

УДК 629.3.064.5

Н.А. Хрипач, Б.А. Папкин, В.С. Коротков

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
(Университет машиностроения)

Приведен анализ повышения эффективности отечественных теплоэнергетических установок в малой энергетике и на транспорте в связи с использованием прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Рассмотрены различные материалы как с точки зрения их термоэлектрических свойств, так и возможности применения в термоэлектрических генераторах. На основании технических характеристик существующих образцов термоэлектрических генераторов обоснована актуальность развития технологий прямого преобразования тепловой энергии в электрическую для увеличения конкурентоспособности российских разработок в области автомобилестроения и малой энергетики на мировой арене.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, рекуперация тепловой энергии, прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

Изменение климата является одной из наиболее значительных угроз общественному здоровью и глобальной окружающей среде. Одним из доминирующих факторов, оказывающих значительное влияние на окружающую среду, являются парниковые газы, попадающие в атмосферу, в том числе, в результате сгорания углеводородного топлива в двигателях автомобилей и стационарных энергоустановок. Парниковые газы имеют как естественное, так и антропогенное происхождение. Автономные энергетические системы, особенно применяемые на транспорте, выбрасывают более трети всех антропогенных парниковых газов, причем из четырех парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O и галогенированные углеводороды) наиболее критичным является углекислый газ, на долю которого приходится почти 90% выбросов всех парниковых газов. Эти выбросы напрямую связаны со сгоранием топлива и пропорциональны его расходу.

Принятые в последние годы и планируемые международные стандарты требуют от транспортных средств почти двукратного сокращения к 2020–2025 гг. выбросов CO_2 и потребления нефтяных топлив и почти пятикратного уменьшения выбросов NO_x и NMOG (органических газов, не содержащих метан) по сравнению с 2010 г.

Современная автомобилестроительная отрасль находится на грани крупного сдвига в парадигме, аналогичного концу XIX в., когда электропривод был скорее правилом, чем исключением. Продажи гибридных транспортных средств, сочетающих в себе электропривод и двигатель внутреннего сгорания, исчисляются миллионами.

При этом значительная часть исследовательских бюджетов автопроизводителей направляется на улучшение экологических и экономических показателей гибридных транспортных средств, повсеместно внедряется система рекуперации энергии при торможении. Другой возможный способ снижения потребления топлива и выбросов вредных веществ заключается в прямом преобразовании тепловой энергии отработавших газов двигателя внутреннего сгорания в электроэнергию, которая может быть направлена на силовой привод транспортного средства.

Тепловые двигатели, применяемые на транспорте, являются основным элементом силовой установки, поскольку позволяют не только генерировать электроэнергию, но и имеют высокий потенциал в обеспечении теплом, получаемым от охлаждающей жидкости, а также от отработавших газов. Энергоэффективность автотранспортного средства, которую в основном оценивают по топливной экономичности, в первую очередь, зависит от степени пре-

образования энергии сгорания топлива в механическую и/или электрическую (в случае гибридного автотранспортного средства) энергию. Современные технологии организации рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания, применяемые на автомобильном транспорте, приближаются к пределу своего развития, дальнейшее их совершенствование будет сопровождаться все большими техническими трудностями, а эффект от использования будет все менее заметен. Для дальнейшего увеличения энергоэффективности силовых установок на базе тепловых двигателей необходимо внедрение новых технологий преобразования энергии сгорания топлива, в том числе тепловой энергии отработавших газов, выбрасываемой в атмосферу.

Анализ внешнего теплового баланса двигателя внутреннего сгорания [1], в частности с искровым зажиганием, показывает, что до 40% энергии, выделившейся при сгорании топлива, уносится с отработавшими газами. Значительную часть этой энергии можно использовать для различных целей. Кроме того, часть энергии рассеивается системой охлаждения ДВС и расходуется на преодоление сил трения и инерции.

Для транспортных средств с гибридными силовыми установками из многочисленных вариантов рекуперации тепловой энергии отработавших газов наиболее целесообразными являются методы, позволяющие получить электрическую энергию, которая может быть сразу направлена на тяговый электродвигатель.

На рис. 1 показано изменение теплового баланса гибридного транспортного средства при внедрении термоэлектрического генератора. Главным условием сравнения двух тепловых балансов было равенство количества энергии, затрачиваемой на привод ведущих колес транспортного средства (30 кВт) [2]. Коэффициенты полезного действия всех систем привода гибридного транспортного средства при этом оставались без изменений. Из представленной схемы следует, что в случае внедрения термоэлектрического генератора с коэффициентом полезного действия 5%, преобразующего около 2% тепловой энергии отработавших газов в электрическую, расход топлива снижается примерно на 3%.

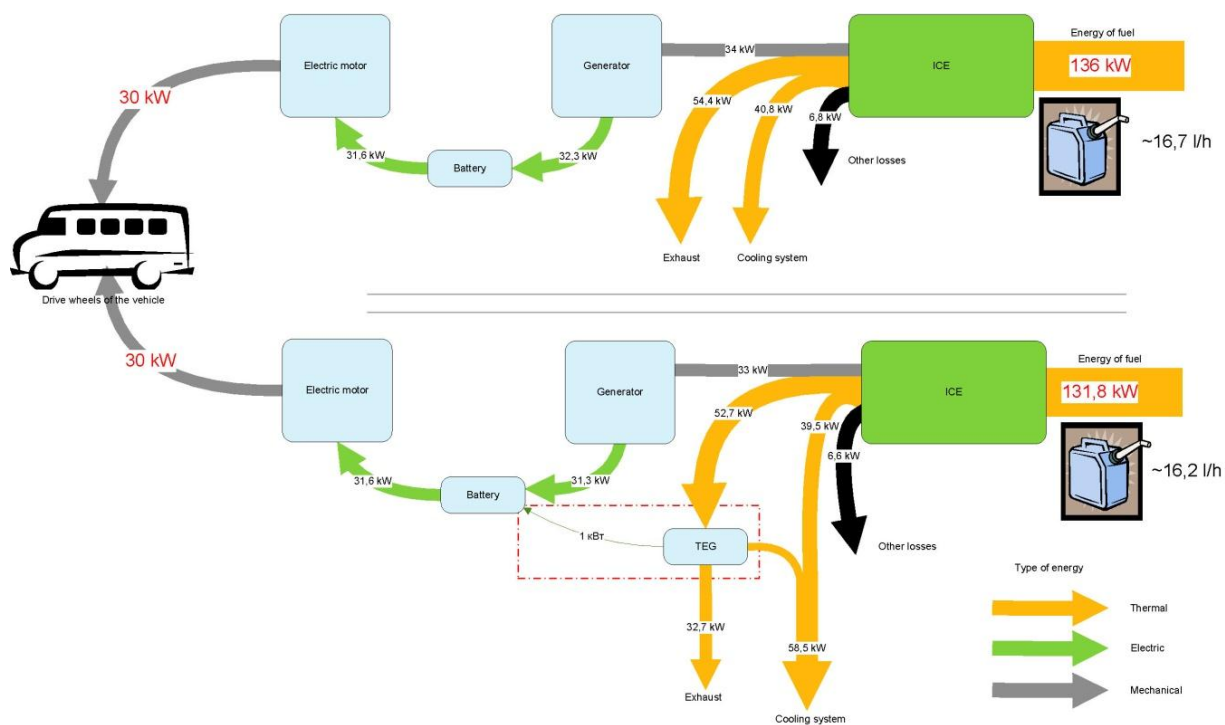


Рис. 1. Изменение теплового баланса транспортного средства с гибридной силовой установкой при внедрении термоэлектрического генератора

В этой связи разработка технических решений для повышения эффективности отечественных теплоэнергетических установок в малой энергетике и на транспорте использо-

ванием прямого преобразования тепловой энергии в электрическую является актуальной задачей.

Внедрение данной концепции с использованием современных термоэлектрических элементов позволит рекуперировать до 20% тепловой энергии, рассеиваемой двигателем внутреннего сгорания.

Предлагаемая тема является новой и не достаточно изученной. В последние годы ведущие мировые исследовательские центры принимают активное участие в создании энергоблоков на базе термоэлектрических элементов, интегрируемых в системы выпуска отработавших газов автомобильных двигателей [3-6]. Однако на данный момент результаты выполненных работ носят лишь теоретический и экспериментальный характер. Учитывая факт отставания российских исследователей в области создания термоэлектродгенераторов и отсутствие на территории РФ задела по данному научному направлению, очевидна актуальность выбранной тематики и возможность достижения научно-технических результатов, превосходящих мировой уровень.

Эффективность утилизации тепловой энергии отработавших газов двигателя внутреннего сгорания в составе транспортного средства напрямую зависит от свойств выбранного материала термоэлектрического генераторного модуля.

Впервые прямое преобразование тепловой энергии в электрическую было описано Томасом Иоганном Зеебеком в 1821 г. Однако он объяснял термоэлектрический эффект, названный его именем, поляризацией материалов под воздействием разницы температур, что было опровергнуто позднее. Эффект Зеебека заключается в возникновении электродвижущей силы при наличии разницы температур в контактах замкнутой электрической цепи, состоящей из разнородных проводников. Однако ЭДС, возникающая в цепи из двух разнородных проводников, не превышает нескольких милливольт, что достаточно для замеров температуры, но не для генерирования электроэнергии. С целью повышения эффективности как прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, так и обратного, были созданы термоэлектрические элементы, состоящие из полупроводников p и n типов, последовательно соединенных электрически и параллельно соединенных термически. Конструкция термоэлектрического генераторного модуля показана на рис. 2.

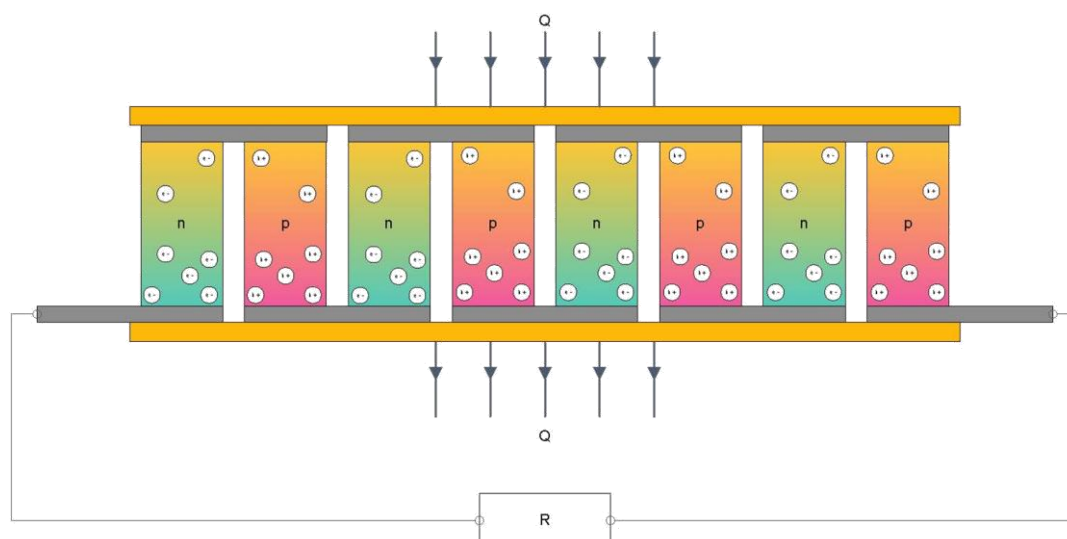


Рис. 2. Принцип работы и конструкция термоэлектрического генераторного модуля

Итоговая температура обеих сторон термоэлектрического модуля и напряжение в цепи при неизменном тепловом потоке и нагрузке складываются из величин трех основополагающих термоэлектрических эффектов: Зеебека, Пельтье и Томпсона.

Производительность термоэлектрического генератора можно оценить по величине ко-

эфициента полезного действия (2), который зависит не только от используемого материала, но и от перепада температур между холодным и горячим спаем. Для оценки эффективности термоэлектрического материала используется понятие добротности ZT (1). Добротность термоэлектрического материала и его КПД можно рассчитать следующим образом:

$$ZT = \frac{\sigma \alpha^2}{\lambda} \Delta T, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{1+ZT+\frac{T_X}{T_H}} \frac{T_H-T_X}{T_H}, \quad (2)$$

где σ – удельная проводимость, См/м; α – коэффициент термо-ЭДС; λ – удельная теплопроводность, Вт/(м·К); ΔT – разность температур горячей (T_H) и холодной (T_X) сторон элемента, К.

Из определения добротности термоэлектрического материала следует, что наряду с высокой термо-ЭДС он должен обладать высокой электрической проводимостью и низкой удельной теплопроводностью, но в одном материале это недостижимо. Поэтому поиск эффективного термоэлектрического материала сводится к компромиссу для заданных условий эксплуатации.

На рис. 3 приведены некоторые термоэлектрические материалы как используемые в настоящий момент, так и перспективные разработки с середины XX в.

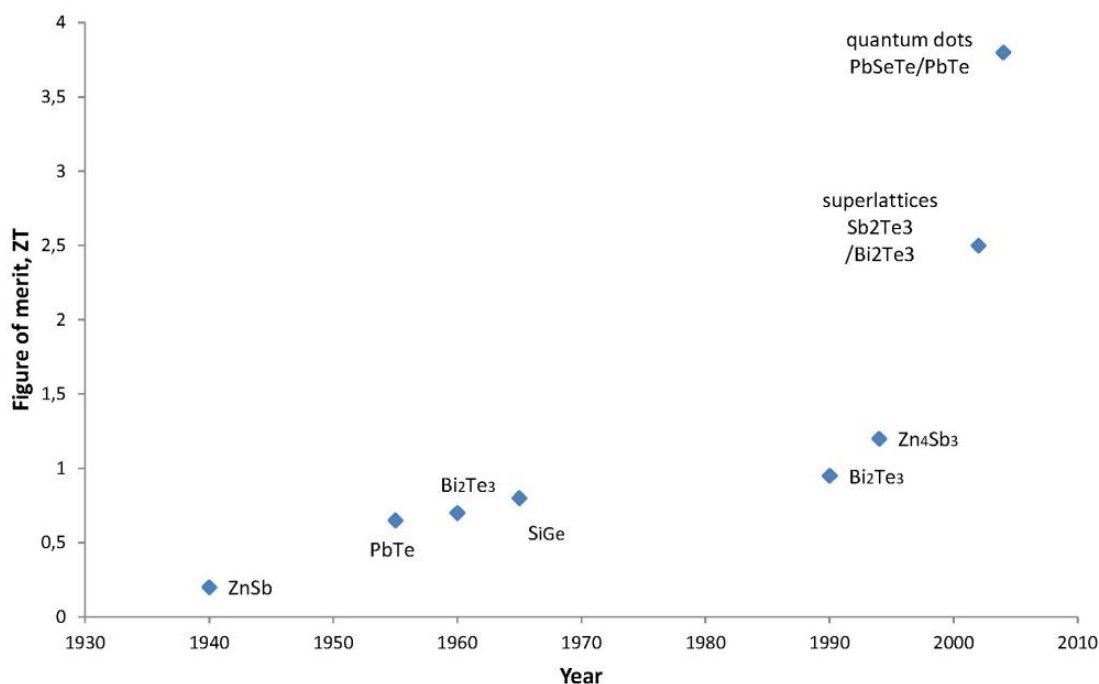


Рис. 3. Прогресс термоэлектрических материалов по добротности, ZT

Антимонид цинка (ZnSb), использовавшийся Зеебеком в его опытах, имеет крайне низкую величину добротности 0,2. Ввиду низкого коэффициента полезного действия первый термоэлектрический генератор с использованием сплава цинк-сурьма с составом, близким к стехиометрическому, представленный в 1867 г., не нашел практического применения.

Начиная с 60-х годов XX в. наибольшее распространение нашли термоэлектрические элементы на основе теллуридов свинца и висмута. Основной причиной широкого распространения теллурида свинца (PbTe), несмотря на невысокую величину термоэлектрической добротности (0,6-0,7), была его низкая себестоимость. Позже он был полностью заменен на теллурид висмута (Bi₂Te₃) с ZT примерно 1,0, что соответствует КПД 5-7% при температуре до 230⁰С, но значительно снижается при более высоких температурах. В последующие десятилетия эффективность термоэлементов на основе теллурида висмута неуклонно увеличива-

лась, но барьер $ZT=1$ так и не был преодолен. Наряду с описанными теллуридами ограниченное распространение, вследствие высокой себестоимости получил силицид германия (SiGe).

Интерес к использованию антимонида цинка в генераторных модулях вновь возник после открытия термоэлектрических свойств, значительно превосходящих таковые теллуридов, у сплава с составом Zn_4Sb_3 . Высокая (порядка 1,2 [7]) термоэлектрическая добротность данного материала в значительной степени обусловлена неоднородностями кристаллической решетки, снижающими его теплопроводность.

Дальнейшие работы по поиску высокоэффективных термоэлектрических материалов направлены на снижение теплопроводности при сохранении низкого электрического сопротивления путем создания в сплаве полупроводников различных наноструктур. В настоящее время ведутся работы по созданию материалов со сверхрешетками (ZT до 2,5) и квантовыми точками (ZT до 3,8) [8, 9].

В табл.1 приведены основные свойства термоэлектрических материалов, применяемых в современных серийно выпускаемых моделях генераторных модулей.

Таблица 1

Свойства термоэлектрических материалов

Название	Состав	Тип полупроводника	Оптимальная рабочая температура, °C	Добротность ZT	Технология изготовления
Силицид германия	$Si_{0,8}Ge_{0,2}$	n	730	1,00	Горячее прессование
	$Si_{0,8}Ge_{0,2}$	p	730	0,70	Горячее прессование
Теллурид свинца	$PbTe$	n	230-577	0,70	Горячее прессование
Антимонид цинка	$Zn_4(Sb_{0,97}Sn_{0,03})_3$	p	230-480	1,00	Плазменное спекание
	Zn_4Sb_3	p	230-480	1,22	Плазменное спекание
Теллурид/селенид висмута/сурьмы	Bi_xTe_y/Sb_xSe_y	p/n	180-250	0,3-1,01	Горячее прессование

В качестве примера современного серийно выпускаемого генераторного модуля На можно привести модель 2411G-7L31-15CX1 производства Custom Thermoelectric, технические характеристики которого показаны на рис. 4.

Таким образом, если современные термоэлектрические генераторные модули с использованием теллурида висмута (III) при $ZT < 1$ позволяют преобразовать тепловую энергию, утилизируемую с отработавшими газами двигателя внутреннего сгорания, с КПД 5–7%, тогда применение перспективных высокоэффективных термоэлектрических материалов позволит поднять этот показатель до 20–24%.

Однако на термоэлектрический материал, предназначенный для использования в транспортных средствах, накладываются дополнительные требования, такие как экологичность и доступность, т.е. низкая себестоимость. В настоящее время немногие термоэлектрические материалы, удовлетворяющие всем перечисленным требованиям, находятся в серийном производстве, в частности теллурид висмута (III) Bi_2Te_3 .

Основным направлением промышленности, в котором в настоящее время активно используется технология прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, является аэрокосмическая отрасль. Термоэлектродгенераторы применяются в качестве бортовых источников электропитания космических аппаратов, предназначенных для исследования удаленных от Солнца регионов Солнечной системы.

Термоэлектрический генератор позволяет преобразовать тепловую энергию в электрическую, принцип его действия основывается на эффекте Пельтье.

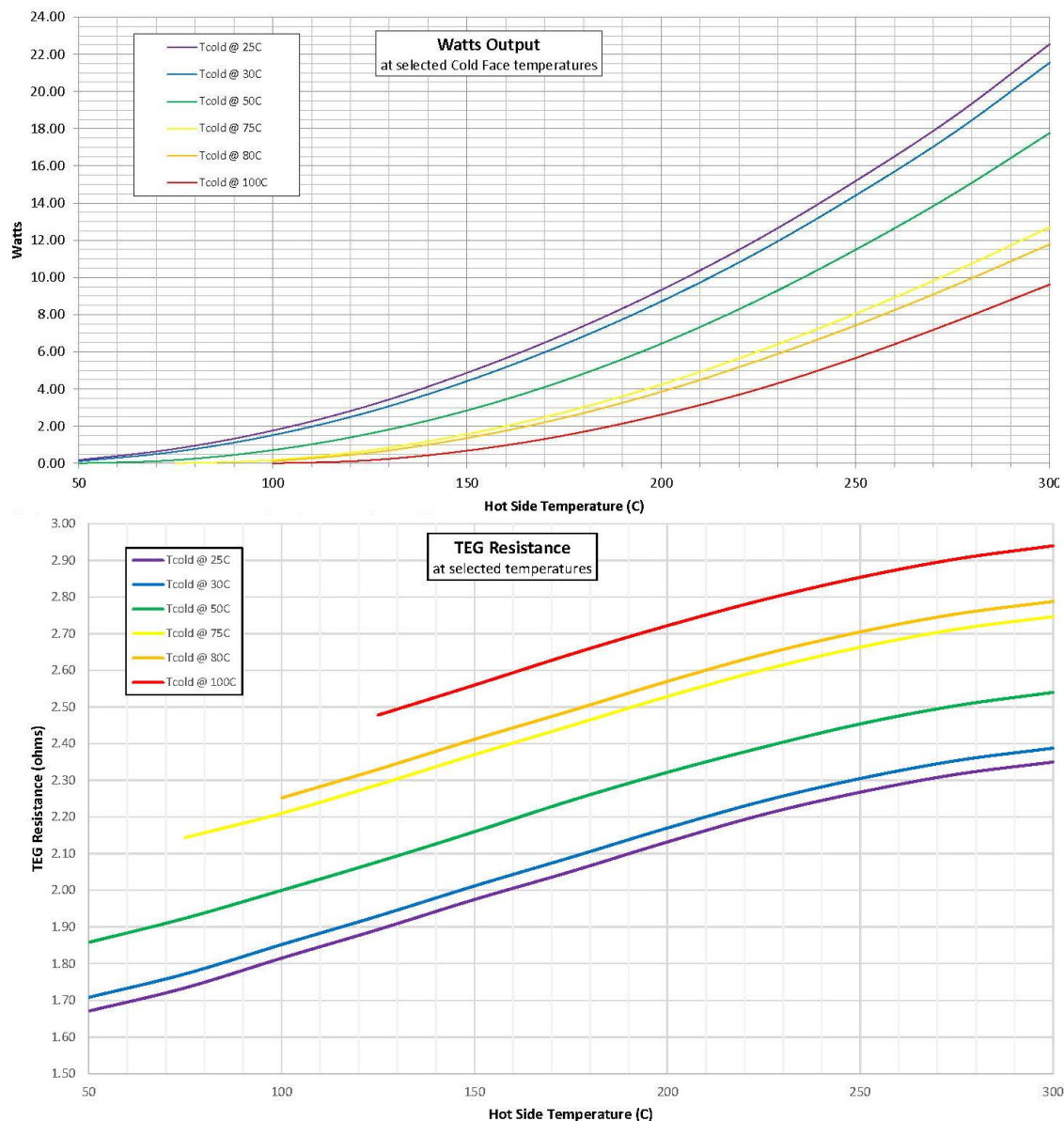


Рис. 4. Выходная мощность и внутреннее сопротивление термоэлектрического генераторного модуля при различных температурах [10]

Основными достоинствами элемента Пельтье, являются:

- небольшие размеры, что упрощает его интеграцию в системы автомобиля;
- отсутствие каких-либо движущихся частей, а также газов и жидкостей;
- отсутствие механических частей;
- отсутствие шума при работе.

К недостатку элементов Пельтье можно отнести высокую стоимость элемента, однако, учитывая постоянный интерес к разработкам в данной области и результаты исследований в области получения материалов для термоэлектрических материалов, можно предположить их существенное удешевление уже в ближайшие годы.

Наибольшую популярность предложенная тематика получила у зарубежных исследовательских центров и автопроизводителей. Так, компанией BMW в 2005 г. был предложен вариант применения рекуперации отработавших газов для питания бортовой сети автомоби-

ля. Для этого служит термоэлектродгенератор на основе теллурида висмута, устанавливаемый в отрезок системы выпуска автомобиля и контактирующий непосредственно с поверхностью выхлопной трубы. Данная установка позволит вырабатывать до 600 Вт мощности при высоких значениях температур отработавших газов, а также снижение расхода топлива на 5%.

Одна из крупнейших американских компаний по производству автомобильных компонентов Tenneco, Inc. в настоящее время сконцентрировала усилия на разработке термоэлектрического генератора, основанного на эффекте Зеебека, для автомобиля. Генератор вырабатывает электрическую энергию за счет электродвижущей силы в замкнутом кольце термоэлектрической батареи, возникающей из-за устойчивой разности температур полупроводниковых контактов. Наружная часть термоэлектрических элементов омывается горячими отработавшими газами двигателя внутреннего сгорания, а внутренняя часть охлаждается циркулирующей охлаждающей жидкостью. Ожидаемый эффект от использования данной системы составляет не менее 5% улучшения топливной экономичности.

Данная тематика является весьма актуальной в сфере автомобилестроения. Это доказывает и тот факт, что крупнейшие зарубежные автопроизводители – BMW, Chevrolet, Volkswagen и General Motors – работают над созданием высокоэффективных жаростойких термоэлектрических генераторов, которые можно будет устанавливать внутри системы выпуска отработавших газов двигателя, где температура может достигать 1000°C, что способствует дополнительному 5% увеличению топливной экономичности. Также компания Rolls Royce уже инвестировала несколько миллионов фунтов стерлингов в зарегистрированный в Гибралтаре проект Power Chips. Термоэлектрические генераторы Power Chips предполагается использовать в аэрокосмической области, для создания новых типов электромобилей и пр., в том числе в упомянутом качестве – для отвода тепла от автомобильных двигателей.

К сожалению, в данной момент наблюдается значительное отставание России в области создания термоэлектрических генераторов, в основном все результаты научно-исследовательских работ ограничиваются теоретическими материалами без проведения должных экспериментальных исследований и внедрения разработок в производство. Это позволяет сделать вывод о необходимости развития технологий прямого преобразования тепловой энергии в электрическую для увеличения конкурентоспособности российских разработок в области автомобилестроения и малой энергетики на мировой арене.

Настоящая работа подготовлена в рамках соглашения № 14.577.21.0078 о предоставлении субсидии при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Библиографический список

1. **Bourhis, G.P.** Energy and Exergy Balances for Modern Diesel and Gasoline Engines / G. Bourhis, P. Leduc // Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP. 2010. V. 65. № 1. P. 39–46.
2. **Khripach, N.** Thermoelectric generators of motor vehicle powertrains, problems and prospects / N. Khripach, B. Papkin, V. Korotkov // Life Science Journal. 2014. № 12. P. 503–507.
3. **Sacr, K.M.** Thermal design of automobile exhaust based on thermoelectric generators: Objectives and challenges / K.M. Sacr, M.K. Mansour, M.N. Mussa // Thermoelectricity. 2008. № 1. P. 64–73.
4. **Anatychuk, L.I.** Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles / L.I. Anatychuk, O.J. Luste, R.V. Kuz // Journal of Electronic Materials. 2011. V. 40. Issue 5.
5. **Anatychuk, L.I.** Materials for vehicular thermoelectric generators / L.I. Anatychuk, R.V. Kuz // Proc. of ICT-2011. – Michigan, USA, 2011.
6. **Anatychuk, L.I.** Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator / L.I. Anatychuk, R.V. Kuz // Proc. of Thermoelectrics goes automotive. – Berlin, 2010.
7. **Toberer, E. S.** Composition and the thermoelectric performance of β -Zn₄Sb₃ / E. S. Toberer [et al.] // Journal of Materials Chemistry. 2010. № 20. P. 9877–9885.
8. Properties of Nanostructured One-Dimensional and Composite Thermoelectric Materials / A.M. Rao [et al.] // MRS Bulletin. 2006. V. 31. № 3. P. 218–223.

9. Aspects of Thin Film Superlattice Thermoelectric Materials, Devices, and Applications / H. Böttner [et al.] // MRS Bulletin. 2006. V. 31. №. 3. P. 211–217.
10. TEG Specification Sheet [Электронный ресурс] http://www.customthermoelectric.com/powergen/pdf/2411G-7L31-15CX1_20140508_spec_sht.pdf

*Дата поступления
в редакцию 20.09.2014*

N.A. Khripach, B.A. Papkin, V.S. Korotkov

IMPROVING ENVIRONMENTAL SAFETY OF VEHICLES USING THERMOELECTRIC GENERATORS

Moscow state university of mechanical engineering

This article analyzes improve the efficiency of domestic thermal power plants in decentralized energy and transport using the direct conversion of thermal energy into electrical energy. Considered various materials from the point of view of their thermoelectric properties and possibilities of application in thermoelectric generators. Based on performance of existing models of thermoelectric generators in the urgency of the development of technologies for direct conversion of thermal energy into electrical energy to increase the competitiveness of Russian developments in the automotive industry and decentralized energy on the world stage.

Key words: thermoelectric generator, recuperation of heat energy, direct conversion of heat into electricity.