

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 629.048.7:621.43

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202102.304-320

Оригинальная статья



Повышение эффективности работы жидкостного подогревателя при предпусковой подготовке двигателя внутреннего сгорания

Р. Ф. Самиков¹, Ш. Ф. Нигматуллин¹, М. М. Разяпов¹,
А. А. Козеев¹, А. В. Смольянов^{2*}, Д. А. Галин²

¹ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (г. Уфа, Российская Федерация)

²ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Российская Федерация)

*alexsmol013@yandex.ru

Введение. В данной статье объектом исследования является система энергоснабжения предпускового подогревателя. Цель – оценить возможность использования термоэлектрического генератора для питания жидкостного предпускового подогревателя с оптимизацией проточной части теплообменника термоэлектрического генератора.

Материалы и методы. Предложено использовать термоэлектрический генератор в качестве дополнительного источника энергии для снижения потребления электроэнергии предпусковым подогревателем. В процессе выполнения работы были смоделированы различные конструкции проточной части теплообменника термоэлектрического генератора. Был проведен термический и гидродинамический анализ в программных средах ANSYS Workbench, Solidworks Flow Simulation, по результатам которого определена наиболее эффективная конструкция проточной части теплообменника термоэлектрического генератора.

Результаты исследования. Была собрана экспериментальная установка, и выведена зависимость влияния температурных режимов работы предпускового подогревателя на выходные показатели термоэлектрического генератора.

Обсуждение и заключение. Доказана возможность снижения энергопотребления аккумуляторной батареи автотранспортного средства при тепловой подготовке двигателя внутреннего сгорания путем применения термоэлектрического генератора, адаптированного к системе энергоснабжения жидкостного предпускового подогревателя.

Ключевые слова: предпусковой подогреватель, термоэлектрический генератор, теплообменник, тепловая подготовка, гидродинамический расчет теплообменника

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Самиков Р. Ф., Нигматуллин Ш. Ф., Разяпов М. М., Козеев А. А., Смольянов А. В., Галин Д. А., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Повышение эффективности работы жидкостного подогревателя при предпусковой подготовке двигателя внутреннего сгорания / Р. Ф. Самиков, Ш. Ф. Нигматуллин, М. М. Разяпов [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202102.304-320 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 304–320.

Original article

Improving the Efficiency of the Liquid Heater in the Pre-Start Preparation of the Internal Combustion Engine

R. F. Samikov^a, Sh. F. Nigmatullin^a, M. M. Razyapov^a,
A. A. Kozeev^a, A. V. Smolyanov^{b*}, D. A. Galin^b

^aBashkir State Agrarian University (Ufa, Russian Federation)

^bNational Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

*alexsmol013@yandex.ru

Introduction. In this article the study subject is the power supply system of the pre-start heater. The purpose of the study is to evaluate the possibility of using a thermoelectric generator to power the liquid preheater with optimization of the flow section of the thermoelectric generator heat exchanger.

Materials and Methods. It is proposed to use a thermoelectric generator as an additional energy source to reduce electric power consumption by a pre-start heater. In the course of the study, various structures of the flow section of the thermoelectric generator heat exchanger have been modeled. The thermal and hydrodynamic analyses were carried out in the software environment ANSYS Workbench, Solidworks Flow Simulation to develop the most effective design for the flow section of the thermoelectric generator heat exchanger.

Results. An experimental installation was assembled and the dependence of the temperature modes of the pre-start heater on the output parameters of the thermoelectric generator was determined.

Discussion and Conclusion. It has been proved the possibility of reducing the power consumption of the vehicle battery during thermal preparation of the internal combustion engine by using a thermoelectric generator adapted to the power supply system of the liquid pre-start heater.

Keywords: preheater, thermoelectric generator, heat exchanger, thermal preparation, hydrodynamic calculation of heat exchanger

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Samikov R.F., Nigmatullin Sh.F., Razyapov M.M., et al. Improving the Efficiency of the Liquid Heater in the Pre-Start Preparation of the Internal Combustion Engine. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):304-320. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.304-320>

Введение

Запуск двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при отрицательных температурах окружающей среды остается актуальной проблемой для всех видов транспортных средств. Прежде всего, это связано с отрицательным влиянием

низких температур на работу ДВС. Вследствие быстрого нагревания отдельных деталей «холодного» двигателя в нем возникают температурные напряжения, которые вместе с механическими нагрузками приводят к быстрому износу деталей и сокращению ресурса [1].

Предпусковой подогрев охлаждающей жидкости в двигателе является одним из наиболее распространенных и эффективных методов прогрева при пониженных температурах. Жидкостные подогреватели подходят практически для всех типов ДВС, поэтому применяются как в легковых и грузовых автомобилях, так и в автобусах.

Несмотря на ряд положительных свойств, автомобильные подогреватели штатно не используются, а являются вспомогательным оборудованием. Одна из причин – дополнительное потребление невосполняемой электрической энергии от аккумуляторной батареи для питания компонентов предпусковых подогревателей: топливного насоса, вентилятора для подачи воздуха в камеру сгорания, циркуляционного насоса для прокачки жидкого теплоносителя. Исследования показали, что при работе жидкостного нагревателя тепловой мощностью 4 кВт и потребляемой электрической мощностью 37–40 Вт (со штатным вентилятором системы отопления автомобиля до 60 Вт) аккумулятор емкостью 60 А·ч теряет 50 % емкости за 4,5 ч. Следует учесть и тот факт, что в условиях отрицательных температур емкость автомобильного аккумулятора дополнительно снижается более чем на 20 %. Поэтому жидкостные предпусковые подогреватели рекомендуют использовать не больше 20 минут для автомобилей с двигателем до 3 л и не больше одного часа для двигателей объемом более 3 л, однако этого может быть недостаточно для прогрева ДВС до рабочей температуры [2; 3]. В этой связи вопрос снижения потребляемой предпусковым подогревателем электроэнергии без изменения его потребительских качеств представляется актуальным [4–6].

Цель исследования – оценить возможность использования термоэлектрического генератора (ТЭГ) для питания

жидкостного предпускового подогревателя с оптимизацией проточной части теплообменника ТЭГ.

Обзор литературы

Автономные предпусковые подогреватели для тепловой подготовки ДВС автотранспортных средств при низких температурах окружающей среды серийно производятся на ряде предприятий: Eberspacher, Webasto, Truma (Германия), Ateso (Чехия), Mikuni (Япония), «Теплостар» (Россия).

В настоящее время ни одна из известных моделей предпусковых подогревателей не решает проблему разрядки аккумуляторной батареи при тепловой подготовке автомобильного транспортного средства (АТС) [7]. Обзор научной и учебной литературы показал, что существуют несколько способов снижения потребления энергии аккумуляторной батареи при тепловой подготовке ДВС [8–11]. Первый способ решения проблемы – использование в качестве теплового модуля генератора горячих газов со сниженным энергопотреблением, где в качестве источника тепловой энергии выступает разогретый поток воздуха [12]. Снижение энергопотребления реализовано преобразованием тепловой энергии потерь в электрическую с помощью усовершенствованной направляющей насадки, где установлен термоэлектрический генератор.

Второй способ снижения энергопотребления осуществлен с помощью внедрения в конструкцию предпускового подогревателя ТЭГ. В этом случае подогреватель работает следующим образом: тепловая энергия, полученная вследствие сгорания топлива, нагревает горячий теплообменник, проходит через термоэлектрический преобразователь и отводится жидким теплоносителем, который циркулирует в теплообменнике подогревателя и системе охлаждения ДВС. Вследствие различия температур между

горячей и холодной сторонами термопреобразователя генерируется электрический ток [13; 14].

В рассмотренных работах не уделено внимание тому, что для снижения потребления энергии аккумуляторной батареи необходимо изменять конструкцию устройств тепловой подготовки ДВС.

Методы и материалы

При проектировании ТЭГ в качестве генераторных модулей были выбраны ТГМ-199-1,4-1,2 фирмы Kryotherm [15]. Основные характеристики представлены в таблице 1: I_{\max} – максимальный электрический ток, А; Q_{\max} – максимальная холодопроизводительность при нулевой разности температур между его сторонами, Вт; НТ – температура эксплуатации до 200 °С.

Энергоотдача ТЭГ зависит от разницы температур на сторонах термоэлектрических генераторных модулей (ТГМ), поэтому важно обеспечить подвод тепла к горячей стороне и отвод температуры от холодной стороны ТГМ

с помощью теплообменников. Для наиболее эффективного выбора конструкций теплообменников ТЭГ необходимо произвести гидродинамические расчеты движения потоков выхлопных газов предпускового подогревателя и теплоносителя системы охлаждения двигателя, а также проанализировать температурное поле распределения тепла на поверхности теплообменника ТЭГ.

При проектировании конструкций ТЭГ был разработан ряд моделей (рис. 1).

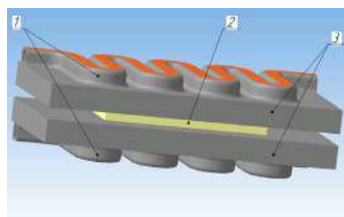
Модель, представленная на рисунке 1а, состоит из ТГМ 2, на противоположных сторонах которого установлены пластины 3, к ним плотно прижаты трубчатые теплообменники 1, имеющие спиралевидную форму. Следующая модель (рис. 1б) состоит из ТГМ 2, теплообменников 3, выполненных в виде коробов прямоугольного сечения, во внутренней части которых расположены пластины 1; каждая пластина находится на определенном расстоянии друг от друга в шахматном порядке.

Таблица 1

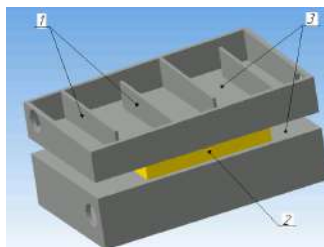
Table 1

Характеристики ТГМ-199-1,4-1,2
Specification TGM-199-1,4-1,2

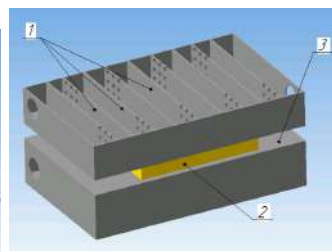
I_{\max} , А / I_{\max} , A	Q_{\max} , Вт / Q_{\max} , W	U , В / U , V	R , Ом / R , Ω	НТ, °С	T_c , °С	T_h , °С
2,1	9,8	4,6	1,54	200	30	150



a)



b)



c)

Р и с. 1. Модель теплообменника отработавших газов с использованием:

а) медных трубок в форме спирали; б) металлических пластин;

в) металлических пластин с отверстиями

Fig. 1. Model of an exhaust gas heat exchanger using: а) copper tubes in the form of a spiral; б) metal plates; в) metal plates with holes

Данная конструкция позволяет создавать лабиринт при движении потоков различных сред. На рисунке 1с представлена расчетная модель, состоящая из ТГМ 2, теплообменников 3, пластин со сквозными отверстиями 1. В отличие от вышерассмотренной модели пластины имеют сквозные отверстия, которые создают завихренность движению потока.

Для расчета поставленной задачи был выбран пакет ANSYS Thermal Steady State, реализующий метод конечных элементов. Его применение позволяет с малой погрешностью рассчитать тепловое поле нагрева поверхности теплообменника. Для проведения расчетов в качестве граничных условий были заданы следующие параметры: давление выхлопных газов предпускового подогревателя 150 кПа; температура выхлопных газов 420 °С; давление циркуляционного насоса охлаждающей жидкости 130 кПа; начальная температура теплоносителя –15 °С; модель твердотельная; составные компоненты газовой среды не вступают в химическое взаимодействие друг с другом; задача стационарная; отсутствуют подвижные элементы; геометрия модели неизменная.

Для оптимального выбора модели ТЭГ расчета температурного поля нагрева недостаточно. Необходимо установить распределение поля давления во внутренней полости теплообменника. В качестве программного модуля для проведения гидродинамического расчета был выбран комплекс САЕ Solidworks Flow Simulation.

Для описания движения и теплообмена газа в проточной области теплообменника применили систему дифференциальных уравнений Навье – Стокса. В нее входят уравнения сохранения энергии и неразрывности и сохранения количества движения.

Для дальнейшего исследования турбулентного течения гомогенных

отработавших газов предпускового подогревателя применяется модифицированная модель турбулентности $k-\varepsilon$. В данной модели использовали два дополнительных уравнения для переноса кинетической энергии турбулентности и переноса диссипации турбулентности, чтобы добиться замыкания системы уравнений Навье – Стокса [16]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \tau_{ij}^R \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_t P_B \right) - f_2 C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k}, \quad (2)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности, Дж/кг; ε – диссипация энергией турбулентности, Дж/(кг·с); $P_B = -g_i \partial \rho / (\sigma_{Bp} \partial x_i)$ – коэффициент, отвечающий за генерацию турбулентности; $C_\mu, C_{s1}, C_{s2}, \sigma_\delta, \sigma_B, C_B$ – константы.

Для вычисления тензора напряжений Рейнольдса использовали гипотезу Буссинеска [16]:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \cdot \rho k \delta_{ij}. \quad (3)$$

Турбулентная вязкость вычисляется по формуле:

$$\mu_t = f_\mu \cdot C_\mu \cdot \rho k^2 / \varepsilon. \quad (4)$$

Демпфирующие функции являются особенностью рассматриваемой модели:

$$f_\mu = \left(1 - e^{-0,025 R_y} \right)^2 \cdot (1 + 20,5 / R_T), \quad (5)$$

$$f_1 = 1 + (0,05 / f_\mu)^3, \quad (6)$$

$$f_2 = 1 - e^{-\frac{R_y^2}{T}}, \quad (7)$$

где $R_y = \rho \sqrt{ky} / \mu R, R = \rho \cdot k^2 / (\mu \cdot \varepsilon), \text{ м};$
 y – расстояние до сетки, м.

Данные функции гарантируют уменьшение энергии турбулентности и вязкости и увеличение диссипации турбулентности при низких значениях числа Рейнольдса.

В дальнейших исследованиях при описании пограничного слоя применена двухуровневая модель, в которой принимались два разных метода описания тонких и толстых пограничных слоев. Преимуществом данной модели является значительное снижение трудоемкости сравнительного анализа существующих конструкций теплообменников, а также решение уравнений Навье – Стокса и модели турбулентности методом конечных объемов. В деталях ТЭГ для определения значений теплопроводности применимо уравнение Фурье:

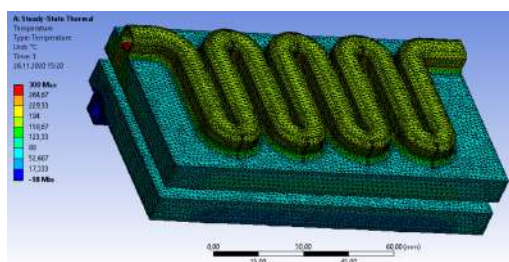
$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \Delta u, \quad (8)$$

где u – температура, К; a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

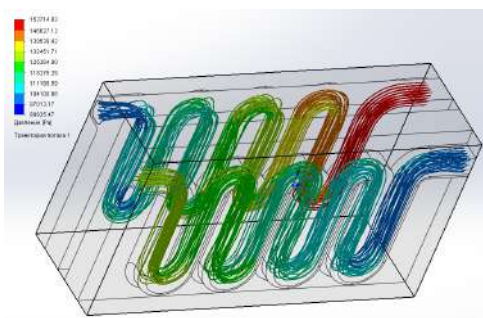
Предварительные расчеты изменения температурного поля теплообмен-

ников при использовании в качестве теплоносителей охлаждающей жидкости и отработавших газов показали, что при последующих расчетах можно не моделировать процессы с применением охлаждающей жидкости, так как температура стенок теплообменника по всей его длине изменятся незначительно. В качестве граничного условия здесь используется температура окружающей среды [17].

На рисунке 2 представлены результаты расчетов распределения температурного поля (рис. 2а) и давления (рис. 2б) в теплообменнике с использованием медных трубок в форме синусоиды. По температурному полю нагрева теплообменника видно, что максимальная температура равномерно распределена по всей площади трубки и достигает 230 °С. По карте распределения давления в теплообменнике 1 видно, что при подаче горячего газа максимальное давление 153 кПа снижается с каждым витком трубки на 10 кПа, на выходе давление приближено к атмосферному. Во второй теплообменник противоточно подается охлаждающая жидкость с заданным начальным давлением 130 кПа, которое плавно снижается до 120 кПа из-за местных гидравлических сопротивлений [18].



а)



б)

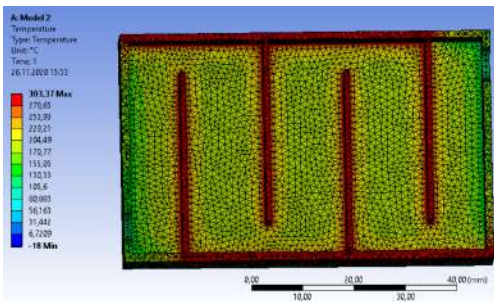
Р и с. 2. Модель с использованием медных трубок в форме спирали: а) температурное поле; б) карта результатов давления

Fig. 2. Model using helical copper tubes: a) temperature field; b) map of pressure results

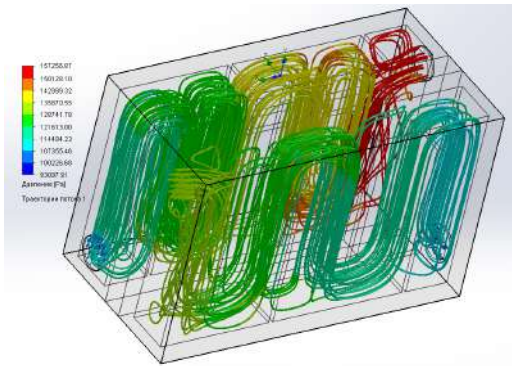
На рисунке 3 представлены результаты расчетов распределения температурного поля (рис. 3а) и давления (рис. 3б) модели с использованием металлических пластин. По карте распределения давления видно, что есть локальные участки падения и повышения давления, движение потоков газа и жидкости имеет завихренности внутри полости теплообменников. Максимальное давление при подаче отработавшего газа составляет 157 кПа, минимальное – 110 кПа. Термический

анализ показал, что максимальная температура металлических пластин достигает 300 °С.

На рисунке 4 представлены результаты расчетов распределения температурного поля (рис. 4а) и давления (рис. 4б) модели с использованием металлических пластин с отверстиями. По карте результатов температурного поля при течении горячего газа видно, что температура от максимального значения 250 °С плавно уменьшается до 46 °С.



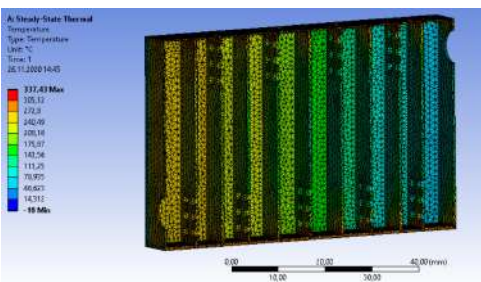
а)



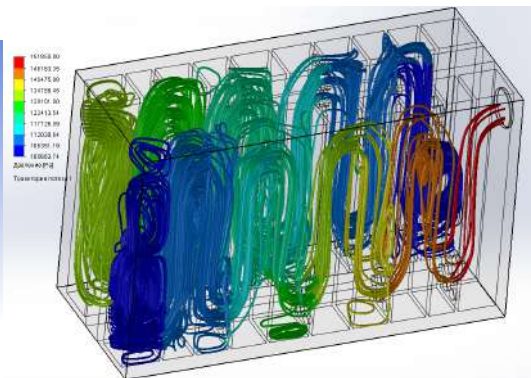
б)

Р и с. 3. Модель с использованием металлических пластин: а) температурное поле (вид в разрезе); б) карта результатов давления

F i g. 3. Model using metal plates: a) temperature field (sectional view); b) map of pressure results



а)



б)

Р и с. 4. Модель с использованием металлических пластин с отверстиями: а) температурное поле (вид в разрезе); б) карта результатов давления

F i g. 4. Model using metal plates with holes: а) temperature field (sectional view); б) map of pressure results

Различные конструкции проточной части определяют газодинамическое сопротивление теплообменника. Для сравнения различных конструкций используются безразмерные критерии Nu / Nu_0 , ξ / ξ_0 , где Nu_0 – критерий Нуссельта, ξ_0 – коэффициент потерь. Для оценки рациональности применения различных конструкций сравнение проводится по отношению $(Nu / Nu_0) / (\xi / \xi_0)$. Критерий Нуссельта является безразмерным коэффициентом теплоотдачи и рассчитывается по формуле:

$$Nu = \alpha \cdot l / \lambda, \quad (9)$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К); l – характерный размер (в нашем случае длина проточной части теплообменника), м.

После проведения расчетов для оптимального выбора конструкций теплообменников термoeлектрического

генератора была составлена сравнительная таблица 2.

Из таблицы 2 можно сделать вывод, что расчетная модель с использованием металлических пластин без отверстий имеет самую высокую температуру нагрева со слабовыраженной завихренностью, траекторией потока движения и наибольшим значением $(Nu / Nu_0) / (\xi / \xi_0)$, то есть модель с использованием пластин наиболее оптимальна [19].

Результаты исследования

После проведения теоретических расчетов и выбора оптимальной конструкции теплообменника на кафедре автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» был собран экспериментальный образец ТЭГ и установка на базе предпускового подогревателя «Теплостар 14ТС-12» (рис. 5).

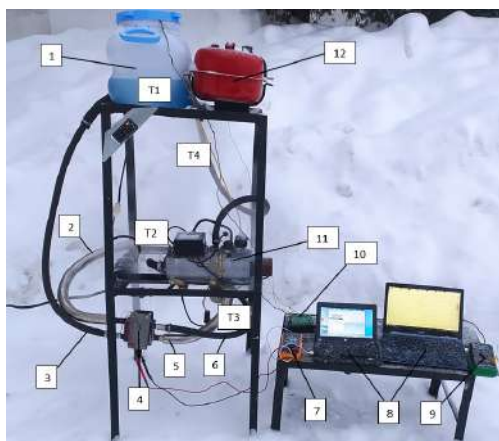
Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

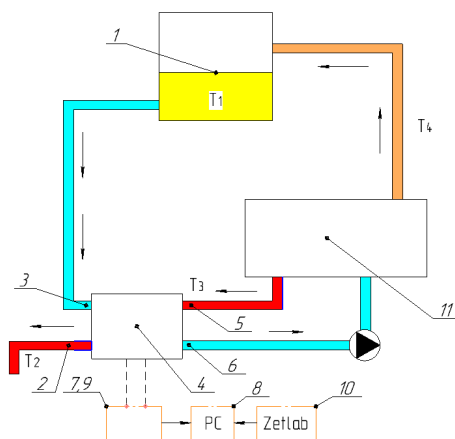
Параметры оценки эффективности конструкций теплообменников
Parameters for evaluating the efficiency of heat exchanger designs

Оцениваемый параметр / Estimated parameter	Модель с использованием медных трубок в форме спирали / Helical copper tube model	Модель с использованием металлических пластин / Model using metal plates	Модель с использованием металлических пластин с отверстиями / Model using metal plates with holes
Термический анализ в ANSYS Thermal Steady State / Thermal analysis in ANSYS Thermal Steady State			
Максимальная температура нагрева теплообменника, °C / Maximum heating temperature of heat exchanger, °C	230	300	250
Газогиродинамический анализ в Solidworks Flow Simulation / Hydrodynamic analysis in Solidworks Flow Simulation			
Максимальное давление, кПа / Maximum pressure, kPa	153	157	151
Завихренность потока / Flow swirl	Отсутствует / Is absent	Слабая / Loose	Высокая / High
Nu / Nu_0	1,52	1,75	1,61
ξ / ξ_0	4,93	2,10	2,00
$(Nu / Nu_0) / (\xi / \xi_0)$	0,31	0,83	0,81

Mechanical engineering



a)



b)

Р и с. 5. Фотография и схема экспериментальной установки: 1 – бак с охлаждающей жидкостью; 2, 5 – выхлопные трубопроводы подогревателя; 3, 6 – трубопроводы охлаждающей жидкости; 4 – термоэлектрический генератор с теплообменниками; 7 – USB-мультиметр; 8 – персональный компьютер; 9 – мультиметр; 10 – АЦП Zetlab 210; 11 – предпусковой подогреватель «Теплостар 14ТС-10-12»; 12 – топливный бак

F i g. 5. Photography and diagram of the experimental installation: 1 – cooling liquid tank; 2, 5 – preheater exhaust pipes; 3, 6 – coolant pipelines; 4 – thermoelectric generator with heat exchangers; 7 – USB multimeter; 8 – personal computer; 9 – multimeter; 10 – Zetlab 210 ADC; 11 – pre-start heater Teplostar 14TS-10-12; 12 – fuel tank

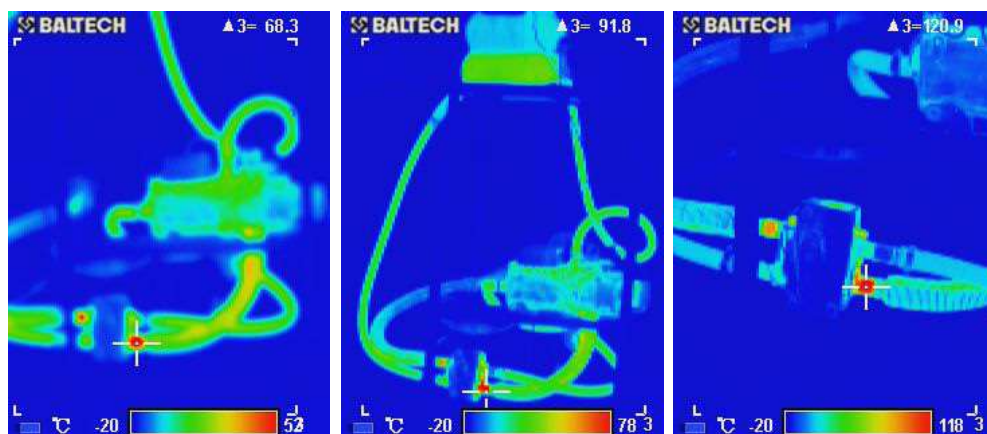
Размещение термпар T1, T2, T3, T4 типа хромель-копель на экспериментальной установке показано на рисунке 5. Термпары измеряют изменение температуры: T1 – охлаждающей жидкости в баке; T2 – выхлопных газов на выходе из теплообменника; T3 – выхлопных газов на входе в теплообменник; T4 – охлаждающей жидкости на выходе из подогревателя.

Данная экспериментальная установка работает следующим образом. После подачи питания на предпусковой подогреватель 11 циркуляционный насос начинает перекачивать охлаждающую жидкость из бака 1 в холодный теплообменник термоэлектрического генератора 4 и далее во внутреннюю полость подогревателя, где жидкость нагревается до температуры 90 °С. Выхлопные газы предпускового подогревателя входят в горячий теплообменник термоэлектрического генератора 4 и выходят из трубопровода 2. ТГМ, установленные между теплообменниками ТЭГ 4,

генерируют электрическую энергию за счет созданной разности температур. Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 10 регистрирует изменение температур в местах установки термпар, мультиметры 7, 9 записывают и сохраняют показания генерируемой электрической энергии ТЭГ 4.

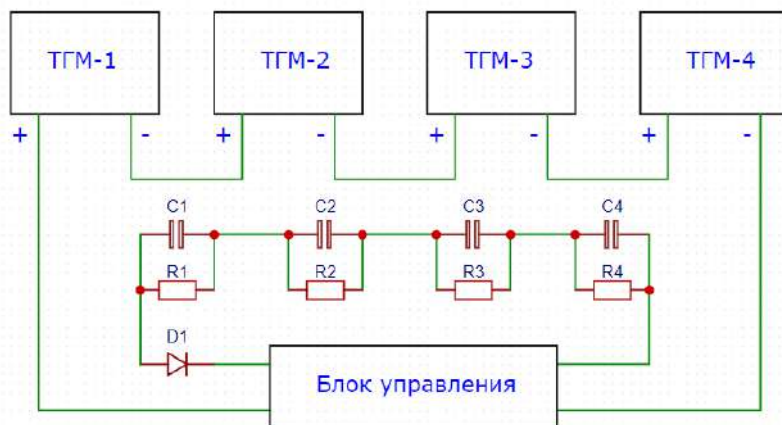
Значение вырабатываемой электроэнергии будет тем выше, чем больше разница температур между холодным и горячим теплообменниками. Контроль температуры теплообменников ТЭГ осуществлялся путем тепловизионных исследований (рис. 6), по результатам которых были сопоставлены температурные и временные режимы.

На рисунке 7 представлена принципиальная схема подключения ТГМ и конденсаторов с балансирующими резисторами. Установлены конденсаторы большой емкости, которые сглаживают падение напряжения в момент уменьшения разности температуры и накапливают заряд в период роста.



Р и с. 6. Фотографии тепловизионного исследования

F i g. 6. Photographs of thermal imaging examination



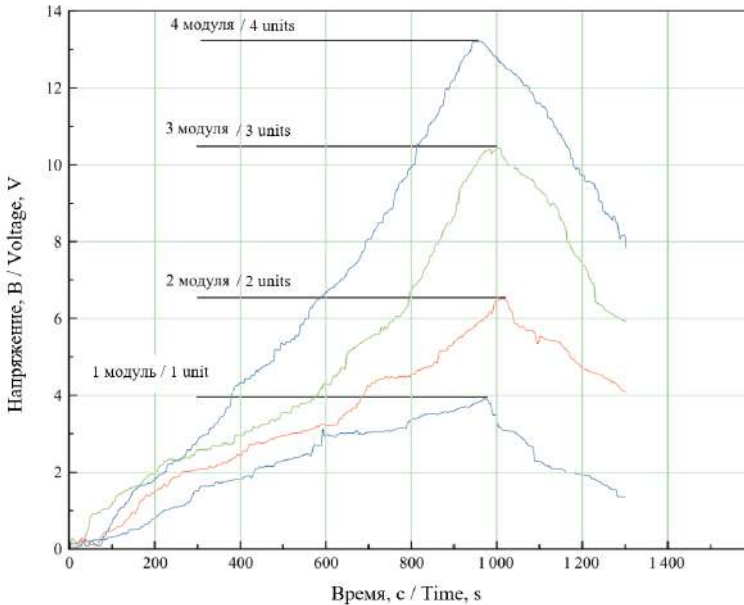
Р и с. 7. Принципиальная схема подключения ТГМ к блоку управления предпусковым подогревателем

F i g. 7. Schematic diagram of TGM connection to the pre-start heater control unit

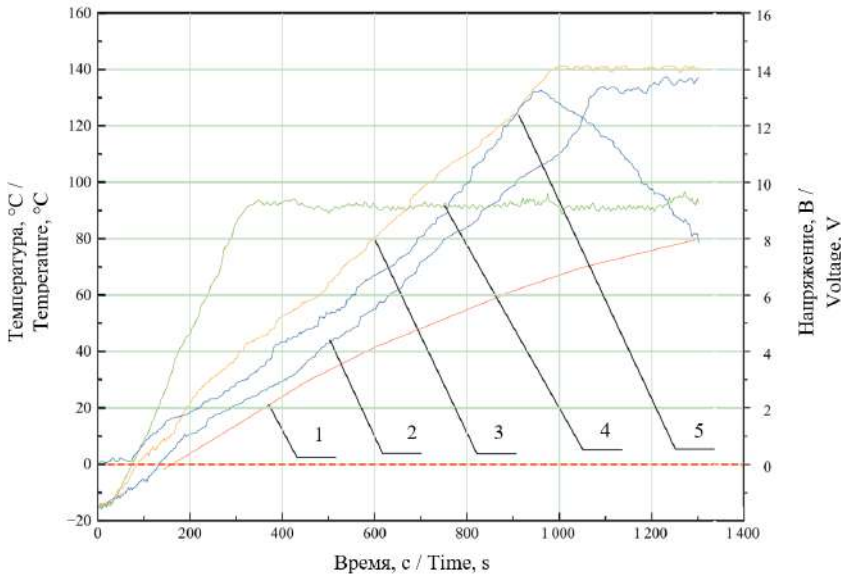
На рисунке 8 представлен график зависимости генерируемого напряжения с разным количеством ТГМ от времени работы предпускового подогревателя. По полученным данным можно сделать вывод, что через 15 минут после запуска при использовании 1 модуля максимальное генерируемое напряжение составляет $U_{\max 1} = 3,8$ В, при использовании 2 модулей – $U_{\max 2} = 6,5$ В, трех модулей – $U_{\max 3} = 10,6$ В, четырех

модулей – $U_{\max 4} = 13,1$ В. Таким образом, для автотранспортных средств с бортовым напряжением 12 В наиболее эффективно использовать ТГМ с 4 модулями.

На рисунке 9 представлены результаты исследований, по которым видно, что интенсивность роста температуры охлаждающей жидкости в баке экспериментальной установки 1 возрастает практически линейно и достигает целевого значения 80 °С за 20 минут.



Р и с. 8. Сравнительный график генерируемого термоэлектрическим генератором напряжения
 F i g. 8. The comparative schedule generated thermoelectric voltage generator



Р и с. 9. Графики зависимости температур в измеряемых точках экспериментальной установки и изменение генерируемого напряжения ТГМ: 1 – температура охлаждающей жидкости в баке установки; 2 – температура выхлопных газов на выходе из теплообменника ТЭГ; 3 – температура выхлопных газов на входе в теплообменник ТЭГ; 4 – температура охлаждающей жидкости на выходном канале предпускового подогревателя; 5 – выходное генерируемое напряжение с 4 модулей ТЭГ

F i g. 9. Graphs of temperature dependence in the measured points of the experimental installation and change of generated voltage of TGM: 1 – temperature of the coolant in the unit tank; 2 – temperature of the exhaust gases at the TEG heat exchanger outlet; 3 – temperature of the exhaust gases at the TEG heat exchanger inlet; 4 – temperature of the coolant at the preheater outlet channel; 5 – output generated voltage from 4 TEG modules

Температура выхлопных газов 2 на выходе из теплообменника термоэлектрического генератора растет равномерно в течении 1 080 секунд, далее температура стабилизируется на отметке 133 °С. Падение температуры выхлопных газов после теплообменника термоэлектрического генератора, в сравнении с показаниями температуры до теплообменника, обусловлено потерями тепловой энергии. Оно направлено на генерирование электрической энергии. Температура выхлопных газов на входе в теплообменник термоэлектрического генератора 3 (на выходе из выпускного трубопровода предпускового подогревателя) растет линейно до температуры 140 °С и стабилизируется. Температура охлаждающей жидкости на выходном канале предпускового подогревателя 4 стремительно растет от -15 до 90 °С и поддерживается до окончания цикла работы подогревателя.

Как видно из графика, генерируемое напряжение ТЭГ после запуска предпускового подогревателя постоянно растет до максимального значения 13,1 В, что соответствует 950 с от начала работы данного подогревателя. Далее происходит снижение вырабатываемого напряжения, обусловленное тем, что температура горячего теплообменника ТЭГ стабилизировалась, а температура холодного теплообменника растет.

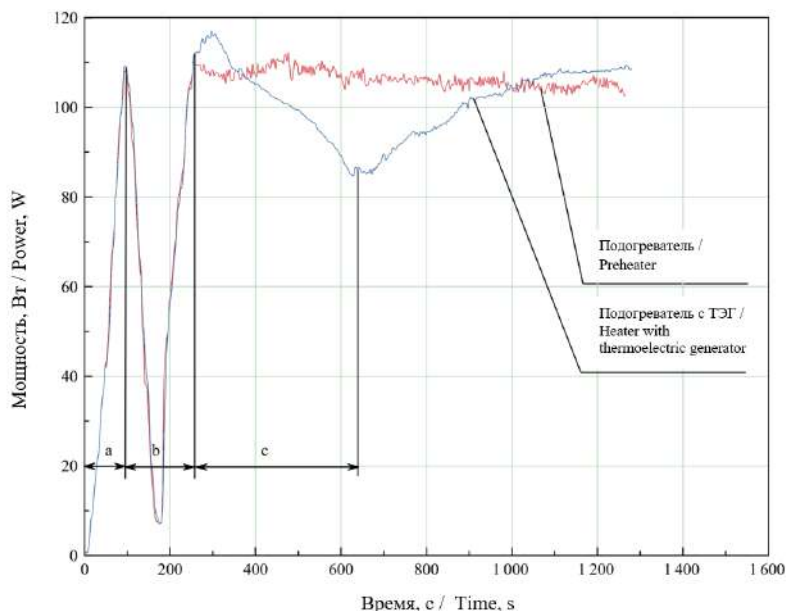
После внедрения ТЭГ в систему электропитания экспериментальной установки был получен график зависимости потребления электрической энергии предпусковым подогревателем от времени его работы без ТЭГ и с ним (рис. 10). Снижение потребления в этой точке обусловлено уменьшением числа оборотов центробежного вентилятора. После запуска подогревателя потребление электроэнергии возрастает и стабилизируется в случае работы штатного

подогревателя без ТЭГ на протяжении всего цикла.

Как видно из графика (рис. 10), при применении подогревателя с ТЭГ происходит снижение потребления электрической энергии автомобильной аккумуляторной кислотной батареи (АКБ). Максимальное снижение потребляемой энергии соответствует диапазону с, что свидетельствует о том, что применение ТЭГ в системе предпускового подогрева ДВС снижает потребление электрической энергии АКБ.

Обсуждение и заключение

Был проведен термический и гидродинамический анализ теплообменников, по результатам которого была определена наиболее эффективная конструкция проточной части теплообменника ТЭГ. Собран ТЭГ с 4 ТГМ, их выходное напряжение составило 13,1 В. Также была сконструирована экспериментальная установка, в результате использования которой получена зависимость влияния температурных режимов работы предпускового подогревателя на выходные показатели термоэлектрического генератора. После установки ТЭГ в систему работы жидкостного предпускового подогревателя удалось снизить энергопотребление на 12 %. Таким образом, определена и экспериментально доказана возможность снижения энергопотребления аккумуляторной батареи путем применения термоэлектрических генераторных модулей. Накопленную энергию можно адаптировать к системе питания самого предпускового подогревателя либо направить на зарядку аккумуляторной батареи или иных потребителей электрооборудования АТС. Такой способ использования термоэлектрического генератора снижает процент разрядки аккумуляторной батареи автомобиля в процессе тепловой подготовки.



Р и с. 10. График зависимости потребления электрической энергии АКБ предпусковым подогревателем от времени его работы: а – потребление электроэнергии подогревателем при продувке камеры сгорания; б – потребление электрической энергии при воспламенении топливоздушнoй смеси; с – диапазон максимального снижения потребляемой энергии

F i g. 10. Diagram of dependence of electric power consumption of the fuel tank by the pre-start heater on the time of its operation: a – power consumption of the heater when blowing out the combustion chamber; b – electrical energy consumption during the ignition of the fuel-air mixture; c – maximum energy consumption reduction range

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Неговора, А. В.** Обоснование конструктивно-режимных параметров предпускового подогревателя / А. В. Неговора, Д. А. Гусев // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 125. – С. 90–96. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27657634> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

2. **Михайловский, В. Я.** Режимы работы автомобилей при пониженных температурах. Необходимость использования нагревателей и рациональность применения термогенераторов для их работы / В. Я. Михайловский, Н. В. Максимук // Термоэлектричество. – 2015. – № 3. – С. 20–30. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ter_2015_3_5 (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

3. **Bell, L. E.** Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems / L. E. Bell. – DOI 10.1126/science.1158899 // Science. – 2008. – Vol. 321, Issue 5895. – Pp. 1457–1461. – URL: <https://science.sciencemag.org/content/321/5895/1457> (дата обращения: 01.03.2021).

4. New Perspectives in Thermoelectric Energy Recovery System Design Optimization / T. J. Hendricks, N. K. Karri, T. P. Hogan, Ch. J. Cauchy. – DOI 10.1007/s11664-012-2406-x // Journal of Electronic Materials. – 2013. – Vol. 42. – Pp. 1725–1736. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-012-2406-x#citeas> (дата обращения: 01.03.2021).

5. **Максимук, М. В.** Проектування автомобільного передпускового джерела тепла з термоелектричним генератором / М. В. Максимук. – DOI 10.20535/1970.54(2).2017.119531 // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: приладобудування. – 2017. – № 54 (2). – С. 53–60. – URL: <http://visnykpb.kpi.ua/article/view/119531> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

6. **Анатычук, Л. И.** Термоэлектрический генератор для бензинового двигателя / Л. И. Анатычук, Р. В. Кузь, Ю. Ю. Розвер // Термоэлектричество. – 2012. – № 2. – С. 97–104. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ter_2012_2_11 (дата обращения: 01.03.2021).
7. **LeBlanc, S.** Thermoelectric Generators: Linking Material Properties and Systems Engineering for Waste Heat Recovery Applications / S. LeBlanc. – DOI 10.1016/j.susmat.2014.11.002 // Sustainable Materials and Technologies. – 2014. – Vol. 1-2. – Pp. 26–35. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993714000062?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).
8. The Influence of Inner Topology of Exhaust Heat Exchanger and Thermoelectric Module Distribution on the Performance of Automotive Thermoelectric Generator / Y. Wang, S. Li, Y. Zhang [et al.]. – DOI 10.1016/j.enconman.2016.08.009 // Energy Conversion and Management. – 2016. – Vol. 126. – Pp. 266–277. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416306811?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).
9. Heat Transfer Enhancement of a Modularised Thermoelectric Power Generator for Passenger Vehicles / B. Li, K. Huang, Y. Yan [et al.]. – DOI 10.1016/j.apenergy.2017.08.092 // Applied Energy. – 2017. – Vol. 205. – Pp. 868–879. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917311121?via%3Dihub> (дата обращения: 01.03.2021).
10. Design of a Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery Application on a Drivable Heavy Duty Vehicle / A. E. Risseh, H.-P. Nee, O. Erlandsson [et al.]. – DOI 10.4271/2017-01-9178 // SAE International Journal of Commercial Vehicles. – 2017. – Vol. 10, Issue 1. – Pp. 26–44. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2017-01-9178/> (дата обращения: 01.03.2021).
11. Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part I: Numerical Modeling and Baseline Model Analysis / S. Kumar, S. D. Heister, X. Xu [et al.]. – DOI 10.1007/s11664-013-2471-9 // Journal of Electronic Materials. – 2013. – Vol. 42. – Pp. 665–674. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11664-013-2471-9#citeas> (дата обращения: 01.03.2021).
12. Efficient Use of Energy Resources of the Generator of Hot Gases in the Thermal Preparation of Motor Vehicles / S. Nigmatullin, I. Gabitov, A. Izmailov [et al.]. – DOI 10.32479/ijeep.8503 // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2020. – Vol. 10, Issue 1. – Pp. 228–235. – URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/8503> (дата обращения: 01.03.2021).
13. Патент № 192532 Российская Федерация, МПК F02N 19/00 (2010.01). Автономная система предпусковой подготовки двигателя с термоэлектрическим генератором : № 2019111818 : заявл. 18.04.2019 : опубл. 23.09.2019 / Габитов И. И., Неговора А. В., Разпов М. М., Самиков Р. Ф. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет». – Текст : электронный. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU192532U1_20190923 (дата обращения: 01.03.2021).
14. Патент № 72304 Украина, МПК F01N 5/00, H01L 35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення : № и 2012 02055 : заявл. 23.02.2012 : опубл. 10.08.2012 / Анаитчук Л. І., Михайловський В. Я. ; Власник Інститут термоелектрики Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України. – 7 с. – URL: <https://uapatents.com/7-72304-avtomobilnij-obigrivach-z-termoelektrichnim-dzherelom-zhivlennya.html> (дата обращения: 01.03.2021).
15. **Шостаковский, П. Г.** Инновационная деятельность компании «Криотерм» в области разработки и производства термоэлектрических приборов и устройств / П. Г. Шостаковский // Инновации. – 2014. – № 2 (184). – С. 137–141. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22671285> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.
16. **Леонтьев, А. И.** Выбор оптимального метода интенсификации теплообмена для повышения эффективности термоэлектрического генератора / А. И. Леонтьев, Д. О. Онищенко, Г. А. Арутюнян // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 5. – С. 779–787. – URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/13e/13e2d1b431080b1dcc8d87186d951529.pdf> (дата обращения: 01.03.2021).
17. Повышение эффективности рабочего процесса поршневого двигателя путем прямого преобразования теплоты выпускных газов в электрическую энергию / А. И. Леонтьев, Р. З. Кавтарадзе, Д. О. Онищенко [и др.]. – DOI 10.7868/S0040364416010051 // Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54, № 1. – С. 99–107. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?doi=10.7868/S0040364416010051> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

18. Теоретические и экспериментальные исследования генератора горячих газов с термоэлектрической насадкой / А. В. Неговора, Ш. Ф. Нигматуллин, М. М. Разяпов, Р. Ф. Самиков // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 57. – С. 123–128. – URL: <https://clck.ru/UnX6h> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

19. Разработка стенда для испытания предпусковых подогревателей силовых агрегатов сельскохозяйственной и строительной техники / Ш. Ф. Нигматуллин, М. М. Разяпов, С. С. Акимов, Р. Ф. Самиков // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2020. – № 2 (54). – С. 100–105. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42982359> (дата обращения: 01.03.2021). – Рез. англ.

Поступила 16.03.2021; одобрена после рецензирования 20.04.2021; принята к публикации 11.05.2021

Об авторах:

Самиков Руслан Фанзилович, аспирант кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3263-3825>, 89173711415@mail.ru

Нигматуллин Шамиль Файзрахманович, доцент кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6689-1481>, shamil.bosch@mail.ru

Разяпов Махмут Магдутович, доцент кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6848-736X>, mahmut_23@mail.ru

Козеев Арсений Александрович, доцент кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2613-0247>, kozeevbsau@mail.ru

Смолянов Алексей Викторович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7852-1146>, alexsmol013@yandex.ru

Галин Дмитрий Александрович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-2685>, tehosmotr.yalga@yandex

Заявленный вклад соавторов:

Р. Ф. Самиков – подготовка текста, анализ литературных данных.

Ш. Ф. Нигматуллин – научное руководство, анализ и доработка текста.

М. М. Разяпов – научное руководство, анализ и доработка текста.

А. А. Козеев – подготовка текста, анализ данных.

А. В. Смолянов – подготовка и анализ литературных данных, редактирование текста.

Д. А. Галин – подготовка и анализ литературных данных, редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Negovora A.V., Gusev D.A. Substantiation of Constructive-Regime Parameters of Preheater. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2016; 125:90-96. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27657634> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Mikhaylovskiy V.Ya., Maksimuk N.V. [Modes of Operation of Vehicles at Low Temperatures. Necessity of Using Heaters and Rationality of Using Thermogenerators for Their Operation]. *Termoelektrichestvo = Thermoelectricity*. 2015; (3):20-30. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ter_2015_3_5 (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Bell L.E. Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems. *Science*. 2008; 321(5895):1457-1461. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1158899>
4. Hendricks T.J., Karri N.K., Hogan T.P., Cauchy Ch.J. New Perspectives in Thermoelectric Energy Recovery System Design Optimization. *Journal of Electronic Materials*. 2013; 42:1725-1736. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-012-2406-x>
5. Maksymuk M.V. Designing of Automotive Pre-Start Heat Sources with Thermoelectric Generator. *Visnik natsionalnogo tekhnichnogo universitetu Ukraini "Kiivskiy politekhnichniy institu". Seriya: priladobuduvannya = Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series: Instrument Engineering*. 2017; (54):53-60. Available at: <http://visnykpb.kpi.ua/article/view/119531> (accessed 01.03.2021). (In Ukr., abstract in Eng.)
6. Anatyshchuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. [Thermoelectric Generator for Gasoline Engine]. *Termoelektrichestvo = Thermoelectricity*. 2012; (2):97-104. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ter_2012_2_11 (accessed 01.03.2021). (In Russ.)
7. LeBlanc S. Thermoelectric Generators: Linking Material Properties and Systems Engineering for Waste Heat Recovery Applications. *Sustainable Materials and Technologies*. 2014; 1-2:26-35. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.11.002>
8. Wang Y., Li S., Zhang Y., et al. The Influence of Inner Topology of Exhaust Heat Exchanger and Thermoelectric Module Distribution on the Performance of Automotive Thermoelectric Generator. *Energy Conversion and Management*. 2016; 126:266-277. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.009>
9. Li B., Huang K., Yan Y., et al. Heat Transfer Enhancement of a Modularised Thermoelectric Power Generator for Passenger Vehicles. *Applied Energy*. 2017; 205:868-879. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.092>
10. Risseh A.E., Nee H.-P., Erlandsson O., et al. Design of a Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery Application on a Drivable Heavy Duty Vehicle. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*. 2017; 10(1):26-44. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/2017-01-9178>
11. Kumar S., Heister S.D., Xu X., et al. Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part I: Numerical Modeling and Baseline Model Analysis. *Journal of Electronic Materials*. 2013; 42:665-674. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-013-2471-9>
12. Nigmatullin S., Gabitov I., Izmailov A., et al. Efficient Use of Energy Resources of the Generator of Hot Gases in the Thermal Preparation of Motor Vehicles. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2020; 10(1):228-235. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.32479/ijeep.8503>
13. Gabitov I.I., Negovora A.V., Razyapov M.M., Samikov R.F. [Stand-Alone Engine Preparation System with Thermoelectric Generator]. Patent 192,532 Russian Federation. 2019 September 23. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU192532U1_20190923 (accessed 01.03.2021). (In Russ.)
14. Anatyshchuk L.I., Mikhaylovskiy V.Ya. Car Heater with a Thermo-Electric Power Source. Patent 72,304 Ukraine. 2012 August 10. Available at: <https://uapatents.com/7-72304-avtomobilnij-obigrivach-z-termoelektrichnim-dzherelom-zhivlennya.html> (accessed 01.03.2021). (In Ukr.)
15. Shostakovskiy P.G. Innovation Activity of the Krioterm Company in Development and Production of Thermoelectric Devices and Equipment. *Innovatsii = Innovations*. 2014; (2):137-141. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22671285> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Leontev A.I., Onishchenko D.O., Arutyunyan G.A. [Selection of the Optimal Method of Heat Exchange Intensification to Increase the Efficiency of Thermoelectric Generator]. *Teplofizika*

i aeromekhanika = Thermophysics and Aeromechanics. 2016; 23(5):779-787. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/13e/13e2d1b431080b1dcc8d87186d951529.pdf> (accessed 01.03.2021). (In Russ.)

17. Leontiev A.I., Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., et al. Improvement of Piston Engine Operation Efficiency by Direct Conversion of the Heat of Exhaust Gases into Electric Energy. *Teplotfizika vysokikh temperatur* = High Temperature. 2016; 54(1):99-107. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364416010051>

18. Negovora A.V., Nigmatullin Sh.F., Razyapov M.M., Samikov R.F. Theoretical and Experimental Studies of a Hot Gas Generator with a Thermoelectric Nozzle. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2019; (57):123-128. Available at: <https://clck.ru/UnX6h> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

19. Nigmatullin Sh.F., Razyapov M.M., Akimov S.S., Samikov R.F. For Testing Pre-Starting Heaters of Power Units of Autotractor and Construction Equipment. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of the Bashkir State Agrarian University. 2020; (2):100-105. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42982359> (accessed 01.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 16.03.2021; approved after reviewing 20.04.2021; accepted for publication 11.05.2021

About the authors:

Ruslan F. Samikov, Postgraduate Student in the Chair of Automobiles and Machine-Tractor Complexes, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3263-3825>, 89173711415@mail.ru

Shamil F. Nigmatullin, Associate Professor of the Chair of Automobiles and Tractor-Specific Machines, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6689-1481>, shamil.bosch@mail.ru

Makhmut M. Razyapov, Associate Professor of the Department of Automobiles and Tractor-Specific Machines, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6848-736X>, mahmut_23@mail.ru

Arseniy A. Kozeev, Associate Professor of the Chair of Automobiles and Tractor-Specific Machines, Bashkir State Agrarian University (34, 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2613-0247>, kozeevbsau@mail.ru

Alexey V. Smolyanov, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7852-1146>, alexsmol013@yandex.ru

Dmitriy A. Galin, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-2685>, tehosmotr.yalga@yandex

Contribution of the authors:

R. F. Samikov – text preparation, analysis of literary data.

Sh. F. Nigmatullin – scientific guidance, analysis and revision of the text.

M. M. Razyapov – scientific guidance, analysis and revision of the text.

A. A. Kozeev – text preparation, data analysis.

A. V. Smolyanov – preparation and analysis of literary data, text editing.

D. A. Galin – preparation and analysis of literary data, text editing.

All authors have read and approved the final manuscript.