

К. х. н. Л. Т. СТРУТИНСКАЯ, к. х. н. В. Я. МИХАЙЛОВСКИЙ,
Е. В. ЧАЙКОВСКАЯ

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества
E-mail: strutinska@mail.ru

Дата поступления в редакцию
19.12.2005 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. П. МИХАЛЬЧЕНКО
(ЧФ Харьк. политехн. ун-та, г. Черновцы)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА

Предложена модель термоэлектрического генератора, позволяющая оптимизировать его параметры путем согласования системы теплообмена, конструктивных параметров термогенератора и свойств термоэлектрических батарей.

В настоящее время актуальным для Украины становится развитие различных видов нетрадиционной возобновляемой энергетики. Это направление тесно связано с созданием полупроводниковых термоэлектрических генераторов с низкотемпературными источниками тепла. Такие источники тепла (в частности, геотермальное тепло, тепло океана, промышленное отработанное тепло) имеются в больших количествах и могут быть использованы для генерирования электрической энергии с помощью термоэлектрических устройств [1, 2].

Конструкция полупроводникового термоэлектрического генератора может быть оптимизирована в соответствии с видом источника тепла. Если используется дорогое тепло, главное внимание отводится КПД преобразования. В случае дешевого (отработанного) тепла главной задачей является снижение стоимости конструкции [3]. Для случаев, когда главную роль играют объемные характеристики, приоритетным становится уменьшение объема системы. Однако комплексному исследованию термоэлектрического генерирования при низких температурах в литературе уделено крайне мало внимания [1].

Во многих известных теоретических моделях допускается, что температура горячего (холодного) спаев равна температуре горячего (холодного) потока в этой точке, т. е. не учитывается уменьшение температуры, обусловленное конечностью коэффициента теплопередачи из объема потока к поверхности спаев. В ряде аналитических моделей не учтено, что в реальных системах наблюдается непрерывное падение температуры горячего потока и увеличение температуры холодного потока [4, 5].

Многоканальные термогенераторы, которые используют низкотемпературное тепло, в частности, тепло океана, состоят из большого количества полупроводниковых термоэлементов, размещенных в небольшом объеме [6, 7]. В такой системе расположение холодного и горячего потоков может быть продольным, встречным (противоток) [4, 8] или поперечным

[9]. Для таких термогенераторов важным является согласование системы теплообмена, конструктивных параметров и свойств термоэлектрических батарей.

Целью данной работы является создание аналитической модели термоэлектрического генератора (ТЭГ) с низкотемпературным источником тепла для оптимизации его по энергетическим характеристикам.

Схема низкотемпературного термоэлектрического генератора показана на рис. 1, а тепловая модель для его расчета приведена на рис. 2.

На рис. 2 показаны принятые обозначения температуры T элементов ТЭГ, а также проходящих через них тепловых потоков Q . (T_1 и T_8 — средние значения температуры соответствующих потоков.)



Рис. 1 Функциональная модель ТЭГ

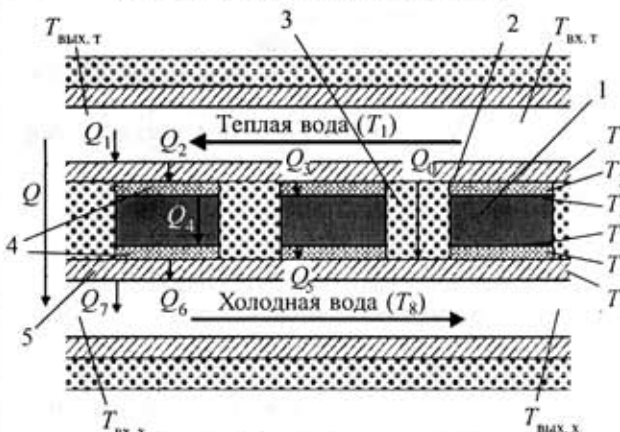


Рис. 2. Тепловая модель ТЭГ:

1 — термоэлектрический модуль; 2 — стенка теплового теплообменника; 3 — теплоизоляция; 4 — электроизоляция; 5 — стенка холодного теплообменника

Низкотемпературный термоэлектрический генератор содержит термоэлектрическую батарею (ТЭБ), которая состоит из термоэлектрических модулей 1, расположенных между стенками жидкостных теплообменников 2 и 5. Разность температур теплой и холодной воды создает градиент температуры, необходимый для работы термоэлектрического генератора.

Методика расчета ТЭГ в соответствии с его моделью должна учитывать следующие потери:

- при теплообмене стенки 2 с теплой водой $\Delta T_1 = T_1 - T_2$;
- на стенке теплового теплообменника $\Delta T_2 = T_2 - T_3$;
- на слое электроизоляции на теплой стороне $\Delta T_3 = T_3 - T_4$;
- на модуле $\Delta T_4 = T_4 - T_5$;
- на слое электроизоляции по холодной стороне $\Delta T_5 = T_5 - T_6$;
- на стенке холодного теплообменника $\Delta T_6 = T_6 - T_7$;
- при теплообмене стенки 5 с холодной водой $\Delta T_7 = T_7 - T_8$;
- общие потери при прохождении теплового потока Q через ТЭГ $\Delta T_8 = T_{\text{вх.т.}} - T_{\text{вых.т.}}$.

При построении модели термогенератора были сделаны следующие допущения:

- свойства теплоносителей, в частности плотность и удельная теплоемкость, постоянны;
- свойства термоэлектрического материала, а именно коэффициент Зеебека, удельное электрическое сопротивление и удельная теплопроводность, не зависят от температуры (поскольку в исследуемом диапазоне температур они практически постоянны [10, с. 264]);
- система адиабатически изолирована (нет потерь тепла в окружающую среду).

Алгоритм для компьютерного расчета и оптимизации ТЭГ с низкотемпературным источником тепла содержит систему уравнений теплового баланса, которая отвечает предложенной тепловой модели. Рассмотрим отдельно каждое из них.

1) *Общее уравнение теплового баланса:*

$$Q = P(T_4, T_5) + Q_1. \quad (1)$$

Общее количество тепла, которое передается от теплой воды:

$$Q = c_p M_t (T_{\text{вх.т.}} - T_{\text{вых.т.}}), \quad (2)$$

где c_p — удельная теплоемкость воды;

M_t — массовый расход теплой воды.

Электрическая мощность термоэлектрической батареи является функцией разности температур ее холодного и горячего спаев и рассчитывается по формуле [11]

$$P(T_4, T_5) = \frac{\alpha_m^2 (T_4 - T_5)^2 N^2 n^2}{4(R + r')}, \quad (3)$$

где α_m — коэффициент термоЭДС;

N — количество термоэлектрических модулей в ТЭБ;

n — количество термоэлементов в модуле;

R — сопротивление внешней нагрузки;

r' — сопротивление ТЭБ.

Тепло, которое передается от стенки холодного теплообменника к холодной воде, [12]

$$Q_1 = c_p M_x (T_7 - T_8), \quad (4)$$

где M_x — массовый расход холодной воды;

$T_8 = (T_{\text{вх.х.}} + T_{\text{вых.х.}})/2$.

Массовый расход воды вычисляется по формуле

$$M = \pi d l \text{St} \rho V,$$

где d — эквивалентный диаметр канала;

l — длина теплообменника;

St — число Стантона для потока воды; $\text{St} = \alpha / c_p \rho V$;

ρ — плотность воды;

V — объемный расход воды;

α — коэффициент теплообмена воды со стенкой теплообменника.

2) *Уравнение теплового баланса для стенки теплового теплообменника:*

$$Q_1 = Q_2 + Q_0. \quad (5)$$

Тепло, которое передается от теплой воды к стенке теплового теплообменника:

$$Q_1 = c_p M_t (T_1 - T_2), \quad (6)$$

где $T_1 = (T_{\text{вх.т.}} + T_{\text{вых.т.}})/2$.

Тепло, которое передается от стенки теплового теплообменника к слою электроизоляции:

$$Q_2 = \frac{NS_m \lambda_s}{\delta_s} (T_2 - T_3), \quad (7)$$

где S_m — площадь теплоприемной поверхности модуля;

λ_s — теплопроводность материала стенки теплообменника;

δ_s — толщина стенки теплообменника.

Тепло, которое передается от теплового теплообменника к холодному через слой теплоизоляции между модулями:

$$Q_0 = \frac{S \lambda_n}{\delta_n} (T_4 - T_5), \quad (8)$$

где S — площадь теплопередающей поверхности между модулями;

λ_n — теплопроводность изоляционного материала;

δ_n — толщина слоя изоляции.

3) *Тепло, которое передается от слоя электроизоляции к горячему спаю ТЭБ:*

$$Q_3 = \frac{NS_m \lambda_c}{\delta_c} (T_3 - T_4), \quad (9)$$

где λ_c — теплопроводность материала электроизоляции;

δ_c — толщина слоя электроизоляции.

4) *Уравнение теплового баланса для ТЭБ:*

$$Q_3 = P(T_4, T_5) + Q_4. \quad (10)$$

Тепло, которое передается от горячего к холодному спаю ТЭБ:

$$Q_4 = \frac{NS_m \lambda_m}{\delta} (T_4 - T_5), \quad (11)$$

где λ_m — теплопроводность материала термоэлемента;

δ — высота ветви термоэлемента.

5) *Тепло, которое передается от холодного спаю ТЭБ к слою электроизоляции:*

$$Q_5 = \frac{NS_m \lambda_c}{\delta_c} (T_5 - T_6). \quad (12)$$

6) *Тепло, которое передается от слоя электроизоляции к стенке холодного теплообменника:*

$$Q_6 = \frac{NS_m \lambda_s}{\delta_s} (T_6 - T_7). \quad (13)$$

7) *Уравнение теплового баланса для теплоносителей на входе и на выходе их из теплообменников [3]:*

$$P(T_4, T_5) = \frac{1}{2} [c_p M_t (T_{\text{вх.т.}} - T_{\text{вых.т.}}) - c_p M_x (T_{\text{вх.х.}} - T_{\text{вых.х.}})]. \quad (14)$$

Исходные данные для расчета ТЭГ:

- температура теплой воды на входе в теплообменник $T_{\text{вх.т.}} = 298 \text{ K}$;
- температура холодной воды на входе в теплообменник $T_{\text{вх.х.}} = 278 \text{ K}$;
- эквивалентный диаметр канала $d = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;
- теплопроводность материала стенки теплообменника $\lambda_t = 160 \text{ Вт/(м·К)}$;
- толщина стенки теплообменника $\delta_t = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- теплопроводность теплоизоляционного материала $\lambda_{\text{и}} = 0,1 \text{ Вт/(м·К)}$;
- толщина слоя теплоизоляции $\delta_{\text{и}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- теплопроводность материала электроизоляции $\lambda_{\text{э}} = 24 \text{ Вт/(м·К)}$;
- толщина слоя электроизоляции $\delta_{\text{э}} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$;
- количество термоэлементов в модуле $n = 256$;
- сопротивление термоэлектрического модуля $r = 2 \text{ Ом}$;
- теплопроводность материала термоэлемента $\lambda_m = 1,47 \text{ Вт/(м·К)}$;
- высота ветки термоэлемента $\delta = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- коэффициент термоЭДС $\alpha_m = 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}$;
- площадь теплоприемной поверхности модуля $S_m = 1,60 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Дополнительно задаются: длина теплообменника l , количество термоэлектрических модулей в ТЭБ N , сопротивление ТЭБ r' , расход теплой V_t и холодной V_x воды, коэффициент теплообмена воды со стенкой теплообменника α .

Система уравнений теплового баланса (1), (5), (9) — (14) позволяет однозначно определить значения температуры всех элементов ТЭГ. Для решения поставленной задачи эта система дополнена уравнением (3)

Параметры конструкции ТЭГ и скорость подачи теплоносителей должны быть такими, чтобы обеспечить максимальный коэффициент полезного действия ТЭГ

$$\eta = P/Q, \quad (15)$$

т. е. максимальную исходную электрическую мощность при минимальных затратах тепла.

Описанный выше алгоритм и приведенные исходные данные легли в основу компьютерной программы расчета оптимальных характеристик низкотемпературного термоэлектрического генератора.

Результатами такого расчета являются:

- 1) энергетические характеристики ТЭГ — P и η ;
- 2) температурные характеристики — значения T_1 , ..., T_8 и $\Delta T_4 = T_4 - T_5$;
- 3) параметры конструкции ТЭГ и условия его оптимальной работы — N , V_t , V_x .

Программа использована для моделирования и исследования характеристик ТЭГ с теплообменниками длиной 1 м и стандартными термоэлектрическими модулями Altec-22.

На рис. 3 приведены зависимости КПД η от расхода теплой и холодной воды для ТЭГ с $N=10$.

Из рис. 3, а видно, что максимальный КПД достигается при расходе теплой воды $12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, холодной — $12,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, и практически не изменяется при дальнейшем увеличении расходов. Исследованы также случаи влияния на η одной из расходных характеристик при стабилизации другой (рис. 3, б, в).

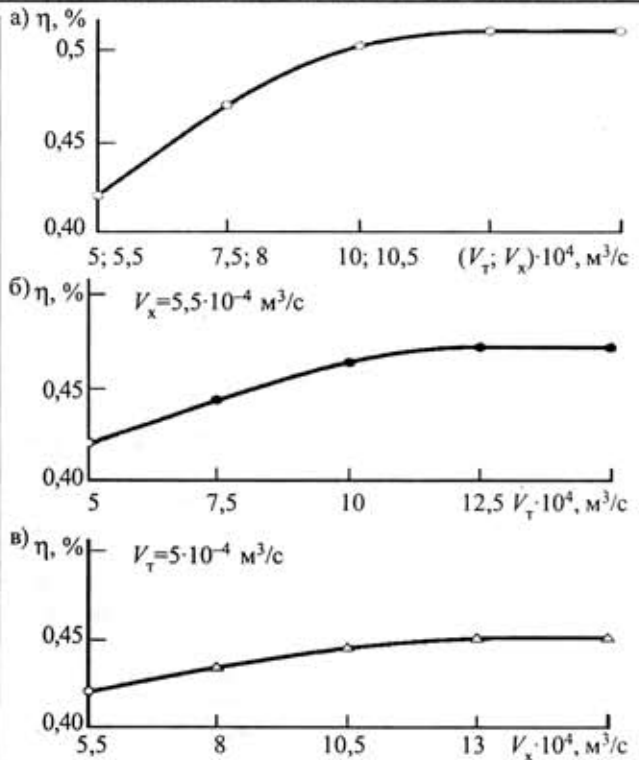


Рис. 3. Зависимость КПД термогенератора от расхода теплоносителей

Для определения оптимального количества термоэлектрических модулей в ТЭБ были рассчитаны КПД, мощность ТЭБ и ΔT_4 при разных значениях N . Увеличение количества модулей приводит к уменьшению разности температур на спаях ТЭБ, соответственно уменьшается и исходная электрическая мощность каждого модуля. В то же время электрическая мощность ТЭБ возрастает вследствие увеличения количества модулей (рис. 4). Максимум КПД 0,8% достигается в случае расположения между теплообменниками 20 модулей, при этом исходная электрическая мощность ТЭБ составляет 0,86 Вт.

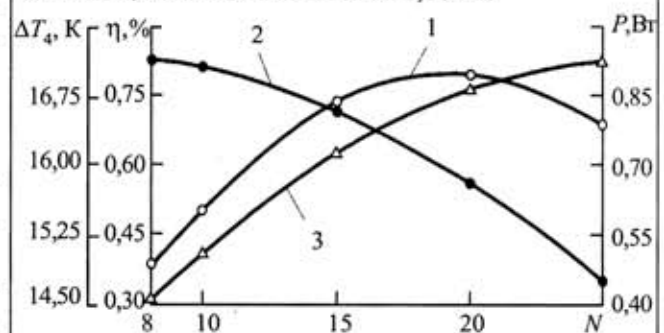


Рис. 4. Зависимость КПД ТЭГ (1), ΔT (2) и электрической мощности (3) от количества модулей в ТЭБ

Используя формулы для расчета удельной плотности теплового потока на поверхности теплообмена [1]

$$q_1 = St_1 \rho V_{t,c_p} (T_1 - T_2); \quad q_7 = St_7 \rho V_{x,c_p} (T_7 - T_8)$$

и исходя из известных $T_{\text{вх.т.}}$ и T_1 , найдены распределения температуры теплой (T_t) и холодной (T_x) воды по длине соответствующих теплообменников (рис. 5), а также распределение температуры стенок теплового и

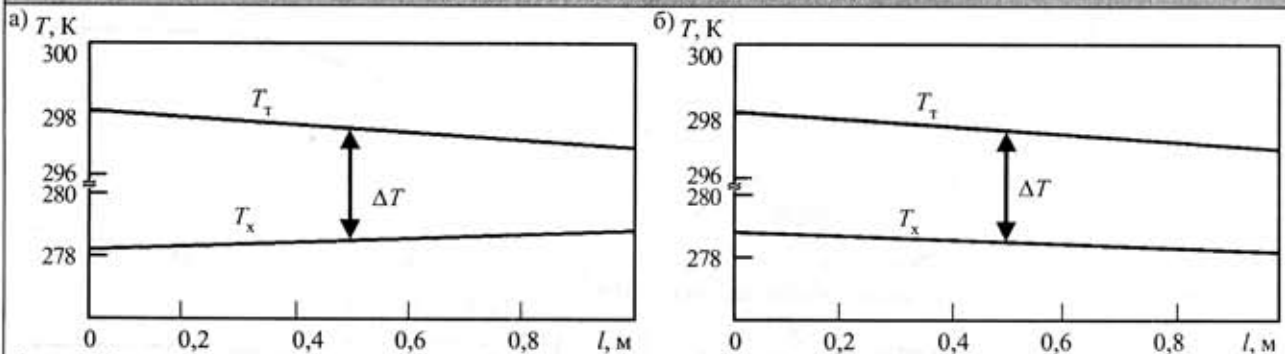


Рис. 5. Распределение температуры горячей (T_t) и холодной (T_x) воды по длине теплообменников при движении теплоносителей в одном (а) и в противоположных (б) направлениях

холодного теплообменников для двух случаев направления движения теплоносителей.

В отличие от случая, когда направления потоков горячей и холодной воды совпадают (рис. 5, а), при их встречном движении (рис. 5, б) разность $\Delta T = T_t - T_x$ остается одинаковой вдоль всего ТЭГ. В таком случае обеспечивается одинаковая исходная мощность всех термоэлектрических модулей, независимо от их расположения по длине ТЭГ. Такой режим работы является предпочтительным, и поэтому в дальнейших расчетах рассматривается только модель с встречным движением теплоносителей.

На рис. 6 приведены основные характеристики ТЭГ в зависимости от величины температуры горячей воды на входе в теплообменник.

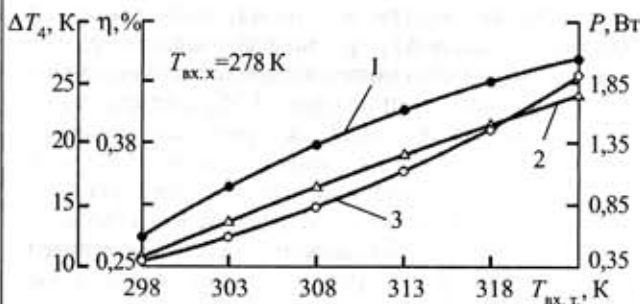


Рис. 6. Зависимость КПД ТЭГ (1), ΔT_4 (2), мощности термогенератора P (3) от $T_{вх.т.}$

Рассмотренная модель низкотемпературного термогенератора была использована для разработки модели ТЭГ мощностью 500 Вт.

Наиболее эффективной схемой движения теплоносителей для пакета теплообменников является схема встречных разветвленных потоков [4, 8], представленная на рис. 7.

Построение математической модели такого ТЭГ включает проведение детального анализа схемы тепловых потоков в термогенераторах разной конструкции, теплового баланса с учетом взаимного влияния теплообменников горячей и холодной воды, потерь тепла с участков теплообменников между модулями, а также расчет электрических характеристик термогенератора. Разработанная компьютерная программа позволила рассчитать электрическую мощность термогенератора, из которых складывается пакет, исходную суммарную мощность ТЭГ, а также количество модулей, необходимое для пакета мощностью 500 Вт.

Получены следующие результаты.

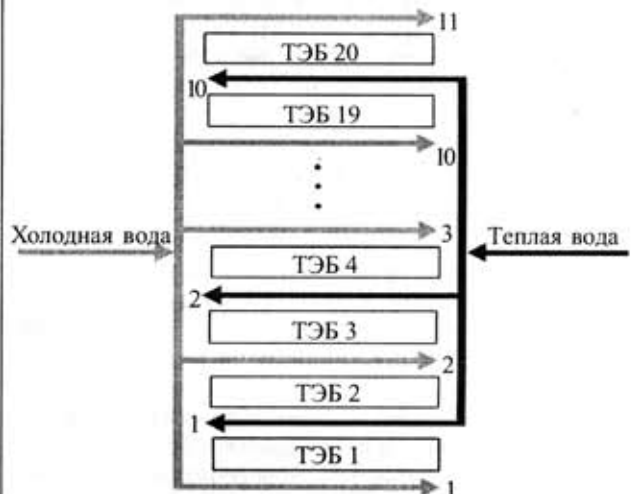


Рис. 7. Схема блока, состоящего из 20 ТЭБ

Блок из 20 ТЭБ, содержащий 400 модулей, имеет электрическую мощность 18,3 Вт. Собранные в ТЭГ 28 блоков обеспечивают 513 Вт исходной электрической мощности. Геометрические размеры такого термогенератора $1,2 \times 1 \times 2,24$ м.

Решение системы уравнений теплового баланса для термогенератора мощностью 500 Вт позволяет построить тепловую модель пакета, найти значения температуры на поверхности всех теплообменников и на спаях ТЭБ.

Таким образом, рассмотренная модель термоэлектрического генератора с низкотемпературным источником тепла позволяет оптимизировать его характеристики путем согласования системы теплообмена, конструктивных параметров термогенератора и свойств термоэлектрических батарей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rowe D. M. CRC Handbook of Thermoelectrics. — CRC Press: 1995.
2. Burke E. J., Buist R. J. Thermoelectric coolers as power generators // Proc. 15th International Conf. on Thermoelectric Energy Conversion. — Arlington. — 1984. — P. 91—94.
3. Matsuura K., Rowe D. M., Koumoto K. et al. Design optimisation for a large scale, low temperature thermoelectric generator // Proc. of the 11th International Conf. on Thermoelectrics. — Arlington (USA). — 1992. — P. 10—16.
4. Mathiprakasham B., Sutikno T., Beeson J. Analytical model for predicting the performance of thermoelectric generators // Proc. of

the 14th International Conf. on Thermoelectric Energy Conversion.— Arlington.— 1982.— P. 61—66.

5. Henderson J. Analysis of a heat exchanger-thermoelectric generator system // Proc. of the 14th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference.— 1979.— P. 1835.

6. Bell L. E. High power density thermoelectric systems // Proc. of the 23rd International Conf. on Thermoelectrics.— Adelaide (Australia).— 2004.— P. 149.

7. Bell L. E. Alternate thermoelectric thermodynamic cycles with improved power generation efficiencies // Proc. of the 22th International Conf. on Thermoelectrics.— La Grande-Motte (France).— 2003.— P. 558—562.

8. Suzuki R. O., Tanaka D., Toda S. Mathematical simulation of thermoelectric power generation with the multi-flat-panels // Ibid.— P. 550—553.

9. Benson D. K., Jayadev T. S. Thermoelectric energy conversion. Economical electric power from low grade heat // Proc. of the 3rd International Conf. on Thermoelectric Energy Conversion.— Arlington (USA).— 1980.— P. 27—56.

10. Анатыйчук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник.— Киев: Наукова думка, 1979.

11. Matsuura K. Large scale thermoelectric generation of low-grade heat, the future // Proc. of the 12th International Conf. on Thermoelectrics.— Yokogama (Japan).— 1994.— P. 439—446.

12. Григорьев В. А., Зорин В. М. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент.— М.: Энергоатомиздат, 1982.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

8-я СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

ЭНЕРГЕТИКА. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. АВТОМАТИКА.



6-9 июня, 2006 г.
Донецк, Украина

Тел/факс: +38 (062) 381-21-50 381-21-41 (0622) 57-07-32
E-mail: Zaharov@expodon.dn.ua,
Borisenko@expodon.dn.ua,
Nafaty@expodon.dn.ua
<http://www.expodon.dn.ua/electrotech>

**Синхронизированный выставочный центр
ЭКСПОДОНЕСС**
ул. Чистопольская, 189-а, Донецк, Украина, 83048

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Исследование примесного фотоэффекта в двухбарьерных $p-n-m$ -структурах. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Разработка и исследование газовых лазеров для телекоммуникаций. (Украина, г. Львов)
- Анизотропные термоэлектрические координатно-чувствительные линейки. (Украина, г. Черновцы)
- Исследование собственных и примесных точечных дефектов в сапфировых подложках люминесцентными методами. (Украина, г. Ужгород)
- Датчики на основе линии задержки на ПАВ для дистанционного контроля физических параметров. (Россия, г. Вологодск)
- Конденсор тепловой трубы на основе лазерного рефрижератора. (Россия, г. Таганрог)
- Фотоэлектрические параметры гетеропереходов $\text{SnS}_2-x\text{Se}-\text{InSe}$ ($0 \leq x \leq 1$). (Украина, г. Черновцы)
 - Оценка перераспределения потенциала в трехбарьерной структуре. (Узбекистан, г. Ташкент)
 - Конструктивно-технологические особенности автодинных гибридно-интегральных схем КВЧ на диодах Ганна. (Россия, г. Томск)
 - Новые волоконно-оптические зонды для абсорбционного анализа. (Украина, г. Киев)
 - Светонзлучающие диоды белого света: состояние и основные тенденции развития. (Украина, г. Львов, г. Киев)



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции