

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.362

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-232-2-86-92

В.С. Вохмин, Ф.Ф. Хабилов

V.S. Vokhmin, F.F. Khabirov

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ TGM-127-1,4-2,0 ДЛЯ СЛАБОТОЧНЫХ СИСТЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

### STUDY OF THE THERMOELECTRIC MODULE TGM-127-1.4-2.0 FOR LOW-CURRENT SYSTEMS OF AGRICULTURAL ENTERPRISES

**Ключевые слова:** термоэлектрический модуль, термоэлектрический генератор, термоэлектричество, слаботочные системы, беспроводная коммуникационная сеть, LoRaWAN.

Контроль параметров работы инженерных коммуникаций и системы учета энергоресурсов (электросетей, водоснабжения, отопления, канализации и др.) является актуальным направлением для исследований в области применения нетрадиционных источников энергии. Технические средства, выполняющие функции сбора, обработки и передачи информации, относятся к слаботочным системам электропитания. Для корректной и надежной работы слаботочных систем требуется создавать оптимальные условия, к которым относится бесперебойность электропитания. Несмотря на эффективность применения слаботочных систем контроля энергоресурсов, не все необходимые точки измерений оснащены данными системами. В большей степени это обусловлено тем, что для их функционирования требуется электрическая энергия. Использование автономного источника энергии даёт возможность производить контроль и фиксацию необходимых параметров, обеспечивая также при этом местное освещение рабочих зон. Одним из перспективных автономных источников электропитания для таких систем является термоэлектрический генератор (ТЭГ), который преобразует тепловые потери в электрическую энергию. Термоэлектрический генератор состоит из термоэлектрических модулей, количество которых зависит от требуемых выходных параметров. Для исследования и выявления наиболее эффективных термоэлектрических модулей была разработана экспериментальная установка термоэлектрического генератора с принудительной системой охлаждения. На основе анализа технических характеристик низкотемпературных термоэлектрических элементов был подобран термоэлектрический модуль

марки TGM-127-1,4-2,0. В ходе проведения опытов выявлено, что исследуемый термоэлектрический модуль является наиболее подходящим для разработанной конструкции ТЭГ, так как его технические параметры и выходные характеристики способны обеспечить автономное электроснабжение слаботочной системы на базе беспроводной коммуникационной сети LoRaWAN.

**Keywords:** thermoelectric module, thermoelectric generator, thermoelectricity, low-voltage systems, wireless communication network, LoRaWAN.

Control of parameters of engineering communications and energy metering system (electric grid, water supply, heating, sewerage, etc.) is a topical direction for research in the field of application of non-traditional energy sources. The technical means used for collecting, processing and transmitting information relate to low-current power supply systems. Correct and reliable operation of low-voltage systems requires the creation of optimal conditions which include uninterrupted power supply. Despite the effectiveness of low-current energy monitoring systems, not all required measurement points are equipped with these systems. More importantly, they require electrical energy to function. The use of an autonomous power source makes it possible to control and fix the necessary parameters while also providing local lighting of the working areas. One of the promising independent power sources for such systems is a thermoelectric generator (TEG) which converts heat losses into electrical energy. The thermoelectric generator consists of thermoelectric modules the number of which depends on the required output parameters. To study and identify the most effective thermoelectric modules, an experimental installation of a thermoelectric generator with a forced cooling system was developed. Based on the analysis of the technical characteristics of low-temperature thermoelectric elements, the thermoelectric

module of the brand TGM-127-1.4-2 was selected. During the experiments, it has been found that the examined thermoelectric module is the most suitable for the developed TEG design, because its technical parameters and

output are able to provide an autonomous power supply to a weak-current system based on LoRaWAN wireless communication network.

**Вохмин Вячеслав Сергеевич**, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: v\_vohmin@mail.ru.

**Хабиров Фидан Фазитович**, аспирант, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: fidan.20@mail.ru.

**Vokhmin Vyacheslav Sergeevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, e-mail: v\_vohmin@mail.ru.

**Khabirov Fidan Fazitovich**, post-graduate student, Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, e-mail: fidan.20@mail.ru.

### Введение

Интерес в разработке и совершенствовании альтернативных источников энергии с прямым преобразованием тепловой энергии сжигаемого топлива в электрическую энергию всегда актуален. Одной из перспективных технологий по преобразованию тепловой энергии в электрическую энергию можно отнести термоэлектрический эффект в термоэлектрическом генераторе.

Термоэлектрическое устройство (термоэлектрический генератор (ТЭГ)) создает напряжение, когда с каждой стороны имеется разная температура (эффект Зеебека). И наоборот, когда к нему прикладывается напряжение, тепло передается с одной стороны на другую, создавая разницу температур (эффект Пельтье).

Конструкция ТЭГ выполнена таким образом, что каждая из сторон модуля контактирует либо р-п, либо п-р переходами (в зависимости от полярности). Контакты р-п нагреваются, п-р – охлаждаются. Соответственно, возникает разность температур ( $\Delta T$ ) на сторонах элемента. Примечательно, что изменение полярности питания приводит к смене горячей и холодной поверхности [1].

Величина разности потенциалов в такой цепи зависит от температуры, электропроводности и коэффициента термо-ЭДС, который также называется коэффициентом Зеебека.

Для разных материалов его значение различно и измеряется относительно коэффициента платины, которой равняется нулю [2- 4].

Основным элементом в термоэлектрическом генераторе является термоэлектрический модуль (ТЭМ), который отличается габаритными размерами, выходными электрическими характеристиками, диапазонами рабочих температур.

**Целью** является исследование характеристик термоэлектрического модуля TGM-127-1,4-2,0 для слаботочных систем подсчета энергоресурсов сельскохозяйственных предприятий.

**Задача** исследования состоит в анализе режимов работы термоэлектрического генератора на базе термоэлектрического модуля TGM-127-1,4-2,0 с разработкой режимной карты выработки электрической энергии.

### Объекты и методы исследования

Исследования проводились при помощи общенаучных методов в рамках статического и логического анализа.

Объектом исследования является термоэлектрический модуль в термоэлектрическом генераторе с принудительной системой охлаждения, который использует тепловые потери теплоэнергетического оборудования для преобразования тепловой энергии в электрическую.

Известно, что ТЭМ разделяются на низко-, средне- и высокотемпературные [5]. Выбор был сделан на исследование низкотемпературных термоэлектрических модулей. Произведен анализ технических характеристик низкотемпературных термоэлектрических элементов [1, 6], на основании которого установили, что самыми распространенными модулями являются TEC1-12703...TEC1-12715, которые в основном применяются для холодильных устройств, но при создании определенных температурных режимов также способны генерировать электрическую энергию. Стоит отметить термоэлектрические модули SP1848 27145 SA, TEP1-142T300 и TGM-127-1,4-2 (табл. 1), предназначенные для генерации электрической энергии, которые работают на основе эффекта Зеебека [5, 7, 8].

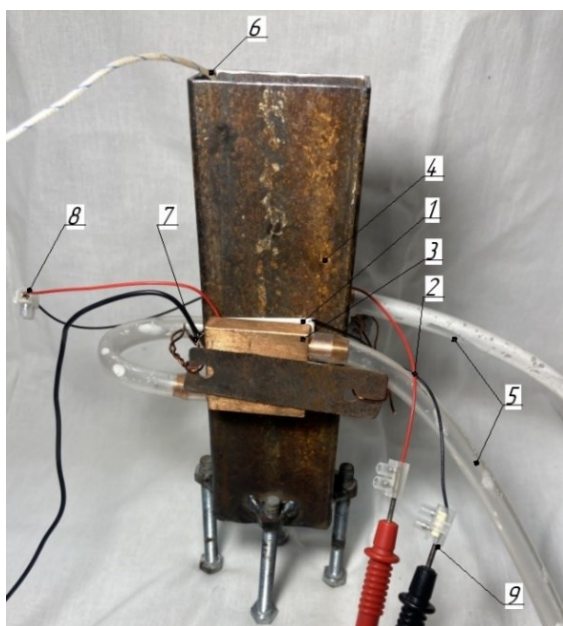
Параметры указаны для сопротивления нагрузки, равного внутреннему электрическому сопротивлению модуля.

Для проведения экспериментальных исследований была разработана опытная конструкция ТЭГ (рис. 1). В основе расчетов термоэлектрического генератора находятся термоэлектрические и теплообменные процессы [3, 7, 9].

Технические характеристики термоэлектрического модуля TGM-127-1,4-2,0

Параметры	$T_c = 50^\circ\text{C}$	$T_c = 30^\circ\text{C}$
	$T_h = 150^\circ\text{C}$	$T_h = 200^\circ\text{C}$
Напряжение, В	2,10	3,50
Ток, А	0,94	1,50
Мощность, Вт	1,96	5,30
КПД, %	3,40	5,30
Электрическое сопротивление (при $22^\circ\text{C}$ ), Ом	1,5±0,050%	
Тепловое сопротивление, К/Вт	2,20±10%	

Примечание.  $T_c$  – температура холодной стороны термоэлектрического генератора;  $T_h$  – температура горячей стороны термоэлектрического генератора.



**Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки термоэлектрического генератора с принудительной системой охлаждения:**

- 1 – термоэлектрический модуль;
- 2 – положительные и отрицательные провода;
- 3 – медный теплообменник; 4 – стальная труба с горячим теплоносителем; 5 – патрубки системы охлаждения; 6 – датчик температуры горячего теплоносителя;
- 7 – датчик температуры холодного теплоносителя; 8, 9 – клеммы

Экспериментальная установка термоэлектрического генератора с принудительной системой охлаждения [2] позволяет изменять параметры горячего и холодного теплоносителей, моделировать изменение температуры с возможностью исследования влияния параметров теплоносителей на выходные параметры термоэлектрического генератора. Установка включает в себя: термоэлектрические модули 1,

положительные и отрицательные провода 2, медный теплообменник для прокачки холодного теплоносителя 3, стальную трубу с горячим теплоносителем 4, систему охлаждения 5, датчик температуры горячего теплоносителя 6, датчик температуры для холодного теплоносителя 7.

#### Экспериментальная часть

Исследован термоэлектрический модуль TGM-127-1,4-2,0 российской компании KRYOTHERM. Результаты проведенных исследований отражены в режимной карте, которая приведена в таблице 2.

По результатам исследований получили, что исследуемый термоэлектрический модуль TGM-127-1,4-2,0 можно применять для разработанной конструкции ТЭГ и проведения дальнейших исследований [10, 11].

#### Результаты и их обсуждения

Проведены исследования в трехкратной повторяемости при изменяющейся температуре нагреваемой стороны модулей от 0-120°C. Температура охлаждающей стороны модулей принимали: в первом  $T_x = 10^\circ\text{C}$ , во втором  $T_x = 40^\circ\text{C}$ , в третьем  $T_x = 70^\circ\text{C}$ . Полученные зависимости показаны на рисунках 2, 3.

Значения тока и напряжения фиксировали с температуры нагреваемой стороны 30°C, так как при температуре нагреваемой стороны ТЭГ меньше 30°C значения напряжения слишком малы и не достаточны для работы слаботочных систем.

На рисунке 2 представлены графики напряжения при температуре от 0 до 120°C с нагреваемой стороны ТЭГ.

Режимная карта работы ТЭГ

Температура охлаждаемой стороны, °C	Температура нагреваемой стороны, °C	Напряжение, В	Ток, mA	Мощность, Вт
10	5	0,11	1,1	0,00012
	10	0,23	0,8	0,00018
	15	0,45	1,3	0,0005
	20	0,64	3,4	0,0021
	25	0,73	3,9	0,0028
	30	0,81	5,5	0,0044
	35	0,88	5,6	0,0049
	40	0,92	6,3	0,0057
	45	0,99	6,8	0,0067
	50	1,05	7,7	0,0080
	55	1,1	7,9	0,0086
	60	1,2	8,2	0,009
	65	1,4	8,5	0,01
	70	1,6	16	0,02
	75	1,9	20	0,03
	80	2,1	45	0,09
	85	2,3	47	0,10
	90	3,1	51	0,15
	95	3,4	53	0,18
	100	4,2	70	0,29
105	5	76	0,38	
110	5,4	77	0,41	
115	5,6	78	0,43	
120	5,6	79	0,44	

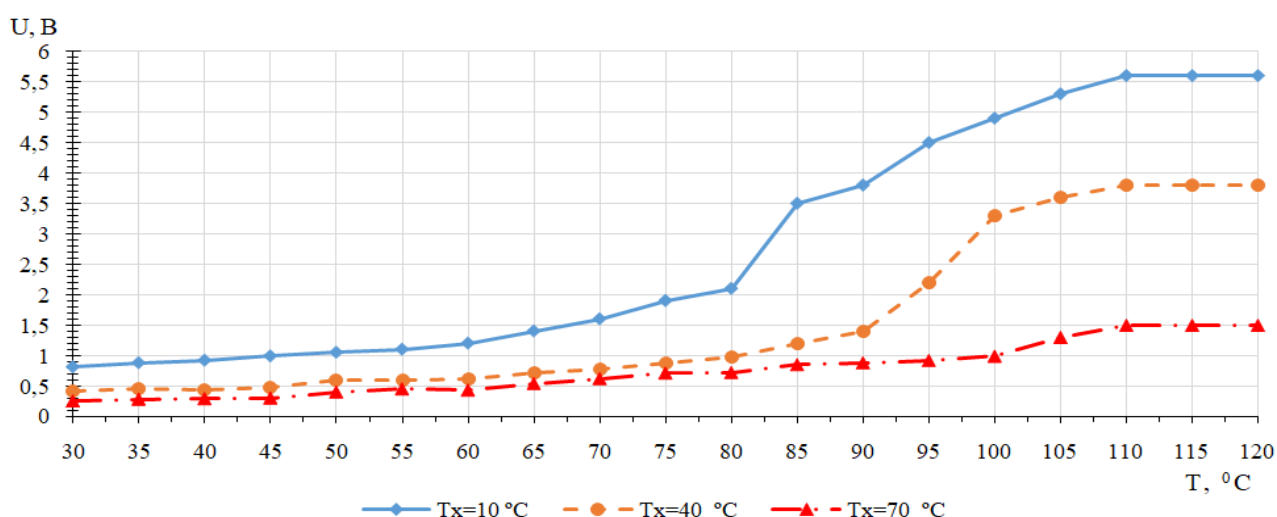


Рис. 2. Графики изменения напряжения при температуре от 0 до 120°C с нагреваемой стороны ТЭГ

Как видно по полученным зависимостям на рисунке 2 наибольшее значение выходного напряжения составляет  $U = 5,6$  В при температуре охлаждающей стороны в 10°C и при температуре в 120°C с нагреваемой стороны.

На рисунке 3 представлены графики изменения тока при температуре от 0 до 120°C с нагреваемой стороны ТЭГ.

Как видно по полученным зависимостям на рисунке 3, наибольшее значение выходного тока составляет  $I = 79$  mA при температуре охлаждающей стороны в 10°C и при температуре в 120°C с нагреваемой стороны.

По результатам исследования ТЭМ в предлагаемой конструкции ТЭГ получили, что для учета и передачи данных в слаботочных системах та-

кой источник автономного электроснабжения может быть применим.

В качестве беспроводной передачи данных предлагается использовать технологию LPWAN (Low-power Wide-area Network «глобальная сеть

малой мощности»). Одной из них служат коммуникационные сети LoRa, или, как их еще называют, по протоколам, используемым в канальном уровне, – LoRaWAN.

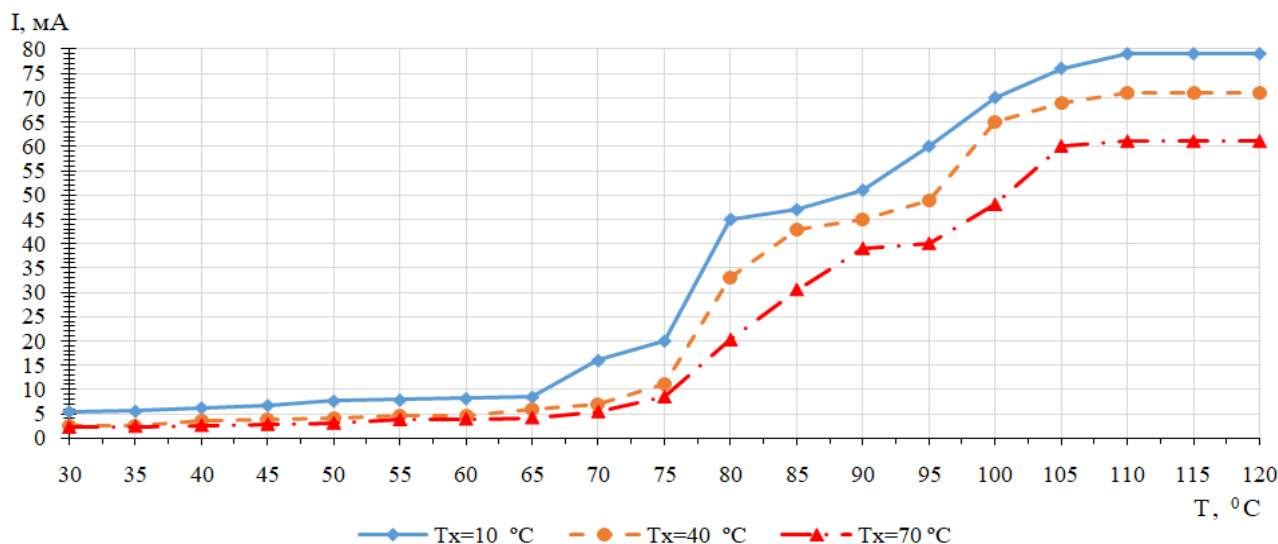


Рис. 3. Графики получения тока при температуре от 0 до 120°C с нагреваемой стороны ТЭГ

Большая автономность достигается за счет использования высокоемкостных аккумуляторов, не подверженных саморазряду, а также за счет низкого энергопотребления, что позволит интегрировать предлагаемую конструкцию термоэлектрического генератора с LoRaWAN.

LPWAN датчики, как правило, питаются от 3,6 В литиевой батареи. Стандартное короткое сообщение LoRaWAN длительностью 1,6 с расходует примерно 20 мкА·ч энергии батареи, что позволяет в предельном случае отправить до 100 тыс. сообщений от стандартной батареи, емкость которой обычно составляет 2000 мА·ч [10].

Предлагаемый источник питания на базе ТЭГ с термоэлектрическими модулями TGM-127-1,4-2,0 способен обеспечить электропитанием предлагаемую слаботочную систему передачи данных, что подтверждается проведенными исследованиями.

Для стабилизации напряжения питания, получаемого от сборки термоэлементов, необходимо применять специальные преобразователи напряжения [9, 11].

### Выводы

1. Проведены исследования термоэлектрического модуля TGM-127-1,4-2,0 при имитации различных температурных режимов.

2. Согласно проведенным исследованиям, на разработанной конструкции ТЭГ при температуре с нагреваемой стороны ТЭГ в 120°C и при температуре ТЭГ с охлаждаемой стороны в 10°C было получено  $U = 5,6$  В,  $I = 79$  мА,  $P = 0,44$  Вт.

3. Рассмотрена возможность обеспечения электропитанием слаботочной системы для беспроводной передачи данных в коммуникационной сети LoRaWAN.

### Библиографический список

1. Исследование основных характеристик термоэлектрического охладителя и генератора: лабораторный практикум / В. Н. Белозерцев [и др.]. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 76 с. – Текст: непосредственный.

2. Патент 2755980 Российская Федерация: МПК H01L 35/30. Термоэлектрический генератор с принудительной системой охлаждения / Вохмин В. С., Хабиров Ф. Ф., заявитель и патентообладатель Уфа, ФГБОУ ВО Башкирский государственный аграрный университет; заявл. 01.10.2021; опубл. 23.09.2021, Бюл. № 27. – 8 с. – Текст: непосредственный.

3. Хабиров, Ф. Ф. Разработка термоэлектрического генератора для слаботочных систем сельскохозяйственных предприятий / Ф. Ф. Хабиров, В. С. Вохмин. – Текст: непосредственный



// АПК РОССИИ / Южно-Уральский государственный аграрный университет. – Челябинск, 2022. – С. 490-499.

4. Karri, M., Thacher, E., Helenbrook, B. (2011). Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: Two case studies. *Energy Conversion and Management*. 52. 1596-1611. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.10.013.

5. Виноградов, С. В. Проектирование термоэлектрического генератора, работающего от теплоты выхлопных газов судовых дизелей / С. В. Виноградов, М. М. Горбачёв, К. Р. Халыков. – Текст: непосредственный // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2010. – № 1. – С. 89-94.

6. Гайнетдинов, Н. Н. Термоэлектрический генератор как автономный источник энергии для питания приборов учета контрольных точек тепловых сетей / Н. Н. Гайнетдинов, В. С. Вохмин, Ф. Ф. Хабиров. – Текст: непосредственный // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК: сборник материалов / Международная научно-практическая конференция в рамках 32-й Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2022», Уфа, 23-24 марта 2022 г.; Башкирский ГАУ. – Уфа, 2022. – С. 137-141.

7. Банных, О. П. Основные конструкции и тепловой расчет теплообменников: учебное пособие / О. П. Банных. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. – 42 с. – Текст: непосредственный.

8. Хабиров, Ф. Ф. Обоснование применения термоэлектрического генератора в системе дымоотведения котельной / Ф. Ф. Хабиров, В. С. Вохмин. – Текст: непосредственный // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – № 3 (32). – С. 285-292.

9. Патент 2305347 Российская Федерация: МПК H01L 35/30. Термоэлектрический генератор / Еврофеев Р.С. [и др.]; заявитель и патентообладатель Москва, Федеральное ГУП НПП «Квант»; заявл. 17.04.2006; опублик. 27.08.2007, Бюл. № 24. – 7 с. – Текст: непосредственный.

10. Валишин, Д. Е. Применение LORAWAN для мониторинга и контроля потребления энергоресурсов предприятием / Д. Е. Валишин, И. М. Ситдинов, А. Д. Хайруллин. – Текст: непосредственный // Наука молодых – инновационному развитию АПК: сборник материалов / XIV Национальная научно-практическая конферен-

ция молодых ученых, Уфа, 17-18 ноября 2021 г.; Башкирский ГАУ. – Уфа, 2021. – С. 227-231.

11. Хабиров, Ф. Ф. Исследование и разработка термоэлектрического генератора для слаботочных систем сельскохозяйственных предприятий / Ф. Ф. Хабиров, В. С. Вохмин. – Текст: непосредственный // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК: сборник материалов / Международная научно-практическая конференция, Уфа, 22-24 марта 2023 г.; Башкирский ГАУ. – Уфа, 2023. – С. 111-115.

## References

1. Issledovanie osnovnykh kharakteristik termoelektricheskogo okhladitel'ia i generatora: lab. praktikum / V.N. Belozertsev [i dr.]. – Samara: Izdatel'stvo SGAU, 2015. – 76 s.

2. Termoelektricheskii generator s prinuditel'noi sistemoi okhlazhdeniia: pat. 2 755 980 Rossiiskaia Federatsiia: MPK N01L 35/30. / Vokhmin V.S., Khabirov F.F., zaiavitel' i patentoobladatel' Ufa, FGBOU VO Bashkirskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet; zaiavl. 01.10.2021; opubl. 23.09.2021, Biul. No. 27. – 8 s.

3. Khabirov, F.F. Razrabotka termoelektricheskogo generatora dlia slabotochnykh sistem selskokhoziaistvennykh predpriatii / F.F. Khabirov, V.S. Vokhmin // APK ROSSII / Iuzhno-Uralskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet. – Cheliabinsk, 2022. – S. 490-499.

4. Karri, M., Thacher, E., Helenbrook, B. (2011). Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: Two case studies. *Energy Conversion and Management*. 52. 1596-1611. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.10.013.

5. Vinogradov, S.V. Proektirovanie termoel'ektricheskogo generatora, rabotaiushchego ot teploty vykhlopnykh gazov sudovykh dizelei / S.V. Vinogradov, M.M. Gorbachev, K.R. Khalykov // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaia tekhnika i tekhnologiia. – 2010. – No. 1. – С. 89–94.

6. Gainetdinov, N.N. Termoelektricheskii generator kak avtonomnyi istochnik energii dlia pitaniia priborov ucheta kontrolnykh toчек teplovykh setei / N.N. Gainetdinov, V.S. Vokhmin, F.F. Khabirov // Sovremennoe sostoianie, traditsii i innovatsionnye tekhnologii v razvitii APK: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii v ramkakh 32-i Mezhdunarodnoi spetsializirovannoi vystavki

«Agrokompleks-2022» (Ufa, 23-24 marta 2022 g.) Bashkirskii GAU. – Ufa, 2022. – S. 137-141.

7. Bannykh, O.P. Osnovnye konstruksii i teplovoi raschet teploobmennikov: uchebnoe posobie / O.P. Bannykh. – Sankt-Peterburg: NIU ITMO, 2012. – 42 s.

8. Khabirov, F.F. Obosnovanie primeneniia termoelektricheskogo generatora v sisteme dymootvedeniia kotelnoi / F.F. Khabirov, V.S. Vokhmin // Innovatsii v selskom khoziaistve. – 2019. – No. 3 (32). – S. 285–292.

9. Termoelektricheskii generator: pat. 2305347 Rossiiskaia Federatsiia: MPK N01L 35/30 / Evrofeev R.S. [i dr.]; zaiavitel i patentoobladatel Moskva, Federalnoe GUP NPP “Kvant”; zaiavl. 17.04.2006; opubl. 27.08.2007, Biul. No. 24. – 7 s.

10. Valishin, D.E. Primenenie LORAWAN dlia monitoringa i kontroliia potrebleniia energoresursov predpriatiem / D.E. Valishin, I.M. Sitdikov, A.D. Khairullin // Nauka molodykh – innovatsionno-mu razvitiuu APK: materialy XIV Natsionalnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh (Ufa, 17-18 noiabria 2021 g.). Bashkirskii GAU. – Ufa, 2021. – S. 227-231.

11. Khabirov, F.F. Issledovanie i razrabotka termoelektricheskogo generatora dlia slabotochnykh sistem selskokhoziaistvennykh predpriatii / F.F. Khabirov, V.S. Vokhmin // Sovremennoe sostoianie, traditsii i innovatsionnye tekhnologii v razvitiu APK: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Ufa, 22-24 marta 2023 g.) / Bashkirskii GAU. – Ufa, 2023. – S. 111-115.



УДК 631.372

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-232-2-92-98

**Е.С. Поликутина, Е.Е. Кузнецов,  
С.В. Щитов, З.Ф. Кривуца, Е.В. Панова  
E.S. Polikutina, E.E. Kuznetsov,  
S.V. Shchitov, Z.F. Krivutsa, E.V. Panova**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ ПОСРЕДСТВОМ СНИЖЕНИЯ  
УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА**

**INCREASING EFFICIENCY OF AGRICULTURAL PRODUCTION  
BY REDUCING THE SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION OF A MACHINE AND TRACTOR UNIT**

**Ключевые слова:** машинно-тракторный агрегат, энергетические средства, сельскохозяйственные машины, удельная энергоёмкость, сельскохозяйственные культуры, энергозатраты, энергетическая эффективность.

В связи с резким повышением цен на нефтепродукты особенно актуально в настоящее время уменьшение энергетических затрат на производство сельскохозяйственной продукции. Снизить величину удельной энергоёмкости машинно-тракторного агрегата возмож-

но за счёт увеличения годовой загрузки и производительности. Одним из способов решения данной проблемы является повышение сцепного веса, приходящегося на ведущие колёса энергетического средства, за счёт установки предлагаемого прижимно-разгрузочного механизма, дающего возможность регулировать нагрузку между осями энергетического средства. На основании полученных данных установлено, что перераспределение сцепного веса между осями трактора за счёт установки представленного устройства повышает производительность машинно-