

УДК 621.5

Расчетно-экспериментальное исследование криогенного термоэлектрического генератора

К. А. БОГАТКИН, канд. техн. наук Е. В. БЛАГИН*, Н. В. ГАЛКИНА,

д-р техн. наук А. И. ДОВГЯЛЛО, А. Л. ЛОПАТИН

Самарский университет

*E-mail: blagin.ev@ssau.ru

Статья посвящена актуальной проблеме утилизации энергетического потенциала сжиженного природного газа (СПГ) в процессе его регазификации с помощью термоэлектрических генераторов (ТЭГ), работающих в криогенном диапазоне температур. Целью работы являлось расчетно-экспериментальное исследование характеристик ТЭГ для определения их эффективности. Проведен сравнительный анализ термоэлектрических свойств перспективных полупроводниковых материалов ($\text{Bi}_{1,6}\text{Sb}_{0,4}\text{Te}_3$, $\text{Pb}_{0,74}\text{Sn}_{0,24}\text{Cd}_{0,02}$, CsBi_4Te_6 , $\text{Mg}_2\text{SiO}_{0,3}\text{Sn}_{0,7}$) с использованием разработанного алгоритма расчета. Наилучшие результаты по величине термоэлектрической добротности и КПД (8–9 %) показал материал на основе висмут-теллурида. Для экспериментальной проверки создан лабораторный образец ТЭГ на базе коммерческого модуля, в котором холодным источником тепла служил кипящий азот, а горячим — тепло окружающего воздуха. В ходе испытаний достигнута максимальная разность температур на модуле 97,5 °С, что позволило получить электрическую мощность 11,8 Вт. Экспериментально полученный КПД системы составил 5,6 %. Выявлено, что основным ограничивающим фактором является эффективность теплообмена на горячей стороне. Результаты подтверждают перспективность применения ТЭГ для рекуперации энергии холода криопродуктов и определяют необходимость оптимизации систем теплоподвода для повышения эффективности генерации.

Ключевые слова: криогенные температуры, криогенное рабочее тело, низкопотенциальное тепло, термоэлектрический генератор, сжиженный природный газ, получение электроэнергии.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 19.03.2025, одобрена после рецензирования 28.01.2026, принята к печати 05.02.2026

DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-14-24

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Богаткин К. А., Благин Е. В., Галкина Н. В., Довгялло А. И., Лопатин А. Л. Расчетно-экспериментальное исследование криогенного термоэлектрического генератора. // Вестник Международной академии холода. 2026. № 1. С. 14–24. DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-14-24

Design of a heat exchanger for an evaporative system based on thermoelectric generators

K. A. BOGATKIN, Ph. D. E. V. BLAGIN*, N. V. GALKINA, D. Sc. A. I. DOVGYALLO, A. L. LOPATIN

Samara University

*E-mail: blagin.ev@ssau.ru

The article concerns the actual problem of utilizing the energy potential of liquefied natural gas (LNG) during its regasification using thermoelectric generators (TEG) operating in the cryogenic temperature range. The aim of the work was a computational and experimental study of the TEG characteristics to determine their efficiency. A comparative analysis of the thermoelectric properties of promising semiconductor materials ($\text{Bi}_{1,6}\text{Sb}_{0,4}\text{Te}_3$, $\text{Pb}_{0,74}\text{Sn}_{0,24}\text{Cd}_{0,02}$, CsBi_4Te_6 , and $\text{Mg}_2\text{SiO}_{0,3}\text{Sn}_{0,7}$) was carried out using the developed calculation algorithm. The best results in terms of thermoelectric merit and efficiency (8–9 %) were shown by the material based on bismuth telluride. For experimental verification, a laboratory TEG prototype was created based on a commercial module, in which boiling nitrogen served as a cold heat source, and the heat of the ambient air served as a hot one. During testing, a maximum temperature difference of 97.5 °C was achieved across the module, enabling an electrical power output of 11.8 W. The experimentally obtained system efficiency was 5.6 %. The main limiting factor was identified as heat exchange efficiency on the hot side. The results confirm the potential of TEGs for recovering cold energy from cryogenic products and highlight the need to optimize heat supply systems to improve generation efficiency.

Keywords: cryogenic temperatures, cryogenic working fluid, low-potential heat, thermoelectric generator, liquefied natural gas, electricity generation.

Article info:

Received 19/03/2025, approved after reviewing 28/01/2026, accepted 05/02/2026

DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-14-24

Article in Russian

For citation:

Bogatkin K. A., Blagin E. V., Galkina N. V., Dovgyallo A. I., Lopatin A. L. Design of a heat exchanger for an evaporative system based on thermoelectric generators. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2026. No 1. p. 14-24. DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-14-24

Введение

В энергетике и нефтегазовом комплексе широкое распространение получил сжиженный природный газ (СПГ). На одном из этапов его использования осуществляется его регазификация — возврат в газообразное состояние за счет подвода внешнего тепла. В настоящее время регазификация СПГ в основном происходит за счет тепла окружающей среды. При этом считается, что использование природных источников тепла не является энергозатратным процессом. Однако стоит учитывать, что для ожижения СПГ ранее была затрачена значительная энергия, часть которой, заключенная в криопродукте, при обычном способе регазификации просто теряется. Таким образом, сжиженный природный газ (как и любой другой криопродукт) содержит в себе энергетический потенциал, который можно было бы использовать при его возвращении в исходное газообразное состояние, следовательно, сам процесс регазификации СПГ обладает значительным потенциалом энергосбережения [1].

Одним из способов использования энергетического потенциала СПГ является применение термоэлектрических генераторов (ТЭГ) для выработки электроэнергии за счет разности температур между СПГ и окружающей средой. Термоэлектрические модули в настоящее время способны работать на уровне температур, ниже температуры кипения азота [2], хотя как правило температурный уровень охлаждения расположен несколько выше [3]. Известны работы [4], где в ТЭГ исследуется возможность производства водорода с помощью для повышения эффективности выработки электроэнергии с использованием низкопотенциального тепла сжиженного природного газа (СПГ). Применительно к СПГ термоэлектрические генераторы также предложены в публикации [5]. Экспериментальные исследования характеристик таких систем позволяют определить влияние теплового состояния, условий подвода и отвода тепла на характеристики низкотемпературных ТЭГ [6].

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность работы ТЭГ в системе испарения СПГ, является теплообмен как на горячей, так и на холодной стороне [7]. Поэтому одной из важных задач для оптимизации ТЭГ является исследование процессов теплопереноса. Кроме использования низкопотенциального тепла СПГ термоэлектрические генераторы находят свое применение в установках аккумулирования энергии в сжиженном воздухе [8, 9]

Таким образом можно сделать вывод о перспективности использования термоэлектрических генераторов в области криогенных температур. Однако, так как основное свое использование они находят в области более высоких температур, характеристики основных видов

термоэлектрических генераторов в области именно криогенных температур остаются малоизученными и требуют дополнительных исследований, которым и посвящена данная статья. Целью исследования является уточнение характеристик термоэлектрических модулей в криогенной диапозоне температур, для чего был разработан алгоритм расчета и изготовлен оригинальный теплообменник, выполненный на базе радиатора системы охлаждения компьютерного процессора. Испытания проводились с целью определения эффективности работы теплообменников с установленными на них термоэлектрическими генераторами.

Исследование термоэлектрического модуля

В модуле (батарее) термоэлектрического генератора пары р-типа и n-типа электрически соединены последовательно и/или параллельно (рис. 1). Пары помещаются между двумя керамическими пластинами. Пластины обеспечивают жесткость конструкции, поверхность для монтажа и диэлектрический слой.

Материалы для термоэлектрического модуля (ТМ).

В экспериментах использовался ТЭГ-127020 (P&N Technology, Китай). Он состоит из 128 пар термоэлектрических блоков р-типа и n-типа на основе Bi_2Te_3 , 256 медных электродов и двух керамических пластин (рис. 2).

Выбор материалов ТЭГ зависит от множества характеристик: механических свойств, его способности выдерживать резкие перепады температур и др.

В настоящее время для изготовления ТЭГ используются следующие материалы: $\text{Bi}_{1,6}\text{Sb}_{0,4}\text{Te}_3$, $\text{Pb}_{0,74}\text{Sn}_{0,24}\text{Cd}_{0,02}$, CsBi_4Te_6 , $\text{Mg}_2\text{SiO}_{0,3}\text{Sn}_{0,7}$.

Рассмотрим полупроводники в различных химических свойствах, сравним их КПД, эффективность, выходную электрическую мощность.

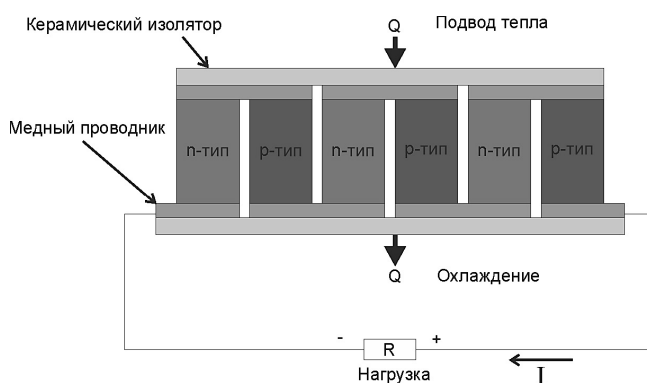


Рис. 1. Термоэлектрический генератор [10]

Fig. 1. Thermoelectrical generator [10]

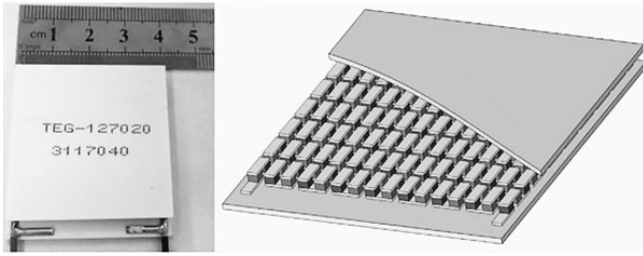


Рис. 2. Термоэлектрический генератор ТЭГ-127020

Fig. 2. Thermoelectrical generator TEG-127020

Результаты расчетов вышеперечисленных материалов, рассчитаны по разным методикам расчетов модулей, зависимости основных параметров от температур в двух вариациях при криогенных температурах представлены в табл. 1–8.

Итоговые значения зависимости основных параметров от температур показаны на рис. 4–7.

2. Алгоритм расчета модуля ТЭГ.

Несмотря на то, что серийно выпускаемый ТЭГ-127020 (P&N Technology, Китай) имеет некоторые паспортные характеристики, были выполнены поверочные расчеты его ожидаемых характеристик. Расчеты проводились по следующей представленной методике (рис. 3).

Исходные данные:

— температура горячей стенки ТЭГ $T_1=300$ К;

— температура холодной стенки $T_2=100$ К;

— термоэлектрические свойства материалов п- и р- типа проводимости.

Средняя температура

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_2 - T_1}{2}.$$

Перепад температур

$$\Delta T = T_2 - T_1. \quad (2)$$

КПД термоэлектрического генератора

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_2} \left(\frac{M-1}{M+T_1/T_2} \right), \quad (3)$$

где коэффициент M определяется по соотношению:

$$M = \sqrt{1 + z \cdot T_{\text{ср}}}, \quad (4)$$

здесь z — термоэлектрическая добротность материала, K^{-1} .

Количество удельной теплоты

$$q = r + c_p \Delta T, \quad (5)$$

где r — удельная теплота парообразования, кДж/кг ;

c_p — изобарная теплоемкость, кДж/кг ;

ΔT — перепад температур.

Выходная удельная положительная работа, кДж/кг :

$$W = \frac{q \cdot \eta}{1 - \eta}. \quad (6)$$

Номинальный ток

$$I = \frac{W}{V}, \quad (7)$$

где V — напряжение, В.

Площадь поперечного сечения ветви р-типа, см^2

$$S_p = \frac{Q \cdot l}{\chi(1+\psi)\Delta T \cdot N} \cdot \left(\frac{1}{M} \right) \cdot \left(\frac{1-\eta/2}{1+\varepsilon_\chi} \right), \quad (8)$$

где χ — среднеинтегральный коэффициент теплопроводности в диапазоне температур T_1 и T_2 на поверхностях стенки; ψ — отношение площадей поперечного сечения ветвей; ε_χ — коэффициент, учитывающий утечки тепла по защитным покрытиям и элементам конструкции;

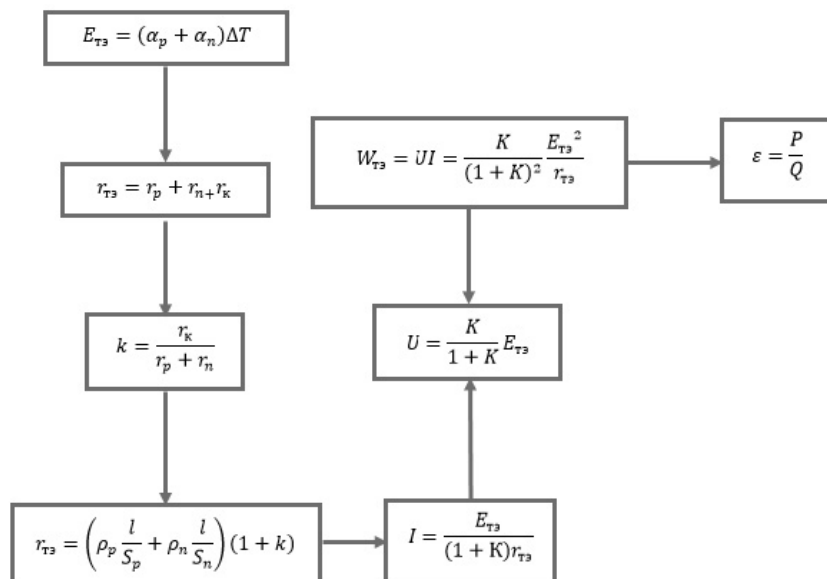


Рис. 3. Алгоритм расчета

Fig. 3. Calculation algorithm

Результаты предпроектного расчета
 $Pb_{0,74}Sn_{0,24}Cd_{0,02}$

Table 1

Pre-design calculation of $Pb_{0,74}Sn_{0,24}Cd_{0,02}$

T, K	dT, K	I, A	$P, Вт$	КПД, %	$E, В/К$
100	200	0,096	2,358	31,3	0,674
125	212,5	0,086	1,88	27	0,602
150	225	0,074	1,409	22,4	0,521
175	237,5	0,062	0,978	17,9	0,434
200	250	0,049	0,613	13,5	0,344
225	262,5	0,036	0,331	9,5	0,253
250	275	0,023	0,138	5,9	0,163
275	287,5	0,011	0,032	2,7	0,078

Результаты уточненной методики расчета
 $Pb_{0,74}Sn_{0,24}Cd_{0,02}$

Table 2

Refined calculation of $Pb_{0,74}Sn_{0,24}Cd_{0,02}$

T, K	dT, K	I, A	$P, Вт$	КПД, %	$E, В/К$
100	200	0,072	1,624	21,6	0,25
125	212,5	0,06	1,108	16	0,207
150	225	0,046	0,698	11,2	0,164
175	237,5	0,036	0,396	7,4	0,123
200	250	0,024	0,194	4,4	0,086
225	262,5	0,01552	0,076	2,2	0,054
250	275	0,008088	0,02	0,9164	0,028
275	287,5	0,00279	0,002472	0,246	0,009785

Результаты предпроектного расчета $CsBi_4Te_6$

Table 3

Pre-design calculation of $CsBi_4Te_6$

T, K	dT, K	I, A	$P, Вт$	КПД, %	$E, В/К$
100	200	0,066	2,768	24,9	0,462
125	212,5	0,062	2,445	24,5	0,434
150	225	0,057	2,065	23,5	0,399
175	237,5	0,0501	1,641	21,8	0,356
200	250	0,043	1,198	19,3	0,304
225	262,5	0,035	0,766	15,9	0,243
250	275	0,025	0,386	11,6	0,173
275	287,5	0,013	0,109	6,3	0,096

Результаты уточненной методики расчета $CsBi_4Te_6$

Table 4

Refined calculation of $CsBi_4Te_6$

T, K	dT, K	I, A	$P, Вт$	КПД, %	$E, В/К$
100	200	0,035	0,772	10,3	0,244
125	212,5	0,033	0,701	10,1	0,232
150	225	0,31	0,605	9,8	0,216
175	237,5	0,028	0,49	9,1	0,195
200	250	0,024	0,364	8,2	0,168
225	262,5	0,019	0,236	6,9	0,135
250	275	0,014	0,12	5,3	0,096
275	287,5	0,007344	0,057	3,4	0,051

Результаты предпроектного теплового расчета
 $Bi_{1,6}Sb_{0,4}Te_3$

Table 5

Pre-design calculation of $Bi_{1,6}Sb_{0,4}Te_3$

T, K	dT, K	I, A	$P, Вт$	КПД, %	$E, В/К$
100	200	0,034	0,747	45,4	0,24
125	212,5	0,032	0,638	43	0,222
150	225	0,029	0,519	39,6	0,2
175	237,5	0,025	0,397	35,2	0,175
200	250	0,021	0,278	29,8	0,146
225	262,5	0,016	0,17	23,5	0,115
250	275	0,011	0,082	16,4	0,08
275	287,5	0,005909	0,022	8,5	0,041

Результаты уточненной методики расчета
 $Bi_{1,6}Sb_{0,4}Te_3$

Table 6

Refined calculation of $Bi_{1,6}Sb_{0,4}Te_3$

T, K	dT, K	I, A	$P, Вт$	КПД, %	$E, В/К$
100	200	0,017286	0,47	29	0,113
125	212,5	0,016216	0,42	27,8	0,104
150	225	0,014858	0,35	24,5	0,094
175	237,5	0,0132	0,28	20,9	0,082
200	250	0,011226	0,2	15	0,068
225	262,5	0,008928	0,13	9	0,053
250	275	0,006296	0,06293	7,28	0,037
275	287,5	0,003322	0,01752	4,26	0,019

Результаты предпроектного расчета
 $Mg_2SiO_{0,3}Sn_{0,7}$

Table 7

Pre-design calculation of $Mg_2SiO_{0,3}Sn_{0,7}$

T, K	dT, K	I, A	$P, Вт$	КПД, %	$E, В/К$
100	200	0,061	2,337	34,9	0,425
125	212,5	0,053	1,817	31,4	0,374
150	225	0,045	1,308	26,8	0,318
175	237,5	0,037	0,859	21,6	0,257
200	250	0,028	0,499	16,2	0,196
225	262,5	0,02	0,244	11	0,137
250	275	0,012	0,089	6,3	0,083
275	287,5	0,005175	0,017	2,6	0,036

Результаты уточненной методики расчета
 $Mg_2SiO_{0,3}Sn_{0,7}$

Table 8

Refined calculation of $Mg_2SiO_{0,3}Sn_{0,7}$

T, K	dT, K	I, A	$P, Вт$	КПД, %	$E, В/К$
100	200	0,045	1,282	17,6	1,758
125	212,5	0,04	0,996	15,4	1,356
150	225	0,033	0,679	11,9	0,977
175	237,5	0,024	0,38	9,7	0,637
200	250	0,018	0,149	7,5	0,349
225	262,5	0,01	0,026	5,2	0,127
250	275	0,006	0,00041	2,414	0,08
275	287,5	0,004	0,009199	0,9284	0,06

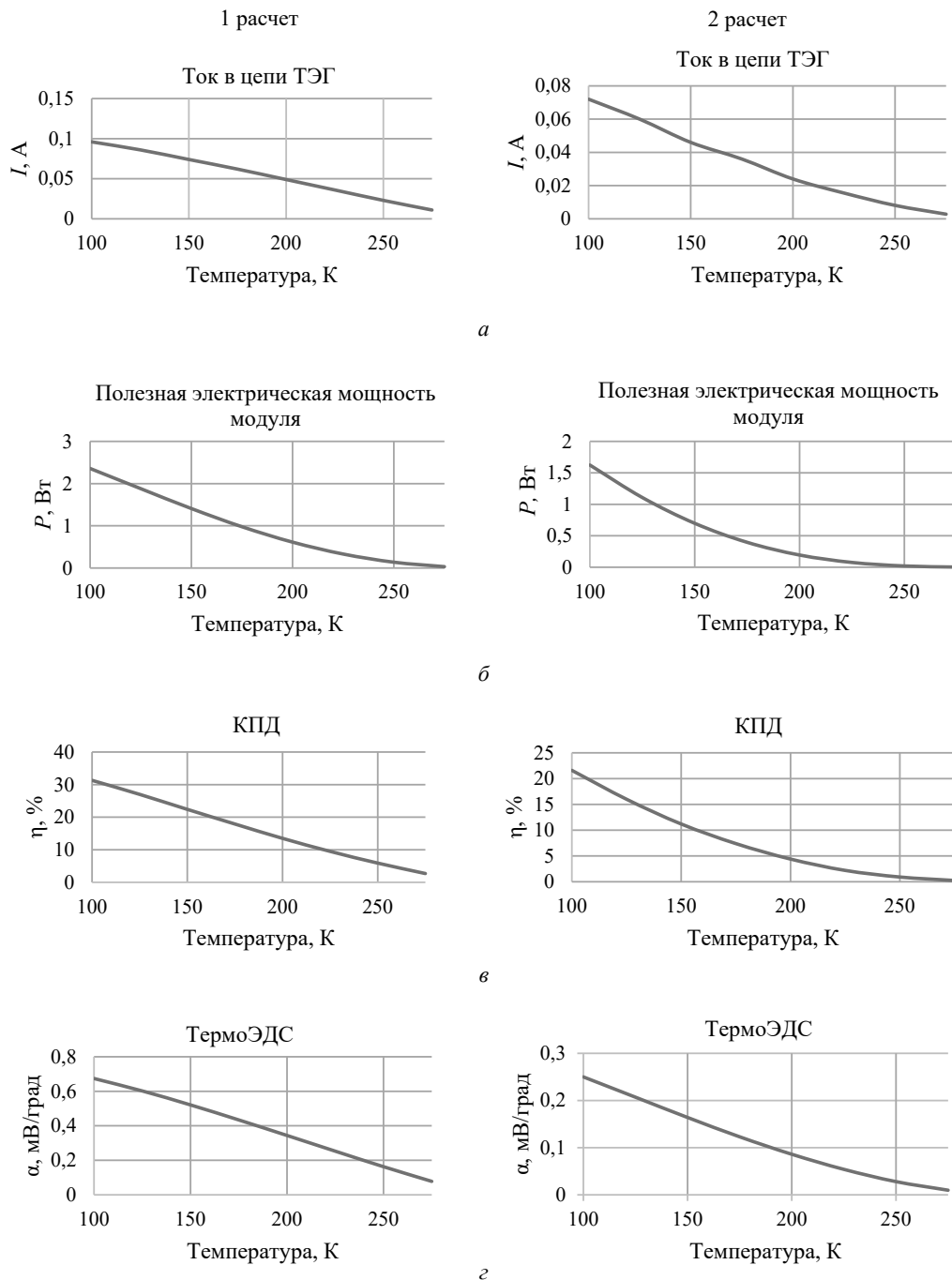


Рис. 4. Зависимости основных параметров от температур ($Pb_{0.74}Sn_{0.24}Cd_{0.02}$)

Fig. 4. Dependence of key parameters on temperature ($Pb_{0.74}Sn_{0.24}Cd_{0.02}$)

N — количество термоэлементов.

Площадь поперечного сечения ветви n-типа:

$$S_n = \psi \cdot S_p. \quad (9)$$

3. Расчет параметров и характеристик ТЭГ, используемых в эксперименте.

Исходные данные:

- температура горячей стенки — $T_1 = 300$ К;
- температура холодной стенки — $T_2 = 190$ К;
- номинально напряжение — $U = 2,2$ В;
- термоэлектрические свойства материалов n- и p-типа проводимости.

Расчет параметров и характеристик ТЭГ, используемых в экспериментальной установке проводится аналогично расчету модуля ТЭГ по формулам (1)–(9).

Экспериментальная установка

Кроме приведенных выше преобразователей в экспериментальной установке можно использовать любые термоэлектрические генераторные модули (ТГМ), которые в настоящее время нашли широкое применение. Мощность, вырабатываемая такими генераторами, варьируется от единиц милливатт до киловатт и определяется экономической целесообразностью выбора способа преобразования энергии.

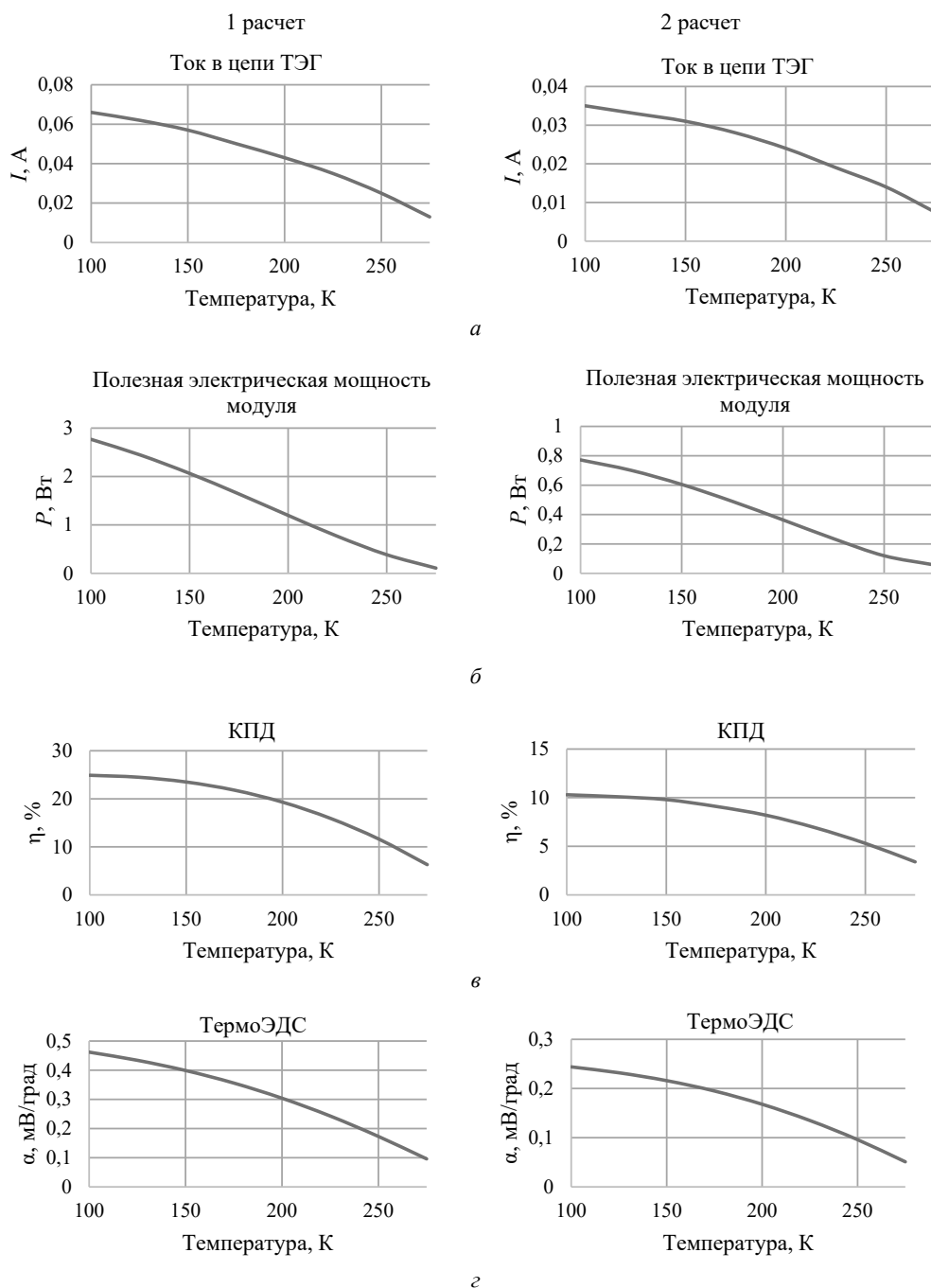


Рис. 5. Зависимости основных параметров от температур ($CsBi_4Te_6$)

Fig. 5. Dependence of key parameters on temperature ($CsBi_4Te_6$)

Для эффективной работы ТГМ необходимо обеспечить максимально допустимую разность температур между сторонами модуля, для этого к одной стороне надо подвести тепло (Q_h), а от другой — отвести тепловую энергию (Q_c).

Особенности работы ТЭГ и ТГМ в условиях эксплуатации заключаются в следующем. Очевидно, что, как и для любого термодинамического преобразователя прямого цикла эффективность и производительность генератора будет тем больше, чем больше разность температур между горячими и холодными спаями. С другой стороны, при увеличении ΔT возрастают перетечи тепла через элементы ТЭГ, что в свою очередь выравнивает поле темпе-

ратур и способствует снижению ΔT . При увеличении расстояния между горячей и холодной обкладками (с целью снизить влияние перетечек тепла) увеличивается собственное электрическое сопротивление элементов ТЭГ и КПД снижается. И, наконец, каждая ветвь термоэлектрического элемента (по свойствам материалов) имеет свой максимум эффективности на своем уровне температур.

Все это многофакторное влияние делает задачу определения оптимальных конструктивных параметров ТЭМ и выявления соответствующих характеристик ТЭГ довольно сложной задачей.

В нашем случае критерием эффективности ТЭГ должен быть не КПД, а максимум электрической мощности.

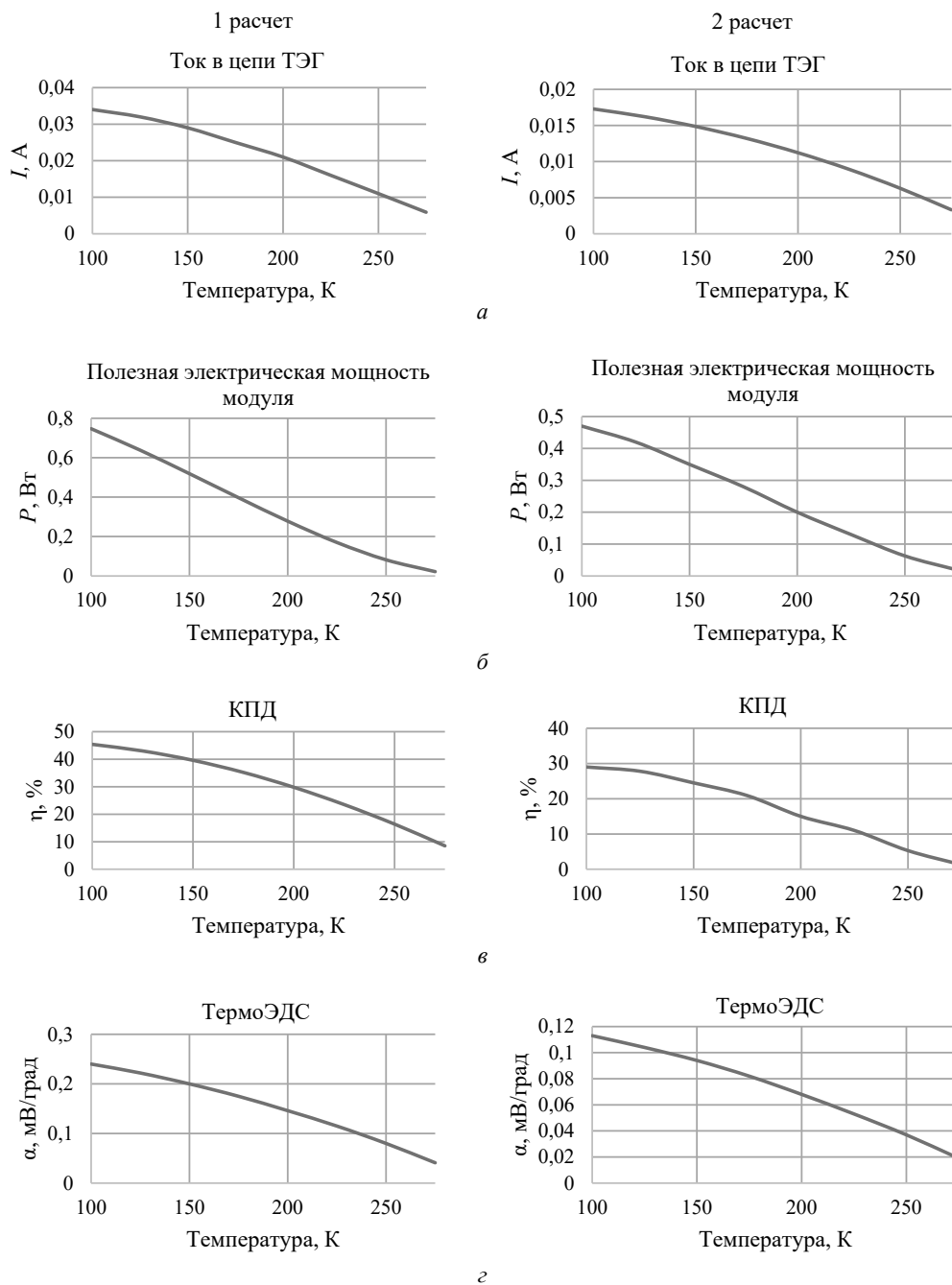


Рис. 6. Зависимости основных параметров от температур ($Bi_{1.6}Sb_{0.4}Te_3$)

Fig. 6. Dependence of key parameters on temperature ($Bi_{1.6}Sb_{0.4}Te_3$)

Это можно обосновать тем, что как подводимое, так и отводимое в ТЭГ тепло можно считать условно «бесплатным».

Поэтому планируемые исследования должны быть направлены в первую очередь на определение характеристик (генерируемой мощности) в зависимости от уровней температур T_1 и T_x , а также ΔT .

Далее оценка возможности и целесообразности использования каскадных модулей ТЭГ (двух, трехкаскадных). Последним (на данном этапе исследований) будет оценка целесообразности использования только теплоты испарения r СПГ и/или в сумме с физическим теплом. Суммарная мощность всех термоэлектрических ТЭГ будет зависеть от конструктивного исполнения и мест установки отдельных модулей, то есть в разных местах трак-

та газификатора и, соответственно, при разных температурах. Еще раз учитывая, то обстоятельство, что подводом «любого» количества тепла от внешних источников мы не ограничены, за эффективность генерации энергии можно предложить удельную величину — отношение производимой электрической мощности к расходу криопродукта. $\varepsilon = W/G$.

На рис. 8 представлена схема энергетического комплекса, работающего на СПГ, с ТГМ. Обозначения на схеме: 1, 4 — дроссель; 2 — сосуд с СПГ; 3 — насос; 5 — теплообменник с ТЭМ; 6 — турбодетандер; 7, 9, 11 — электрогенератор; 8 — теплообменник; 10 — ГПУ.

Рабочее тело (СПГ) поступает из емкости 2, с помощью насоса 3, подается в теплообменный аппарат 5, где

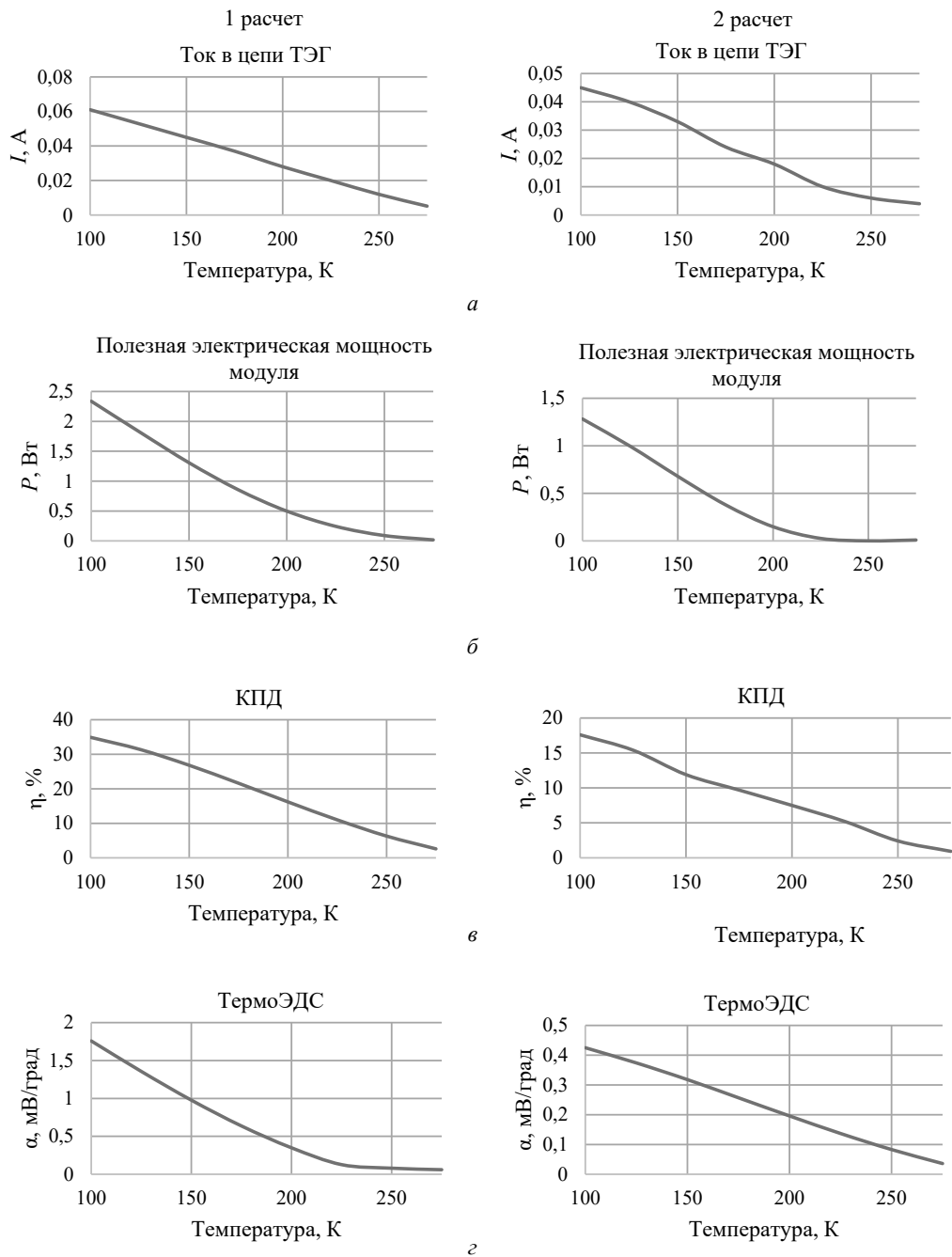


Рис. 7. Зависимости основных параметров от температур ($Mg_2SiO_{0.3}Sn_{0.7}$)

Fig. 7. Dependence of key parameters on temperature ($Mg_2SiO_{0.3}Sn_{0.7}$)

СПГ, являясь низшим источником снимает тепло рабочего процесса ТГМ, при этом само газифицируется и нагревается в пределе до температуры 300 К. Далее рабочее тело в газообразном состоянии поступает в турбодетандер 6 с электрогенератором 7. После расширения на детандере с понижением температуры газа на второй ступени ТГМ низкотемпературный потенциал газа дорабатывается ТЭГ с получением также электроэнергии. Подогретый в теплообменнике 8 газ подается на основную энергетическую установку (газопоршневой двигатель).

В экспериментальных исследованиях в качестве рабочего тела был выбран азот.

Факторы, влияющие на эффективность ТЭГ в системе испарителя СПГ:

- качество теплообменника;
 - качество агрегатов ТЭГ;
 - качество термоэлектрических модулей;
 - износ агрегатов ТЭГ и ТМ;
 - термопаста, наличие и качество которой влияет на коэффициент теплопроводности, как на горячей стороне, так и на холодной.
- В качестве термоэлектрического модуля (ТЭМ) выбран модуль $40 \times 40 \times 3,2$ мм (рис. 9) производителя KRYOTHERM. Обозначения на схеме: 1 — радиаторы системы охлаждения компьютерного процессора; 2 — холодный теплообменник; 3 — ТЭ модуль; 4 — штуцеры (вход/выход); 5 — термопары. В ТЭМ используется полупроводник Bi_2Te_3 , показывающий высокие

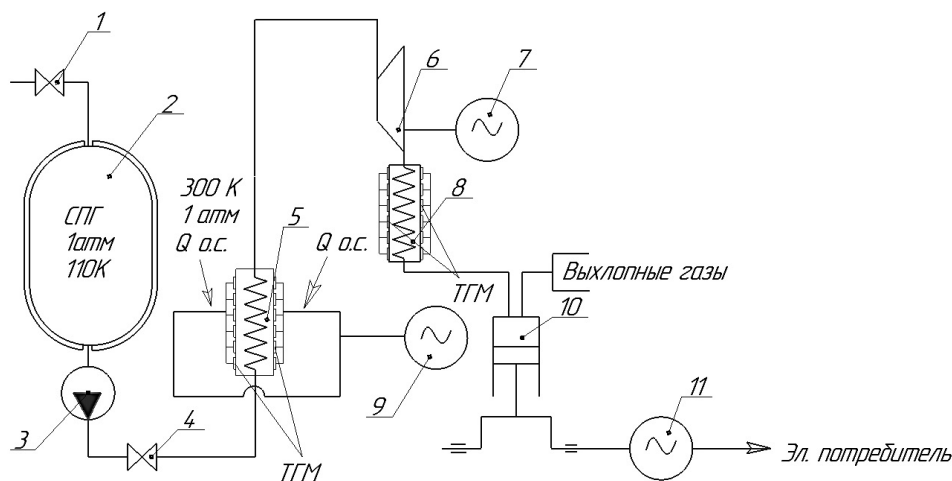


Рис. 8. Энергетический комплекс, работающий на СПГ, с ТГМ

Fig. 8. Energy complex operating on LNG, with TGM

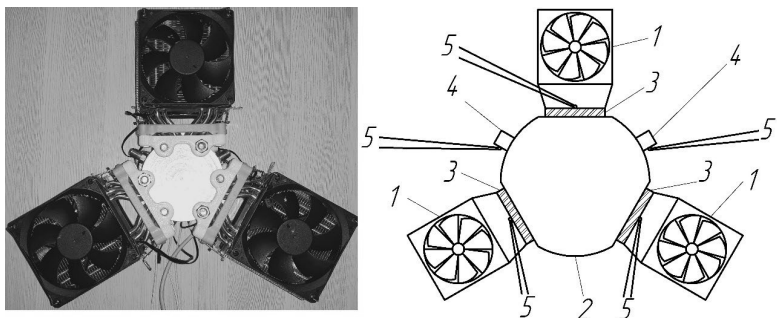


Рис. 9. ТЭГ в сборе [10]

Fig. 9. TEG assembly [10]

добротность и эффективность при криогенных температурах.

Каждый радиатор имеет три вентилятора 12 В, мощностью 2,2 Вт. Два из трех вентиляторов подключены непосредственно к блоку питания, каждый третий соединен параллельно и подключен к ТЭМ через устройство измерения тока и напряжения, ТЭМ соединены последовательно.

Для измерения температур используются термопары. Термопары установлены на входе и выходе из теплообменника, и на радиаторах в максимальной близости от горячей обкладки ТЭМ (T_1 , T_2 , T_3).

Эксперимент показал, что необходимо полностью отказаться от воздушной системы подвода тепла (СП), в пользу жидкостной, так как воздушная СП имеет большие габариты. Условия эксперимента показаны в табл. 9.

За время замеров (около 18 мин) максимальная разница температур составила 97–97,5 °С на 310–340 с, в момент фазового перехода N_2 (рис. 10, 11). Далее при постоянной температуре $T_{\text{вых}}$ горячая сторона охлаждалась интенсивнее, что способствовало уменьшению разности температур и, следовательно, эффективности ТЭГ. С помощью вентиляторов и радиаторов полноценно поддерживать температуру горячей стороны невозможно. Из графика (рис. 11) видно, что давление достигло максимального значения и оставалось постоянным, до момента, пока не закончился азот в сосуде (787 с). Макси-

Таблица 9

Условия эксперимента

Table 9

Experiment conditions

Параметры	Величина	Ед. изм.
Температура окружающей среды	27	°С
Давление в системе	0,15	мПа
Расход азота	2,8	г/с
Температура азота	–173,15	°С

мальная сила тока и напряжение были зафиксированы на 775 с ($I=1,51$ А, $U=7,8$ В).

Выводы

В данной работе проведено комплексное расчетно-экспериментальное исследование характеристик криогенного термоэлектрического генератора (ТЭГ), предназначенного для утилизации холода сжиженного природного газа (СПГ) в процессе его регазификации.

Теоретическая часть исследования включала сравнительный анализ перспективных полупроводниковых материалов ($Bi_{1,6}Sb_{0,4}Te_3$, $Pb_{0,74}Sn_{0,24}Cd_{0,02}$, $CsBi_4Te_6$, $Mg_2SiO_{0,3}Sn_{0,7}$) для применения в криогенном диапазоне температур. На основе разработанного алгоритма расчета были определены их ключевые параметры: генериру-

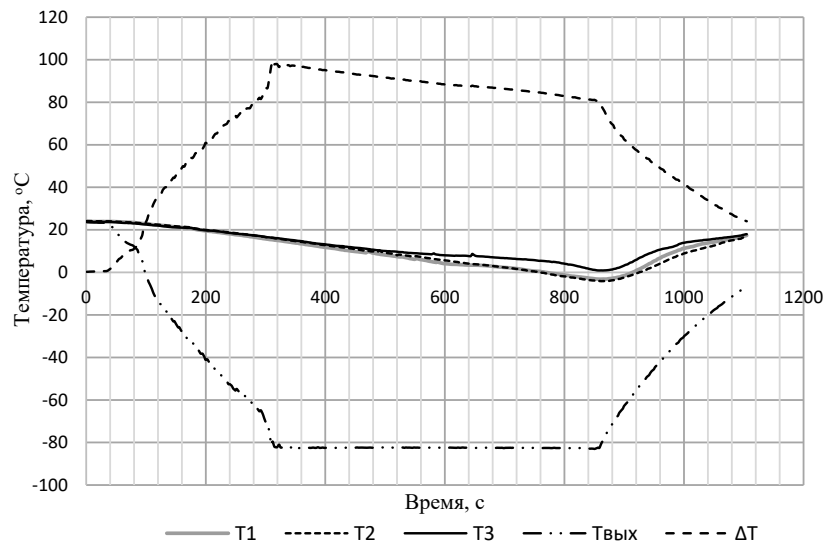


Рис. 10. Изменение температур горячей и холодной поверхностей модулей, и разности температур от времени
Fig. 10. Temperature changes of the hot and cold surfaces of the modules, and the temperature difference over time

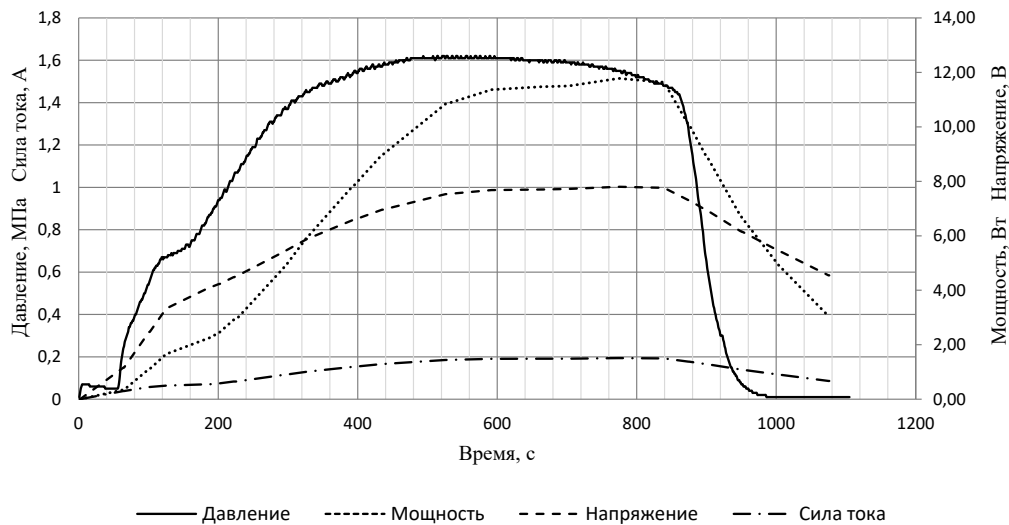


Рис. 11. Графики зависимости напряжения, силы тока, мощности и давления от времени
Fig. 11. Dependences of voltage, current strength, power and pressure on time

емая мощность, ток, КПД и термоЭДС. Наилучшие результаты по совокупности характеристик, в частности по величине термоэлектрической добротности (до 0,004 K⁻¹) и КПД (8–9 %), показал материал на основе висмут-теллурида (Bi_{1,6}Sb_{0,4}Te₃).

Экспериментальная часть подтвердила принципиальную возможность эффективной работы ТЭГ в криогенных условиях с рабочим телом — азотом. В ходе испытаний была достигнута максимальная разность температур на модуле около 97,5 °С, что позволило получить электрическую мощность до 11,8 Вт. Однако эксперимент также выявил существенные конструктивные ограничения, в частности, недостаточную эффективность воздушной системы подвода тепла к горячей стороне модуля, что обусловило снижение разности температур и мощности в установившемся режиме. Экспериментально полученный КПД составил 5.6%, что ниже расчетных значений, но демонстрирует потенциал для оптимизации.

Таким образом, работа доказала перспективность использования термоэлектрических генераторов для рекуперации энергии холода криопродуктов. Основными направлениями для дальнейших исследований являются оптимизация конструкции теплообменников (переход на жидкостные системы теплоподвода), подбор материалов ТЭГ с пиком эффективности в целевом криогенном диапазоне и исследование каскадных схем ТЭГ для повышения общей эффективности энергогенерации.

Благодарности

Результаты работы получены при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSSS-2024-0017).

Литература/References

1. Nasir M. T., Kim M., Lee J. et al. A review on technologies with electricity generation potentials using liquified natural gas re-gasification cold energy. *Frontiers in Energy*. 2023. Vol. 17, no. 5, p. 332–379. <https://doi.org/10.1007/s11708-023-0863-y>

2. Wu X., Fan Z., Zhu H. et al. Bulk Bi-Sb polycrystals underpinned by high electron/phonon mean free path ratio enabling thermoelectric cooling under 77 K. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16, no 1. P. 3534. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58491-1>
3. Zhang Y., Wang L., Chen X., Li K. A novel high-efficiency cooling system for data centers using two-phase immersion cooling: An experimental and numerical study. *Applied Thermal Engineering*. 2025. Vol. 268, 125838. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125838>.
4. Farayi Musharavati, Morteza Saadat-Targhi, Shoaib Khanmohammadi, Saber Khanmohammadi. Improving the power generation efficiency with the use of LNG as cold source by thermoelectric generators for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45, Iss. 51, P. 26905–26919.
5. Sun W., Hu P., Chen Z., Jia L. Power generation cycle combined with TEG recovering LNG cold energy. *Acta Energiæ Solaris Sinica*. October 2005, 26 (5):722–727.
6. Minghui Ge, Zhenhua Li, Yeting Wang, Yulong Zhao, Yu Zhu, Shixue Wang, Liansheng Liu. Experimental study on thermoelectric power generation based on cryogenic liquid cold energy. *Energy*. January 2021, 220 (6):119746. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119746
7. Minghui Ge, Xiaowei Wanga, Yulong Zhaoa, Shixue Wangb, Liansheng Liua. Performance analysis of vaporizer tube with thermoelectric generator applied to cold energy recovery of liquefied natural gas. *Energy Conversion and Management*. November 2019, 200 (5):112112. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112112
8. Tongtong Zhang, Xiaohui She, Zhanping You, Yanqi Zhao, Hongjun Fan, Yulong Ding. Cryogenic thermoelectric generation using cold energy from a decoupled liquid air energy storage system for decentralised energy networks. *Applied Energy*. 1 January 2022. Vol. 305, 117749. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117749>.
9. Qingshan Liu, Zhilong He, Yingwen Liu, Yaling He. Thermodynamic and parametric analyses of a thermoelectric generator in a liquid air energy storage system. *Energy Conversion and Management*. 1 June 2021, Vol. 237, 114117. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114117>.
10. Lopatin A. L., Sarmin D. V., Blagin E. V. and Uglanov D. A. Development and Research of the Design of a Heat Exchanger for an Evaporative System Based on Thermoelectric Generators. 2021 International Scientific and Technical Engine Conference (EC), Samara, Russian Federation, 2021, pp. 1–5. DOI: 10.1109/EC52789.2021.10016818.

Сведения об авторах

Богаткин Кирилл Александрович

Аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (Самарский университет), 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34

Благин Евгений Валерьевич

К. т. н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (Самарский университет), 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, blagin.ev@ssau.ru. Scopus ID: 56440152700

Галкина Наталья Викторовна

Старший преподаватель кафедры инженерной графики, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (Самарский университет), 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, galkina.nv@ssau.ru. Scopus ID: 57117727200

Довгялло Александр Иванович

Д. т. н., профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (Самарский университет), 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, dovgyallo.ai@ssau.ru. Scopus ID: 57193659654

Лопатин Алексей Леонидович

Аспирант, младший научный сотрудник НОЦ ГДИ-209, инженер-конструктор учебной лаборатории двигателей внутреннего сгорания, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (Самарский университет), 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, lopatin.al@ssau.ru

Information about authors

Bogatkin Kirill A.

Postgraduate Student, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara University), 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34

Blagin Evgeny V.

Ph. D., Associate Professor of Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara University), 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34, blagin.ev@ssau.ru. Scopus ID: 56440152700

Galkina Natalia Viktorovna

Senior Lecturer at the Department of Engineering Graphics, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara University), 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34, galkina.nv@ssau.ru. Scopus ID: 57117727200

Dovgyallo Alexander I.

D. Sc., Professor of the Department Thermal Engineering and Thermal Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara University), 443086, Russia, Samara, Moskovskoe highway, 34, dovgyallo.ai@ssau.ru. Scopus ID: 57193659654

Lopatin Alexey Leonidovich

Postgraduate Student, Junior Researcher at REC GDI-209, Design Engineer of the educational laboratory of Internal Combustion Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara University), 443086, Russia, Samara, Moskovskoe highway, 34, lopatin.al@ssau.ru

