, простий в обслуговуванні);
- надійності (не має частин, що рухаються);
- великого ресурсу (визначається ресурсом термоелектричних модулів – не менш 5 років безперервної роботи);
- електровибухобезпеки;
- можливості оптимізації конструкції під конкретного споживача електроенергії.

Для електроживлення комплексу обліку газу типу “ФЛОУТЕК” і автоматики ГРС розроблений, виготовлений і випробуваний у натурних умовах термоелектричний генератор ТЕГ14/06 (номінальна потужність 10 Вт по ланцюгу 14 В постійного струму). Генератор створений на основі охолоджуваної вихрової труби калібру 32 мм і системи 16 термоелектричних модулів типу МТ2-127-1,6.

Результати експериментальних досліджень [5, 6] показали:

- електрогенератор ТЕГ14/06 – працездатний в умовах ГРС за круглогоддинної безперервної експлуатації;



- робочі характеристики ТЕГ14/06 ( $U = 14 \text{ В}$ ,  $I = 0.6 \text{ А}$ ), контрольовані за середньостатистичних діапазонів зміни параметрів робочого газу – тиск на вході  $P_1 = (14 \pm 3) \text{ ата}$  й тиску на виході  $P_0 = (3 \pm 1) \text{ ата}$ ; задовольняють технічним вимогам до електроживлення комплексу “Флоутек”.

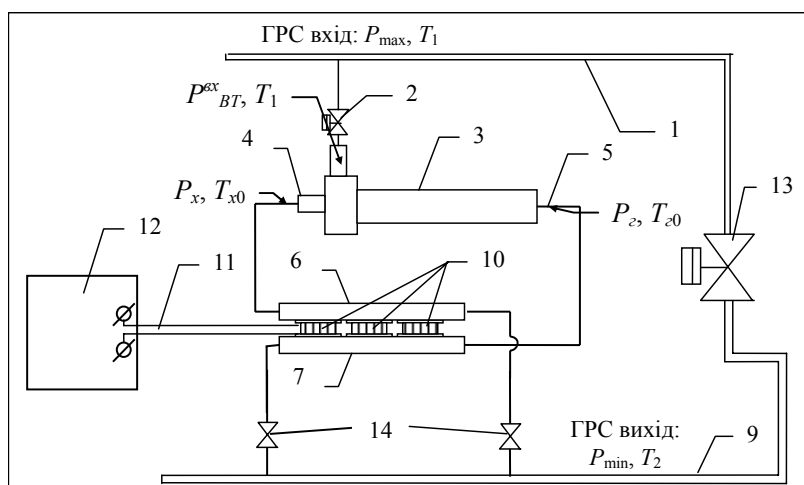
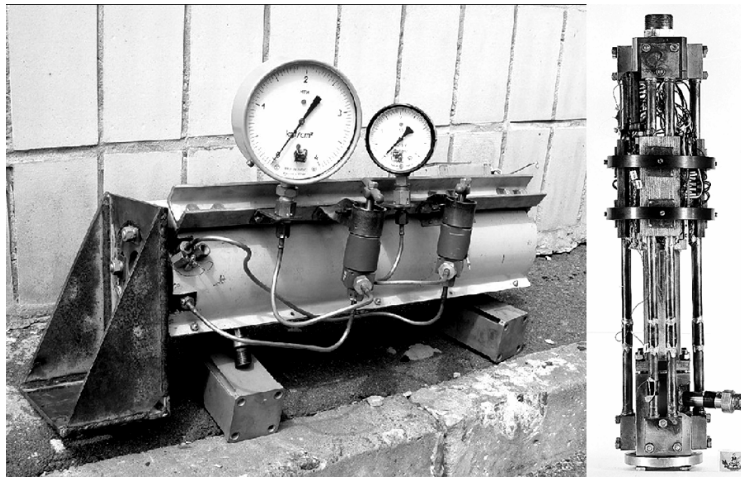


Рис. 10. Зовнішній вигляд, вигляд без кожуха й компонування електрогенератора комбінованого в складі газорозподільної станції. 1 – магістраль газу високого тиску; 2 – регулювальний клапан; 3 – вихрова труба (ВТ), що ділить, протиточна; 4 – колектор холодного потоку ВТ; 5 – колектор гарячого потоку ВТ; 6 – “холодний” теплообмінник; 7 – “гарячий” теплообмінник; 9 – магістраль низького тиску; 10 – термоелектричні модулі; 11 – сполучний кабель; 12 – споживач електроенергії; 13 – штатний регулювальний клапан; 14 – засувка.

## 2.7. Кріодеструктор медичний

Нами на прохання фахівців медсанчастини підприємства в 2008 р. розроблено прилад «Морозко-2», призначений для охолодження ділянок шкірного покриву біологічного об'єкта під час складних внутрішньом'язових ін'єкцій.

Прилад складається з контактної пластини (див. рис. 11 поз.1), охолоджуваної модулем термоелектричним (2), гарячі спаї якого охолоджуються «кулером» (3 – алюмінієвий радіатор, оснащений вентилятором). Прилад оснащений ручкою (4) і шнуром живлення (5). Шнур живлення закінчується штекером (6) з бічним проводом (7) для підключення двох блоків живлення.

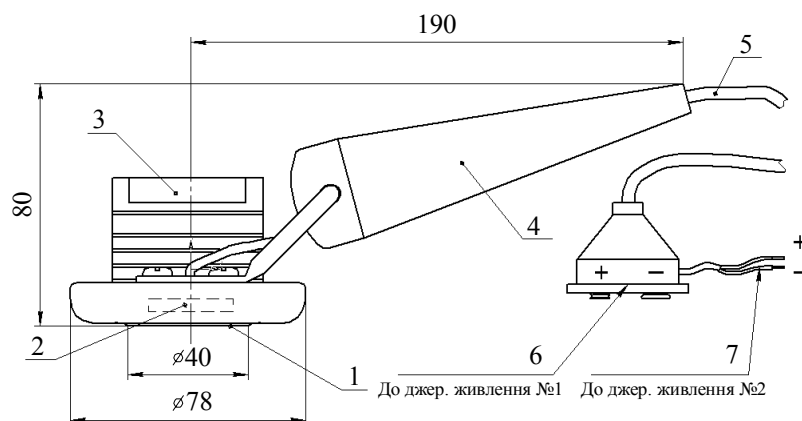


Рис. 11. Принципова схема термоаплікатора: 1 – контактна пластина; 2 – модуль термоелектричний; 3 – радіатор з вентилятором («кулер»); 4 – ручка; 5 – шнур живлення; 6 – штекер живлення модуля термоелектричного; 7 – шнур живлення вентилятора.

Прилад дає можливість швидко (2...3 хв.) здійснити місцеве охолодження шкірного покриву до +2.4°C на ділянці діаметром 40 мм і забезпечує можливість виконання ін'єкцій без больових відчуттів пацієнта.

## Література

1. А.с. №114414 от 03.04.1978 г. / П.М. Закусило, ... А.В. Молодык, Г.А. Смоляр
2. G.F. Smolyar. On Power System Design on the Basis of Thermoelectric Energy Converters, Journal of Thermoelectricity, №2, 1996, p. 75-100.
3. Лозбін Д.В. Особенности проектирования термоэлектрического теплового насоса для эталонного источника ИК-излучения / Д.В. Лозбін, Г.А. Смоляр // Термоелектричество. – 2002. – № 2. – С. 69 – 71.
4. Справочник по ИК-технике. М. Мир, 1999, т. 3, стр. 71-105; 289-379.
5. Опыт создания автономной системы электропитания для газовой промышленности / В.А. Кротевич, Д.В. Лозбін, Е.Л. Погребной [и др.] // Нефть и газ. – 2004. – №7. – С. 30 – 34.
6. Термоэлектрический генератор с вихревой трубой в качестве источника тепла / Н.И. Варич, Д.В. Лозбін, А.В. Панов [и др.] // Термоелектричество. – 2002. – №1, С. 76 – 89.

Надійшла до редакції 27.08.2012.