
КОМБИНИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЭНЕРГИИ КАК МЕТОД РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ СОВРЕМЕННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Молодык А.В., Смоляр Г.А., Лозбин Д.В.

*(Казенное предприятие специального приборостроения «Арсенал»,
ул. Московская, 8, Киев, 01010, Украина)*

- *Позитивный опыт обеспечения требуемых тепловых режимов приборов широкого спектра применения в реальных условиях эксплуатации изделий специального, медицинского и энергетического назначений, достигнутый применением комбинированных СОТ со встроенными ТЭП, подтверждает перспективность их применения. Невысокие значения степени термодинамического совершенства устройств на основе эффектов Пельтье – Зеебека, Ранка-Хилиша и Джоуля-Томсона с успехом компенсируются высокими значениями их эксплуатационных характеристик, возможностью введения в различные приборные и схемные решения. В ближайших планах предприятия предусмотрено применение ТЭП для термостабилизации микроболометрических матриц, а также использование в разработках эталонных источников ИК-излучения для тепловизионных приборов. Эффективность внедрения комбинированных СОТ в состав создаваемых изделий в значительной степени определяется уровнем квалификации разработчиков, степенью владения современными достижениями техники и технологий. Применение ТЭП как составной части разрабатываемого изделия предполагает возможность применения штатных источников электропитания или создания специальных электропреобразователей для конкретных уникальных термоэлектрических модулей. Считаем необходимым поддержать решение руководства НАНУ о возобновлении и расширении практики научно-технических отраслевых совещаний специалистов-теплотехников.*

Введение

На примере разработок предприятия в области ИК-тематики, медицинской и энергетической техник показана необходимость и перспективность создания комбинированных среднетемпературных и криогенных охладителей, содержащих термоэлектрические преобразователи энергии (ТЭП).

Основное направление работ научно-производственного комплекса №3 (НПК-3) – структурного подразделения КП СПС «Арсенал» – создание изделий ИК-техники, базирующихся на применении специальных приемников ИК-излучений (ПИ), дистанционно регистрирующих тепловые излучения объектов наблюдения, контрастных в заданном спектральном диапазоне.

Современные ПИ наиболее эффективно работают лишь на среднетемпературном или криогенном уровнях охлаждения чувствительных элементов (ЧЭ) приемников [1]. Как убедительно показывает многолетний опыт работы предприятия перспективность разрабатываемого ИК-изделия в значительной степени определяется успешностью решения технико-экономических задач создания и эксплуатации специальных систем охлаждения его ПИ и теплозащиту узлов, критичных к тепловым условиям.

Специалистами НПК-3 наработаны технические решения по созданию охлаждающих и термостатирующих устройств (далее СОТ) для ряда изделий ИК-тематики, предназначенных к применению в стационарных, транспортных и мобильных условиях, а также для изделий

медицинской и газовой отраслей. При этом проектирование СОТ для мобильных ИК-изделий является наиболее сложной комплексной задачей: необходимо обеспечить выполнение теплофизических условий работы ПИ – составного элемента изделия, эксплуатируемого в интенсивных, длительных высотно-скоростных режимах взаимодействия со скоростным напором набегающего потока воздуха (НП).

Примечание: Охлаждающие устройства среднетемпературного и криогенного уровней для медицинской и газовой отраслей разрабатывались в инициативном плане.

Анализ условий эксплуатации, а также требований к энергетическим характеристикам создаваемых ИК-изделий, к приборам (устройствам) медицинской и газовой отраслей промышленности определяет для реализации современных требований необходимость привлечения достижений широкого спектра трансформаторов энергии, их комбинирование в наиболее рациональных схемах.

Так, для изделий авиационной техники и для энергопреобразователей газовой отрасли, характеризующихся проблемами теплообмена с НП и возможностью «срабатывания» энергии потока газа высокого давления, соответственно, – целесообразно и необходимо использовать комбинирование эффектов Ранка-Хилша и Пельтье-Зеебека.

Для повышения эксплуатационных характеристик ИК-систем наблюдения, а также баллонных дроссельных систем ИК-техники, перспективно применение ТЭП с одновременным решением проблем теплоотвода и теплозащиты.

2. Базовые технические решения по созданию специальных охладителей, реализованные специалистами предприятия

2.1. Автономная теплозащита ЧЭ ПИ

В период 1973 – 1975 гг. для изделия ИК-техники авиационного базирования выполнена его кардинальная модернизация, направленная на повышение чувствительности и теплоустойчивости в кратковременных режимах интенсивного кинетнагрева. Модернизация реализована применением ПИ с введением в его состав однокаскадного термоэлектрического охладителя (ТЭО) и заменой ЧЭ на основе PbS на материал $PbSe$. Охладитель, введенный в корпус прибора $\varnothing 8 \times 12$ мм и потребляющий эл. мощность $P \leq 0.6$ Вт при величине рабочего тока до 0.4 А, понижал температуру ЧЭ на 35 – 45 К. Введение ТЭО в объём ПИ, установленного в узел, прокачиваемый в телесном угле (рис. 1), и характеризующийся крайне ограниченными условиями теплоотвода (рис. 2), потребовало решения ряда технологических и конструкторских проблем термоэлектрического приборостроения. В результате создано принципиально новое техническое

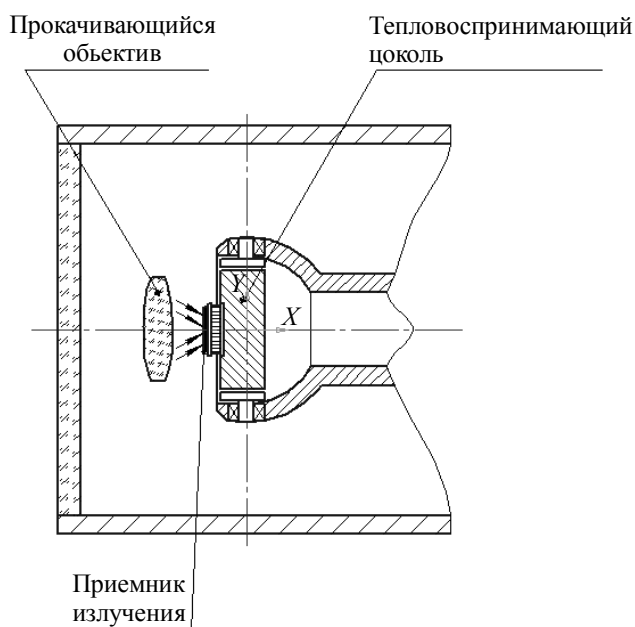


Рис. 1. Принципиальная схема термостабилизации приемника излучения тепловизионного прибора на основе термоэлектрического охладителя.

решение [2]. Модернизация обеспечила требуемые значения чувствительности и теплоустойчивости изделия как в режимах барражирования, так и при кратковременных пиковых значениях температуры набегающего на изделие потока воздуха. Разработку одной из первых слаботочных серийноспособных конструкций ТЭО выполнили в сжатые сроки специалисты СКТБ «Фонон» (г. Черновцы) и ОТИХП (г. Одесса). ИК-прибор ФРО-ЕС-131 серийно производился заводом «Кварц» (г. Черновцы) и успешно применялся в СССР до 90-х годов.

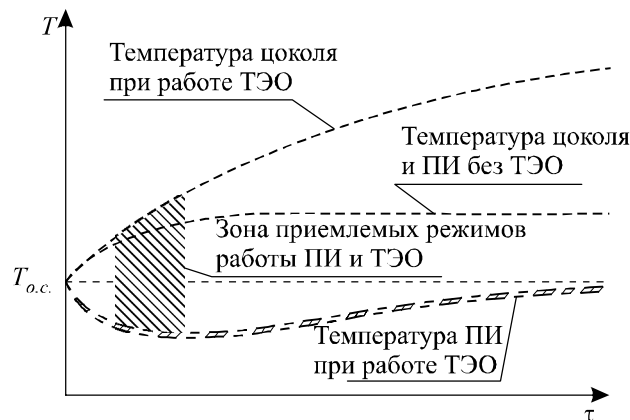


Рис. 2. Динамика изменения температуры элементов термостабилизации приемника излучения тепловизионного прибора в процессе работы изделия.

2.2. Автономные среднетемпературные комбинированные охладители

В плане углубленной модернизации специальной авиационной ИК-техники, направленной на обеспечение применения в длительных режимах интенсивного кинетнагрева в 80-х годах создана комбинированная система охлаждения на основе эффектов Ранка-Хилша и Пельтье (далее – КСО-НП). Введенная в состав изделия, снабженного дополнительным воздухозаборным устройством, КСО-НП (рис. 3) состоит из четырехкаскадного ТЭО ПИ, двухкаскадной системы вихревых труб (ВТ) и специальных тепловых мостов (ТМ). ВТ запитываются скоростным напором набегающего на изделие атмосферного воздуха. Система охлаждения решает задачи термостатирования на допустимом уровне:

- теплонапряженных узлов оптико-механического блока (ОМБ) изделия;
- цоколя ПИ, содержащего встроенный четырехкаскадный ТЭО ($P \leq 4.2$ Вт при

$I_{\text{раб}} \leq 1.2$ А) и создающий $\Delta T = 117$ К при $T_{oc} = 333$ К.

Согласно требованиям к функционированию изделия, его оптическая система (ОС) и приемник ИК-излучения размещаются в герметичном отсеке, заполненном неконденсирующейся газовой средой. Это создает проблему в части обеспечения необходимых тепловых режимов работы элементов блока. В предложенной конструкции термостатируемого отсека ТМ соединяют герметичный объем отсека и негерметичный блок, в котором размещены радиаторы ТМ, обдуваемые охлажденным в ВТ атмосферным воздухом.

Согласно требованиям к функционированию изделия, его оптическая система (ОС) и приемник ИК-излучения размещаются в герметичном отсеке, заполненном неконденсирующейся газовой средой. Это создает проблему в части обеспечения необходимых тепловых режимов работы элементов блока. В предложенной конструкции термостатируемого отсека ТМ соединяют герметичный объем отсека и негерметичный блок, в котором размещены радиаторы ТМ, обдуваемые охлажденным в ВТ атмосферным воздухом.

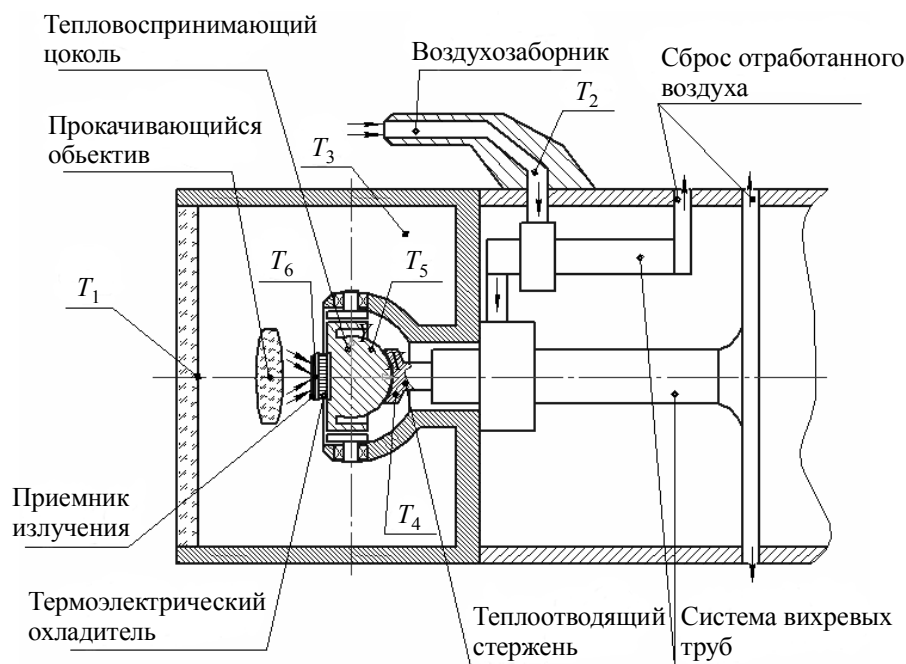


Рис. 3. Принципиальная схема системы охлаждения приемника излучения тепловизионного прибора на основе термоэлектрического охладителя и системы вихревых труб.

В результате летных испытаний теплового макета создаваемого изделия (рис. 4) установлено: температура заторможенного набегающего потока достигает значений (310 – 330) К в длительных режимах работы и (420 – 430) К – в кратковременных режимах интенсивной эксплуатации. При этом вихревой каскад КСО-НП обеспечивает понижение температуры ОС и цоколя ПИ, размещенных в герметичном отсеке, до (310 – 330) К. Термоэлектрический охладитель ПИ стабилизирует его чувствительные элементы на уровне ~ 200 – 210 К, что обеспечивает реализацию требуемого значения чувствительности изделия.

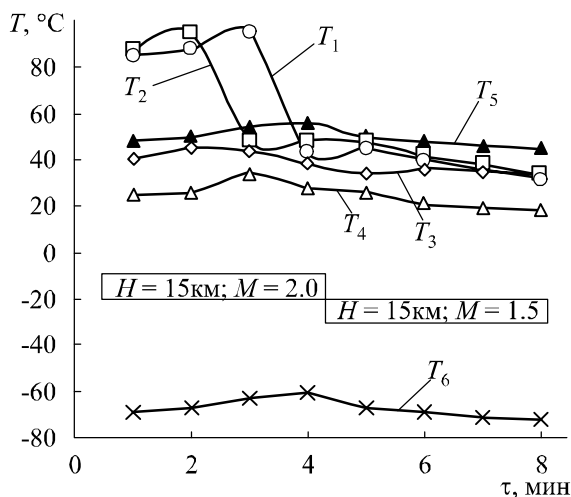


Рис. 4. Динамика изменения температуры элементов термостабилизации приемника излучения тепловизионного прибора в процессе работы изделия на разных режимах эксплуатации. T_1 – температура на мениске; T_2 – температура входящего воздуха; T_3 – температура в отсеке; T_4 – температура теплоотвода; T_5 – температура цоколя; T_6 – расчетная температура холодных спаев.

КСО-НП создано в кооперации с рядом предприятий РФ, специалистов СГАУ (г. Самара, РФ) и ЧП «Гермион» (г. Одесса).

В связи с интенсификацией работ по созданию изделий с криоохлаждаемыми ПИ внедрение технических решений по КСО изделий НП в тематику предприятия не было реализовано.

2.3. Автономный комбинированный баллонный криоохладитель увеличенного ресурса

Применительно к ИК-тематике предприятия задача криостатирования современных ПИ для спектрального диапазона 5–8 мкм с 60-х годов успешно решается созданием баллонных дроссельных микрокриогенных систем (МКС). Баллонные МКС (рис. 5) характеризуются высокой степенью надежности работы всех элементов, возможностью введения дроссельного микроохладителя (МО) непосредственно в состав герметизированного ОМБ с криостатированием ЧЭ ПИ. Это обеспечивает наиболее рациональное использование энергии газа – неконденсирующегося криоагента, запасаемого в баллоне высокого давления (до 35.0 МПа).

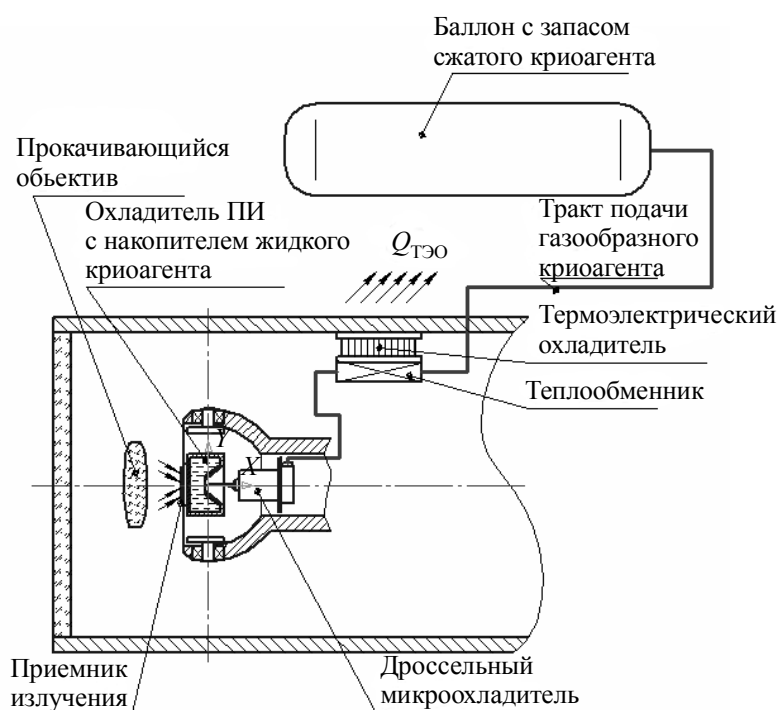


Рис. 5. Принципиальная схема экономичной дроссельной баллонной системы охлаждения приемника излучения тепловизионного прибора (с предварительным каскадом охлаждения криоагента на основе термоэлектрического охладителя).

В зависимости от требований к временным условиям эксплуатации изделия и располагаемых объемных ограничений по ОМБ, МОМКС проектируются в рефрижераторном или ожижительном исполнениях.

Для реализации требуемой длительности функционирования МКС, комплектуемой баллоном заданных объемно-массовых характеристик, специалистами предприятия создаются и успешно внедряются специальные конструкции МО. Так, введение в объем малоразмерного МО (диаметр теплообменника ≤ 6 мм) термочувствительной системы на основе материала с «памятью формы» обеспечило возможность его работы в режиме саморегулирующейся холодопроизводительности.

Эффективность работы дроссельных МКС существенно зависит от величины изотермического дроссель-эффекта криоагента Δi_T [3]. При понижении температуры криоагента на входе в МО Δi_T возрастает пропорционально ΔT_{ex} газа.

Введение в тракт подвода криоагента к МО теплообменника, охлаждаемого системой ТЭО, обеспечивает дополнительное увеличение ресурса энергии газа, запасенного в баллоне.

Проектирование системы МКС-ТЭО базируется на учете потребной холодопроизводительности системы ТЭО, условий ее компоновки в изделии и отвода тепловой энергии ($Q_0 + W_{ТЭО}$) в окружающую среду (здесь $W_{ТЭО}$ – эл. мощность, потребляемая системой ТЭО).

На рис. 6 представлена термодинамическая модель и блок-схема экономичной МКС на основе МО с встроенным саморегулирующимся дроссельным узлом.

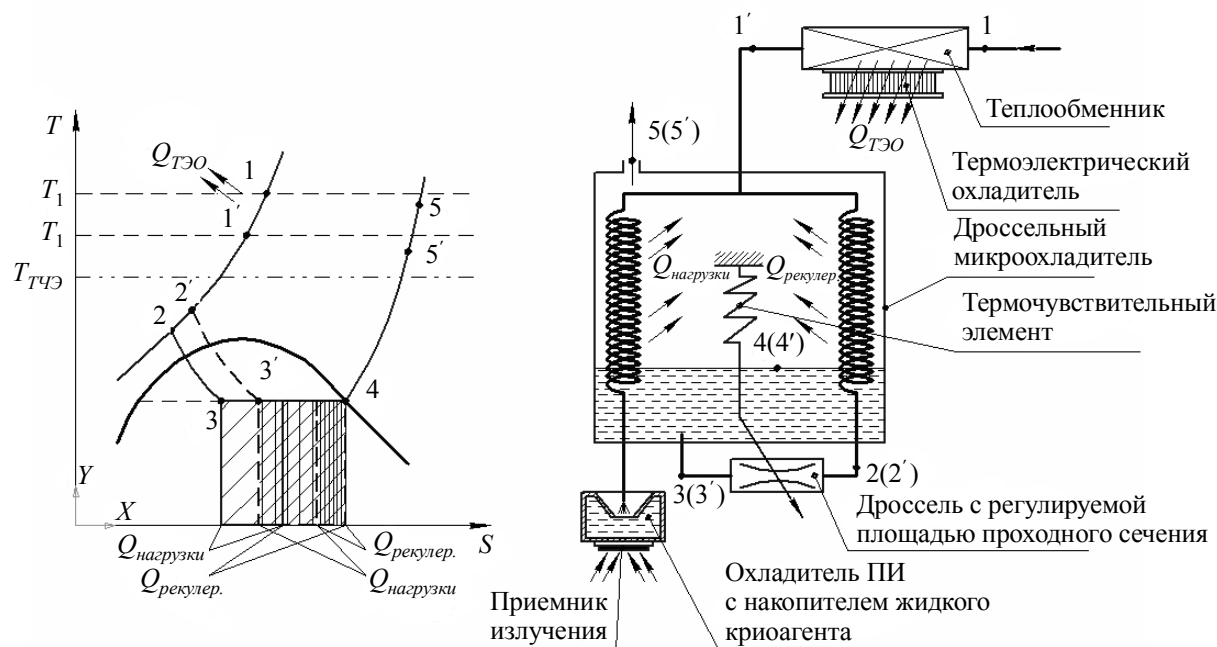


Рис. 6. Термодинамическая модель работы экономичной дроссельной баллонной системы охлаждения приемника излучения (с предварительным каскадом охлаждения криоагента на основе термоэлектрического охладителя).

Результаты экспериментального исследования изделия, комплектуемого МКС-ТЭО, выявили увеличение ресурса системы на 30 – 40% при охлаждении потока криоагента (азот) на 25 – 30 К. Система ТЭО организована из 4-х специальных модулей Altek СПО-К ЕБРИ. 432211.016, (производитель – ИТЭ г. Черновцы). Система потребляет $P_{\Sigma} = 33.8$ Вт по цепи 5.2 В. Теплоотвод от системы осуществляется на НП, омывающий наружный корпус изделия через конструктивно-технологический тепловой мост.

2.4. Автономная система на основе ТЭП для непрерывной тепловой калибровки двух эталонных ИК-излучателей и тепловой защиты приемника ИК-излучения, криостатируемого ГКМ

В разрабатываемом предприятии квазистационарном изделии, предназначенном для непрерывной селекции объекта наблюдения по его ИК-излучению в диапазоне 8 – 12 мкм при наличии различного рода тепловых помех, применена [4] двухуровневая термоэлектрическая система, обеспечивающая:

- тепловую защиту электродвигателя газовой криогенной машины (ГКМ), криостатирующей ЧЭ ПИ на уровне 80 К;
- требуемые темпы изменения температуры двух малоразмерных эталонных излучателей, работающих в противофазных режимах.

Моноблочный криоохладитель K508 фирмы «RICOR» (рис. 7) в составе разрабатываемого изделия потребляет от 13 до 7.5 Вт по цепи 23 В. При этом необходимо в

критических режимах его применения осуществлять теплозащиту эл. двигателя с $\Delta T \leq 35$ К. Нами создана система активной теплозащиты на основе двух типов твердотельных ТЭП. При этом, МТО Altek-71-1.4 × 1.4 × 1.5 обеспечивает решение задачи термостатирования электродвигателя машинного криоохладителя. Требуемый темп изменения температуры калибраторов в диапазонах $T_h = 305 - 345$ К и $T_c = 225 - 260$ К при изменении температуры окружающей среды $T_{oc} = 223 - 333$ К обеспечивается применением модулей Altec-7-1.2 × 1.5 × 1.5 (размер 8 × 8 × 4 мм) в количестве 1 шт./калибратор. Модули потребляют до 3 Вт эл. мощности по цепи 12 В; при этом, с горячего радиатора отводится 5 Вт тепловой энергии. Для исключения заиндевания рабочих поверхностей калибраторов, объем прибора заполняется азотом, осушенным до точки росы, не выше минус 40°C.

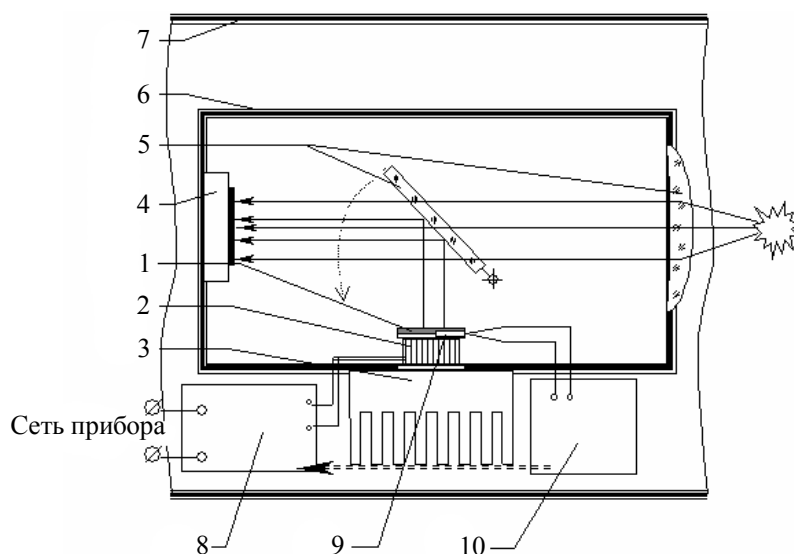


Рис. 7. Принципиальная схема автономного эталонного источника излучения и схема его установки в приборе. 1 – излучатель, 2 – термоэлектрический модуль, 3 – радиатор, 4 – фотоприемник, 5 – оптическая система, 6 – коллиматор, 7 – корпус прибора, 8 – блок управления, 9 – датчик температуры, 10 – задатчик температуры.

2.5. Автономная система охлаждения газовых потоков (АСОГП)

Нашим предприятием совместно с НПФ «Параллак» (г. Киев) для дроссельных МКС создается малогабаритная установка по подготовке криоагента из окружающего воздуха.

Термоэлектрическая система (рис. 8), входящая в состав установки, одновременно в двух блоках установки охлаждает на ~ 25 К и ~ 30 К, соответственно, транзитный поток газа высокого давления (расход 100 нл/мин, $P = 33.0$ МПа). Исходя из требований к работоспособности установки в полевых условиях; величине теплового потока, отводимого от термоэлектрической системы (1.5 кВт), обеспечивающей холодопроизводительность 0.2 кВт в каждом блоке, – создана АСОГП.

АСОГП является двухконтурной системой, содержащей газовые теплообменники, охлаждаемые первым каскадом ТЭО и контур водяного активного теплоотвода от них; в состав контура входят: система ТЭО второго каскада и водовоздушные радиаторы, отводящие суммарный тепловой поток системы (1.5 кВт) в окружающую среду. Система, представленная на рис. 4, выполнена на основе модулей термоэлектрических МТО71-1.5 × 1.5. В каждом газовом теплообменнике (рис. 9) установлено по 4 модуля, а в составе водовоздушного радиатора – 6 модулей. Система запитывается по цепи 27 В и 35 В с рабочим режимом 3.0 А и

4.5 А, соответственно, для модулей в газовых теплообменниках и для модулей в составе водовоздушного радиатора.

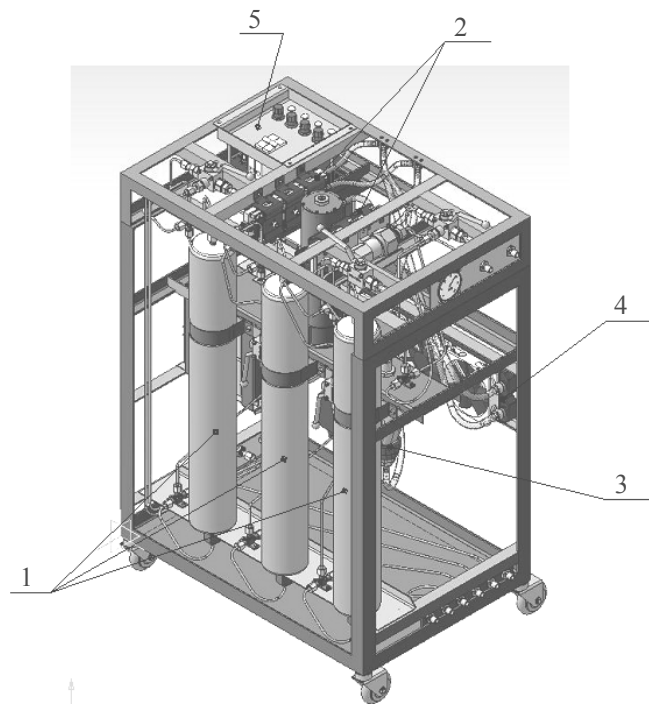


Рис. 8. Малогабаритная установка по подготовке криоагента из сжатого воздуха. 1 – фильтры адсорберы; 2 – термоэлектрические блоки охлаждения газа; 3 – циркуляционный насос; 4 – активный водовоздушный теплообменник; 5 – блок питания.

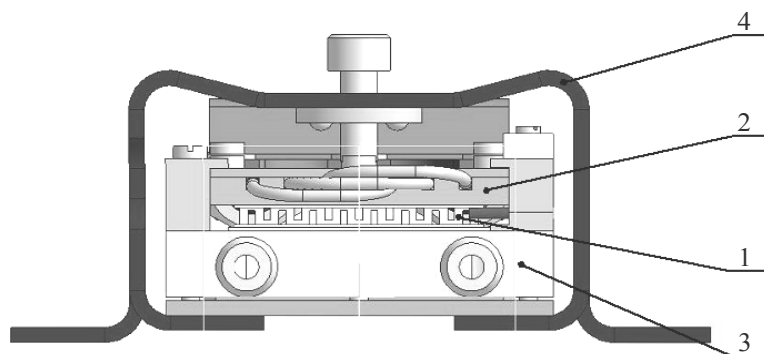


Рис. 9. Термоэлектрические блоки охлаждения газа.
1 – термоэлектрические модули; 2 – газовый теплообменник;
3 – водяной теплообменник; 4 – прижим.

Суммарное энергопотребление системы (14 модулей термоэлектрических и гидронасоса) ~ 0.6 кВт по цепи 27...35 В.

2.6. Электрогенератор на основе ТЭП и ВТ (рис. 10)

Применительно к проблеме электрообеспечения технологических устройств газовой отрасли разработана концепция автономной системы электропитания комплекса ФЛЮУТЕК на основе оригинального термоэлектрического генератора. Источником “тепла” и “холода” в предложенном генераторе является вихревая труба, преобразующая энергию сжатого природного газа в тепловую при его редуцировании, например, на газораспределительных станциях.

Предложенный генератор перспективен ввиду:

- экономичности (не требует сжигания газа, прост в обслуживании);
- надежности (не имеет движущихся частей);

- большого ресурса (определяется ресурсом термоэлектрических модулей – не менее 5 лет непрерывной работы);
- электровзрывобезопасности;
- возможности оптимизации конструкции под конкретного потребителя электроэнергии.

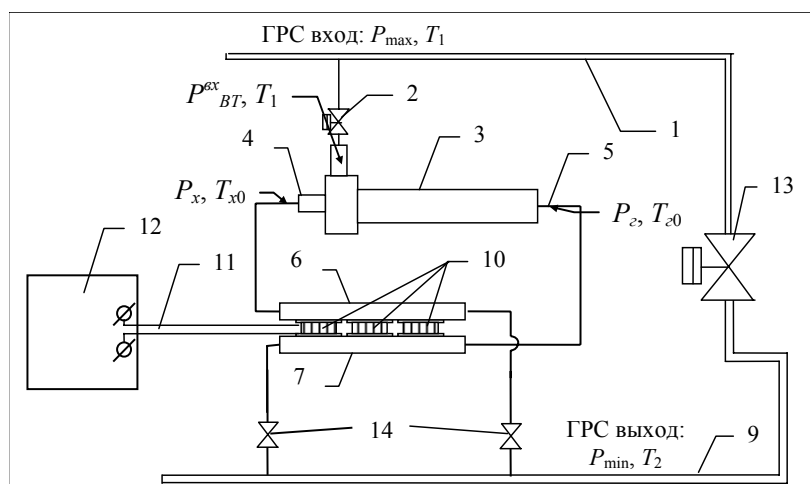
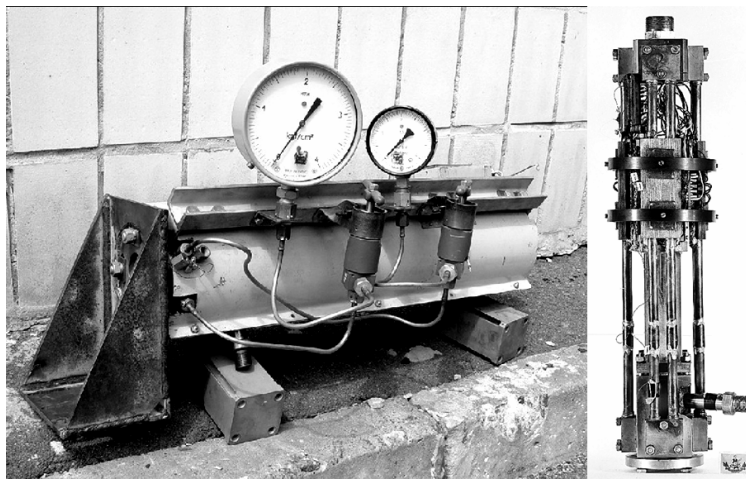


Рис. 10. Внешний вид, вид без кожуха и компоновка электрогенератора комбинированного в составе газораспределительной станции. 1 – магистраль газа высокого давления; 2 – регулирующий клапан; 3 – вихревая труба (ВТ) делящая противоточная; 4 – коллектор холодного потока ВТ; 5 – коллектор горячего потока ВТ; 6 – “холодный” теплообменник; 7 – “горячий” теплообменник; 9 – магистраль низкого давления; 10 – термоэлектрические модули; 11 – соединительный кабель; 12 – потребитель электроэнергии; 13 – штатный регулирующий клапан; 14 – задвижка.

Для электропитания комплекса учета газа типа “ФЛОУТЕК” и автоматики ГРС разработан, изготовлен и испытан в натуральных условиях термоэлектрический генератор ТЭГ14/06 (номинальная мощность 10 Вт по цепи 14 В постоянного тока). Генератор создан на основе охлаждаемой вихревой трубы калибра 32 мм и системы 16 термоэлектрических модулей типа МТ2-127-1,6.

Результаты экспериментальных исследований [5, 6] показали:

- электрогенератор ТЭГ14/06 – работоспособен в условиях ГРС при круглогодичной непрерывной эксплуатации;

- рабочие характеристики ТЭГ14/06 ($U = 14 \text{ В}$, $I = 0.6 \text{ А}$), контролируемые при среднестатистических диапазонах изменения параметров рабочего газа – давление на входе $P_1 = (14 \pm 3) \text{ атм.}$ и давлении на выходе $P_0 = (3 \pm 1) \text{ атм.}$; удовлетворяют техническим требованиям к электропитанию комплекса “Флоутек”.

2.7. Криодеструктор медицинский

Нами по просьбе специалистов медсанчасти предприятия в 2008 г. разработан прибор «Морозко-2», предназначенный для охлаждения участков кожного покрова биологического объекта при проведении сложных внутримышечных инъекций.

Прибор состоит из контактной пластины (см. рис.11 поз.1), охлаждаемой модулем термоэлектрическим (2), горячие спаи которого охлаждаются «кулером» (3 – алюминиевый радиатор, снабженный вентилятором). Прибор снабжен ручкой (4) и шнуром питания (5). Шнур питания оканчивается штекером (6) с боковым проводом (7) для подключения двух блоков питания.

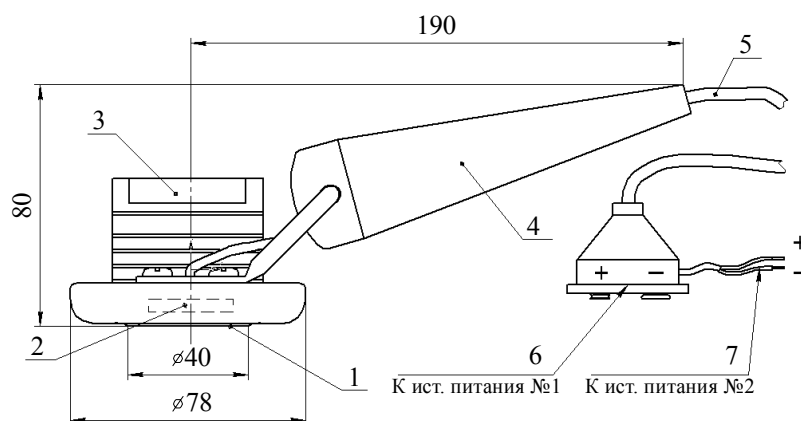


Рис. 11. Принципиальная схема термоаппликатора: 1 – контактная пластина; 2 – модуль термоэлектрический; 3 – радиатор с вентилятором («кулер»); 4 – ручка; 5 – шнур питания; 6 – штекер питания модуля термоэлектрического; 7 – шнур питания вентилятора.

Прибор позволяет быстро (2...3 мин.) провести местное охлаждение кожного покрова до $+2.4^{\circ}\text{C}$ на участке диаметром 40 мм и обеспечивает возможность выполнения инъекций без болевых ощущений пациента.

Литература

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. Лозбин Д.В. Особенности проектирования термоэлектрического теплового насоса для эталонного источника ИК-излучения / Д.В. Лозбин, Г.А. Смоляр // Термоэлектричество. – 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. Лозбин, 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. Лозбин, А.В. Панов [и др.] // Термоэлектричество. – 2002. – №1, С. 76 – 89.

Поступила в редакцию 27.08.2012.