

05

О конфликте двигателей внутреннего сгорания и термоэлектрических генераторов при рекуперации тепловых потерь в автомобилях

© М.А. Коржув

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва

E-mail: korzhuev@ultra.imet.ac.ru

В окончательной редакции 7 сентября 2010 г.

Показано, что двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и термоэлектрический генератор (ТЭГ), установленный на выхлопной трубе (ВТ) ДВС, вступают в конфликт тепловых машин (ТМ), связанный с использованием одних и тех же тепловых ресурсов автомобиля. Установлено, что конфликт ТМ возрастает при росте полезной электрической мощности W_e ТЭГ, что ограничивает как максимально достижимую величину W_e^{\max} , так и возможность рекуперации тепловых потерь (РТП) автомобиля.

Вопросы экономии топлива и снижения выбросов парниковых газов в атмосферу делают актуальной разработку специальных автомобильных термоэлектрических генераторов (ТЭГ) для рекуперации тепловых потерь (РТП) двигателей внутреннего сгорания (ДВС), составляющих $> 60\%$ от мощности сгорающего топлива Q_F [1]. В настоящее время созданы прототипы серийных ТЭГ, размещаемых на выхлопной трубе (ВТ) автомобиля. Электрическая мощность ТЭГ достигала $W_e = 0.2-0.5 \text{ kW}$, что составляло 20–50% от мощности, необходимой для электропитания автомобиля [2,3]. Попытки дальнейшего увеличения W_e наталкиваются на технические трудности [4]. Ограничения величины W_e^{\max} ТЭГ имеют так же термодинамические основания и связаны с конфликтом тепловых машин (ТМ) — ДВС и ТЭГ, развивающимся в системе с ростом W_e [5]. При установке ТЭГ на ВТ ДВС и ТЭГ конкурируют за использование периферийных тепловых потоков, проходящих через ВТ ($Q_{EP} = 0.3Q_F$) и систему охлаждения (СО) автомобиля ($Q_{CS} = 0.3Q_F$) [5,6]. Целью настоящей работы был анализ

перспектив использования ТЭГ, установленных на ВТ автомобиля, с учетом конфликта ТМ.

Расчеты тепловых потоков Q и распределения температуры T проводились с помощью законов Ома и Кирхгофа для тепловых цепей. Баланс энергии в системе в отсутствие (1) и при установке ТЭГ на ВТ (2) определялся из соотношений

$$Q_F = W_{ICE} + Q_{CS} + Q_{EP} \quad (1)$$

и

$$Q_F = W_{ICE} + Q_{CS} + Q_{EP} + W_e, \quad (2)$$

где $W_{ICE} = \eta_{ICE} Q_F$ и η_{ICE} — мощность и КПД ДВС; $W_e = (Q_0 - Q_1) = \eta_{TEG} Q_0$; Q_0 и Q_1 — входящие и выходящие тепловые потоки ТЭГ; $\eta_{TEG} = F_C(M - 1)/(M + T_0/T_1)$ — КПД ТЭГ; $F_C = (\Delta T/T_1)$ — фактор Карно; $\Delta T = (T_1 - T_0)$; T_1 и T_0 — температуры „горячих“ и „холодных“ стыков ТЭГ; $M = (1 + Z(T_0 + T_1)/2)^{1/2}$; $Z = \alpha^2 \sigma / ((\kappa_n/\sigma_n)^{1/2} + (\kappa_p/\sigma_p)^{1/2})^2$ — параметр термоэлектрической эффективности модулей; $\alpha = (\alpha_p - \alpha_n)$ — коэффициент Зеебека термопары; $\alpha_{n,p}$, $\sigma_{n,p}$ и $\kappa_{n,p}$ — коэффициенты Зеебека, удельные электропроводности и теплопроводности n - и p -ветвей [7].

На рис. 1 показано, как меняется баланс энергии в системе в зависимости от мощности W_e ТЭГ. При расчетах использовались значения $\eta_{ICE} = 0.4$ [7], $\eta_{TEG} = 0.05$ ($Z = 0.003$ 1/К), $Q_F = 100$ kW и условие $W_{ICE+TEG} = W_{ICE} + W_e$ (кривая 1, рис. 1), соответствующее случаю, когда ТЭГ не мешает работе ДВС [6]. Из рис. 1 видно, что из-за малости $\eta_{TEG} \ll \eta_{ICE}$ с ростом W_e в системе (ДВС+ТЭГ) наблюдаются значительные изменения тепловых потоков Q_{EP} и Q_{CS} (кривые 2, 3, 5, рис. 1). Поэтому работа ТЭГ требует мощных теплообменников в районах нагревателя и холодильника [1].

По экономическим соображениям в качестве холодильника ТЭГ обычно используют СО автомобиля с увеличенной на $\Delta W_{CS} = (W_{CS}^{TEG} - W_{CS})$ мощностью приводов (вентилятора и водяного насоса). На рис. 2 показан рост температуры T_{CS} (a) и выигрыш в полезной мощности $\Delta W_{ICE+TEG} = (W_e - \Delta W_{CS})$, рассчитанные без учета (4) и с учетом ΔW_{CS} (1–3). При расчетах ΔW_{CS} полагалось, что относительная мощность приводов составляет $W_{CS}/Q_{CS} = 0.03$, а при увеличении нагрузки она возрастает по квадратичному закону $W_{CS}^{TEG} = W_{CS}$

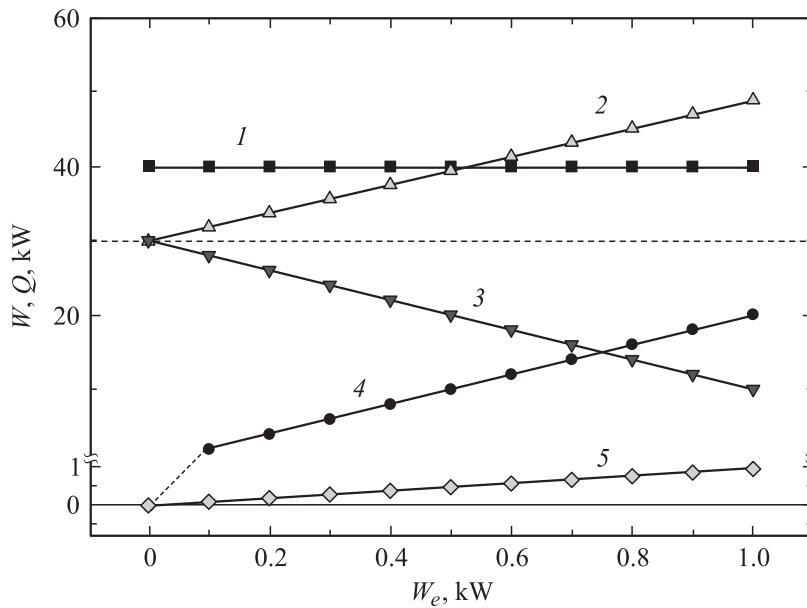


Рис. 1. Перераспределение потоков энергии W и тепла Q в системе (ДВС+ТЭГ) при установке ТЭГ на ВТ в зависимости от полезной мощности W_e ТЭГ ($\eta_{TEG} = 0.05$). 1 — W_{ICE} ; 2 — Q_{CS} ; 3 — Q_{EP} ; 4 — Q_{0TEG} ; 5 — $\Delta W_{ICE+TEG} = W_{ICE+TEG} - W_{ICE} = W_e$.

$(Q_{CS}^{ICE+TEG}/Q_{CS}^{ICE})^2$, связанному с ростом динамического сопротивления воды при перекачке. Из рис. 2, *a* видно, что при $\Delta W_{CS} = 0$ из-за увеличения сброса тепла ТЭГ в СО температура T_{CS} повышается с ростом W_e , причем тем быстрее, чем меньше η_{TEG} (кривые 3→1). При $T_{CS} > T_c = 373-393$ К (здесь T_c — температура кипения воды) возможны закипание воды в СО и остановка ДВС. При $T_{CS} < T_c$ возможна работа системы в режиме $\Delta W_{CS} = 0$, при этом выигрыш в полезной мощности оказывается максимальным $\Delta W_{ICE+TEG} = W_e$ (кривая 4, рис. 2, *b*). По достижении температуры $T_{CS} \geq T_c$ для предотвращения остановки ДВС мощность приводов СО необходимо увеличить ($\Delta W_{CS} > 0$), соответственно выигрыш $\Delta W_{ICE+TEG}$ уменьшается и либо

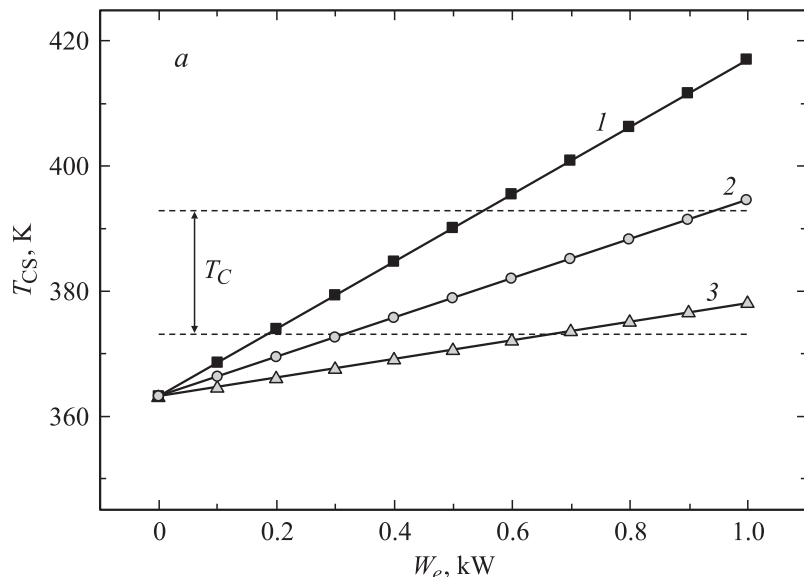


Рис. 2. Рост температуры T_{CS} (a) и выигрыш в полезной мощности системы $\Delta W_{ICE+TEG} = (W_e - \Delta W_{CS})$ (b), рассчитанные без учета (4) и с учетом роста мощности приводов СО ΔW_{CS} , необходимого для предотвращения закипания воды в СО (1–3). η_{TEG} : 1 — 0.03, 2 — 0.05, 3 — 0.1. Стрелкой показан интервал закипания воды в СО автомобиля.

не наблюдается вообще ($\eta_{TEG} = 0.03$ и 0.05 , кривая 1, 2, рис. 2, b), либо он относительно мал ($\eta_{TEG} = 0.1$, кривая 3).

На рис. 3 приведена расчетная температура T_{EP} на границе ВТ/ТЭГ в зависимости от W_e (a), а также распределение температуры по сечению L ТЭГ (b) в случае воздушного (1–3) и водяного охлаждения модулей (4–6). При расчетах использовались стандартные характеристики ТЭГ (длина $l = 0.6$ m; внутренний диаметр $D = 0.05$ m; $\kappa = 0.015$ W/(cm · K) — удельная теплопроводность материала ветвей (Bi_2Te_3), масса $m_{TEG} \sim 10$ kg). Высота ветвей ТЭГ $h \sim 1$ cm находилась из условия максимума функции $W_e = f(Q_0, \Delta T)$. Из рис. 3 видно, что с ростом W_e температура T_{EP} уменьшается из-за отвода части тепла к ТЭГ (кривые 1–3, рис. 3, a), при этом тепловой напор ΔT на ветви

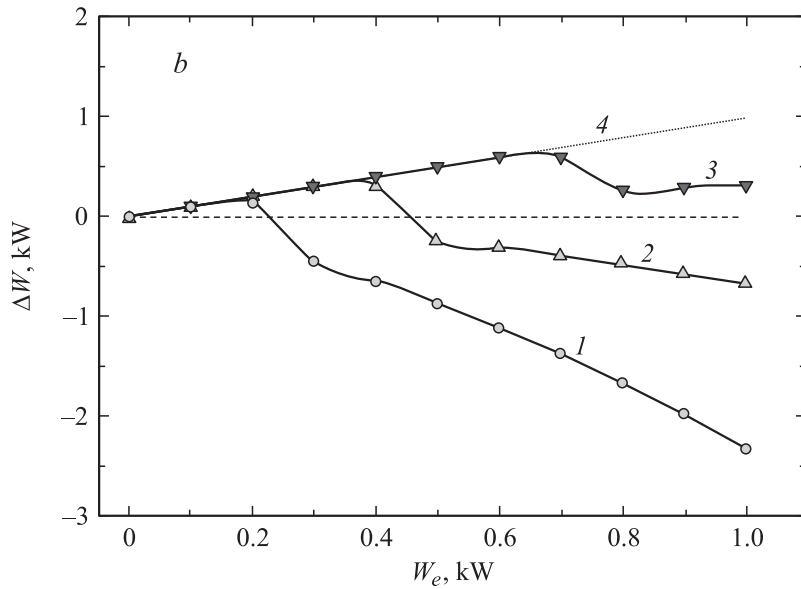


Рис. 2 (продолжение).

ТЭГ дополнительно снижается из-за вклада больших переходных тепловых сопротивлений R_T на границах газ/твердое тело (кривые 1, 2, рис. 3, b) [1].

Снижение T_{EP} нарушает режим резонансного наддува двигателя [6], затрудняет „дожигание“ топлива в трубе и катализаторе, усиливает выброс парниковых газов и отложение сажи в ВТ, что ведет к быстрому „старению“ модуля. Попытки снизить R_T с помощью дополнительного теплообменника, расположенного внутри ВТ, вели к росту противодавления выхлопных газов в ВТ и снижению $\eta_{ICE+TEG}$ [1,2]. Совместное снижение T_{EP} и ΔT (рис. 2,3) уменьшает F_C и η_{TEG} , в результате для существующих термоэлектрических материалов ($Z \sim 0.003$ 1/K) получаем оценки предельной мощности $W_e^{max} < 0.25$ kW и < 0.15 kW при водяном и воздушном охлаждении модулей, что составляет ~ 0.3 и 0.15% от мощности сжигаемого топлива $Q_F = 100$ kW. Достигнутые на практике показатели ТЭГ оказываются значительно ниже,

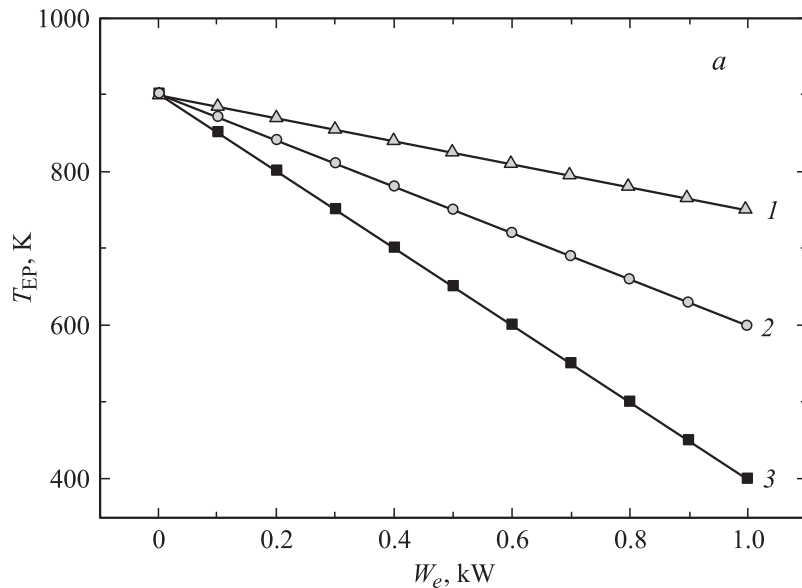


Рис. 3. Температура $T_{ГР}$ границы ВТ/ТЭГ (1–3) в зависимости от W_e ($\eta_{ТЭГ}$: 1 — 0.1, 2 — 0.05, 3 — 0.03) (a); распределение температуры T по сечению L ТЭГ (b) при воздушном (1) и водяном (2) охлаждении модулей. Размеры участков L (m): 1, 2 — газовый слой на поверхности ВТ (0.0001); 2, 3 — корпус ВТ (Fe) (0.002); 3, 4 и 5, 6 — фазовые границы Fe ТЭГ и ТЭГ/Al (0.001); 4, 5 — ветви ТЭГ (0.01); 6, 7 — радиатор (Al) (0.002); 7, 8 — радиатор/хладагент (0.001).

соответственно: $W_e/Q_F \sim 0.3 \text{ kW}/500 \text{ kW} = 0.06\%$ для автомобилей [2] и $\sim 0.04 \text{ kW}/100 \text{ kW} = 0.04\%$ для мотоциклов [3]. При этом выигрыш в W_e сравним с затратами мощности ДВС на преодоление сопротивления движению автомобиля $\Delta W_R = (m_{ТЭГ}/m_{авто})W_R \sim 0.1 \text{ kW}$, вызванного весом ТЭГ (здесь $m_{ТЭГ}/m_{авто} \sim 10 \text{ kg}/1000 \text{ kg} \sim 0.01$; $W_R \sim \sim 0.1Q_F$) [4].

Причиной столь низкой эффективности ТЭГ является малая исходная величина $\eta_{ТЭГ}$, а также конфликт ТМ, возникающий в системе (ДВС+ТЭГ) вследствие нарушения ТЭГ тепловых режимов

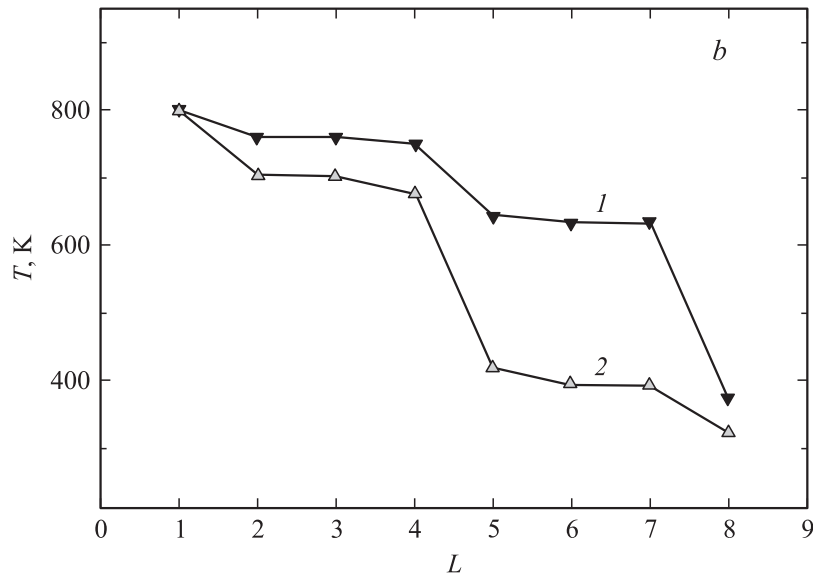


Рис. 3 (продолжение).

СО и ВТ (рис. 1). В результате прирост мощности W_e , полученный за счет ТЭГ, сопровождается потерями в других частях системы (ДВС+ТЭГ), что существенно ограничивает как величину W_e^{\max} , так и возможности РТП автомобиля. тем не менее существует узкий интервал мощностей $W_e < 0.2-0.25 \text{ kW}$, где возможна РТП автомобиля за счет использования резервов СО (начальные участки кривых 1, 2, рис. 2, b). Однако работа СО в указанном режиме может существенно снизить ресурс ДВС [5].

Для повышения величины W_e^{\max} и надежной РТП автомобиля необходимо уменьшение конфликта ДВС и ТЭГ путем увеличения $\eta_{\text{ТЕГ}}$ (рис. 1–3). При $\eta_{\text{ТЕГ}} > 0.1$ возможно получение $W_e^{\max} \sim 0.8 \text{ kW}$ и РТП автомобиля ($\eta_{\text{ICE+TEG}} > \eta_{\text{ICE}}$), что требует использования для ветвей ТЭГ материалов с термоэлектрической добротностью $Z > 0.005 \text{ 1/K}$. В настоящее время такие термоэлектрические материалы активно разрабатываются специалистами (сверхрешетки, наноккомпозиты, фононные стекла и др.) [3,4].

Список литературы

- [1] Саqr X.M., Мансур M.X., Мусса M.H. // Термоэлектричество. 2008. № 1. С. 64–73.
- [2] Lieb J., Neugebauer S., Eger A., Linde M., Masar B., Stütz W. // MTZ. 2009. V. 70. P. 1–18.
- [3] Bell L.E., Crane D., La Grandeur J., Koripella C.R., Ayres S. // Abstracts of 29th Internal Conference on Thermoelectrics. Shanghai, China, 2010. P. 41.
- [4] Rowe D.M., Smith J., Thomas G., Min G. // Ibid. 2010. P. 44.
- [5] Korzhuev M.A., Granatkina Yu.V. // Ibid. 2010. P. 224.
- [6] Коржуев M.A. // Физические явления в конденсированном состоянии вещества. Чита: Забайкальский госуниверситет, 2009. С. 51–56.
- [7] Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.В. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1974. 448 с.