

ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ АВТОМОБИЛЯ

Коржуев М.А., Катин И.В.

ФГБУН ИМЕТ им. А.А.Байкова РАН, Москва, Россия

E-mail: korzhuev@imet.ac.ru¹

Автомобильные термоэлектрические генераторы (АТЭГ) преобразуют тепловые потери двигателя внутреннего сгорания (ДВС) автомобиля в полезную электрическую энергию с помощью эффекта Зеебека [1-5]. Разработка АТЭГ ведется в различных странах с середины XX столетия [1], однако и сейчас АТЭГ необходимой мощности ($W_e^{\max} \sim 0,3-1 \text{ кВт}$) не создан, что обычно связывается разработчиками АТЭГ с техническими трудностями [2, 5]. В [6] отмечено, что срок разработки АТЭГ (более 50 лет) существенно превышает обычное время разработки технического продукта средней степени сложности (несколько лет). Отсюда следует, что успешному решению проблемы АТЭГ препятствуют не одни только технические трудности.

Согласно [6-9], разработке АТЭГ препятствуют жесткие термодинамические ограничения в системе «автомобиль – АТЭГ», связанные с разнородностью тепловых машин (ТМ) (ДВС и АТЭГ). Отмечались трудности отвода тепла к АТЭГ в автомобиле из-за больших паразитных тепловых сопротивлений теплообменников (ТО) на границах «выхлопные газы (ВГ)/ ТО» и «ТО/ радиатор воздушного охлаждения» ($\xi_{\text{ТО}}^{\text{гор}}, \xi_{\text{ТО}}^{\text{хол}} \gg 0$) [6, 7]. В результате для одних и тех же термоэлектрических материалов (ТЭМ) удельная мощность $\dot{W}_e^{\max} = W_e^{\max}/S$ АТЭГ (здесь S – площадь ТО) оказывается в $\sim 3-4$ раза меньше, чем предсказывает известная теория Иоффе ($\xi_{\text{ТО}}^{\text{гор}} \sim \xi_{\text{ТО}}^{\text{хол}} \sim 0$) [6].

Кроме того, в результате согласования тепловых сопротивлений по правилу Ленца $\xi_{\text{ТО}}^{\text{гор}} + \xi_{\text{ТО}}^{\text{хол}} = M_0 \cdot \xi_{\text{ТЭМ}}$ масса $m_{\text{АТЭГ}}$ существенно возрастает (теория Охотина) [6]. Здесь $M_0 = (1 + Z_{\text{АТЭГ}} T_{\text{ср}})^{1/2}$, $\xi_{\text{ТЭМ}}$ – теплопроводность ветвей, $Z_{\text{АТЭГ}}$ – термоэлектрическая добротность АТЭГ, $T_{\text{ср}} = (T_{\text{гор}} + T_{\text{хол}})/2$ – средняя температура ветвей, $T_{\text{гор}}$ и $T_{\text{хол}}$ – температура горячей и холодной стороны ветвей. В результате дополнительные затраты энергии на транспортировку АТЭГ $\Delta W_{\text{ДВС}}$ могут превысить его полезную мощность ($\Delta W_{\text{ДВС}} > W_e^{\max}$, здесь $W_{\text{ДВС}}$ – полезная исходная мощность ДВС) [3, 6]. Кроме того, совместная работа двух разнородных ТМ (ДВС и АТЭГ) в

автомобиле ведет к усилению их естественного конфликта, связанного с конкуренцией за теплоту сгорающего топлива Q_0 [6- 9]. Этот конфликт возрастает с ростом W_e^{\max} АТЭГ и зависит от места расположения АТЭГ в автомобиле (рис.1). Во всех случаях (рис.1) конфликт ДВС и АТЭГ ведет к снижению $W_{\text{ДВС}}$ и W_e^{\max} , а также ресурса ТМ [6]. Соответственно в настоящее время некоторые исследователи вообще прекратили работу над АТЭГ, другие – продолжают совершенствовать ТО АТЭГ¹, третьи – ищут более эффективные ТЭМ с повышенной добротностью Z и малым удельным весом d . Наконец, четвертые – изучают возможность повышения коэффициента полезного действия (кпд) η АТЭГ путем помещения его горячих спаев в камеру сгорания (КС) ДВС (1, рис.1) [10, 11]. Целью настоящей работы был анализ современного состояния и перспектив решения проблемы АТЭГ.

АТЭГ в автомобиле. На рис.1 показаны основные схемы подключения АТЭГ к источникам и стокам тепла в автомобиле (ДВС, ВТ, СО). Во всех случаях (рис.1) АТЭГ подключается к источнику и стоку тепла параллельно [6].² При этом АТЭГ использует только часть располагаемой тепловой энергии $Q_0^{\text{ДВС}} = Q_0$; $Q_0^{\text{ВТ}}, Q_0^{\text{СО}} = 0,3 Q_0$, определяемую коэффициентом передачи $\eta_2 = \xi_{1, 2, 3} / \xi^*$, (табл.1). Здесь $\xi^* = \xi_{1, 2, 3} + \xi_{\text{АТЭГ}}$, $\xi_{1, 2, 3}$ и $\xi_{\text{АТЭГ}}$ – тепловые сопротивления ДВС (1), ВТ (2), СО (3) и АТЭГ (рис.2) [6].

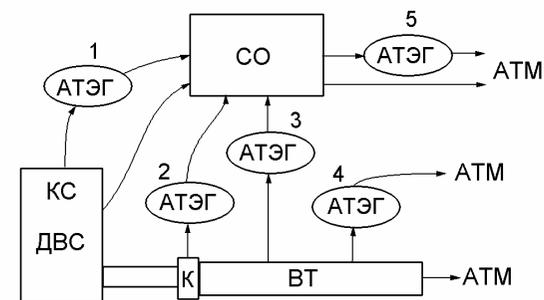


Рис.1. Основные схемы подключения АТЭГ в автомобиле: 1 – КС/ СО; 2 – К/ СО; 3 – ВТ/ СО, 4 – ВТ/ АТМ; 5 – СО / АТМ. Здесь СО – система водяного охлаждения; К – катализатор; ВТ – выхлопная труба; АТМ – атмосфера.

Стрелки показывают направления потоков энергии в системе.

¹ Эти работы предполагают замену - «АТЭГ Охотина» → «АТЭГ Иоффе» [6].

² Последовательное подключение АТЭГ невозможно из-за несовместимости механизмов теплопереноса в автомобиле (массоперенос нагретых газов и воды) и в АТЭГ (термодиффузия электронов и фононов и эффект Пельтье в твердом теле), последние механизмы существенно менее эффективны [6 -9].

В результате полный КПД АТЭГ описывается соотношением

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4, \quad (1)$$

здесь $W_e^{\max} = \eta \cdot Q_0^* = \eta \cdot Q_0^{\text{ДВС, ВТ, СО}}$, $\eta_1 = (T_1 - T_0) / T_1$ – фактор Карно, $\eta_3 = \zeta_{\text{АТЭГ}} / \xi$ – коэффициент передачи теплообменников в режиме W_e^{\max} , $\eta_4 = (M_0 - 1) / (M_0 + T_{\text{хол}} / T_{\text{сп}})$ – КПД термоэлектрических материалов (ТЭМ). Здесь $\zeta = \zeta_i + \zeta_{\text{ТО}}^{\text{гор}} + \zeta_{\text{ТО}}^{\text{хол}} + \zeta_{\text{АТЭГ}}$ – тепловое сопротивление цепи (рис.3) [6].

Таблица 1

Сравнительные характеристики схем подключения АТЭГ (1- 5, рис.1)

№	$T_1 / T_0, \text{ К}$	$\zeta \neq 0$	η_1	η_2	η_3	η_4	η	W_e^{\max} / Q_0^* , кВт
1	2500/373	$\zeta_i; \zeta_{\text{ТО}}^{\text{гор}}$	0,85	0,10	0,34	0,26	0,008	0,8/ 100
2	900/373	$\zeta_{\text{ТО}}^{\text{гор}}$	0,58	0,15	0,34	0,22	0,007	0,21/ 30
3	800/373	$\zeta_{\text{ТО}}^{\text{гор}}$	0,53	0,15	0,34	0,21	0,006	0,18/ 30
4	800/293	$\zeta_{\text{ТО}}^{\text{гор, хол}}$	0,56	0,08	0,34	0,22	0,003	0,09/ 30
5	373/293	$\zeta_{\text{ТО}}^{\text{хол}}$	0,21	0,02	0,34	0,18	0,0003	0,008/ 30

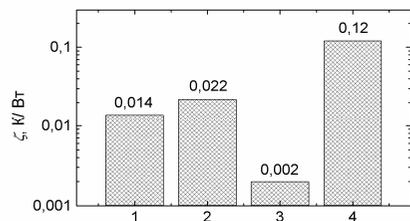


Рис.2. Сравнительные значения эффективных тепловых сопротивлений ζ ДВС (1), ВТ(2), СО (3) и АТЭГ (табл.1). $\zeta_{\text{АТЭГ}}$ – ветви АТЭГ; $\zeta_{\text{ТО}}^{\text{гор}}$ и стандартных размеров с ВО (4), определяющих коэффициент передачи η_2 (табл.1) [6].

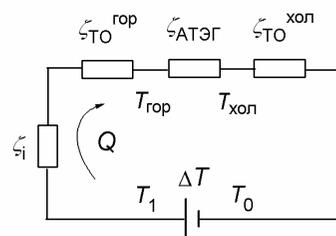


Рис.3. Сопротивления тепловой цепи, определяющие коэффициент передачи η_3 (табл.1). $\zeta_{\text{АТЭГ}}$ – ветви АТЭГ; $\zeta_{\text{ТО}}^{\text{гор}}$ и $\zeta_{\text{ТО}}^{\text{хол}}$ – горячий и холодный теплообменники; ζ_i – источник тепла. Q – тепловой поток в цепи [6].

При расчетах коэффициентов η_{2-4} (табл.1) использовались тепловые сопротивления ζ агрегатов автомобиля ($\zeta_{\text{АТЭГ}} > \zeta_{\text{ВТ}} > \zeta_{\text{ДВС}} \gg \zeta_{\text{СО}}$) (рис.2), а также значения $Z_{\text{АТЭГ}} T = 1$, соответствующие лучшим современным ТЭМ [6- 9]. Тепловая цепь АТЭГ (рис.3) оптимизировалась по правилу Ленца -

$\zeta_{\text{АТЭГ}} / \zeta = M_0$. При этом малость η_2 и η_3 (табл.1), являлась следствием рассогласования ζ агрегатов автомобиля (рис.2) и паразитных $\zeta_{\text{ТО}}^{\text{гор}}$ и/или $\zeta_{\text{ТО}}^{\text{хол}}$, связанных с существованием на границах теплообмена «газ/ твердое тело» неподвижного слоя газа с низкой теплопроводностью [6]. Согласно оценкам (табл.1), в качестве источника тепла для АТЭГ в автомобиле подходят ВТ и ДВС. Установка АТЭГ на СО (5, рис.1) оказывается неэффективной вследствие малости η (табл.1). Использование воздушного охлаждения в случае подключения АТЭГ к ВТ (4, рис.1) также оказывается неэффективным, поскольку при этом существенно возрастают $\zeta_{\text{АТЭГ}}$ и $m_{\text{АТЭГ}}$ за счет вклада паразитного теплового сопротивления $\zeta_{\text{ТО}}^{\text{хол}}$ (в случае водяного охлаждения (ВО) имеем $\zeta_{\text{ТО}}^{\text{хол}} \rightarrow 0$) [6, 8].

Установка АТЭГ в ДВС. Установка АТЭГ в ДВС (2, рис.1) также оказывается неэффективной из-за конфликта АТЭГ с ДВС [6, 8]. Действительно, при установке АТЭГ в ДВС (2, рис.1) ТМ конкурируют непосредственно за мощность сжигаемого топлива Q_0 [6, 7]. В этом случае конфликт ТМ быстро развивается с ростом W_e АТЭГ, что приводит к резкому снижению общего КПД системы (ДВС+ АТЭГ)

$$\eta^{\text{ДВС+АТЭГ}} = \eta^{\text{ДВС}} (1 - \delta) + \eta^{\text{АТЭГ}} \delta, \quad (2)$$

где $\delta = Q_0^{\text{АТЭГ}} / Q_0$ – доля тепла, отводимая от ДВС к АТЭГ [6,8]. Снижение $\eta^{\text{ДВС+АТЭГ}}$ при установке АТЭГ на ДВС имеет простой физический смысл, поскольку в этом случае часть мощности сгорающего топлива Q_0 используется менее эффективной ТМ ($\eta^{\text{АТЭГ}} \sim 0,01$ (табл.1) $\ll \eta^{\text{ДВС}} \sim 0,4$) ([6, 8]).³ Так что в настоящее время изо всех схем подключения АТЭГ в автомобиле наилучшими характеристиками обладают схемы установки АТЭГ на ВТ (2, 3, рис. 1).

Установка АТЭГ на ВТ. При установке АТЭГ на ВТ (2, 3, рис. 1) ТМ конкурируют за периферийные тепловые потоки в системе ($Q_0^{\text{ВТ}}$ и $Q_0^{\text{СО}}$), при этом конфликт ТМ соответственно уменьшается. Основные потоки вещества и энергии в автомобиле при установке АТЭГ на ВТ показаны на рис.4. Из рис.4 видно, что и в этом случае АТЭГ может влиять на работу ДВС через периферийные системы (СО и ТО) и рабочие среды. Кроме того, АТЭГ увеличивает массу и габариты автомобиля [6- 9].

Масс - фактор и форм фактор АТЭГ. Увеличение массы и габаритов автомобиля при установке АТЭГ требует увеличение мощности ДВС при движении: $\Delta W_{\text{ДВС}} = \Delta W_m + \Delta W_s$, здесь ΔW_m и ΔW_s - масс - фактор

³ Достижение паритета АТЭГ и ДВС ($\eta^{\text{АТЭГ}} = \eta^{\text{ДВС}}$) для схемы (1, рис. 1) требует разработки ТЭМ с $ZT \sim 4$, а также выполнения условия $\eta_2 \sim \eta_3 \sim 1$ (табл.1).

и форм- фактор АТЭГ (m и n , Рис.4). При установке аэродинамических обтекателей на АТЭГ имеем $\Delta W_m \rightarrow 0$, однако для всех современных АТЭГ обычно $\Delta W_{ДВС} \sim \Delta W_m$ [2- 6], что объясняется низкой удельной (на единицу массы) мощностью $\dot{W}_{e,*} = W_e/m_{АТЭГ}$, связанной с малостью η_2 , η_3 и η АТЭГ (табл.1) и повышенной массой $m_{АТЭГ}$ [3, 6, 9].

Перезрузка СО. Из-за малости η (табл.1) АТЭГ с ростом W_e вызывает существенную перегрузку СО, что требует затрат дополнительной мощности ДВС на работу приводов СО - $\Delta W_{СО} \sim W_e$ (h, к, рис.4) [6- 9, 12]. В результате имеем $\Delta W = W_e - (\Delta W_m + \Delta W_{СО}) < 0$, то есть АТЭГ работает в режиме простой генерации энергии (ПГЭ) ($W_e > 0$, $\Delta W < 0$), а рекуперации тепловых потерь (РТП) ($\Delta W > 0$) не происходит. Однако при малых $W_e < 0,2$ кВт для охлаждения АТЭГ можно использовать имеющиеся резервы СО ($\Delta W_{СО} = 0$), при этом режим работы АТЭГ может приближаться к полноценному РТП ($W_e > 0$, $\Delta W \geq 0$) [6, 8].

Работа АТЭГ в режиме ПГЭ. В режиме ПГЭ обнаружено увеличение эффективного кпд АТЭГ до $\eta^* = W_e / \Delta W_{ДВС} \sim \eta_{АВТО} \sim 0,1 \gg \eta \sim 0,01$ (табл.1), который определяется кпд приводов автомобиля $\eta_{АВТО}$ (q, рис.4) [6]. Эффект может быть использован для замены (полной, или частичной) «ременного» генератора автомобиля на АТЭГ [5, 6].

Турбонаддув и резонансный наддув. Считается, что АТЭГ слабо влияет на работу турбины турбонаддува автомобилей, использующей механическую энергию ВГ (i, рис.4). В то же время, за счет изменения тепловых и акустических характеристик ВТ, АТЭГ может существенно нарушить процесс резонансного наддува (РН) ДВС (i, рис.4) и повысить остаточное давление в ВТ, что может снизить $W_{ДВС}$ на 20% и более [8, 12].

АТЭГ и катализатор К. Работа К (p, рис.4) повышает температуру горячего теплообменника, что ведет к росту η АТЭГ (табл.1). Однако, АТЭГ в свою очередь понижает температуру К (2, рис.1), что может нарушить процесс его работы и даже вывести К из строя [6, 12].

Выводы

1. Совместная работа двух разнородных ТМ (АТЭГ и ДВС) в автомобиле показывает их недостаточную совместимость друг с другом.
2. В результате эффективность работы АТЭГ в автомобиле существенно понижается (малые η_2 , η_3 и η , табл.1), со своей стороны. АТЭГ ухудшает работу ДВС (перегрузка ДВС и СО, нарушение РН и др.).
3. Относительная «гармонизация» работы АТЭГ и ДВС в автомобиле в настоящее время, как представляется, возможна только при малых мощностях АТЭГ ($W_e \leq 0,2$ кВт, при $Q_0 = 100$ кВт ($W_{ДВС} \sim 60$ л.с.)).

4. Для получения больших мощностей ΔW , видимо, нужно использовать другие методы рекуперации тепловых потерь автомобилей.

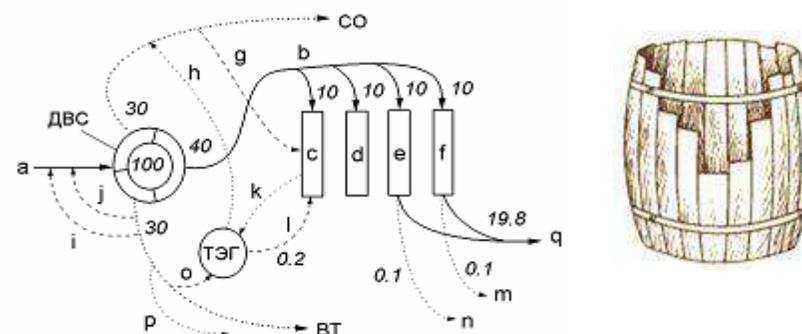


Рис.4. Основные потоки вещества и энергии в автомобиле в случае размещения АТЭГ на ВТ (пунктир - потери, штрихи - рекуперация). а- топливо ($Q_0 = 100$ кВт); б- полезная мощность $W_{ДВС}$; в- вспомогательное оборудование; д- потери в передаче; е и ф- компенсация сопротивления сопротивления колес и воздуха при движении; г - отопление салона; h и о – выходящий и входящий тепловые потоки АТЭГ; i- турбонаддув j- резонансный наддув; k- приводы охлаждения АТЭГ; l- W_e АТЭГ; m и n – потери на масс- фактор ΔW_m и форм-фактор ΔW_s АТЭГ; p- тепло катализатора; q- движение автомобиля. Цифры показывают характерные значения мощности потоков в кВт. Справа - «Бочка Либиха», иллюстрирующая влияние АТЭГ на характеристики автомобиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Файнзильбер Э. М., Драбкин Л. М. Автомоб. пром., 1966. №7. с. 9- 10.
2. Saqr K. M., Mansour M. K., Musa M.N. IJAT, 2008. v.9. № 2. p. 155- 160.
3. Rove D.M., Smith J., Thomas G., Min G. JEMS, 2011. v.40. № 5. p. 784-788.
4. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Kuz R.V. JEMS, 2011 v.40. № 5. p. 1326-1331.
5. Lieb J., Neugebauer S., Eger A., Linde M., Masar B., Stütz W. MTZ, 2009. v.70. №4. p. 4-11.
6. Коржуев М.А., Свечникова Т.Е. Термoelectricчество, 2013. №3. с .58- 75.
7. Коржуев М.А. Письма в ЖТФ, 2011 т.37. №4. с. 8- 15.
8. Korzhuev M.A., Katin I.V. JEMS, 2010. v.39. №9. p. 1390-1394.
9. Коржуев М.А., Гранаткина Ю.В. Термoelectricчество, 2012. №1. с .81- 94.
10. Анатышук Л.И., Кузь Р.В., Розвер Ю.Ю. Термoelectricчество, 2011. №4. с. 80- 85; 2012, №2, с. 97-104; 2014. №2. с. 61-69; 2014. №3. с. 91 – 95.
11. Tatarinov D., Koppers M., Bastian G., Schramm D. JEMS, 2013. v.42. №7. p. 2274- 2281.
12. Kühn R., Koeppen O., Kitteournal J. JEMS, 2014. v.43. №6. p. 1521-1526.