

Дмитриченко М.Ф. доктор техн. наук

Гутаревич Ю.Ф. доктор техн. наук

Трифонов Д.М. канд. техн. наук

Сирота О.В. канд. техн. наук

Шуба Е.В. канд. техн. наук

Национальный транспортный университет
ул. Г. Емельяновича-Павленко, 1, г. Киев, 01010, Украина,
e-mail: kafedradvzntu@gmail.com

**О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ГЕНЕРАТОРОВ В СИСТЕМЕ ПУСКА ХОЛОДНОГО
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С
ТЕПЛОВЫМ АККУМУЛЯТОРОМ**

По результатам анализа энергетических возможностей системы пуска двигателя внутреннего сгорания в условиях низких температур окружающего воздуха установлено, что значительное влияние на этот процесс оказывает температура электролита аккумуляторной батареи. Предложено использование термоэлектрической системы, которая позволяет утилизировать тепловую энергию отработанных газов, аккумулируемую в тепловом аккумуляторе, при помощи термоэлектрического генератора и для обеспечения питания инфракрасного нагревательного элемента для поддержания теплового состояния аккумуляторной батареи во время содержания автомобиля в условиях низких температур. Приведены описание предложенной системы, принцип ее функционирования и результаты исследований. Библ. 15, рис. 4.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, тепловой аккумулятор фазового перехода.

Введение

Обеспечение эффективной эксплуатации автомобиля, в соответствии с современными требованиями, предъявляемыми к его топливной экономичности и экологической безопасности, невозможно без учета условий эксплуатации. Значительное влияние на топливную экономичность и экологическую безопасность автомобиля оказывают природно-климатические факторы, при воздействии которых происходит эксплуатация транспортного средства. В условиях низких температур окружающего воздуха основной проблемой является обеспечение надежного и безаварийного пуска холодного двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Экономия топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) может быть осуществлена благодаря утилизации части вторичных энергетических ресурсов, возникающих в значительных объемах во время работы ДВС. Потенциал энергосбережения, обеспечиваемый использованием вторичных энергетических ресурсов, достаточно велик и может составлять до 40 % от затраты первичных ТЭР.

Многие исследователи признают, что рекуперация части тепловой энергии отработанных газов (ОГ) двигателя является одной из наиболее эффективных мер, позволяющих снизить

общую удельную затрату топлива, обеспечивая при этом увеличение общей мощности энергетической установки и уменьшение отрицательного влияния транспортного средства на окружающую среду [1-7]. Утилизация тепловой энергии ОГ с помощью термоэлектрических генераторов (ТЭГ) обеспечивает генерирование электрической энергии.

Последние технологические достижения сделали системы рекуперации вторичных энергетических ресурсов экономически эффективными, а усиление экологических и топливно-экономических требований к транспортным средствам и позарез необходимыми.

Поэтому повышение энергоэффективности энергетической установки транспортного средства, прежде всего за счет уменьшения потерь вторичных энергетических ресурсов, является актуальной задачей и одним из приоритетных направлений научных исследований в этой области.

Целью данного исследования являются определение возможности и эффективности применения термоэлектрической системы, которая позволит поддерживать оптимальное тепловое состояние стартерной аккумуляторной батареи во время содержания автомобиля в условиях низких температур окружающего воздуха, обеспечивая улучшение условий холодного пуска ДВС. Источником тепла в предложенной системе есть тепловой аккумулятор фазового перехода (ТАФП), обеспечивающий генерирование электрической энергии термоэлектрическим генератором после завершения функционирования ДВС.

Анализ предыдущих исследований

Вследствие ухудшения работы стартерной аккумуляторной батареи при снижении температуры окружающего воздуха существенно снижается электростартерная способность системы пуска ДВС. При снижении температуры сила разрядного тока и внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи резко возрастают. В среднем, при снижении температуры электролита на 1°C емкость аккумуляторной батареи уменьшается на 1,0...1,5 %. При температурах электролита ниже минус 30°C батарея практически не принимает заряда и функционирует фактически разряженной до 50...60 % номинальной емкости [8-10].

По данным Научно-исследовательского института аккумуляторов при температуре 0 °C коэффициент отдачи аккумуляторной батареи по току равняется 90 %, а при минус 40°C – только 20%. То есть, аккумулятор становится практически неработоспособным при температуре минус 30...35°C [11].

Большое влияние на внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи оказывает температура и плотность электролита. Минимальное сопротивление электролит имеет при температуре плюс 15 °C и плотности 1,225 г/см³. Со снижением температуры электролита от плюс 30 °C до минус 40 °C его удельное сопротивление возрастает в 6 – 8 раз [12-14].

Таким образом, понижение температуры электролита приводит к уменьшению напряжения на клеммах аккумуляторной батареи, что приводит к снижению мощности стартера в процессе пуска холодного двигателя. Ведь для обеспечения эффективного функционирования стартерной аккумуляторной батареи нужно поддерживать ее оптимальную температуру. Для этого довольно широко применяют подогрев электролита аккумуляторной батареи электронагревателями, встроенными в моноблок, или размещенными в теплоизоляционных контейнерах для аккумуляторной батареи с питанием от внешней электрической сети или генератора автомобиля при работе двигателя. Однако недостатком этого метода является необходимость дополнительного использования энергетических

ресурсов, невозможность применения внешней электрической сети при содержании автомобилей на открытых площадках и то, что поддержание оптимальной температуры аккумуляторной батареи возможно лишь во время функционирования ДВС.

Преодолеть эти недостатки можно, если источник теплоты использует тепловую энергию отработанных газов, аккумулированную в ТАФП, что обеспечивает возможность генерации электрической энергии ТЭГ как во время работы ДВС, так и по завершении его работы.

Результаты экспериментальных исследований

Согласно избранной схеме утилизации тепловой энергии ОГ тепловая модель термоэлектрической системы имеет вид, изображенный на рис. 1. Во время функционирования ДВС часть тепловой энергии от ОГ передается к ТАФП, в котором тепловая энергия аккумулируется. При содержании автомобиля в условиях низких температур окружающего воздуха после завершения функционирования ДВС часть тепловой энергии, аккумулированной в ТАФП, передается к “горячим” спаям ТЭГ и далее от “холодных” спаев ТЭГ в окружающий воздух.



Рис. 1 – Схема потоков тепловой энергии в предложенной термоэлектрической системе утилизации тепловой энергии ОГ с тепловым аккумулятором фазового перехода.

Предложенная термоэлектрическая система (рис. 2) состоит из ТАФП 1, слоя термостойкого компаунда 2, термоэлектрического генератора, который содержит последовательно соединенные элементарные термопары 3, терморегулятора 4 и инфракрасного нагревательного элемента 5.

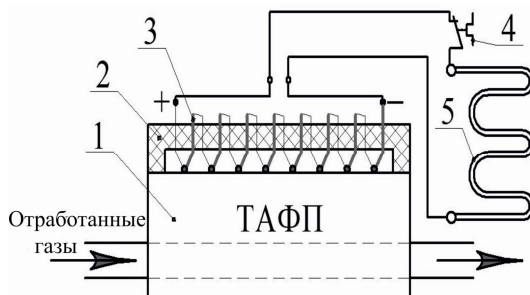


Рис. 2 – Термоэлектрическая система утилизации тепловой энергии ВГ с тепловым аккумулятором фазового перехода:
1 – тепловой аккумулятор фазового перехода,
2 – слой термостойкого компаунда,
3 – термоэлектрический генератор, 4 – терморегулятор,
5 – инфракрасный нагревательный элемент.

Принцип функционирования предложенной системы состоит в следующем. Во время работы двигателя внутреннего сгорания поток отработанных газов проходит по пучкам трубок сквозь ТАФП 1, отдавая часть тепловой энергии теплоаккумулирующему материалу (ТАМ). В течение хранения автомобиля в условиях низких температур окружающего воздуха термоэлектрический генератор 3 превращает часть тепловой энергии аккумулированной в ТАФП, в электрическую. Полученная электрическая энергия питает инфракрасный нагревательный пленочный элемент 5. Терморегулятор 4 обеспечивает поддержание оптимальной температуры аккумуляторной батареи, что создает условия, необходимые для улучшения холодного пуска ДВЗ.

Изготовленный на кафедре двигателей и теплотехники Национального транспортного университета при участии работников Института газа НАН Украины ТАФП (рис. 3) представляет собой теплообменный аппарат кожухотрубчатого типа с коробчатым кожухом, состоящим из корпуса со слоем тепловой изоляции, двух газовых трубных пучков (теплообменников), смонтированных на трубных досках, между которыми находится фазопереходный ТАМ. Теплоаккумулирующим материалом является октогидрат гидроксида бария $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$, температура плавления которого составляет 351,2 К [15].

Термоэлектрический генератор (рис. 3 а) состоит из термоэлектрических преобразователей типа ТХК (хромель-копелевых термопар), соединенных последовательно.

Инфракрасный нагревательный элемент изготовлен из алюминий-магниевого сплава защищенного полиметаллами. Этот сплав сочетает в себе высокую прочность и коррозионную стойкость, нагревательный элемент с температурой на поверхности +60...65 °С, имеет высокую надежность и эффективность.

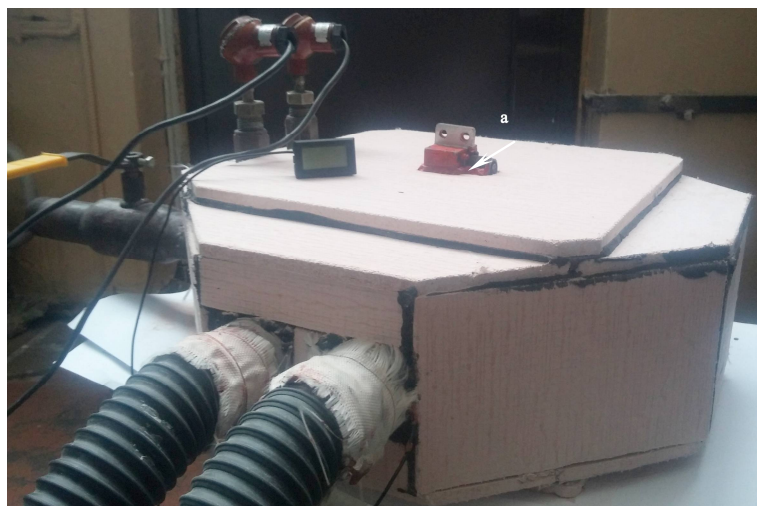


Рис. 3. Тепловой аккумулятор фазового перехода с термоэлектрическим генератором (а)

Во время проведения экспериментальных исследований средняя температура окружающего воздуха составляла около 1.5 °С, температура поверхности ТАФП под слоем тепловой изоляции в месте контакта с “горячими” спаями ТЭГ составляла 116 °С.

При естественном охлаждении время разрядки ТАФП в интервале температур от 116 °С до 65 °С составило 320 минут, при этом средняя скорость снижения температуры ТАФП составляла порядка 0.16 °С/мин. Потери тепловой энергии в окружающий воздух при ее

хранении в тепловом аккумуляторе в процессе безгаражного содержания автомобиля зависит от качества тепловой изоляции ТАФП (рис. 4).

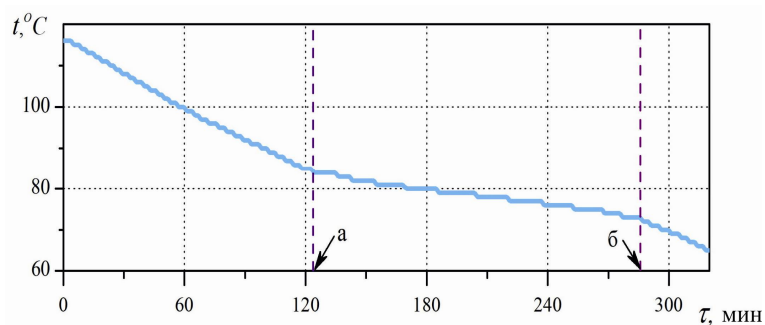


Рис. 4 – Изменение температуры поверхности ТАФП под пластом тепловой изоляции в месте контакта с “горячими” спаями ТЭГ при естественном охлаждении (а – начало, б – конец кристаллизации ТАМ).

Замедление снижения температуры поверхности ТАФП под слоем тепловой изоляции в месте контакта с “горячими” спаями ТЭГ наблюдается с 124 по 286 мин. (рис. 4). Данное замедление можно объяснить периодом кристаллизации ТАМ. Продолжительность периода кристаллизации ТАМ составляет около 160 мин. Температура поверхности ТАФП в месте контакта с “горячими” спаями ТЭГ относительно стабилизировалась в интервале температур +84...73 °С, средняя температура составляла 78.5 °С, при этом скорость снижения температуры составляла около 0,07 °С/мин.

Таким образом, исследование теплового аккумулятора фазового перехода показало, что тепловой аккумулятор размещенный в подкапотном пространстве способен обеспечить различие температур между “горячими” и “холодными” спаями ТЭГ в пределах 70...80°С практически постоянной на протяжении почти 320 мин.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что при применении в ТЕГА пятнадцати термопар соединенных последовательно за различия температур между “горячими” и “холодными” спаями близко 75 °С термоэлектродвижущая сила (термоЕРС) достигала 45 мВ.

В дальнейшем запланировано проведение расчетных и экспериментальных исследований с целью определения количества пар термоэлектрических элементов в ТЭГ для обеспечения необходимого напряжения питания инфракрасного нагревательного элемента, энергетических характеристик ТЭГ, определение зависимости термоэлектродвижущей силы ТЭГ от разности температур между “горячими” и “холодными” спаями ТЭГ, исследование физической модели предложенной термоэлектрической системы с тепловым аккумулятором фазового перехода в процессе ее функционирования.

Выводы

1. Испытания предложенной термоэлектрической системы показали, что она позволяет утилизировать аккумулированную в ТАФП тепловую энергию отработанных газов ДВС при помощи термоэлектрического генератора для питания инфракрасного нагревательного элемента с целью поддержания теплового состояния стартерной аккумуляторной батареи во время содержания автомобиля в условиях низких температур окружающего воздуха. При

разности температур между “горячими” и “холодными” спаями ТЭГ около 75 °С термоЭДС составляла около 45 мВ.

2. Испытание теплового аккумулятора фазового перехода, разработанного и изготовленного на кафедре двигателей и теплотехники Национального транспортного университета при участии работников Института газа НАН Украины, при температуре окружающего воздуха близко 1,5 °С показало, что время хранения тепловой энергии составляет 320 мин. За это время температура поверхности ТАФП под слоем тепловой изоляции в месте контакта с “горячими” спаями ТЭГ снизилась от 116 °С до 65 °С.

3. Результатами данного исследования подтвержденная возможность и эффективность использования термоэлектрических генераторов в системе пуска холодного двигателя внутреннего сгорания с тепловым аккумулятором для генерирования электрической энергии на борту автомобиля в течение продолжительного времени после завершения функционирования ДВЗ.

Литература

1. J. Vazquez, M.A. Zanz-Bobi, R. Palacios, A. Arenas, “State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles,” Proceedings of 7th European workshop on thermoelectric, 2002.S.
2. Gritsuk, I., Gutarevych, Y., Mateichyk, V., and Volkov, V., "Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator," SAE Technical Paper 2016-01-0204, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-0204>.
3. Трифонов Д.М. Анализ направлений рекуперации тепловой энергии отработанных газов двигателя внутреннего сгорания / Д.М. Трифонов // Современные энергетические установки на транспорте и технологии и оборудование для них обслуживание. 9-а Международная научно-практическая конференция – Херсон: Херсонская государственная морская академия. 2018. С. 194-199
4. Sprouse C. Iii and Depcik C., "Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery," Applied Thermal Engineering, vol. 51, pp. 711-722, 2013.
5. Jadhao J.S., Thombare D.G. «Review on exhaust gas heat recovery for I.C. Engine». International journal of engineering and innovative technology (IJEIT) Volume 2, Issue 12, June 2013.
6. Recovery of Exhaust Waste Heat for ICE Using the Beta Type Stirling Engine, Wail Aladayleh, Ali Alahmer, Hindawi Publishing Corporation, Journal of Energy, Volume 2015, Article ID 495418, 8 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/495418>.
7. DuraisamySivaprahtpm,Subramaniamharish,Raghavangopalanandgovindhansundararajan(July11th2018).Automotivewasteheatrecoverybythermoelectricgeneratortechology,Bringingthermoelectricityintoreality,Patriciaaranguren,Intechopen,DOI:10.5772/intechopen.75443.
8. Кузнецов Е.С. Техническая эксплуатация автомобилей: учебник для вузов / Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин, В.Г. Власов и др. // – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука, 2001. - 535 с.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности / Лыков А.В. // — М.: Высшая школа, 1967. - 599 с.
10. Крохта Г.М. Особенности работы стартерных аккумуляторных батарей при самопрогреве двигателя в холодный период / Г.М. Крохта, Н.А. Усатых, Ю.А. Гуськов, Д.М. Воронин // Достижения науки и техники АПК. 2016. т.30. №12. С. 94-97.

11. Панкратов Н.И. Эксплуатация аккумуляторных батарей при низких температурах / Н.И. Панкратов // Автомобильный транспорт. 1985. №2. С. 16-19.
12. Тиминский В.И. Справочник по электрооборудованию автомобилей, тракторов, комбайнов / В.И. Тиминский // М.: Урожай, 1985. - 256 с.
13. Тышкевич Л.Н. Исследование тепловых процессов аккумуляторной батареи при эксплуатации автомобиля в условиях низких отрицательных температур / Л.Н. Тышкевич, Б.В. Журавский // Омск.: Вестник СибАДИ, выпуск 6 (58), 2017. С. 71-77.
14. Маркин А.Г. Энергообеспечение пуска двигателя внутреннего сгорания автомобиля / А.Г. Маркин, Б.В. Журавский, А.П. Жигадло // Омск.: Вестник СибАДИ, выпуск 5 (45), 2015. С.26-30.
15. Трифонов Д.М. Улучшение топливной экономичности и экологических показателей автомобиля использованием тепловых аккумуляторов фазового перехода для прогрева двигателя: дис. на получение наук. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.20 — «Эксплуатация и ремонт средств транспорта» / Д.М. Трифонов – Киев, 2018. 236 с.

Поступила в редакцию 06.08.18.

Dmytrychenko M.F., Dr. of Technical Sciences
Gutarevych Yu.F., Dr. of Technical Sciences
Trifonov D.M., Cand. of Technical Sciences
Syrota O.V., Cand. of Technical Sciences
Shuba E.V., Cand. of Technical Sciences

National Transport University
1, M.Omelianovycha-Pavlenka Str., Kyiv, 01010, Ukraine,
e-mail: kafedradvzntu@gmail.com

ON THE PROSPECTS OF USING THERMOELECTRIC GENERATORS WITH THE COLD START SYSTEM OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH A THERMAL BATTERY

According to the results of the analysis of the power capabilities of the internal combustion engine start system under low ambient temperatures, it has been found that this process is considerably affected by the temperature of the battery electrolyte. It is proposed to use a thermoelectric system that allows a thermoelectric generator to recover the exhaust gas thermal energy which is stored in a thermal battery to provide power to the infrared heating element in order to maintain the thermal state of the battery while the vehicle is kept at low temperatures. The description of the proposed system, its operating principle and the results of research are given. Fig. 4, Bibl. 15.

Key words: thermoelectric generator, recovery of exhaust gas thermal energy, phase change thermal battery, cold engine start, starter battery.

References

1. Vazaquez J., Zanz-Bobi M.A., Palacios R., Arenas A. (2002). State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles. *Proceedings of 7th European Workshop on Thermoelectrics*.

2. Gritsuk, I., Gutarevych, Y., Mateichyk, V., and Volkov, V. (2016). Improving the processes of preheating and heating after the vehicular engine start by using heating system with phase-transitional thermal accumulator. *SAE Technical Paper 2016-01-0204*, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-0204>.
3. Trifonov D.M. (2018). Analiz napriamiv rekuperatsii teplovoi enerhii vidpratsiovanykh haziv dvyhuna vnutrishnioho zhorannia [Analysis of the directions of recovery of thermal energy of exhaust gases of internal combustion engine]. Suchasni energetychni ustavovky na transporti i tekhnologii ta obladnannia dlia ikh obsluhovuvannia [Modern energy installations on transport and technology and equipment for their maintenance]. *9-th International Scientific and Practical Conference*. Kherson: Kherson State Maritime Academy.
4. Sprouse C. Iii and Depcik C. (2013). Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 51, 711-722.
5. Jadhao J.S., Thombare D.G. (2013). Review on exhaust gas heat recovery for I.C. Engine. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2 (12).
6. Aladayleh Wail, Alahmer Ali. (1915). Recovery of exhaust waste heat for ICE using the beta type stirling engine. *Journal of Energy*, Article ID 495418, 8 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/495418>.
7. Duraisamy Sivaprahasam, Subramaniam Harish, Raghavan Gopalan and Govindhan Sundararajan (2018). *Automotive waste heat recovery by thermoelectric generator technology, bringing thermoelectricity into reality*, Patricia Aranguren, IntechOpen.
8. Kuznetsov E.S., Boldin A.P., Vlasov V.M., et al. (2001). *Tekhnicheskaiia ekspluatatsia avtomobilei: uchebnyk dlia vuzov* [Technical maintenance of cars: textbook for higher schools]. 4-th ed., revised and supplemented. Moscow: Nauka [in Russian].
9. Lykov A.V. (1967). *Teoriia teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]*. Moscow: Vysshiaia shkola [in Russian].
10. Krokhta G.M., Usatykh N.A., Guskov Yu.A., Voronin D.M. (2016). Operating peculiarities of starter storage batteries during self-heating of the engine in winter. *Dostizheniia nauki i tekhniki APK – Achievements of Science and Technology of Agro-Industrial Complex*, 30 (12), 94-97.
11. Pankratov N.I. (1985). Ekspluatatsiia akkumulatornykh batarei pri nizkikh temperaturakh [Operation of storage batteries at low temperatures]. *Avtomobilnyi Transport*, 2, 16–19 [in Russian].
12. Timinskii V.I. (1985). *Spravochnik po elektrooborudovaniuu avtomobilei, traktorov, kombainov [Handbook of the electrical equipment of cars, tractors, combines]*. Moscow: Urozhai [in Russian].
13. Tyshkevich L.N., Zhuravskii B.V. (2017). *Issledovaniie teplovykh protsessov akkumulatornoi batarei pri ekspluatatsii avtomobilia v usloviakh nizkikh otritsatelnykh temperatur [Study of thermal processes of storage battery when operating a car under low negative temperatures]*. Omsk: Bulletin of Siberian Automobile and Highway Academy, 6 (58) [in Russian].
14. Markin A.G., Zhuravskii B.V., Zhigadlo A.P. (2015). *Energoobespecheniie puska dvigatelii vnutrennego sgoraniia avtomobilia [Power supply of the start of a car internal combustion engine]*. Omsk: Bulletin of Siberian Automobile and Highway Academy, 5 (45) [in Russian].
15. Trifonov D.M. (2018). Polipshennia palyvnoi ekonomichnosti i ekolohichnykh pokaznykov avtomobilia vykorystanniam teplovykh akumuliatoriv fazovoho perekhodu dlia prohrivu dvyhuna [Improvement of fuel economy and environmental performance of the car using phase change thermal batteries for engine warm-up]. *Candidate's thesis* (Operation and repair of means of transport). Kyiv (in Ukrainian).

Submitted 06.08.2018.