

Л.І. Анатичук, В.Я. Михайловський, Л.Т. Струтинська

Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Чернівці

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ АВТОНОМНИХ ОПАЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ГАЗОВОМУ ПАЛИВІ



Наведено результати досліджень та розробки термоелектричного генератора для живлення допоміжних електричних пристроїв автономних систем опалення. Запропонована фізична модель генератора на газовому паливі, наведено результати розрахунку основних енергетичних та конструктивних параметрів термогенератора. Подані оптимальна конструкція секційного генератора для систем водяного опалення та результати експериментальних досліджень його параметрів.

Ключові слова: термоелектричний генератор, фізична модель, система опалення, теплообмінник, модуль.

ВСТУП

Сучасні ефективні системи опалення оснащуються рядом допоміжних пристроїв (напр., датчиками повноти згорання палива, засобами оперативного контролю та автоматичного регулювання температури вихідних газів, рідкого теплоносія і т. ін.). Крім того, у таких системах зазвичай використовуються електричні насоси для примусової циркуляції рідкого теплоносія і вентилятори для нагнітання повітря у камеру згорання або відведення від неї димових газів. Живлення таких пристроїв здійснюється від центральної електромережі.

Однак, незважаючи на ряд позитивних якостей (висока ефективність, зручність в експлуатації, комфортність), такі опалювальні системи мають і суттєві недоліки. Зокрема під'єднання централізованої мережі до водяних систем опалення є потенційно небезпечним для здоров'я людини. Окрім цього, функціонування таких систем стає неможливим у випадку відключення електропостачання або при відсутності централізованої електромережі.

Результативним шляхом вирішення означеної проблеми є використання термоелектричних генераторів (ТЕГ) [1–3], котрі здійснюють пряме перетворення теплової енергії в електричну.

Наявність у системах опалення ТЕГ забезпечує живлення запобіжної автоматики, дозволяє створювати оптимізовані газові суміші, автоматизувати і здійснити точний контроль і регулювання температури. Цим відкривається можливість розробки й впровадження автономних джерел тепла нового покоління, які працюють на природному або зрідженому газі та дають можливість досягти максимально повного згорання палива, підвищити ефективність опалювальних систем та мінімізувати забруднення навколишнього середовища.

Метою наших досліджень було створення термоелектричних джерел живлення для автономних систем опалення і гарячого водопостачання на газовому паливі.

РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вирішення конкретної практичної задачі проведено з врахуванням чинників, сукупність яких дозволяє створити оптимальну конструк-

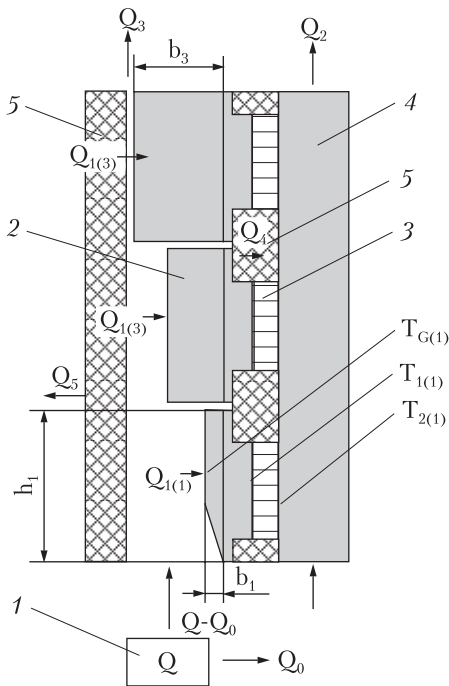


Рис. 1. Фізична модель термогенератора на газовому паливі: 1 – джерело тепла; 2 – гарячий теплообмінник (радіатор); 3 – термоелектрична батарея; 4 – холодний теплообмінник; 5 – теплоізоляція

цію та отримати найбільшу ефективність термогенератора.

Основні параметри термогенератора розраховані на основі фізичної моделі. Модель (рис. 1) передбачає окреме джерело тепла: інжекційний пальник часткового змішування палива і повітря, термоелектричні модулі розташовані між гарячим та холодним теплообмінниками. Тепло до гарячого теплообмінника генератора надходить завдяки вільній конвекції гарячих продуктів згоряння палива, що рухаються у вертикальних каналах теплообмінника. Відведення тепла від термоелектричних модулів здійснюється рідким теплоносієм, що примусово циркулює у системі опалення.

Для забезпечення надходження відповідних теплових потоків до гарячого боку термоелектричних модулів за умови зниження температури гарячих газів по висоті ТЕГ в системі підведення тепла було використано кілька секцій теплооб-

мінників з різною по величині поверхнею теплообміну.

У фізичній моделі прийнято:

- температури теплоприймальної поверхні гарячого радіатора, гарячого боку термоелектричної батареї (ТЕБ) та продуктів згоряння на виході з гарячого радіатора однакові;

- за визначальну температуру для розрахунку коефіцієнта конвекції прийнято T_{cep} [4, 5], яка обчислюється за співвідношенням $T_{cep} = (T_2 + T_1)/2$, де T_2, T_1 – температура газів відповідно на вході і виході гарячого радіатора;

- за умови $Gr \cdot Pr > 10^3$ коефіцієнт конвекції визначається за емпірично знайденою формулою [6]:

$$Nu_{cep} = 0,65 \cdot \left(Cr \cdot Pr \cdot \frac{d_e}{2h'} \right)_{cep}^{0,25}, \quad (1)$$

де h' – висота каналу гарячого радіатора, d_e – ефективний діаметр каналу;

- за умови $Gr \cdot Pr \leq 10^3$ передача тепла від газової суміші до стінок каналів гарячого радіатора здійснюється тільки за рахунок теплопровідності, тобто коефіцієнт конвекції приймається рівним 1.

- числа Грасгофа, Прандтля знайдено з урахуванням залежності фізичних властивостей газової суміші (кінематичної, динамічної в'язкості, питомої теплоємності, теплопровідності) від T_{cep} [7–9];

- термоелектричний перетворювач складається з стандартних термоелектричних модулів Алтек-1061, виготовлених з термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 , максимальна робоча температура гарячого боку яких не перевищує 300 °С.

Комп'ютерне проектування ТЕГ з секційним підведенням тепла до ТЕБ здійснювалося з урахуванням визначених теплових потоків, які забезпечують оптимальний режим роботи термогенератора. При цьому виходили з умови забезпечення надходження однакової кількості тепла до кожного модуля та однакової робочих температур для всіх термоелектричних модулів генератора.

Запишемо рівняння теплового балансу для даної моделі термогенератора:

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_3 + Q_5; \quad (2)$$

$$Q_1 = P + Q_2 + Q_4. \quad (3)$$

Тут Q_1 — теплова потужність, яка надходить від джерела тепла до гарячого секційного теплообмінника ТЕГ конвективним шляхом і випромінюванням і визначається співвідношенням

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n Q_{1(i)}, \quad (4)$$

де $n = 2, 3$ — кількість секцій у гарячому теплообміннику термоелектричного генератора, $Q_{1(i)}$ — теплова потужність, яка надходить конвективним шляхом та випромінюванням від гарячих газів до гарячого радіатора i -ої секції [10]; Q_2 — теплова потужність, яка відводиться від холодного боку ТЕБ потоком рідкого теплоносія, що циркулює в рідинному теплообміннику; Q_3 — теплова потужність, яка відводиться у навколишнє середовище з продуктами реакції горіння палива [11]:

$$Q_3 = Q_{CO_2} + Q_{H_2O} + Q_{N_2}; \quad (5)$$

Q_4 — теплова потужність, яка втрачається на елементах конструкції гарячого теплообмінника:

$$Q_4 = \sum_{i=1}^n Q_{4(i)}, \quad (n = 2, 3), \quad (6)$$

де $Q_{4(i)}$ — теплова потужність, яка втрачається на елементах конструкції гарячого радіатора i -ої секції і визначається співвідношенням

$$Q_{4(i)} = \frac{\lambda_i \cdot S_i}{L_i} (T_{1(i)} - T_{2(i)}). \quad (7)$$

Тут λ_i — теплопровідність ізоляційного матеріалу; S_i — площа поверхні гарячого радіатора i -ї секції, яка не зайнята модулями; L_i — товщина шару теплоізоляції; $T_{1(i)}$, $T_{2(i)}$ — температура гарячого та холодного боку ТЕБ i -ї секції відповідно; P — електрична потужність ТЕГ

визначається як

$$P = \sum_{i=1}^n n_i \cdot P_i, \quad (8)$$

де $P_i = P T_{1(i)}, T_{2(i)}$ — електрична потужність одного модуля при визначених температурах гарячого та холодного боку; n_i — кількість модулів у секції.

Розв'язок системи рівнянь теплового балансу (2)–(3) дав можливість визначити основні енергетичні та конструктивні параметри термоелектричного генератора для газового котла, систем підведення і відведення тепла.

За умови $T_2 = 70 \div 80$ °С, $T_1 = 290 \div 300$ °С електрична потужність ТЕГ складає $60 \div 64$ Вт, а ефективність знаходиться в межах $3,5 \div 3,7$ %.

Знайдено залежність ККД та електричної потужності ТЕГ від загальної площі теплоприймальної поверхні гарячих радіаторів при постійній кількості тепла, що надходить до модулів. Площу змінювали в межах, відповідних робочим температурам гарячого боку модуля ($250 \div 300$ °С). Найбільші значення потужності та ККД досягаються при $S = 4\,500$ см², причому оптимальне співвідношення площ теплоприймальних поверхонь секцій S_2/S_1 , S_3/S_2 складає $2,0 \div 2,2$.

Система тепловідведення термогенератора складається з одного суцільного рідинного теплообмінника, одна поверхня якого має тепловий контакт з термоелектричними модулями, а друга має ребра, занурені у рідкий теплоносіє, що циркулює у системі опалення. Оптимальна геометрія холодних радіаторів термогенератора розрахована за умови забезпечення відведення необхідної кількості тепла Q_2 :

$$Q_2 = \sum_{i=1}^n Q_{2(i)} \quad (n = 2, 3), \quad (9)$$

де $Q_{2(i)}$ — тепло, яке відводиться від холодного боку термобатареї i -ї секції. При цьому

$$\sum_{i=1}^n Q_{2(i)} = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n S_{xi} (T_{2(i)} - T_0), \quad n = 2, 3, \quad (10)$$

де $S_{xi} = S/n$, (11)

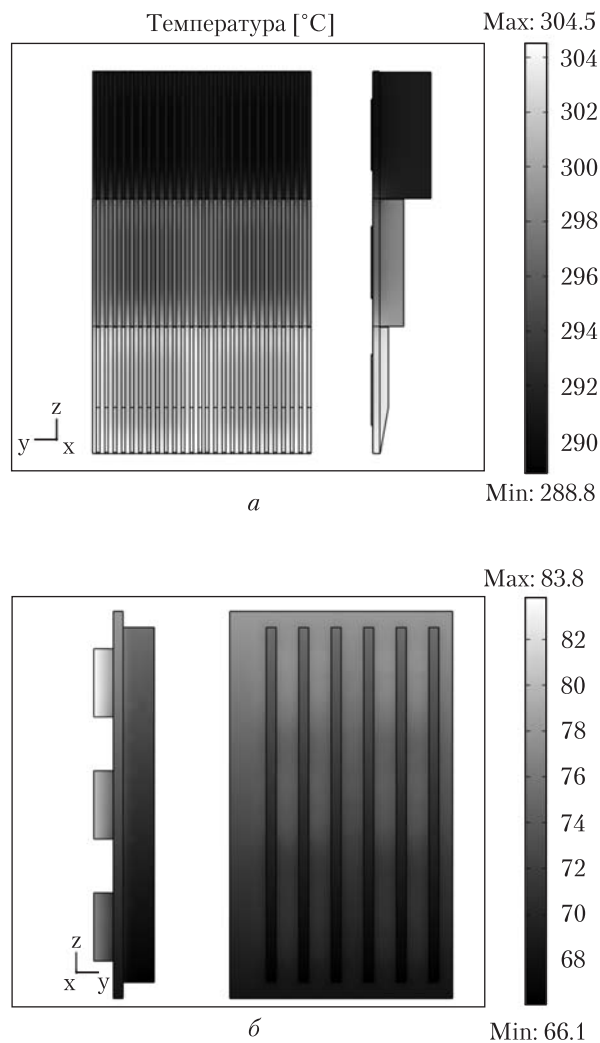


Рис. 2. Розподіл температур теплообмінника: а – для підведення тепла; б – для відведення тепла

α – коефіцієнт тепловіддачі холодного радіатора; S' – загальна площа поверхні холодного радіатора; T_0 – середня температура теплоносія (води) в холодному радіаторі.

Результати розрахунку геометричних параметрів гарячого та холодного теплообмінників наведені в таблиці.

За таких умов досягається мінімальний градієнт температур ($\Delta T = 3 \div 5$ °C) між теплоприймальними послідовно розташованими у потоці гарячих газів поверхнями окремих секцій ТЕГ, а відповідно і між гарячими боками термоелектричних модулів різних секцій (рис. 2). Розподіл температур (моделювання проведено за допомогою програми COMSOL) на гарячому і холодному боці термогенератора (що містить секційний гарячий теплообмінник та суцільний холодний) наведено з урахуванням того, що теплові процеси у симетричних частинах ТЕГ аналогічні.

У випадку використання традиційного гарячого теплообмінника, який має суцільну основу і поздовжні ребра однакової висоти, градієнт температур теплоприймальної поверхні складає 25–30 °C. Це призводить до того, що модулі, розташовані на різних рівнях, працюють не в оптимальному температурному режимі.

Отже, розрахункова електрична потужність термоелектричного секційного генератора для систем опалення при максимальних температурах $T_1 = 290 \div 300$ °C, $T_2 = 80$ °C та оптимальних геометричних параметрах теплообмінників для підведення і відведення тепла

Оптимальні геометричні параметри теплообмінників для підведення та відведення тепла в термогенераторі

Теплообмінники	α , мм	c , мм	b_1 , мм	b_2 , мм	b_3 , мм	k , шт.	h_1 , мм	h_2 , мм	S , см ²
Гарячий	2,5	2	6	16	32	12	75	64	4 500
Холодний	13	5	26	–	–	13	238*	271*	2 050

Примітки: α – ширина каналу між ребрами радіаторів; c – товщина ребра радіаторів кожної секції; k – кількість каналів у радіаторі для одного модуля; h_1 – висота радіатора для одного модуля; h_2 – ширина радіатора для одного модуля; S – загальна теплоприймальна поверхня теплообмінників для підведення та відведення тепла; * – параметри теплообмінників для 12 модулів.

та тепловій потужності джерела тепла на рівні 1 840 Вт складає 64 Вт.

КОНСТРУКЦІЯ ТЕРМОГЕНЕРАТОРА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Генератор (рис. 3) складається з чотирьох основних частин: гарячого теплообмінника, холодного теплообмінника, термоелектричних модулів, розташованих між ними, та газового джерела тепла полум'яного типу. Гарячий теплообмінник складається з 3-х секцій, кожна з яких містить по 4 окремі радіатори, що мають з одного боку вертикальні ребра, розташовані у потоці гарячих газів, а з другого — площину для розміщення термоелектричного модуля. Площа теплоприймальної поверхні кожної секції, а відповідно і окремих радіаторів, з яких вона складається, різні. Найменшу площу мають радіатори першої секції, розташовані в нижньому ряду, найбільшу — радіатори 3-ої секції, розташовані у верхньому ряду.

Холодний теплообмінник має вигляд суцільної основи, з одного боку якої є вертикальні ребра, які охолоджуються рідким теплоносієм, що циркулює у водяному контурі котла, а з другого — виступи з площадками, на яких розташовані термоелектричні модулі. До торців ребер гарячих радіаторів 3-ої секції прилягає теплоізолюючий елемент, внутрішній об'єм якого заповнений тепловою ізоляцією на основі волокнистого кремнезему ($\chi = 0,06 \text{ Вт / м} \cdot \text{К}$). Проміжок між теплоізолюючим елементом та гарячим радіатором 1-ої секції слугує камерою згоряння. В нижній частині генератора симетрично до теплоізолюючого елемента та радіаторів 1-ої секції розташований головний палик інжекторного типу, оснащений пусковим пристроєм. Продукти згоряння палива відводяться від генератора за допомогою димової труби, яка з'єднана з димовою камерою опалювального котла.

Термогенератор оснащений електронним стабілізатором напруги. Циркуляція рідкого теп-

лоносія у рідинному контурі системи опалення здійснюється електричним насосом, який живиться від термогенератора. На виході димової камери котла встановлено вентилятор, який призначений для інтенсифікації відведення димових газів з котла. Це особливо важливо у період запуску котла, оскільки уже у перші хвилини роботи котла необхідно сформувати достатню тягу для забезпечення ефективного згоряння палива.

Експериментальні дослідження параметрів термогенератора проводили при температурах $35 \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$ вхідної води у котел. При цьому вимірювали температуру гарячих боків модулів у кожній секції, температуру холодного радіатора, температуру продуктів згоряння

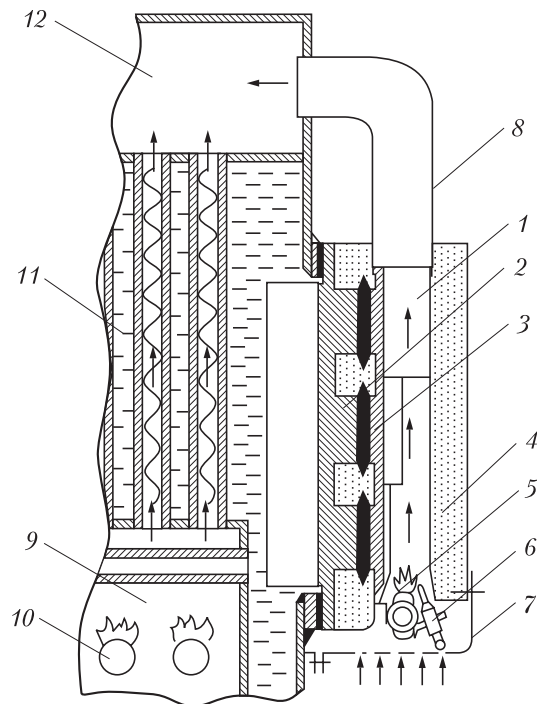


Рис. 3. Схема термоелектричного генератора для систем опалення: 1, 2 — гарячий і холодний теплообмінники відповідно; 3 — термоелектричні модулі; 4 — теплоізолюючий елемент; 5 — джерело тепла (головний палик); 6 — пусковий пристрій; 7 — кожух палика; 8 — димова труба генератора; 9 — камера згоряння котла; 10 — пальники котла; 11 — теплообмінники котла; 12 — димова камера котла

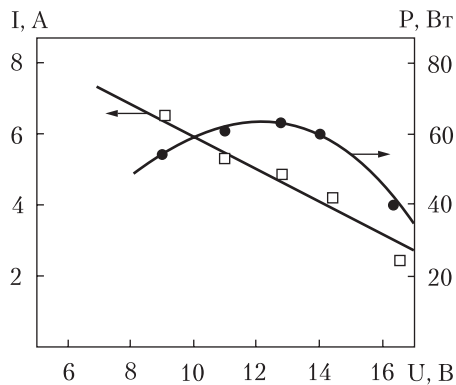


Рис. 4. Вольт-амперна характеристика ТЕГ для систем водяного опалення

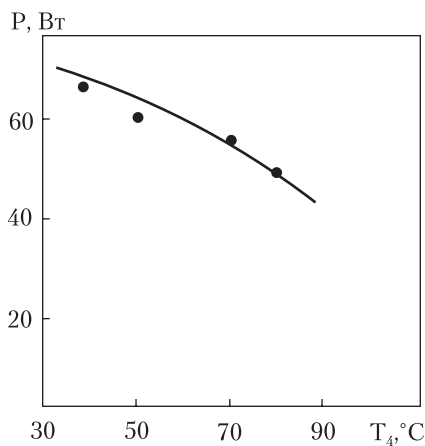


Рис. 5. Залежність електричної потужності P ТЕГ від температури T_b рідкого теплоносія

палива на виході генератора, напругу на виході генератора і силу струму.

Вольт-амперну характеристику термоелектричного генератора (рис. 4) наведено при середній температурі гарячого боку $285\text{ }^{\circ}\text{C}$, холодного — $35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Доведено, що максимальна електрична потужність на узгодженому навантаженні досягається в інтервалі напруги $11,5\text{--}13,5\text{ В}$. Опір зовнішнього навантаження при цьому складає $2,2\div 3\text{ Ом}$. Експериментальні дослідження показали, що максимальний градієнт температур по висоті теплоприймальної поверхні між секціями 1 і 3 теплообмінника складає $10\div 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура відпрацьованих газів

на виході димової труби генератора на рівні $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, що свідчить про достатньо високу ефективність відведення тепла від гарячих газів.

Електрична потужність термогенератора суттєво залежить від температури вхідної води (рис. 5). Видно, що при температурі холодного теплоносія $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ електрична потужність ТЕГ зменшується до 50 Вт , що складає $\sim 20\%$ від потужності, отриманої при низьких ($\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах холодної води. Витрата газу (для досліджень використовувався пропан—бутан) при цьому складає 143 г/год . Для розробленого варіанта опалювального приладу (котел КОГВ-11,2 з вбудованим термогенератором) швидкість циркуляції рідкого теплоносія мало впливає на основні енергетичні характеристики термоелектричного джерела живлення. Оптимальна швидкість циркуляції теплоносія у рідинному контурі складає $200\text{--}400\text{ л/год}$.

Отже, за реальних умов експлуатації котла електрична потужність термогенератора може змінюватись в межах $50\text{--}64\text{ Вт}$. Отримана потужність достатня для живлення циркуляційного насоса примусової подачі теплоносія до батарей опалення ($30\div 40\text{ Вт}$) і вентилятора для примусового відведення димових газів з димової камери котла ($5\div 7\text{ Вт}$). Напруга живлення циркуляційного насоса і вентилятора — 12 В . Крім того, частина отриманої електричної енергії може використовуватись для живлення інших допоміжних пристроїв контролю і керування роботою газового джерела опалення (напр., датчиками ефективності згоряння палива, температури горіння, перегріву гарячих і холодних теплообмінників).

ВИСНОВКИ

1. Визначено оптимальні геометричні параметри конвективних теплообмінників для секційного підведення тепла до модулів. Використання цих параметрів забезпечує ефективне відведення тепла від продуктів згоряння палива та мінімальний градієнт температур теплоприймальної поверхні генератора,

який за експериментальними даними складає $10 \div 15$ °С. Оптимальне співвідношення площ ($S_2/S_1, S_3/S_2$) теплоприймальних поверхонь секцій гарячого теплообмінника складає $2,0 \div 2,2$.

2. За реальних умов експлуатації систем опалення (зміна температури теплоносія від 30 до 80 °С) величина вихідної електричної потужності термоперетворювача може змінюватися в межах 20 %, що вимагає при розробці термогенератора узгодження його мінімальної вихідної зі споживаною потужністю електричних пристроїв конкретної системи опалення.

3. Розроблено автономне джерело опалення на газовому паливі з вбудованим термоелектричним генератором, що дозволяє застосувати ефективну систему примусової циркуляції рідкого теплоносія та примусове відведення димових газів з камери згоряння водонагрівача. Цим підвищується ефективність джерел опалення і зменшується кількість токсичних NO_x і CO у продуктах згоряння палива, а також забезпечується незалежність роботи джерела опалення від централізованої електромережі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Новиков А.И. Термоэлектрический источник питания для отопительных котлов // Термоэлектрики и их применения // Материалы VIII Межгосударственного семинара, С.-Петербург, 2002. — С. 396—401.
2. Пат. RU 2224190. МКИ: F25B21/20. Устройство для генерирования тепловой и электрической энергии / Н.В. Шалаев, О.А. Новосельцев (RU) // Заявл. 23.04.2003. Опубл. 20.02.2004.
3. Анатичук Л.И., Михайловський В.Я. Розвиток досліджень і розробок термогенераторів на органічному паливі // Термоелектрика. — 2004. — № 4. — С. 5—38.
4. Григорьев В.А., Зорин В.М. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. — М.: Энергоиздат, 1982. — 510 с.
5. Швеиц И.Т., Толубинский В.И., Алабовский А.Н. Теплотехника. — К.: Вища школа, 1976. — 517 с.
6. Болгарский А.В., Голдобеев В.И., Идиатуллин Н.С. Сборник задач по термодинамике и теплопередаче. — М.: Высшая школа, 1972. — 304 с.

7. Зарембо К.С. Справочник по транспорту горючих газов. — М.: Гостоптехиздат, 1962. — 888 с.
8. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. — Л.: Химия, 1966. — 535 с.
9. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. Справочник. — М.: Атомиздат, 1976. — 1005 с.
10. Анатичук Л.И., Лусте О.Я., Михайловський В.Я. Секційні термоелектричні генератори на органічному паливі // Термоелектрика. — 2005. — № 4. — С. 20—25.
11. Михайловский В.Я., Струтинская Л.Т., Чайковская Е.В. Моделирование термоэлектрической системы генерирования тепловой и электрической энергии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2005. — № 4 (58). — С. 27—30.

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

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ

Приведены результаты исследований и разработки термоэлектрического генератора для питания вспомогательных электрических устройств автономных систем отопления. Предложена физическая модель генератора на газовом топливе, приведены результаты расчета основных энергетических и конструктивных параметров термогенератора. Представлена оптимальная конструкция секционного генератора для систем водяного отопления и результаты экспериментальных исследований его параметров.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, физическая модель, система отопления, теплообменник, модуль.

L.I. Anatyshuk, V.Ya. Mykhailovsky, L.T. Strutinska

GAS-FUELED THERMOELECTRIC GENERATOR FOR SELF-CONTAINED HEATING SYSTEMS

The results of research and development of thermoelectric generator for power supply to accessory electric devices of self-contained heating systems are presented. Physical model of gas-fueled generator is proposed, results of calculating the basic power and design parameters of thermogenerator are given. Optimal design of sectional generator for water heating systems is presented, along with the results of experimental research on its parameters.

Key words: thermoelectric generator, physical model, heating system, heat-exchanger, module.

Надійшла до редакції 07.02.08.