

neposredstvennyj // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyanie i perspektivy: materialy 7-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Rubcovsk, 27-28 oktyabrya 2017 g.). – Rubcovsk: Izdvo: Rubcovskij industrial'nyj in-tut, 2017. – S. 454-460.

11. Eremochkin, S. Yu. Povyshenie effektivnosti mobil'nyh mashin v APK na osnove vektorno-algoritmicheskogo upravleniya elek-

trodvigatelem: dissertaciya na soiskanie uche-noj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.20.02 / Eremochkin S. Yu. – Barnaul, 2014. – 151 s. – Tekst: neposredstvennyj.

12. Patent № 165863 RF. Reversivnyj reguliruemyy poluprovodnikovyy mostovoj trekhfaznyj simistornyj vypryamitel' / Perekrest I. M., Stalnaya M. I., Vedmankin A. V.; opubl.10.11.2016. – Tekst: neposredstvennyj.



УДК 53.096

Р.Ф. Самиков, Ш.Ф. Нигматуллин, М.М. Разяпов, К.В. Костарев
R.F. Samikov, S.F. Nigmatullin, M.M. Razyapov, K.V. Kostarev

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЖИДКОСТНОГО ПРЕДПУСКОВОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ

STUDY ON A METHOD FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF A LIQUID PRESTART HEATER

Ключевые слова: *предпусковой подогреватель, термоэлектрический генератор, теплообменник, модуль, температура, напряжение, тепловое поле, теплоноситель, газ, жидкость.*

Объектом проведенного исследования является система работы «жидкостный предпусковой подогреватель – термоэлектрический генератор». Были смоделированы различные конструкции проточной части теплообменника термоэлектрического генератора. С учетом недостатков рассмотренных конструкций была выбрана оптимальная конструкция термоэлектрического генератора. Проведен термический и гидродинамический анализ, по результатам

которого была определена наиболее эффективная конструкция проточной части теплообменника термоэлектрического генератора. Собрана экспериментальная установка, по полученным результатам которой выведена зависимость температурных режимов работы предпускового подогревателя на выходные показатели термоэлектрического генератора. Таким образом, определена и экспериментально доказана возможность снижения энергопотребления аккумуляторной батареи путем применения термоэлектрических генераторных модулей, адаптированных к системе энергоснабжения жидкостного предпускового подогревателя.

Keywords: *prestart heater, thermoelectric generator, heat exchanger, module, temperature, voltage, thermal field, heat carrier, gas, liquid.*

In this article, the object of the study is the system of operation "liquid prestart heater - thermoelectric generator." Various designs of the flow section of the thermoelectric generator heat exchanger were modeled; taking into account the disadvantages of the considered designs, the optimal design of the thermoelectric generator was chosen. A thermal and hydrodynamic analysis was carried out, based on the results of which the most effective

design of the flow section of the heat exchanger of the thermoelectric generator was determined. An experimental sample of the thermoelectric generator was assembled, according to the results obtained, the dependence of the temperature modes of the prestart heater on the output parameters of the thermoelectric generator was derived. Thus, the possibility of reducing the energy consumption of the battery by using thermoelectric generator modules adapted to the power supply system of the liquid prestart heater is determined and experimentally proved.

Самиков Руслан Фанзилович, аспирант, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: ruslan.samikov@mail.ru.

Нигматуллин Шамиль Файзрахманович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: shamil.bosch@mail.ru.

Разяпов Махмут Магдатович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, e-mail: mahmutq@mail.ru.

Костарев Константин Васильевич, к.т.н., ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: tia_bgau@mail.ru.

Samikov Ruslan Fanzilovich, post-graduate student, Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, e-mail: ruslan.samikov@mail.ru.

Nigmatullin SHamil Fajzrahmanovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, e-mail: shamil.bosch@mail.ru.

Razyapov Mahmut Magdutovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, e-mail: mahmutq@mail.ru.

Kostarev Konstantin Vasilyevich, Cand. Tech. Sci., Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, e-mail: tia_bgau@mail.ru.

Введение

На сегодняшний день запуск двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при пониженных температурах окружающей среды остается актуальной проблемой для всех без исключения видов транспортных средств. Прежде всего это связано с отрицательным влиянием низких температур на ресурс работы ДВС. Вследствие быстрого нагревания «холодного» двигателя в нем возникают температурные напряжения, которые вместе с механическими нагрузками приводят к быстрому износу деталей и сокращению срока их эксплуатации [1].

Предпусковой подогрев в автономном режиме является одним из наиболее популярных и наиболее эффективных индивидуальных методов тепловой подготовки двигателя внутреннего сгорания при температурах ниже 8°C. Такие нагреватели подходят практически для всех типов двигателей внутреннего сгорания, поэтому применяются как в легковых и грузовых автомобилях, так и в автобусах, самолетах, яхтах и катерах.

Несмотря на ряд положительных свойств автомобильные нагреватели не используются массово, в частности на легковых автомобилях и микроавтобусах [2]. Главной причиной этого является необходимость в электрической энергии для питания компонентов предпусковых нагревателей: топливного насоса низкого давления, центробежного вентилятора и импульсного насоса для подачи теплоносителя в полость теплообменника подогревателя. Исследования показали, что при работе жидкостного нагревателя тепловой мощностью 4 кВт и потребляемой электрической мощностью 37-40 Вт, а со штатным вентилятором системы отопления автомобиля до 60 Вт аккумулятор емкостью 60 А·час за 4,5 ч теряет 50% емкости. Следует учесть и тот факт, что в условиях пониженных температур емкость автомобильного аккумулятора дополнительно снижается еще на 15-20% [3]. Становится актуальным вопрос снижения потребляемой электроэнергии предпускового подогревателя, без снятия потребительских качеств.

Цель и задачи исследования: изучить влияние работы термоэлектрического генератора на выходные показатели жидкостного предпускового подогревателя, а также инженерный расчет и выбор оптимальной конструкции проточной части теплообменника термоэлектрического генератора (ТЭГ).

Условия и методы исследования

При проектировании конструкций теплообменника термоэлектрического генератора необходимо добиться максимальной разницы температур, при температуре холодного теплообменника термоэлектрических генераторных модулей (ТГМ) $T_c = 30^\circ\text{C}$ и горячей $T_h = 200^\circ\text{C}$ выходная мощность с одного модуля в нашем случае Kryotherm ТГМ-199-1,4-0,8 составляет 11,4 Вт [4].

Перед сборкой конструкций теплообменников ТЭГ необходимо произвести гидродинамические расчеты движения потоков выхлопных газов предпускового подогревателя и теплоносителя системы охлаждения двигателя, также необходимо проанализировать температурное поле распределения тепла на поверхности теплообменника термоэлектрического генератора.

При моделировании объектов термоэлектрического генератора были созданы следующие модели теплообменника (рис. 1-3).

Модель, представленная на рисунке 1, состоит из ТГМ 2, с двух противоположно расположенных сторон которых находятся пластины 3, к которым плотно прижат трубчатый теплообменник 1, имеющий спиралевидную форму. Следующая модель состоит из ТГМ 3 и тепло-

обменников 2, выполненных в виде коробов прямоугольного сечения, во внутренней части которых расположена пластина 1. Каждая пластина находится на определенном расстоянии друг от друга, при движении потоков создают лабиринт внутри теплообменника. Последняя расчетная модель состоит из ТГМ 3, теплообменников 2, пластин со сквозными отверстиями 1. В отличие от вышерассмотренной модели пластины 1 имеют сквозные отверстия, создающие завихренность движению потока.

Для теплового расчета поставленной задачи был выбран пакет ANSYS Thermal Steady State, реализующий метод конечных элементов, применение которого позволяет с малой погрешностью рассчитать тепловое поле нагрева поверхности теплообменника.

В качестве граничных условий заданы следующие параметры:

- давление выхлопных газов предпускового подогревателя 150 кПа;
- температура выхлопных газов 420°C ;
- давление циркуляционного насоса 130 кПа;
- начальная температура теплоносителя -15°C ;
- для проведения расчета газодинамики проточной области модели используется твердотельная модель;
- составные компоненты газовой среды не вступают в химическое взаимодействие между собой;
- данная задача стационарная, отсутствуют подвижные элементы, геометрия модели неизменная.

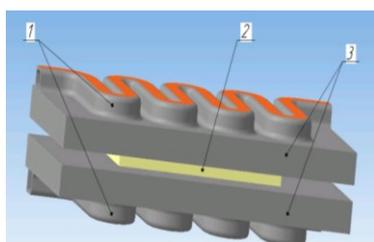


Рис. 1. Модель с использованием медных трубок в форме спирали

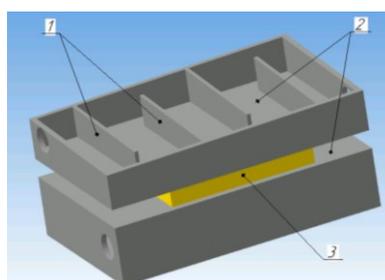


Рис. 2. Модель с использованием металлических пластин, создающих лабиринт движения

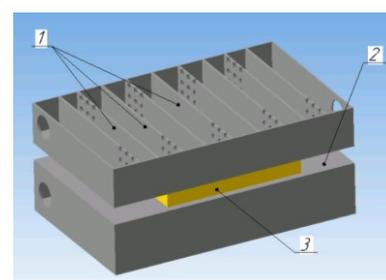


Рис. 3. Модель с использованием металлических пластин с отверстиями

Для определения распределения поля давления во внутренней полости теплообменника, в качестве программного модуля для проведения гидродинамического расчета была выбрана САЕ система Solidworks Flow Simulation.

Теплообмен и движение отработавшего газа в проточной области теплообменника описываются уравнением Навье-Стокса. Данное уравнение включает в себя уравнение сохранения количества энергии и уравнение неразрывности [5]. При решении поставленной задачи в программе применяется осреднение по Фавру. В нашем случае рассматривается стационарное течение отработавших газов предпускового подогревателя. При описывании турбулентного течения во внутренней части теплообменника ТЭГ модифицированная $k-\varepsilon$ модель, в которой для замыкания системы уравнений Навье-Стокса используются два дополнительных уравнения для переноса кинетической энергии турбулентности и переноса диссипации турбулентности [6]:

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

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

где k – кинетическая энергия турбулентности, Дж/кг;

ε – диссипация энергий турбулентности, Дж/(кг·с);

$P_B = -g_i \partial \rho / (\sigma_B \rho \partial x_i)$ – коэффициент, отвечающий за генерацию турбулентности;

$C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_B, C_B$ – константы.

Предварительные расчеты показали, что при обеспечении достаточного расхода температура охлаждающей жидкости, протекающей через теплообменники, незначительно изменяется по

длине термоэлектрического генератора, т.к. в первую очередь рассматривается течение отработавших газов. Для сокращения времени расчета и требуемых вычислительных ресурсов течение охлаждающей жидкости не моделируется, а в качестве граничного условия используется температура на холодной стороне термоэлектрического генератора.

По карте распределения давления видно, что есть локальные участки падения и повышения давления, движение потоков газа и жидкости имеет завихренности внутри полости теплообменника. Максимальное давление при подаче горячего газа составляет 157 кПа, минимальное – 110 кПа.

Внедрение термоэлектрического генератора в систему работы жидкостного предпускового подогревателя влечет за собой увеличение газодинамического сопротивления. Для оценки влияния конструкции ТЭГ используются безразмерные критерии $Nu/Nu_0, \xi/\xi_0$, где Nu_0 – критерий Нуссельта, ξ_0 – коэффициент потерь. Для оценки рациональности применения конструкций сравнение проводится по отношению $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$. Критерий Нуссельта является безразмерным коэффициентом теплоотдачи и рассчитывается по формуле $u = \alpha \cdot l/\lambda$, где λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К), l – характерный размер, м. В качестве характерного размера используется длина проточной части горячего теплообменника [7, 8].

После проведения расчетов теплообменника термоэлектрического генератора была составлена сравнительная таблица, из которой следует, что наиболее оптимальна расчетная модель с использованием металлических пластин, которая имеет самую высокую температуру нагрева со слабовыраженной завихренностью траекторией потока движения и наибольшим значением $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$.

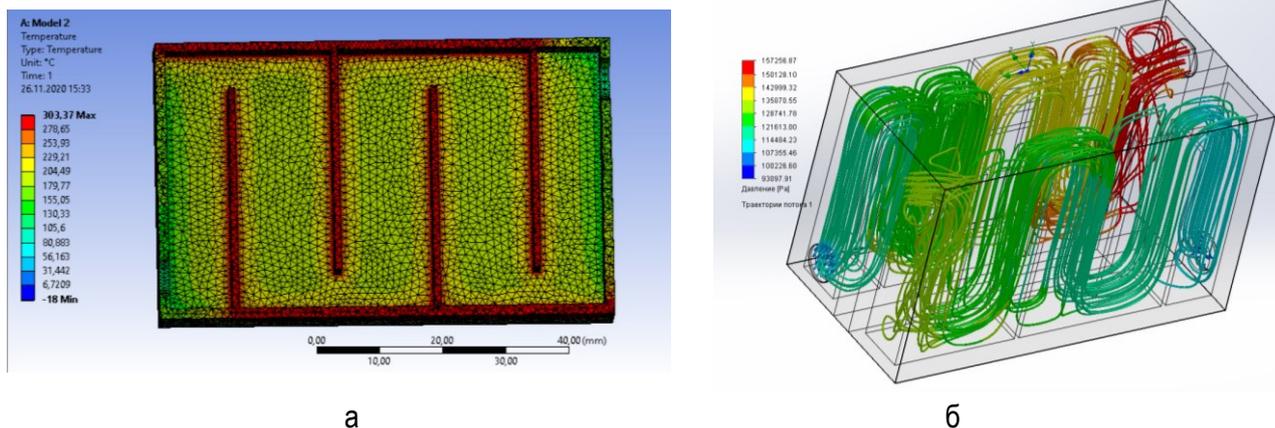


Рис. 4. Модель с использованием металлических пластин:
а – температурное поле; б – карта результатов давления

Таблица

Результаты расчетов теплообменника ТЭГ

Максимальная температура нагрева, °С	Максимальное давление, кПа	Завихренность потока	Nu/Nu_0	ξ/ξ_0	$(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$
Модель с использованием металлических пластин					
300	157	Слабая	1,75	2,10	0,83
Модель с использованием медных трубок в форме спирали					
230	153	Нет	1,52	4,93	0,31
Модель с использованием металлических пластин с отверстиями					
250	151	Высокая	1,61	2,0	0,81

Экспериментальная часть

После проведения теоретических расчетов и выбора оптимальной конструкции теплообменника были собраны экспериментальный образец и установка, которые показаны на рисунке 5.

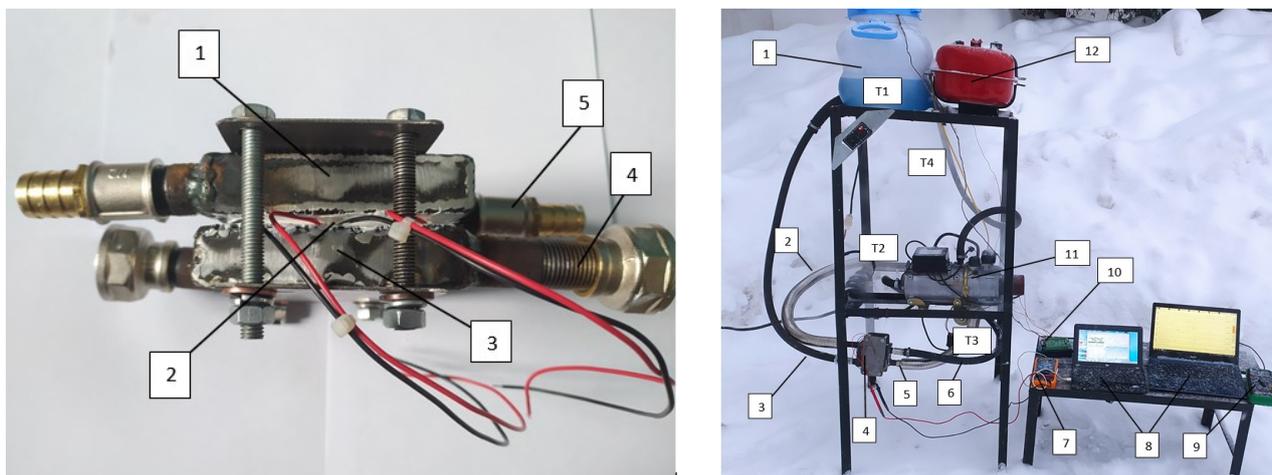
Размещение термодпар на экспериментальной установке показано на рисунке 5б, где: T1 – температура охлаждающей жидкости в баке; T2 – температура выхлопных газов на выходе с теплообменника; T3 – температура выхлопных газов на входе с теплообменника; T4 – температура выхлопных газов на выходе с подогревателя.

Данная экспериментальная установка работает следующим образом: после подачи питания на предпусковой подогреватель 10 циркуляционный насос начинает перекачивать охлаждающую жидкость с бака 1 в холодный теплообменник термоэлектрического генератора 4 во внутреннюю полость подогревателя, где жидкость нагревается до температуры 90°С. Выхлопные газы подогревателя входят в горячий теплообменник термоэлектрического генератора 2 и выходят с трубы 5. Термоэлектрические генера-

торные модули, установленные между теплообменниками 4, благодаря созданной разности температур генерируют электрическую энергию. Аналогово-цифровой преобразователь 10 регистрирует изменение температуры в ключевых местах экспериментальной установки, мультиметры 9, 7 записывают и сохраняют показания генерируемой электрической энергии с термоэлектрического генератора 4.

Результаты исследований и их обсуждение

По сравнительному графику можно сделать вывод о том, что при использовании 1 модуля максимальное генерируемое напряжение составляет $U_{max1} = 3,8$ В, при 2 модулях $U_{max2} = 6,5$ В, при 3 модулях $U_{max3} = 10,6$ В, при 4 модулях $U_{max4} = 13,1$ В. По полученным данным можно сделать вывод о том, что применение 4 модулей в составе термоэлектрического генератора наиболее эффективно, полученную энергию лучше всего накапливать в конденсаторах большой емкости, далее накопленную энергию можно направить на зарядку аккумулятора либо на питание компонентов подогревателя.



а

б

Рис. 5. Экспериментальный образец и установка:

а – собранный образец: 1 – холодный теплообменник, 2 – термоэлектрические генераторные модули, 3 – горячий теплообменник, 4 – входной канал подвода выхлопных газов, 5 – канал подвода охлаждающей жидкости; **б** – экспериментальная установка: 1 – бак с охлаждающей жидкостью, 2, 5 – выхлопная труба подогревателя, 3, 6 – шланг подвода охлаждающей жидкости к теплообменнику, 4 – термоэлектрический генератор, 7 – USB мультиметр, 8 – ПК, 9 – мультиметр, 10 – АЦП Zetlab 210, 11 – предпусковой подогреватель, 12 – топливный бак

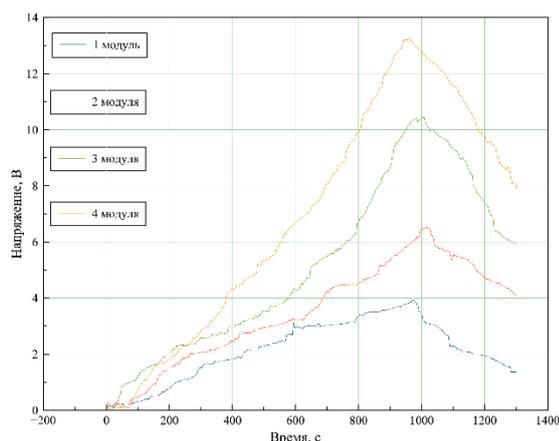


Рис. 6. Сравнительный график генерируемого напряжения от количества модулей

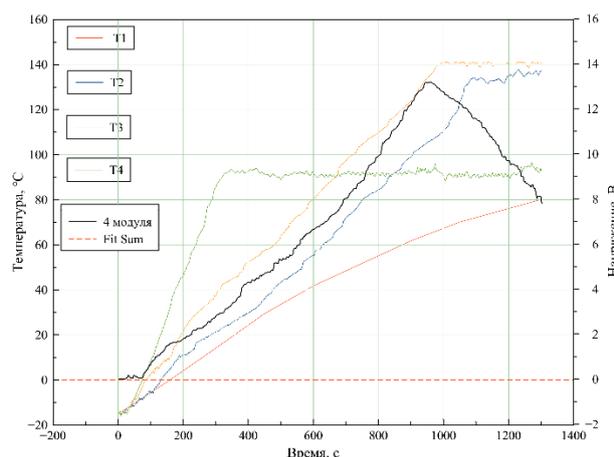


Рис. 7. Общий график температур, снимаемых с экспериментальной установки

После завершения работы предпускового подогревателя накопленную электрическую энергию можно направить на зарядку аккумуляторной батареи автомобиля через повышающие преобразователи, которые подключены к конденсаторам большой ёмкости.

Заключение

Был проведен термический и гидродинамический анализ, по результатам которого определена наиболее эффективная конструкция проточной части теплообменника термоэлектрического

ского генератора. Испытан экспериментальный образец термоэлектрического генератора. Также была собрана экспериментальная установка, по результатам которой выведена зависимость температурных режимов работы предпускового подогревателя на выходные показатели термоэлектрического генератора. Таким образом, определена и экспериментально доказана возможность снижения энергопотребления аккумуляторной батареи путем применения термоэлектрических генераторных модулей, адаптированных к системе энергоснабжения жидкостного

предпускового подогревателя. Такой способ использования термоэлектрического генератора снижает процент разрядки аккумуляторной батареи автомобиля в процессе тепловой подготовки автомобилей.

Библиографический список

1. Самиков, Р. Ф. Современная концепция тепловой подготовки автотракторной техники при эксплуатации в условиях низких температур / Р. Ф. Самиков, М. М. Разяпов. – Текст: непосредственный // Научно-техническое обеспечение АПК Сибири: материалы Международной научно-технической конференции. – 2019. – С. 238-241.

2. Efficient use of energy resources of the generator of hot gases in the thermal preparation of motor vehicles / R. Samikov, S. Nigmatullin, I. Gabitov et al. // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2020. – Т. 10, № 1. – С. 228-235.

3. Гусев, Д. А. Совершенствование метода и средства тепловой подготовки автотракторной техники к приёму нагрузки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: защищена 28.09.17: утв. 15.07.02 / Гусев Д. А. – Москва, 2017. – 115 с. – Текст: непосредственный.

4. Термоэлектрические модули и устройства на их основе: справочное пособие. – Санкт-Петербург: ИПФ «Криотерм», 2004. – 53 с. – Текст: непосредственный.

5. Коновалов, В. И. Исследование процесса теплообмена в оребренном трубчатом рекуператоре / В. И. Коновалов, Е. В. Романова, А. Н. Колиух. – Текст: непосредственный // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 876-880.

6. Bremhorst, K. A modified form of the $k-\epsilon$ model for predicting wall turbulence / K. Bremhorst, C. Lam // J. of Fluids Engng. – 1981. – Vol. 103, № 3. – P. 456-460.

7. 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. // SAE International Journal of Commercial Vehicles. – 2017. – 10 (1). – P. 26-44.

References

1. Samikov, R. F. Sovremennaya koncepciya teplovoj podgotovki avtotraktornoj tekhniki pri ekspluatatsii v usloviyah nizkih temperatur / R. F. Samikov, M. M. Razyapov. – Tekst: neposredstvennyj // Nauchno-tekhnicheskoe obespechenie APK Sibiri: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. – 2019. – S. 238-241.

2. Efficient use of energy resources of the generator of hot gases in the thermal preparation of motor vehicles / R. Samikov, S. Nigmatullin, I. Gabitov et al. // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2020. – Т. 10, № 1. – S. 228-235.

3. Gusev, D. A. Sovershenstvovanie metoda i sredstva teplovoj podgotovki avtotraktornoj tekhniki k priyomu nagruzki: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: zashchishchena 28.09.17: utv. 15.07.02 / Gusev D. A. – Moskva, 2017. – 115 s. – Tekst: neposredstvennyj.

4. Termoelektricheskie moduli i ustrojstva na ih osnove: spravochnoe posobie. – Sankt-Peterburg: IPF «Krioterm», 2004. – 53 s. – Tekst: neposredstvennyj.

5. Konovalov, V. I. Issledovanie processa teploobmena v orebrennom trubchatom rekuperatore / V. I. Konovalov, E. V. Romanova, A. N. Koliuh. – Tekst: neposredstvennyj // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2012. – Т. 18, № 4. – S. 876-880.

6. Bremhorst, K. A modified form of the $k-\epsilon$ model for predicting wall turbulence / K. Bremhorst, C. Lam // J. of Fluids Engng. – 1981. – Vol. 103, № 3. – P. 456-460.

7. 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. // SAE International Journal of Commercial Vehicles. – 2017. – 10 (1). – P. 26-44.

