



Л.И. Анатичук, В.Я. Михайловский, Л.Т. Струтинская, И.Ю. Лудчак

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, Черновцы

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ПИТАНИЯ МАЛОМОЩНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ



Приведены результаты исследований и разработки термоэлектрического генератора (ТЭГ) для питания автономных систем телеметрии газораспределительных станций (ГРС). Представлены результаты моделирования и оптимизация его основных энергетических параметров. Описана конструкция и приведены результаты экспериментальных исследований генератора.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, газораспределительные станции, физическая модель, газовое топливо.

Обеспечение потребителей газом в Украине осуществляется сетями, необходимые режимы газоснабжения в которых обеспечивают ~ 59 тыс. газорегуляторных пунктов, среди них около 10 тыс. газораспределительных станций.

Уровень технического обеспечения этих газовых объектов современными автоматическими устройствами на данный момент недостаточен, поэтому в ближайшие 10 лет необходимо обновить и модернизировать практически половину газовой инфраструктуры Украины с учетом требований техники безопасности. Модернизация предусматривает и внедрение точного учета количества потребляемого газа, определения физико-химических показателей на всех уровнях его распределения и потребления. Это одно из основных звеньев работы газотранспортной системы в рыночных условиях.

Главным фактором, который сдерживает внедрение эффективных автоматических систем регулирования, систем безопасности и

компьютеризованного учета газа, является отсутствие автономного питания на большинстве газораспределительных станций.

Проблема электрического питания может быть решена путем подведения энергии от централизованной сети. Однако в большинстве случаев это экономически не оправдано и потому важным условием внедрения эффективных автоматических систем контроля, а следовательно и безопасной эксплуатации ГРС, является наличие автономного электрообеспечения. Источники питания, которые в настоящее время используются в газовой промышленности, приведены на рис. 1.

Использование ветровых генераторов для питания ГРС ограничивается проблемой стабилизации частоты тока, которая изменяется при изменении скорости ветра [1]. Кроме того, ветровые установки требуют постоянного обслуживания квалифицированным персоналом. Параметры солнечных источников электричества также зависят от условий окружающей среды, потому они используются лишь в комплексе с другими источниками электрической энергии.



Для питания телеметрического оборудования создан ряд термогенераторов, которые используют тепло горячей нефти, движущейся по трубе скважины [2–5]. Однако электрическая мощность таких генераторов существенно зависит от температуры окружающей среды. Кроме того, их мощность недостаточна для питания систем телеметрии, в частности удаленных от скважин, где температура трубы с нефтью уменьшается, а соответственно уменьшается и перепад температур, необходимый для генерирования электрической энергии. Перспективным является использование термогенератора с вихревой трубой [6]. Горячий и холодный потоки, необходимые для создания разности температур, возникают в результате температурного разделения газа, который поступает от источника сжатого газа. Таким образом, при функционировании термогенератора с вихревой трубой нет необходимости сжигать топливо, что улучшает экологические показатели окружающей среды и пожарную безопасность получения электрической энергии. Однако такой генератор работает только при определенных расходах газового потока; его использование не эффективно на малорасходных ГРС 4 и 5 категорий. Электрическая мощность такого ТЭГ должна быть не менее 10 Вт. Вместе с тем практическая эксплуатация ГРС показы-

вает, что есть необходимость также в создании ТЭГ с пламенными газовыми источниками тепла. Они эффективны для непрерывного и длительного питания ГРС, удаленных от населенных пунктов, и малорасходных ГРС 4-й и 5-й категорий.

Целью данной работы является оптимизация параметров ТЭГ на газовом топливе и создание автономного источника электрической энергии для питания маломощной аппаратуры ГРС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для расчета основных параметров ТЭГ предложена физическая модель, приведенная на рис. 2. Модель состоит из источника тепла на газовом топливе, термоэлектрических батарей, горячего и холодного радиаторов для отвода тепла путем естественной конвекции воздуха.

Компьютерный расчет и проектирование ТЭГ проведены с учетом величин тепловых потоков, которые необходимо подвести к термоэлектрическим модулям и которые обеспечивают оптимальный режим работы генератора. Для проведения компьютерного расчета использован пакет прикладных программ Mathcad 11.

Уравнение теплового баланса для данной модели термогенератора:

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_3, \quad (1)$$

$$Q_1 - Q_4 = P + Q_2, \quad (2)$$

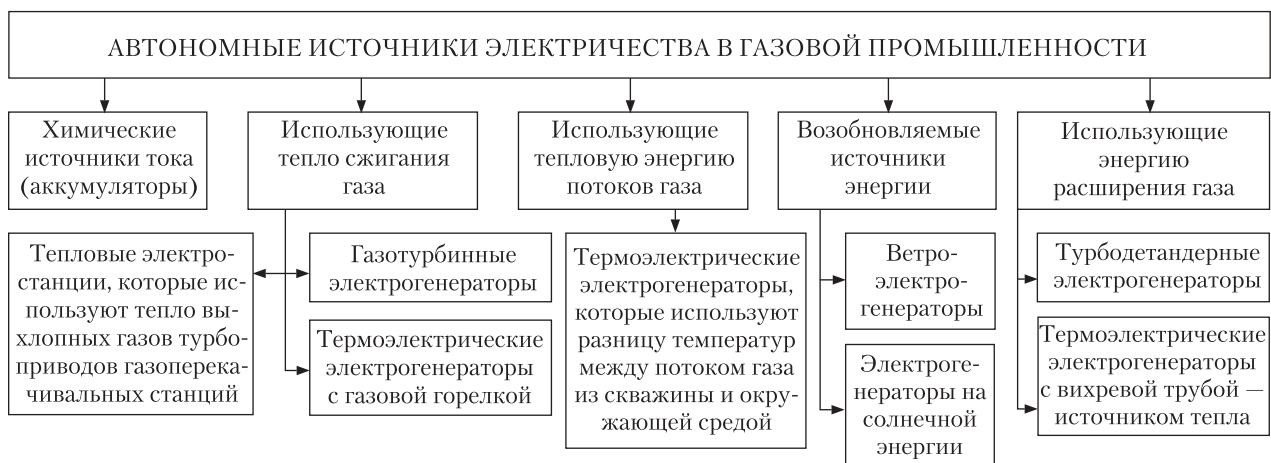


Рис. 1. Источники автономного электропитания, которые используются в газовой промышленности

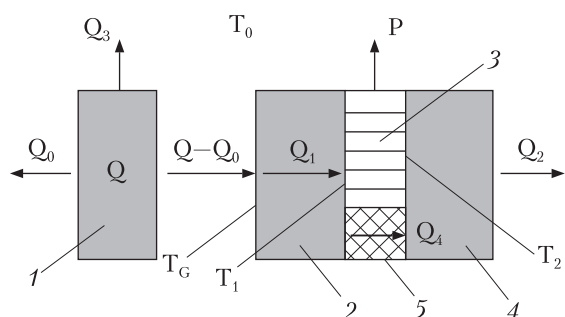


Рис. 2. Физическая модель термогенератора на газовом топливе: 1 – источник тепла; 2 – горячий теплообменник (радиатор); 3 – термоэлектрическая батарея (ТЭБ); 4 – холодный теплообменник; 5 – теплоизоляция

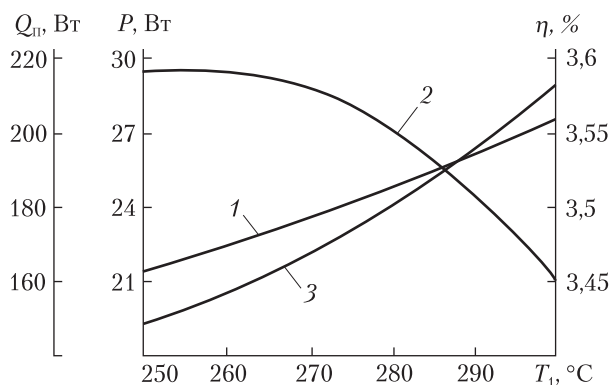


Рис. 3. Зависимость электрической мощности $P(I)$, КПД η (2) и потерь тепла Q_n (3) в термоэлектрическом генераторе от температуры T_1 горячей стороны термобатареи ($T_2 = 55\text{--}65^\circ\text{C}$, $g_T = 43\text{--}57$ г/час)

где Q_0 – потери тепла на элементах источника тепла; Q_1 – тепловая мощность, поступающая от горячих газов к горячему радиатору ТЭГ конвективным путем и излучением; Q_2 – тепловая мощность, отводимая от холодной стороны ТЭБ в окружающую среду путем конвекции; Q_3 – тепловая мощность, отводимая в окружающую среду с продуктами реакции горения; Q_4 – потери тепловой мощности на элементах конструкции горячего радиатора; P – электрическая мощность ТЭГ.

Математическое описание модели и метода расчетов приведены в работе [7].

На рис. 3 приведена зависимость КПД, электрической мощности и потерь тепла в термо-

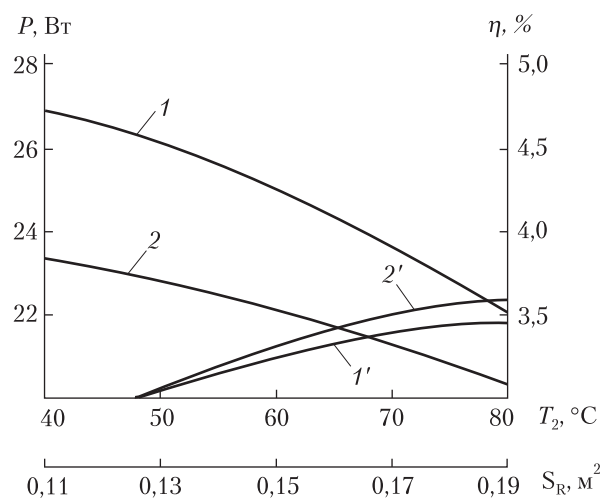


Рис. 4. Зависимость электрической мощности $P(I, I')$ и КПД η (2, 2') термоэлектрического генератора от температуры T_2 холодной стороны ТЭБ (1, 2) и площади теплоприемной поверхности горячего радиатора (1', 2') $T_2 = 60^\circ\text{C}$, $g_T = 50$ г/час, $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

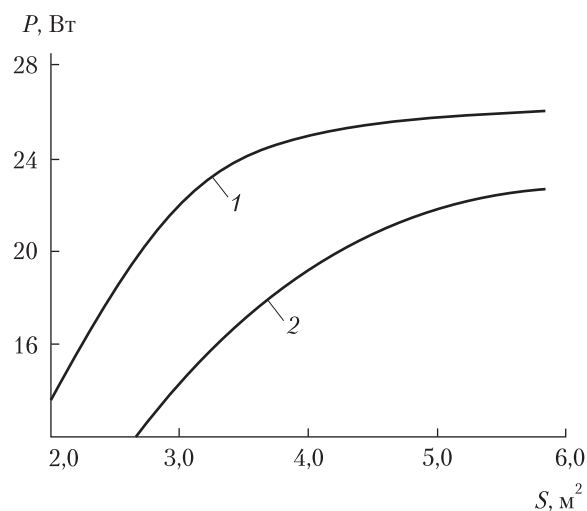


Рис. 5. Зависимость электрической мощности P (1, 2) термоэлектрического генератора от площади теплоотдающей поверхности холодного радиатора: 1 – $T_0 = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T_0 = 40^\circ\text{C}$

электрическом генераторе от температуры горячей стороны T_1 .

Максимальные рассчитанные значения КПД достигаются при температурах горячей стороны генератора в пределах $250\text{--}280^\circ\text{C}$, электрическая мощность при этом составляет $20\text{--}24$ Вт.

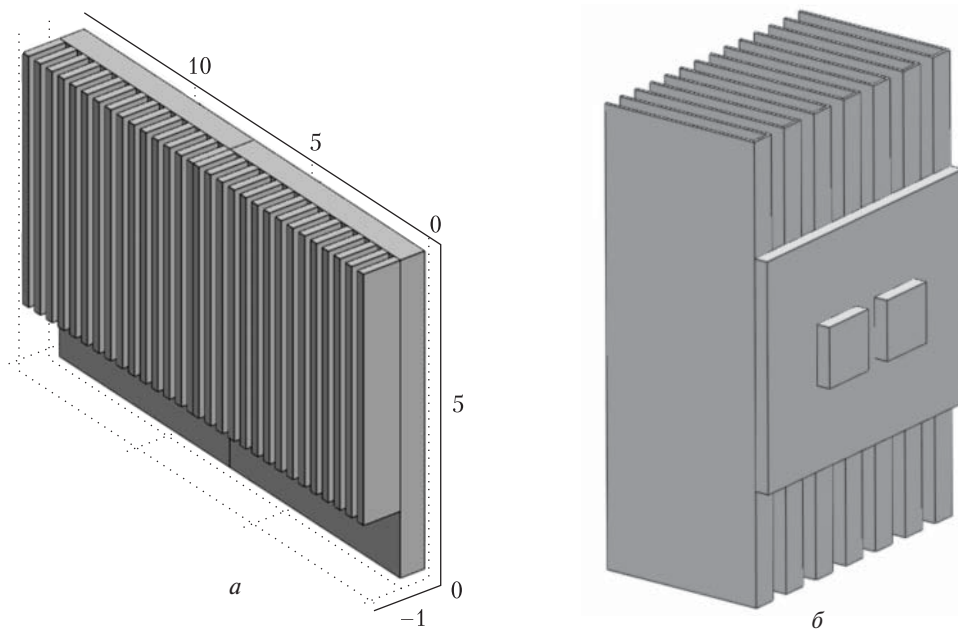


Рис. 6. Общий вид одной из симметричных частей горячего (а) и холодного радиатора (б) ТЭГ

При дальнейшем увеличении температуры КПД снижается в результате существенного (~1,5 раза) увеличения общих потерь тепла в генераторе. При этом основными являются потери тепла с продуктами сгорания топлива.

Зависимости КПД и электрической мощности термоэлектрического генератора от температуры холодной стороны ТЭБ при изменении температуры горячей стороны в пределах $T_1 = 275\text{--}295\text{ }^\circ\text{C}$ ($T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$) и от площади теплоприемной поверхности горячего радиатора при постоянной тепловой мощности источника тепла приведены на рис. 4.

Видно, что при температуре холодной стороны ТЭБ на уровне $80\text{ }^\circ\text{C}$ максимальная элек-

трическая мощность термогенератора составляет ~22 Вт. Увеличение площади теплоприемной поверхности свыше $0,16\text{ м}^2$ мало влияет на увеличение КПД и мощности ТЭГ. Влияние величины площади теплоотдающей поверхности холодного радиатора на электрическую мощность генератора при температуре окружающей среды $20\text{ }^\circ\text{C}$ и $40\text{ }^\circ\text{C}$ и расходе топлива 50 г/час приведено на рис. 5.

Следовательно, для получения электрической мощности на уровне $10\text{--}15\text{ Вт}$ при температуре окружающей среды $40\text{ }^\circ\text{C}$ площадь теплоотдающей поверхности холодного радиатора ТЭГ должна быть не меньше 3 м^2 . С учетом приведенных выше результатов найдены оп-

Геометрические параметры радиаторов для подвода и отвода тепла в ТЭГ

Тип радиатора	a , мм	b , мм	c , мм	k , шт.	h_1 , мм	h_2 , мм	S , м^2
Горячий радиатор	2,5	12	2,5	56	75	145	0,13
Холодный радиатор	14	130	2	26	400	210	3,0

Примечание: a – ширина канала между ребрами радиатора; c – толщина ребра радиатора; b – ширина ребра радиатора; k – общее количество каналов радиаторов; h_1 – высота радиатора; h_2 – ширина радиатора; S – общая площадь поверхности радиаторов.

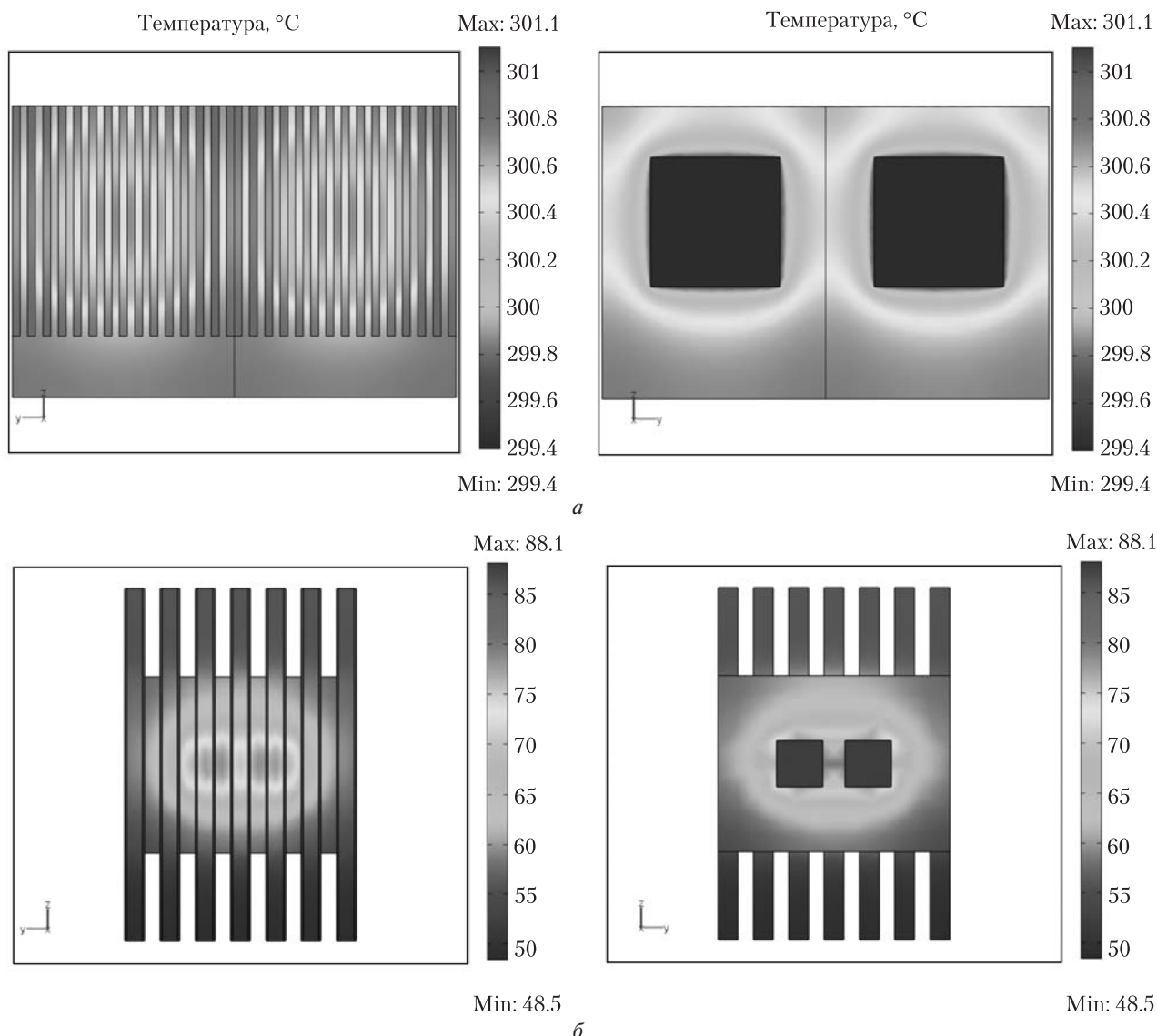


Рис. 7. Распределение температур теплообменника для подвода (а) и отвода тепла (б)

тимальные геометрические параметры холодного и горячего радиаторов термогенератора, которые приведены в таблице.

Система подвода тепла ТЭГ состоит из двух, симметрично размещенных относительно линейного источника тепла, частей (рис. 6, а), каждая из которых содержит 2 радиатора с одинаковыми геометрическими параметрами. Система отвода тепла представлена 2-мя радиаторами (рис. 6, б), которые имеют вертикаль-

ные ребра и расположены симметрично относительно источника тепла.

Поскольку в ТЭГ использован линейный источник тепла, важно найти распределение температуры радиаторов для подвода и отвода тепла. Моделирование систем подвода и отвода тепла проведено с помощью программы COMSOL, результаты приведены на рис. 7.

Как видно из приведенного распределения, разность температур поверхности горячего ра-

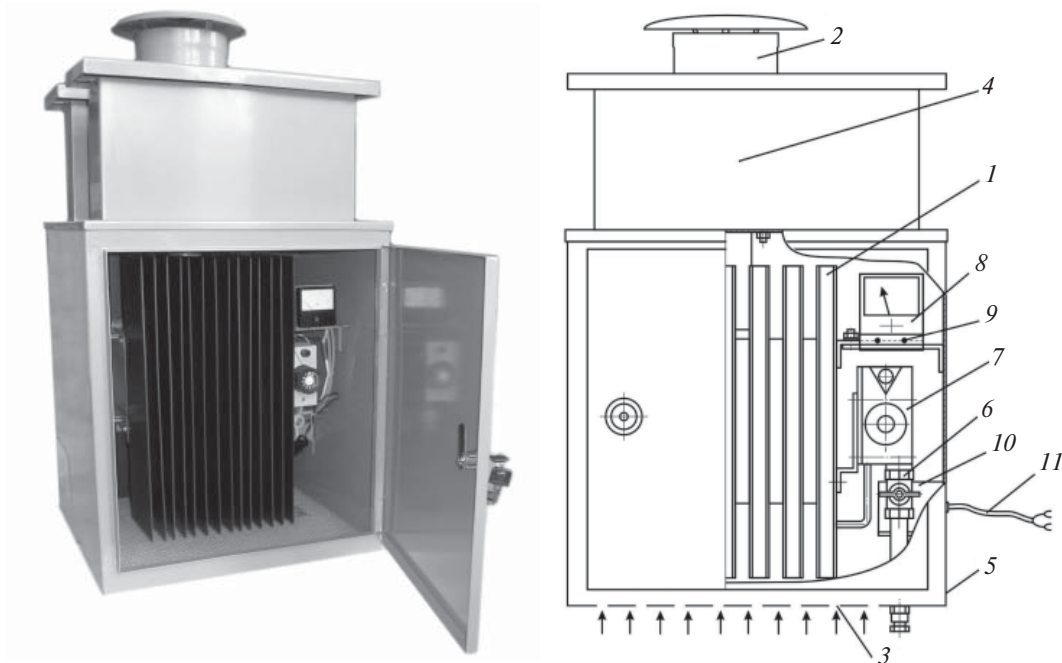


Рис. 8. Внешний вид и схема термоэлектрического генератора Алтек-8038 для питания автоматических устройств газораспределительных станций: 1 — холодный радиатор, 2 — дымовая труба, 3, 4 — соответственно отверстия для входа и вытяжная труба для выхода воздуха охлаждения, 5 — корпус, 6 — газовый кран, 7 — газовая автоматика, 8 — вольтметр, 9 — светодиодный индикатор запуска горелки, 10 — электронный преобразователь напряжения, 11 — электрический кабель для подсоединения потребителя тока

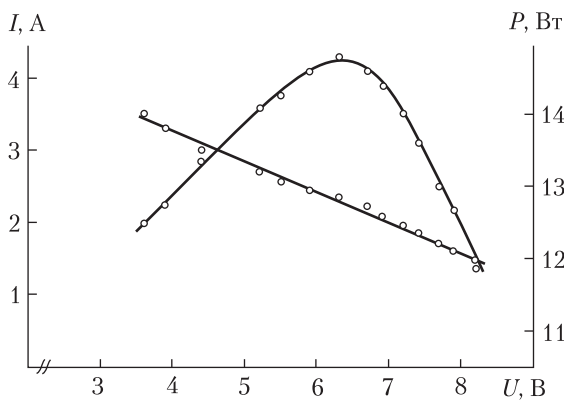


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика термоэлектрического преобразователя

диатора не превышает 2—2,5 °С. При этом температура горячих газов на выходе из горячего радиатора составляет 270—280 °С, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности отвода тепла от горячих продуктов сгорания газового топлива теплоприемной

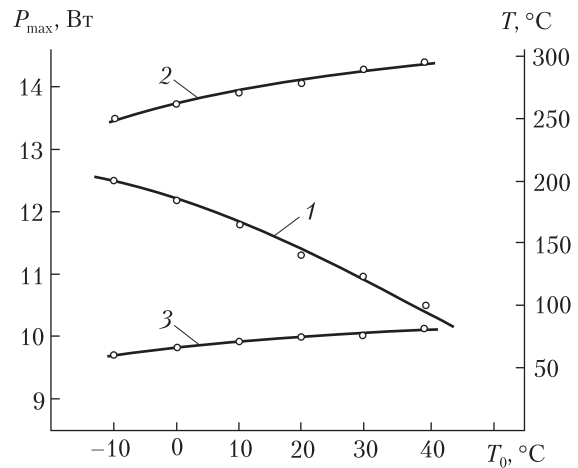


Рис. 10. Зависимость электрической мощности (I), температуры горячей (2) и холодной (3) сторон термогенератора от температуры окружающей среды

поверхностью горячего радиатора. Для холодного радиатора разность температур существенно выше. Градиент температур по высоте радиатора составляет 5—7 °С, а перепад тем-

ператур между холодной стороной модуля и основой двойного ребра радиатора составляет 10—15 °С, однако в целом эффективность отвода тепла от модулей удовлетворительна.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЭГ

Внешний вид и схема термоэлектрического генератора приведены на рис. 8. Термоэлектрический генератор содержит горячий и холодный радиаторы, между которыми расположены термоэлектрические модули. В качестве источника тепла использована инжекционная газовая горелка частичного смешивания топлива и воздуха. Воздух для сгорания топлива поступает в камеру сгорания, где размещена основная горелка и пусковое устройство. Продукты сгорания отводятся в окружающую среду дымовой трубой 2. Охлаждение термогенератора осуществляется путем естественной конвекции воздуха, поступающего через отверстия 3 в корпусе 5, и отводится в окружающую среду вытяжными трубами 4. Термогенератор оснащен газовым краном 6, газовой автоматикой 7 и вольтметром 8, светодиодами 9 для индикации и контроля запуска источника тепла. В термогенераторе использованы модули Алтек-1061, изготовленные из термоэлектрических материалов на основе Bi_2Te_3 . Максимальная рабочая температура горячей стороны модулей — на уровне 300 °С.

Экспериментальные исследования параметров термогенератора проводили при температурах окружающей среды от -10 до +40 °С. При этом измеряли температуру горячей стороны модулей, температуру основы холодного радиатора, на которой расположены модули, температуру продуктов сгорания топлива, которые отводятся от ТЭГ, напряжение на выходе генератора и силу тока. Давление газа (метана) на входе генератора поддерживали постоянным - 0,019 атм.

На рис. 9 приведена вольт-амперная характеристика термоэлектрического преобразователя при температурах горячей стороны 250 °С, холодной - 68 °С и окружающей среды $T_0 = 20$ °С. Максимальная выходная электрическая мощ-

ность термогенератора на согласованной нагрузке ($R = 2,3$ Ом) достигается в интервале напряжения 6,2—6,5 В.

Для обеспечения питания потребителей ГРС напряжением 24 В термогенератор оснащен электронным преобразователем напряжения. При температуре окружающей среды 20° выходная мощность генератора составляет 11,3 Вт, стабильность электрических параметров достигается в течение 18—20 мин. При пониженной (-10 °С) и повышенной (+40 °С) температуре окружающей среды время достижения стабильного режима работы генератора изменяется соответственно от 15 до 24 мин. Максимальная электрическая мощность термоэлектрического генератора в исследованном диапазоне температур окружающей среды составляет не меньше 10,5 Вт при напряжении 24 В (рис. 10). Оптимальный расход топлива (используется метан с теплотой сгорания 13270 ккал/кг) для обеспечения выходной мощности ТЭГ не меньше 10 Вт в этом диапазоне температур составляет 53 г/час. При этом температура горячей стороны термогенератора не превышает максимально допустимую рабочую температуру и находится в пределах 250—295 °С, температура холодной стороны составляет 55—86 °С.

Конструкция термогенератора и источника тепла обеспечивает стабильность горения топлива и генерирования необходимой электрической мощности при условии работы генератора на открытом воздухе при скорости ветра 5—10 м/с.

ВЫВОДЫ

1. Найдены оптимальные тепловые и геометрические параметры теплообменников для подвода и отвода тепла от термобатарей генератора путем естественной конвекции горячих газов и воздуха, при которых достигаются максимальные значения электрической мощности термогенератора.

2. Показано, что при изменении температуры окружающей среды от -10 °С до +40 °С выходная мощность термогенератора для питания ГРС изменяется в пределах 10,5—12,5 Вт. Эксперимен-

тально найденная величина расхода метана, которая обеспечивает генерирование выходной электрической мощности не меньше 10 Вт в исследованном диапазоне температур, составляет 53 г/час. При таких условиях максимальная рабочая температура горячей стороны модулей в случае работы термогенератора при повышенных температурах окружающей среды не превышает 300 °С.

3. Использование ТЭГ позволит решить проблему автономного питания ГРС, повысить эффективность комплексов учета природного газа, осуществить непрерывное питание исполнительных механизмов регуляции параметров потока газа и повысить безопасность эксплуатации ГРС в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрахманов Р.С., Назмеев Ю.Г., Якимов А.В. Об эффективности использования ветроэнергетики в регионах с умеренными скоростями ветра // Изв. РАН Энергетика. — 2001. — № 5. — С. 93–102.
2. Pat. GB 2145876. МКИ: H01L 35/30. — DC power generator for telemetry and like equipment from geothermal energy / Beitner Shlomo. — Оpubл. 03.04.1985.
3. Pat. GB 2140206. МКИ: H01L 35/00. — Thermoelectric power generator associated with oil pipelines / David Chinery. — Оpubл. 21.11.1984.
4. Pat. GB 2433753. МКИ: H01L 35/30. — Thermoelectric power generation and capacitor storage / Jeffryes Benjamin Peter (GB), Huang Songming (GB). — Оpubл. 04.07.2007.
5. Pat. RU 2235875. МКИ: E21B47/12. — Thermoelectric Autonomous Power Source / Grigashkin G.A. (RU) — Оpubл. 10.09.2004.
6. Pat. RU 2234161. МКИ: H01J45/00. — Thermoelectric vortex generator / Zhukhovitskij D.L.; Tsynaeva A.A. — Оpubл. 10.08.2004.
7. Анатичук Л.И., Михайловский В.Я., Гищук В.С., Лудчак И.Ю. Термоэлектрический источник для питания автономных систем телеметрии ГРС // Термоэлектричество. — 2008. — № 3. — С. 66–72.

*Л.И. Анатичук, В.Я. Михайловський,
Л.Т. Струтинська, І.Ю. Лудчак*

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ МАЛОПОТУЖНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ СТАНЦІЙ

Приведені результати досліджень і розробки термоелектричного генератора для живлення автономних систем телеметрії газорозподільних станцій (ГРС). Представлені результати моделювання і оптимізація його основних енергетичних параметрів. Описана конструкція і наведені результати експериментальних досліджень генератора.

Ключові слова: термоелектричний генератор, газорозподільні станції, фізична модель, газове паливо.

*L.I. Anatyshuk, V.Ya. Mykhailovskiy,
L.T. Strutynska, I.Yu. Ludchak*

THERMOELECTRIC GENERATOR FOR POWER SUPPLY TO LOW-POWER ELECTRONIC EQUIPMENT OF GAS-DISTRIBUTING STATIONS

Results of research and development of thermoelectric generator for power supply to self-contained telemetry systems of gas-distributing stations are presented. Results of simulation and optimization of its basic power parameters are given. The generator design is described and results of its experimental studies are given.

Key words: thermoelectric generator, gas-distributing stations, physical model, gas fuel.

Надійшла до редакції 24.02.09.