

УДК 621.315.592:541.124.16:536.75

**Коржуев М.А., Свечникова Т.Е.**

Коржуев М.А.

Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова РАН, Ленинский просп., 49,  
Москва, 119991, Россия

Свечникова Т.Е.

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ  
ОГРАНИЧЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ  
МОЩНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ  
И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

---

Анализируются экспериментальные характеристики автомобильных термоэлектрических генераторов (АТЭГ), установленных на выхлопную трубу (ВТ) автомобиля. Показано, что низкие полезные мощности  $W_e = 0.2 - 0.6$  кВт и неэффективность рекуперации тепловых потерь (РТП) автомобиля с помощью АТЭГ (общий выигрыш в мощности автомобиля  $\Delta W \sim 0$ ) связаны с трудностями теплообмена на границе «выхлопные газы ВТ/АТЭГ». В результате удельная мощность АТЭГ оказывается низкой  $\hat{W}^{АТЭГ} = W_e/m^{АТЭГ} \sim 20 - 30$  Вт/кг ( $m^{АТЭГ}$  – масса АТЭГ), что объясняется в работе в рамках теории А.С. Охотина, учитывающей высокие тепловые сопротивления теплообменников АТЭГ. Показано, что использование для расчетов АТЭГ теории А.Ф. Иоффе, которая не учитывает тепловых сопротивлений теплообменников, дает завышенные оценки  $W_e$ ,  $\Delta W$ ,  $\hat{W}^{АТЭГ}$  и КПД  $\eta^{АТЭГ}$ , а также неверный прогноз оптимальной ширины запрещенной зоны  $E_g^{opt}$  материалов ветвей. Показано, что перспективы использования АТЭГ большой мощности в автомобилях в настоящее время существенно ограничены. Обсуждаются возможности улучшения характеристик АТЭГ.

**Ключевые слова:** термоэлектричество, автомобили, рекуперация тепловых потерь.

*Experimental characteristics of automotive thermoelectric generators (ATEGs) placed on exhaust pipe (EP) are analyzed. It is shown that low net powers  $W_e = 0.2 - 0.6$  kW and inefficient automotive waste heat recovery (WHR) using ATEG (total gain in car power  $\Delta W \sim 0$ ) are related to the difficulties of heat exchange on the “exhaust gas (EG)/ ATEG” boundary. As a result, the specific power of ATEG also appears to be low  $\hat{W}^{ATEG} = W_e/m^{ATEG} \sim 20 - 30$  W/kg (here,  $m^{ATEG}$  is ATEG mass). Low values of  $W_e$  and  $\hat{W}^{ATEG}$  are explained in the framework of A.S. Okhotin theory taking into account high thermal resistances of ATEG heat exchangers. It is shown that using A.F. Ioffe theory that does not take into account thermal resistances of heat exchangers, yields overestimated values of  $W_e$ ,  $\Delta W$ ,  $\hat{W}^{ATEG}$  and efficiency  $\eta^{ATEG}$ , and also the incorrect prediction of optimum energy gap  $E_g^{opt}$  of the leg materials. It is shown that the prospects of using high-power ATEGs in cars are essentially limited today. The ways for improvement of ATEG characteristics are discussed.*

**Key words:** thermoelectricity, cars, waste heat recovery.

## Введение

В настоящее время мировой автомобильный парк превысил  $\sim 1$  млрд. единиц, в результате автомобили стали основными загрязнителями атмосферы Земли выхлопными газами (ВГ) и бросовым теплом [1]. Современные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) автомобилей имеют достаточно высокий КПД  $\eta^{\text{ДВС}} \sim 0.4$ . Однако значительная часть мощности сгорающего топлива  $Q_0$  и часть полезной мощности ДВС  $W^{\text{ДВС}} = \eta^{\text{ДВС}} Q_0$  безвозвратно рассеивается в атмосферу через выхлопную трубу (ВТ) ( $Q_0^{\text{ВТ}} \sim 0.3 Q_0$ ), систему охлаждения (СО) ( $Q_0^{\text{СО}} \sim 0.3 Q_0$ ), трансмиссию и вспомогательные механизмы автомобиля ( $L$ ) ( $Q_0^L \sim 0.2 Q_0$ ) (рис. 1 а). В результате на преодоление силы сопротивления движению автомобиля  $F_R$  обычно расходуется мощность не более  $W_T^{\text{АВТО}} \sim \frac{1}{2} W^{\text{ДВС}} \sim 0.2 Q_0$  [3, 4]. Отсюда возникает необходимость сбора и последующего использования (рекуперации) тепловых потерь (РТП) и экономии топлива автомобилем [1, 4-6]. Для этих целей с середины XX века в различных странах разрабатываются автомобильные термоэлектрические генераторы (АТЭГ), которые размещаются на выхлопной трубе (ВТ) автомобиля (рис. 1 б) [3-12]. При этом часть тепла ВГ  $Q_0^{\text{АТЭГ}} < Q_0^{\text{ВТ}}$  отводится на вход АТЭГ, где преобразуется в полезную электрическую мощность  $W_e = \eta^{\text{АТЭГ}} Q_0^{\text{АТЭГ}}$  с помощью эффекта Зеебека ( $\eta^{\text{АТЭГ}} \leq 0.01 - 0.05$  и  $Q_0^{\text{АТЭГ}}$  – КПД и мощность теплового потока на входе АТЭГ) (рис. 1 б) [1, 2]. В результате при условии  $V_0 = \text{const}$  мощность автомобиля увеличится на величину  $\Delta W = W_e$ , а относительный расход топлива соответственно уменьшится  $\delta A = \Delta A/A \sim -\Delta W/0.2 Q_0 < 0$  ( $A$  и  $\Delta A$  – исходный расход топлива автомобилем и его изменение при установке АТЭГ,  $V_0$  – скорость движения автомобиля) [4, 13].

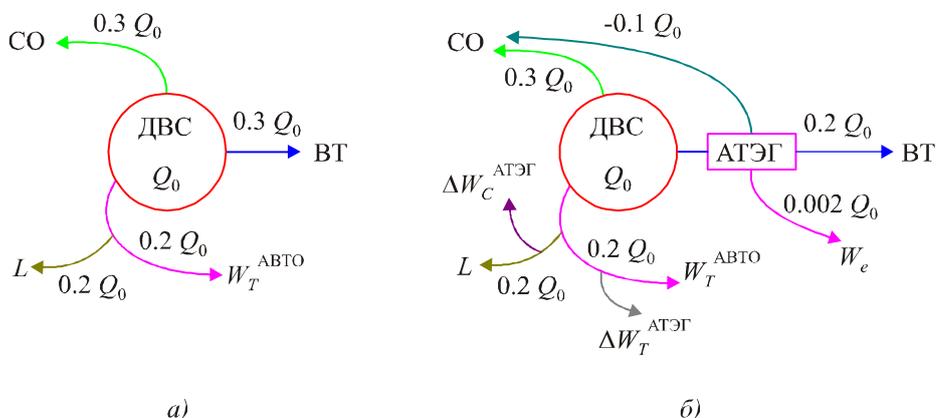


Рис. 1. Поток тепла и энергии в автомобиле до (а) и после (б) установки АТЭГ на ВТ. Здесь  $Q_0$  и  $W_T^{\text{АВТО}}$  – мощность сгорающего топлива и ее часть, затраченная на движение автомобиля;  $L$  – потери в механизмах автомобиля;  $\Delta W_T^{\text{АТЭГ}}$  и  $\Delta W_C^{\text{АТЭГ}}$  – затраты на транспортировку и охлаждение АТЭГ ( $\eta^{\text{АТЭГ}} = 0.02$ ;  $W_e = 0.2 \text{ кВт}$ ;  $\Delta W_T^{\text{АТЭГ}} = 0.1 \text{ кВт}$ ;  $\Delta W_C^{\text{АТЭГ}} = 0.2 \text{ кВт}$ ).

Однако на практике соотношение  $\Delta W = W_e$  в автомобиле никогда не выполняется, поскольку АТЭГ нуждается в затратах части мощности ДВС  $\Delta W^{\text{ДВС}} = \Delta W_T^{\text{АТЭГ}} + \Delta W_C^{\text{АТЭГ}}$  на свою транспортировку ( $\Delta W_T^{\text{АТЭГ}} > 0$ ) и принудительное охлаждение холодных спаев ( $\Delta W_C^{\text{АТЭГ}} \geq 0$ ) (рис. 1 б) [13-15]. При этом мощность РТП автомобиля соответственно уменьшится

$$\Delta W = W_e - \Delta W_T^{\text{АТЭГ}} - \Delta W_C^{\text{АТЭГ}} \quad (1)$$

и даже может стать отрицательной в случае, если сервисные затраты  $\Delta W_T^{\text{АТЭГ}}$  и  $\Delta W_C^{\text{АТЭГ}}$  окажутся значительными [13-15]. Таким образом, на практике возможны два основных режима работы

АТЭГ в автомобиле: 1) режим реальной РТП с экономией топлива ( $0 < \Delta W < W_e$ ,  $\delta A < 0$ ); 2) режим простой генерации энергии (ПГЭ), когда РТП не происходит, а общий расход топлива и выброс парниковых газов автомобилем увеличивается ( $\Delta W < 0 < W_e$ ,  $\delta A > 0$ ) [13-18].

Целью настоящей работы было исследование современного состояния проблемы АТЭГ. Анализируются экспериментальные характеристики прототипов серийных АТЭГ, разработанных в последнее время для мотоциклов, легковых автомобилей и грузовиков [1-5, 7]. Показано, что во всех случаях эксплуатационные характеристики АТЭГ оказываются существенно ниже ожидаемых разработчиками, в результате чего большинство АТЭГ работают в малоэффективном режиме ПГЭ [3, 6, 13]. Низкая эффективность современных АТЭГ связывается с термодинамическими ограничениями их удельной мощности  $\dot{W}^{АТЭГ} = W_e/m^{АТЭГ} < 20 - 30$  Вт/кг ( $m^{АТЭГ}$  – масса АТЭГ) в системе «автомобиль + АТЭГ». Низкие значения  $\dot{W}^{АТЭГ}$  объяснены в работе с помощью теории А.С. Охотина [20], учитывающей большие паразитные тепловые сопротивления теплообменников АТЭГ  $R_{ТО}^{АТЭГ}$  на границе «ВГ/АТЭГ». Показано, что из-за систематически больших  $R_{ТО}^{АТЭГ}$  перспективы использования АТЭГ большой мощности в автомобилях в настоящее время существенно ограничены. Обсуждаются различные пути улучшения характеристик АТЭГ, среди которых основным представляется совершенствование их теплообменников.

### 1. Система «автомобиль + АТЭГ»

При установке АТЭГ в автомобиле образуется сложная термодинамическая система «автомобиль + АТЭГ», содержащая две разнородные тепловые машины (ТМ) – ДВС и АТЭГ [13-15]. Установка АТЭГ увеличивает общую массу автомобиля  $m^{АВТО+АТЭГ} = m^{АВТО} + m^{АТЭГ}$ , площадь его поперечного сечения  $\Delta S^{АВТО+АТЭГ} \approx \Delta S^{АВТО} + \Delta S^{АТЭГ}$ , в результате чего возрастает сила сопротивления движению  $F_R \rightarrow F_R + \Delta F_R$  (рис. 2) [3]. Кроме того, с ростом  $W_e > 0$  в системе «автомобиль + АТЭГ» развивается конфликт ДВС и АТЭГ. Причиной конфликта является конкуренция ТМ за источники и стоки тепла в системе [14]. Развитие конфликта ТМ в системе «автомобиль + АТЭГ» снижает эффективность работы ДВС и ограничивает рост  $W_e$  и  $\Delta W$  АТЭГ [13-18]. Ниже рассмотрено влияние всех перечисленных выше факторов на экспериментальные характеристики АТЭГ.

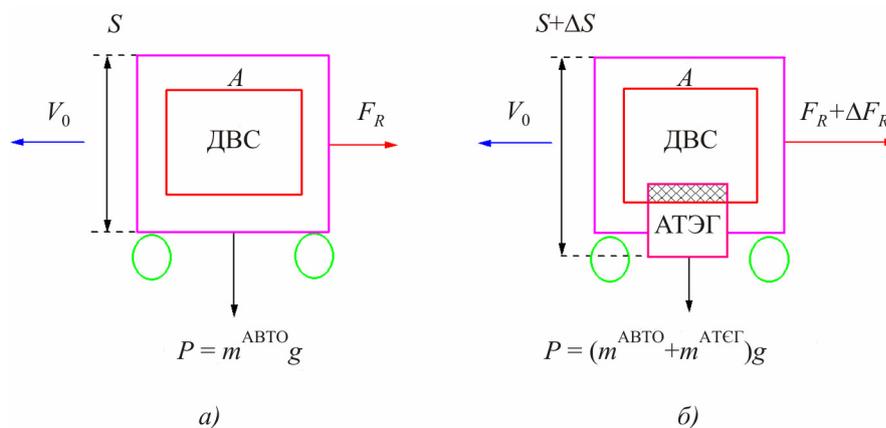


Рис. 2. Изменения массы  $m$ , веса  $P$ , площади поперечного сечения  $\Delta S$ , силы сопротивления движению  $\Delta F_R$  и появление области конфликта тепловых машин (ДВС и АТЭГ) (заштрихована) при установке АТЭГ на автомобиль (А) (а  $\rightarrow$  б).

### 1.1. Экспериментальные характеристики АТЭГ

В табл. 1 приведены экспериментальные характеристики прототипов серийных АТЭГ, разработанных для мотоциклов, легковых автомобилей, пикапов и грузовиков [1, 2-7].

Таблица 1

*Характеристики прототипов серийных АТЭГ, разработанных  
для различных транспортных средств [1, 2-7]*

№	Характеристики	Мотоцикл <sup>a</sup>	Легковой автомобиль <sup>b</sup>	Пикап <sup>c</sup>	Грузовик <sup>d</sup>
1. Транспортное средство	Литраж ( $V$ ), л и тип двигателя	0.4 Б	3.4 Д	5.3 Б	14 Д
	Мощность ДВС ( $W^{ДВС}$ ), кВт	7.4	125	146	162
	Масса ( $m^{АВТО}$ ), кг	150	1545	2770	10000
	Удельная мощность ( $\dot{W}^{АВТО}$ ), Вт/кг	49	81	53	16.2
	Удельная мощность движения ( $\dot{W}_T = \frac{1}{2}\dot{W}^{ДВС}$ ), Вт/кг	24	40	26	8
	Площадь поперечного сечения ( $S^{АВТО}$ ), м <sup>2</sup>	0.7	2.5	4	5
2. АТЭГ	Достигнутая максимальная мощность ( $W_e$ ), Вт	10	200	300* 600**	400*** 1000****
	Необходимая мощность ( $W_e$ ), Вт	100 – 200	~ 600	~ 1000	> 1000
	Материал ветвей АТЭГ	$Fe_2VAl$	$(Bi, Sb)_2Te_3$	$PbTe$	$(Bi, Sb)_2Te_3$
	Масса ( $m^{АТЭГ}$ ), кг	~ 3	13	39.1	13
	Удельная мощность ( $\dot{W}^{АТЭГ}$ ), Вт/кг	3.3	15	7.7* 15.4**	30.8*** 76.9****
	Габариты ( $\Delta S^{АТЭГ}$ ), см <sup>2</sup>	100	220	590	412
	Масс-фактор ( $m^*$ )	0.02	0.008	0.014	0.001
	Форм-фактор ( $S^*$ )	0.014	0.009	0.015	0.008
3. Потери мощности	Потери на масс-фактор $m^*$ ( $\Delta W_{T1}^{АТЭГ}$ ), Вт	20	143	279	29
	Потери на форм-фактор $S^*$ ( $\Delta W_{T2}^{АТЭГ}$ ), Вт	14	149	292	180
	Общий выигрыш в мощности ( $\Delta W$ ), Вт	-24	-92	-271* 29**	191*** 791****
	Изменение расхода топлива, ( $\delta A = \Delta W / (0.2 Q_0)$ ), %	0.65	0.15	0.37* -0.04**	-0.24*** -0.97****

<sup>a)</sup> Suzuki [7]; <sup>b)</sup> BMW531 [5, 6]; <sup>c)</sup> GM Sierra 1500 [3]; <sup>d)</sup> ДВС NTC-350 [3]; \* – движение в городе ( $V_0 \sim 60$  км/ч); \*\* – движение по скоростной автостраде ( $V_0 \sim 110 - 150$  км/ч) [3]; \*\*\* – получено на практике; \*\*\*\* – ожидаемое расчетное значение. Тип двигателя: Б – бензиновый; Д – дизель.

По данным работ [1, 2-7] нами были рассчитаны удельная мощность транспортных средств  $\hat{W}^{ABTO} = W^{ABTO}/m^{ABTO}$ , а также удельная мощность установленных на них АТЭГ  $\hat{W}^{AT\text{ЭГ}} = W_e/m^{AT\text{ЭГ}}$ , мощность РТП  $\Delta W$  и изменение относительного расхода топлива  $\delta A$  автомобилем при работе АТЭГ на полную мощность (табл. 1). При расчетах использовали соотношение (1), где для простоты полагали  $\Delta W_C = 0$ ;  $\Delta W_T^{AT\text{ЭГ}} = \Delta W_{T1}^{AT\text{ЭГ}} + \Delta W_{T2}^{AT\text{ЭГ}}$  ( $\Delta W_{T1}^{AT\text{ЭГ}} = 0.1 W^{ДВС} \cdot m^*$  и  $\Delta W_{T2}^{AT\text{ЭГ}} = 0.1 W^{ДВС} S^*$  – дополнительные затраты мощности ДВС на преодоление трения качения и сопротивления воздуха при движении автомобиля,  $m^* = m^{AT\text{ЭГ}}/m^{ABTO}$  и  $S^* = \Delta S^{AT\text{ЭГ}}/S^{ABTO}$  – масс- и форм-фактор АТЭГ в автомобиле, соответственно). Из табл. 1 видно, что эффективность работы современных АТЭГ, в целом, оказывается низкой.<sup>1</sup> Максимальные величины  $W_e$  АТЭГ не превышали  $\sim 1/3 - 2/3$  от расчетных значений, необходимых для электропитания транспортных средств. При этом все АТЭГ (табл. 1) работали преимущественно в малоэффективном режиме ПГЭ ( $\Delta W < 0$ ) (мотоциклы, легковые автомобили), или в режиме РТП, близкому к режиму ПГЭ (пикапы, грузовики). Смена режимов ПГЭ  $\rightarrow$  РТП (табл. 1) была связана с уменьшением масс-фактора  $m^*$  и форм-фактора  $S^*$  АТЭГ в ряду мотоцикл  $\rightarrow$  грузовик.

В результате на практике РТП оказывалась возможной только для грузовиков ( $m^{ABTO} > 6$  т;  $\Delta W > 0$ ,  $\delta A < 0$ ), но не для легковых автомобилей, пикапов ( $m^{ABTO} = 2 - 5$  т;  $\Delta W$ ,  $\delta A \sim 0$ ) и мотоциклов ( $m^{ABTO} \ll 1$  т;  $\Delta W < 0$ ,  $\delta A > 0$ ). Из табл. 1 видно также, что при  $m^* = \text{const}$  мощность РТП  $\Delta W$  можно увеличить путем уменьшения форм-фактора АТЭГ ( $S^* \rightarrow 0$ ).<sup>2</sup> В этом случае величина  $\Delta W$  будет ограничиваться только двумя основными факторами –  $W_e$  и  $m^{AT\text{ЭГ}}$ , определяющими удельную мощность АТЭГ  $\hat{W}^{AT\text{ЭГ}}$ . Согласно нашим расчетам, удельные мощности АТЭГ для всех транспортных средств оказывались низкими  $\hat{W}^{AT\text{ЭГ}} < 20 - 30$  Вт/кг и иногда не превышали даже удельной мощности ДВС, затраченной на движение транспортного средства  $\hat{W}_T^{ABTO} = 1/2 \hat{W}^{ДВС} \sim 15 - 26$  Вт/кг (табл. 1) [4, 13]. В результате для мотоциклов, легковых автомобилей и пикапов имеем  $\hat{W}_T^{ABTO} > \hat{W}_e$ , то есть выигрыш в общей мощности автомобиля, получаемый за счет полезной мощности  $W_e$  АТЭГ, не компенсирует сервисных затрат ДВС даже на транспортировку АТЭГ (табл. 1). Для грузовиков же получается  $W_e > W_T$ , что связано с их относительно низкими удельными затратами мощности на движение ( $\hat{W}^{ABTO} < \hat{W}^{AT\text{ЭГ}}$ ) (табл. 1). Вопрос о низкой удельной мощности  $\hat{W}^{AT\text{ЭГ}}$  требует специального обсуждения.

## 1.2. Низкая удельная мощность АТЭГ

В табл. 2 дано сравнение удельной мощности  $\hat{W}^{AT\text{ЭГ}}$  с удельной мощностью термоэлектрических генераторов (ТЭГ) других типов ( $\hat{W}^{T\text{ЭГ}}$ ), использующих жидкие или твердые теплоносители [19, 21-23]. Согласно табл. 2, при использовании одних и тех же термоэлектрических материалов (ТЭМ) имеем  $\hat{W}^{T\text{ЭГ}}/\hat{W}^{AT\text{ЭГ}} \geq 10 - 20$ . Соответственно при условии  $W_e = \text{const}$  массы АТЭГ будут существенно превышать массы ТЭГ других типов ( $m^{AT\text{ЭГ}}/m^{T\text{ЭГ}} \sim 10 - 30$  и более) (табл. 2).

Как известно, масса ветвей  $m_L$ , необходимая для получения заданной полезной мощности  $W_e$  ТЭГ, дается выражением

$$m_L = Vd = 2W_e l^2 d / (\Delta A T^2), \quad (2)$$

<sup>1</sup> Характеристики АТЭГ (табл. 1) получены при движении автомобилей по автостраде с предельной скоростью  $V_0 \sim 110 - 150$  км/ч. При движении в городе ( $V_0 \sim 30 - 60$  км/ч), они снизятся еще в 3 - 6 раз.

<sup>2</sup> Это можно сделать за счет использования обтекателей и «утопленного» монтажа АТЭГ [3, 9].

где  $V$  и  $d$  – объем и плотность ТЭМ соответственно;  $l$  – высота ветвей;  $A = Z\kappa = \alpha^2\sigma$  – параметр термоэлектрической мощности;  $\alpha$ ,  $\sigma$  и  $\kappa$  – дифференциальная термоЭДС, удельная электропроводность и теплопроводность материала;  $\Delta T$  – рабочий перепад температур на ветвях термопары [22]. Из выражения (2) следует, что для одних и тех же ТЭМ ( $A$ ,  $d = \text{const}$ ), соотношение  $\dot{W}^{\text{ТЭГ}}/\dot{W}^{\text{АТЭГ}} \sim 10 - 30$  (табл. 2) можно объяснить увеличенной высотой ветвей  $l$  АТЭГ и уменьшенными рабочими перепадами температур на их ветвях  $\Delta T$ . Сравнение конструктивных особенностей АТЭГ и ТЭГ подтвердило указанное предположение. Действительно, высота ветвей АТЭГ достигает  $l^{\text{АТЭГ}} \sim 5; 7.5$  и  $10$  мм [3, 4, 7, 22], тогда как в ТЭГ других типов она значительно меньше (обычно  $l^{\text{ТЭГ}} \leq 1 - 3$  мм) [21, 23]. Таким же образом рабочие перепады температур на ветвях АТЭГ оказываются существенно меньшими  $\Delta T^{\text{АТЭГ}} \sim \frac{1}{2} \Delta T_0$  [9, 24] по сравнению с ТЭГ других типов, где обычно  $\Delta T^{\text{ТЭГ}} \sim \Delta T_0$ , ( $\Delta T_0$  – располагаемый перепад температур, обеспечиваемый источником тепла) [21, 23]. В результате при прочих равных условиях имеем  $W_e^{\text{ТЭГ}}/W_e^{\text{АТЭГ}} \sim 2$ ,  $m^{\text{АТЭГ}}/m^{\text{ТЭГ}} \sim 2 - 10$ , что дает  $\dot{W}^{\text{ТЭГ}}/\dot{W}^{\text{АТЭГ}} \sim 10 - 20$  в согласии с табл. 2. Низкие значения  $\dot{W}^{\text{АТЭГ}}$  связаны с трудностями теплообмена в системе «автомобиль + АТЭГ» [2, 13-15].

*Таблица 2*

*Сравнение удельной мощности  $\dot{W}^{\text{АТЭГ}}$  с удельной мощностью термоэлектрических генераторов других типов  $\dot{W}^{\text{ТЭГ}}$ , использующих жидкие или твердые теплоносители*

Материал ветвей	Плотность ( $d$ ), г/см <sup>3</sup>	Удельная мощность ( $\dot{W}$ ), кВт/кг		Отношение $\dot{W}^{\text{ТЭГ}}/\dot{W}^{\text{АТЭГ}}$
		АТЭГ	Другие ТЭГ	
<i>Bi-Sb-Te-Se</i>	6.5 – 7.8	0.015 [3]	0.17 – 0.3 [21] ~ 0.2 [4]	11 – 20
<i>PbTe</i>	8.16	0.008 – 0.015 [3]	0.2 – 0.25 [4, 21]	13 – 31
<i>SiGe</i>	2.5 – 2.9	0.003 [3, 8]	≤ 1.2 [21]	400
<i>Mg<sub>2</sub>Si<sub>0.4</sub>Sn<sub>0.6</sub></i>	~ 2.9	~ 0.07 – 0.1 [8, 23]	~ 0.8 – 1 [23]	8 – 14

## 2. Расчеты АТЭГ

### 2.1. Теплообмен в системе «автомобиль + АТЭГ»

Будучи, в отличие от ДВС, двигателем «внешнего» сгорания, АТЭГ нуждается в двух дополнительных теплообменниках, подключаемых к источникам и стокам тепла в автомобиле [2, 15]. Для стока тепла АТЭГ обычно используется «штатная» или дополнительная автономная СО с водяным или воздушным охлаждением [3-6].<sup>3</sup> В качестве источников тепла для АТЭГ, кроме ВТ, мы рассмотрим также ДВС и СО, с которыми связаны дополнительные резервы РПТ автомобилей (рис. 1). Тепло в ДВС, ВТ и СО переносится за счет движения нагретых газов и жидкостей в трубах. В АТЭГ тепло переносится фононами и электронами за счет теплопроводности ветвей и эффекта Пельтье (в режиме генерации энергии) [2, 17]. При этом механизмы теплопереноса в АТЭГ оказываются менее эффективными, чем комбинированный тепло- и массоперенос в трубах [13-15]. В результате тепловое сопротивление АТЭГ ( $R_T^{\text{АТЭГ}}$ ) существенно превышает тепловые сопротивления ДВС, ВТ, СО ( $R_T^{\text{ДВС, ВТ, СО}}$ ), что определяет трудности теплообмена в системе [13, 14]. Кроме того, поскольку массоперенос в ветвях АТЭГ невозможен,<sup>4</sup> для отвода тепла к АТЭГ в

<sup>3</sup> Оптимальной считается использование штатной СО автомобиля [3, 4].

<sup>4</sup> Исключение составляют «проницаемые» термоэлементы [25].

автомобиле можно использовать только параллельное подключение АТЭГ к трубам [13, 16]. В этом случае к АТЭГ можно отвести не весь тепловой поток в трубе ( $Q_0^{\text{ДВС, ВТ, СО}}$ ), а только его малую часть  $Q_0^{\text{АТЭГ}} \sim Q_0^{\text{ДВС, ВТ, СО}} \cdot R_T^{\text{ДВС, ВТ, СО}} / (R_T^{\text{АТЭГ}} + R_T^{\text{ДВС, ВТ, СО}}) \ll Q_0$ , обратно пропорциональную  $R_T^{\text{АТЭГ}}$ .

Схема параллельного подключения АТЭГ к ВТ показана на рис. 3. Из рис. 3 видно, что процессу отвода тепла от ВТ к АТЭГ (стрелка) препятствуют неподвижные слои газа и нагара (кокса) с низкой теплопроводностью, адсорбированные на границе теплообмена «ВТ/ВТ» (2, 4) [2, 23, 26]. Слой адсорбированного газа (толщиной  $d \sim 1 - 2$  мкм) постоянно присутствует на внутренней стороне ВТ при любых скоростях движения ВГ в ВТ ( $V^{\text{ВГ}}$ ) (2, рис. 3) [2]. При этом слои кокса (4, рис. 3) могут достигать толщины  $c \sim 1$  мм и более в «холодных» частях ВТ [13, 16].

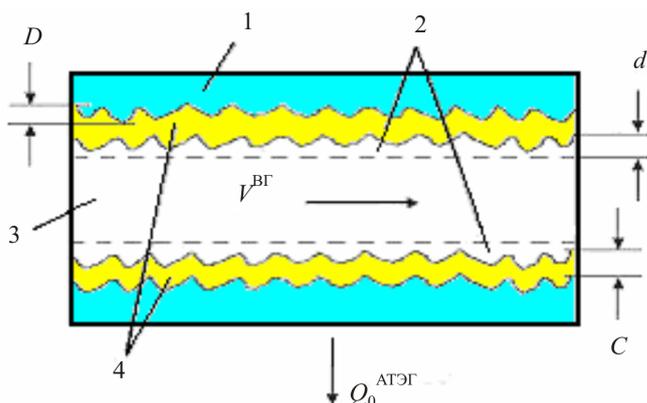


Рис. 3. Параллельное подключение АТЭГ к ВТ. 1 – корпус ВТ; 2 – слой адсорбированного газа; 3 – ВГ; 4 – кокс;  $d, c$  – толщина слоев газа и кокса;  $V^{\text{ВГ}}$  – скорость ВГ;  $D$  – шероховатость внутренней поверхности ВТ;  $Q_0^{\text{АТЭГ}}$  – входной тепловой поток АТЭГ.

Вследствие высоких тепловых сопротивлений адсорбированных слоев (2, 4, рис. 3) тепловые сопротивления АТЭГ существенно увеличиваются. При этом входные тепловые потоки  $Q_0^{\text{АТЭГ}}$  и рабочие перепады температур на ветвях АТЭГ соответственно уменьшаются  $\Delta T \sim \Delta T_0 \cdot R_T^{\text{АТЭГ}} / (R_{\text{ТО}}^T + R_{\text{АТЭГ}}^T)$  [11, 13, 24]. Указанные особенности теплообмена в системе (АВТОМОБИЛЬ + АТЭГ) были учтены нами при выборе тепловой модели АТЭГ [13].

## 2.2. Тепловая модель АТЭГ

Использованная в работе тепловая модель АТЭГ показана на рис. 4 [13]. Модель учитывает тепловые сопротивления ВТ  $R_{\text{ВТ}}^T = R_0^T + R_1^T$  ( $R_0^T$  и  $R_1^T$  – начало и оставшаяся часть ВТ), ветвей термопар  $R_3^T$ , а также «горячего» и «холодного» теплообменников  $R_2^T$  и  $R_4^T$  АТЭГ ( $R_{\text{ТО}}^T = R_2^T + R_4^T$ ). В табл. 3 приведены формулы расчета параметров АТЭГ для модели (рис. 4), отвечающие режимам максимальной мощности (I) и максимального КПД (II). Граничные условия соответствовали: 1) постоянной температуре спаев ( $T_h = \text{const}, T_c = \text{const}$ ) (теория А.Ф. Иоффе) [19] и 2) постоянной температуре теплоносителей ( $T_h' = \text{const}, T_c' = \text{const}$ ) (теория А.С. Охотина) [20].

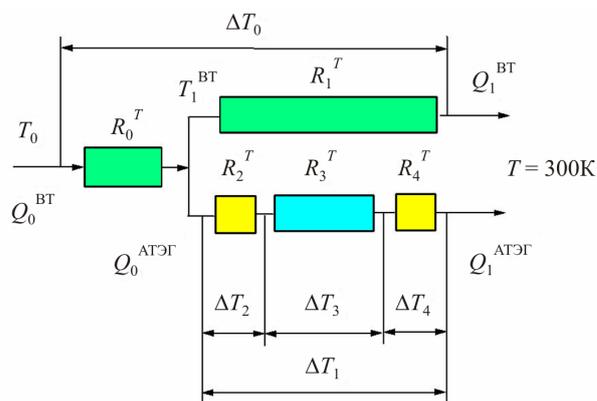


Рис. 4. Тепловая модель параллельного подключения АТЭГ к ВТ и соответствующие перепады температур  $\Delta T_i$  (режим холостого хода АТЭГ). Тепловые сопротивления секций:  $R_0^T$  – начало ВТ;  $R_1^T$  – оставшаяся часть ВТ;  $R_3^T$  – ветви термопар;  $R_2^T$  и  $R_4^T$  – «горячий» и «холодный» теплообменники АТЭГ [13].

Таблица 3

Оптимальные значения параметров ТЭГ в режимах максимальной мощности (I) и максимального КПД (II) при различных граничных условиях. Затемнена область соотношений, пригодных для расчетов АТЭГ\*

Режим	Параметры	Граничные условия	
		Фиксированная температура спаев: $T_h = \text{const}, T_c = \text{const}$ [19]	Фиксированная температура теплоносителей: $T_h' = \text{const}, T_c' = \text{const}$ [20]
I. Максимальной мощности	Относительная электрическая нагрузка, $M = R/r$	1	$A^* = M_0$
	Мощность, $W_e$	$E_{xx}^2/(4r) = W\Delta T^2/4$	$E_{xx}^2/(4A^*r) = W\Delta T^2/(4A^*)$
	Перепад температуры на ветвях, $\Delta T$	$(T_h - T_c)$	$(T_h' - T_c')(A^* + 1)/(4A^*)$
	КПД, $\eta (W_e^{\max})$	$\eta_c / (2 + 4/ZT_h - \eta_c/2)$	$\sim 0.22 \eta_c (M_0 - 1)/(M_0 + T_c'/T_h')$
	Оптимальная безразмерная высота ветвей, $l_0$	$\beta \sim 0.1$	$Bi = M_0$
II. Максимального КПД	Относительная электрическая нагрузка, $M = R/r$	$M_0$	$M_0$
	Мощность, $W_e$	$M_0 E_{xz}^2/[r(1 + M_0)^2]$	0
	Перепад температуры на ветвях, $\Delta T$	$(T_h - T_c)$	$(T_h' - T_c')$
	КПД, $\eta (W_e^{\max})$	$\eta_c (M_0 - 1)/(M_0 + T_c/T_h)$	$\eta_c (M_0 - 1)/(M_0 + T_c'/T_h')$
	Оптимальная безразмерная высота ветвей, $l_0$	$\infty$	$\infty$

\* Здесь  $M = R/r$  – относительная электрическая нагрузка АТЭГ;  $R$  – электрическое сопротивление нагрузки;  $r = r_0(1 + \beta)$  – электрическое сопротивление АТЭГ;  $r_0$  – электрическое сопротивление ветвей;  $\beta = (r_j + r_c)/r_{sc}$  – коэффициент электрических потерь;  $r_j, r_c$  и  $r_{sc}$  – электрические сопротивления контактов, коммутационных пластин и полупроводникового материала ветвей;  $M_0 = (1 + Z\bar{T})^{1/2}$ ;  $Z = Z_0/(1 + \beta)$  и  $Z_0$  – термоэлектрическая добротность ТЭГ с учетом и без учета электрических потерь;  $T = \frac{1}{2}(T_h + T_c)$  – средняя температура;  $E_{xx, xz} = (\alpha_p - \alpha_n)\Delta T_{xx, xz}$  – ЭДС холостого хода и короткого замыкания термопар;  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$  – дифференциальная термоЭДС  $p$ - и  $n$ -ветвей термопар;  $\eta_c = (T_h - T_c)/T_h$  – фактор Карно;  $A^* = E_{xx}/E_{xz} = (1 + Z\bar{T})/(1 + Bi)$  – постоянная АТЭГ;  $R^T = (R_3 + R_4 + R_5)$  – сумма тепловых сопротивлений ветвей и теплопереходов;  $Bi = R_{nn}^T/R_{mo}^T$  – отношение тепловых сопротивлений полупроводниковых ветвей АТЭГ и теплообменников (интегральный критерий Био АТЭГ).

Сравнение рис. 4 и табл. 3 показывает, что теория Иоффе [19] учитывает только вклад ветвей термопар ( $R_3^T$ ) и их контактных электрических сопротивлений (через параметр  $\beta$ ) в общий тепловой и электрический баланс АТЭГ ( $R_3^T \neq 0, R_0^T = R_1^T = R_2^T = R_4^T = 0$ , интегральный критерий Био АТЭГ  $Bi = R_3^T / (R_2^T + R_4^T) = \infty$ ) (рис. 4). Однако на практике для всех АТЭГ имеем  $Bi \sim 1$  [13], так что теория Иоффе [19] оказывается для АТЭГ не лучшим приближением [20]. Ниже показано, что для расчетов АТЭГ лучше подходит теория Охотина [20], учитывающая вклад теплообменников  $R_{TO}^T$  АТЭГ в тепловой баланс системы ( $R_2^T, R_3^T, R_4^T \neq 0, Bi \sim 1$ , рис. 4).

### 2.3. Теории Иоффе и Охотина

Для расчетов АТЭГ использовали слоистую цилиндрическую модель длиной  $L = 0.6$  м, с внутренним диаметром  $D = 0.05$  м [13]. Оптимальную высоту ветвей АТЭГ  $l = 0.5$  см ( $Bi_2 Te_3$ ) оценивали из условия  $Bi = M_0$  (табл. 3). При расчетах толщину пленки адсорбированного газа на поверхности теплообмена «ВГ/ВТ» полагали равной шероховатости ВТ ( $d \sim D \approx 0.0001$  м) (2, рис. 3). Вклад слоя кокса (4, рис. 3) в  $R_2$  для простоты не учитывали [13]. Расчеты вели с использованием законов Ома и Кирхгофа для электрических и тепловых цепей АТЭГ [13]. При расчетах использовали значения  $Q_0^{ДВС, ВТ, СО} = Q_0; 0.3 Q_0; 0.3 Q_0; \Delta T_0^{ДВС, ВТ, СО} \sim 1400, 650$  и  $50$  К, и  $Q_0 = 100$  кВт (бензиновый двигатель мощностью  $W^{ДВС} \approx 54$  л.с.).

На рис. 5 приведены результаты расчетов тепловых сопротивлений  $R^T = \Delta T / Q(A)$  и располагаемых тепловых напоров ( $Q\Delta T$ ) (B) для ДВС (область камеры сгорания), ВТ и СО (область от водяной «рубашки» ДВС до радиатора) при водяном (4) и воздушном охлаждении (5) АТЭГ. Из рис. 5 следует, что во всех случаях для АТЭГ выполняется соотношение  $R_T^{АТЭГ} \gg R_T^{ДВС, ВТ, СО}$ , причем при переходе от водяного охлаждения к воздушному охлаждению тепловое сопротивление  $R_T^{АТЭГ}$  дополнительно возрастало в  $\sim 2$  раза (4  $\rightarrow$  5). Поэтому ниже мы рассматриваем только случай водяного охлаждения АТЭГ ( $R_4^T = 0$ ).<sup>5</sup>

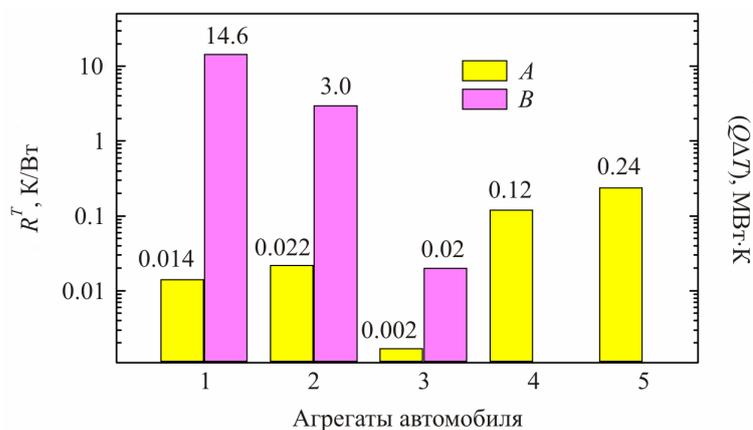


Рис. 5. Тепловые сопротивления  $R^T = \Delta T / Q$  (A) и располагаемые тепловые напоры ( $Q\Delta T$ ) (B) для различных агрегатов автомобиля. 1 – ДВС; 2 – ВТ; 3 – СО; 4 – 5 – АТЭГ стандартных размеров с ветвями из  $Bi_2 Te_3$  ( $l = 5$  мм). Охлаждение АТЭГ: 4 – водяное; 5 – воздушное (расчет по модели рис. 4, при  $R_0 = 0$ ).

На рис. 6 – 8 показаны зависимости КПД  $\eta^{АТЭГ}$ , а также рабочего перепада температур на ветвях  $\Delta T$  и оптимальной высоты ветвей  $l$ , в зависимости от  $ZT$  образцов, рассчитанные с помощью теорий Иоффе [19] и Охотина [20] в режимах максимального КПД и максимальной

<sup>5</sup> Воздушное охлаждение АТЭГ по необходимости применяется только в мотоциклах [1, 7].

мощности (табл. 3). Согласно проведенным расчетам в режиме максимального КПД значения  $\eta$  в теориях Иоффе [19] и Охотина [20] совпадают (кривая 1, рис. 6). Однако при переходе к режиму максимальной мощности (в котором и работает АТЭГ) эти теории дают различные значения  $\eta_W$ . Теория Иоффе дает  $\eta_W \sim 0.8 \eta$ , а теория Охотина –  $\eta_W \sim 0.22 \eta$  (кривые 2 и 3, рис. 6).

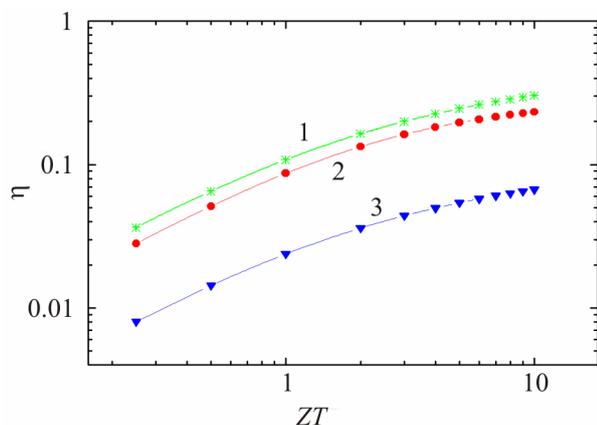


Рис. 6. КПД  $\eta^{АТЭГ}$  в зависимости от термоэлектрической добротности материалов ветвей термопар  $ZT$ . Режимы: 1 – максимального КПД; 2, 3 – максимальной мощности. Теории: 1, 2 – Иоффе [19]; 1, 3 – Охотина [20] ( $T_h = 600 \text{ K}$ ;  $T_c = 300 \text{ K}$ ).

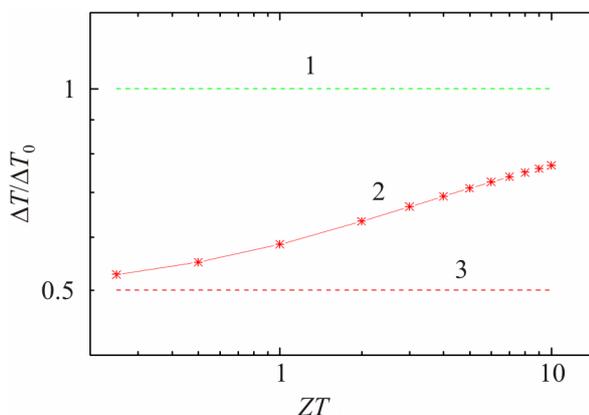


Рис. 7. Отношение рабочего перепада температур  $\Delta T$  на ветвях АТЭГ к разности температур теплоносителей  $\Delta T_0 = (T_h' - T_c')$ . В режиме максимальной мощности в зависимости от термоэлектрической добротности ветвей  $ZT$ . Теории: 1 – Иоффе [19]; 2, 3 – Охотина [20]; 3 – правило Ленца.

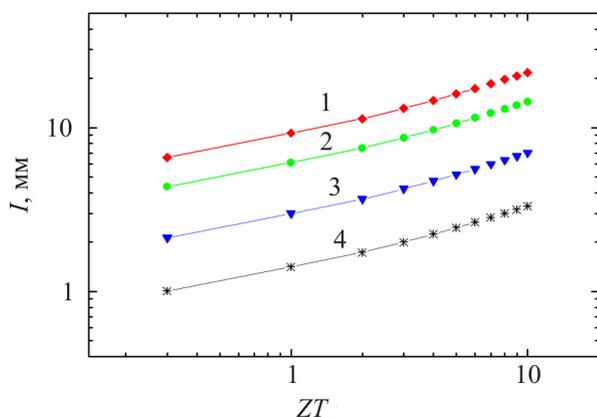


Рис. 8. Оптимальная длина ветвей  $l$  АТЭГ (1 – 3) и ТЭГ (4) в зависимости от термоэлектрической добротности  $ZT$  (водяное охлаждение). Материалы ветвей: 1 –  $PbTe$ ; 2, 4 –  $Bi_2Te_3$ ; 3 – «фононные стекла». Теплопроводности:  $\kappa$ , Вт/(см·К): 1 – 0.025; 2, 4 – 0.015; 3 – 0.005. Теории: 4 – Иоффе [19]; 3 – Охотина [20].

Кроме того, в режиме максимальной мощности теория Охотина [20] предсказывает зависимость перепада температур  $\Delta T$  на ветвях АТЭГ от соотношения его тепловых и электрических характеристик ( $A^*$  и  $M$ ). В результате ожидаемые значения  $W_e$  и оптимальная высота ветвей  $l$  также оказываются зависящими от тепловых сопротивлений теплообменников ( $R_2^T, R_4^T \neq 0$ ) и относительной электрической нагрузки  $M = R/r$  АТЭГ (I, табл. 3). Столь значительное различие теорий Иоффе [19] и Охотина [20] (рис. 6 – 8) связано с учетом в теории [20] вклада больших паразитных тепловых сопротивлений теплообменников  $R_2^T$  и  $R_4^T$  (рис. 4), которые в теории [19] полагаются равными нулю. Полученный результат можно объяснить с помощью известного правила Х. Ленца (рис. 9), которое применимо к любому источнику энергии, работающему в режиме максимальной мощности [27, 28]. Поскольку любой ТЭГ является тепловой и электрической машиной одновременно, правило Ленца, вообще говоря, должно применяться к нему дважды, а именно, сначала к тепловым, а затем к электрическим цепям [17].



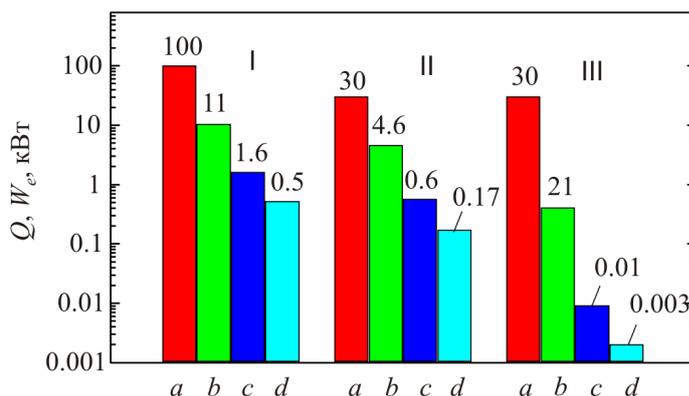


Рис. 10. Располагаемые входные тепловые потоки автомобиля  $Q$  (a), их доля, которую можно отвести к АТЭГ ( $Q_0^{АТЭГ}$ ) (b) и максимальная полезная мощность  $W_e^{max}$  АТЭГ (c, d) (водяное охлаждение). Теории: c – Иоффе [19]; d – Охотина [20]. Место установки АТЭГ: I – ДВС; II – ВТ; III – СО. ( $Q_0 = 100$  кВт,  $ZT = 1$ ).

Последние оценки находятся в согласии с экспериментом (табл. 1), поэтому теория Охотина [20] является лучшим приближением для расчетов АТЭГ, чем теория Иоффе [19].<sup>7</sup> Дальнейшее развитие теории АТЭГ предполагает детальный учет взаимодействия ТМ в системе «автомобиль + АТЭГ».

### 3. Конфликт ДВС и АТЭГ

#### 3.1. Размещение АТЭГ в автомобиле

Конфликт различных ТМ, образующих одну термодинамическую систему, представляет собой широко распространенное в технике явление [2]. Особенностью конфликта ДВС и АТЭГ в системе «автомобиль-АТЭГ» является его зависимость от места расположения АТЭГ в автомобиле [13]. Согласно рис. 3 и 10, в качестве источника тепла для АТЭГ в автомобиле по параметрам  $R^T$  и  $(Q_0\Delta T)$  подходят ВТ ( $Q_0^{АТЭГ} \leq 0.3Q_0$ ) и ДВС ( $Q_0^{АТЭГ} \leq Q_0$ ). Установка АТЭГ на СО ( $Q_0^{АТЭГ} \leq 0.3Q_0$ ) оказывается неэффективной вследствие малости  $R^T$  и  $(Q_0^{CO}\Delta T)$  СО.<sup>8</sup> Однако установка АТЭГ в ДВС также оказывается неэффективной из-за конфликта ДВС и АТЭГ, развивающегося с ростом  $W_e$  в системе «автомобиль + АТЭГ» [13-15]. Действительно, при установке АТЭГ в ДВС ТМ конкурируют за мощность сжигаемого топлива  $Q_0$  [15]. В этом случае конфликт ТМ быстро развивается с ростом  $W_e$ , что приводит к резкому снижению общего КПД системы (ДВС + АТЭГ)

$$\eta^{ДВС+АТЭГ} = \eta^{ДВС} (1 - \delta) + \eta^{АТЭГ} \delta, \quad (3)$$

где  $\delta = Q_0^{АТЭГ}/Q_0$  – доля тепла, отводимая от ДВС к АТЭГ [15]. Снижение  $\eta^{ДВС+АТЭГ}$  системы имеет простой физический смысл, поскольку часть мощности сгорающего топлива  $Q_0$  используется менее эффективной ТМ ( $\eta^{АТЭГ} \ll \eta^{ДВС}$ ) [2, 15]. По этой причине АТЭГ в ДВС в настоящее время не устанавливается, несмотря на большой располагаемый тепловой напор

<sup>7</sup> Теория Иоффе [19] использовалась для расчетов АТЭГ в [1, 3-6], в результате ожидаемые характеристики АТЭГ оказались завышенными (табл. 1).

<sup>8</sup> Согласно нашей оценке, эффективность РТП СО можно увеличить до 10 раз и более, при помещении горячих стыков термонапар АТЭГ в корпус ДВС.

( $Q\Delta T$ ) и приемлемое значение теплового сопротивления  $R_T^{ДВС}$  (1, рис. 5) [17, 18].<sup>9</sup>

С другой стороны, при установке АТЭГ на ВТ, ТМ конкурируют за периферийные тепловые потоки в системе ( $Q_0^{ВТ}$  и  $Q_0^{СО}$ ), при этом конфликт ТМ соответственно уменьшается. В этом случае основное влияние АТЭГ на работу ДВС выражается в понижении температуры ВТ ( $T^{ВТ}$ ) и в повышении температуры СО ( $T^{СО}$ ). Теория Иоффе [19] не предсказывает понижения  $T^{ВТ}$  (табл. 3), однако в теории Охотина [20] понижение  $T^{ВТ}$  при работе АТЭГ большой мощности может оказаться значительным (до 100 К) [13]. В результате величина  $W_e$  АТЭГ ограничивается за счет снижения фактора Карно  $\eta_c$ , а также вследствие отложения при этом на внутренней стороне ВТ слоя кокса, затрудняющего теплообмен (4, рис. 4) [13-14]. Согласно нашей оценке, при толщине слоя кокса  $d = 0.3$  мм величина  $W_e$  АТЭГ может уменьшиться в 3 – 5 раз [17-18]. С другой стороны, повышение  $T^{СО}$  ведет к перегрузке СО, что вызывает необходимость увеличения мощности приводов СО ( $\Delta W_C^{АТЭГ}$ ) [13-15]. Полагая, что  $\Delta W_C^{АТЭГ} \sim 0.03 Q_1^{АТЭГ}$  ( $Q_1^{АТЭГ}$  – мощность теплового потока на выходе АТЭГ), получаем  $\Delta W_C^{АТЭГ} \sim W_e$ . Таким образом, при учете  $\Delta W_C^{АТЭГ}$  реальная мощность РТП  $\Delta W$  может существенно снизиться по сравнению с учетом только масс-фактора  $m^*$  АТЭГ (табл. 1) [18].

### 3.2. Реальные режимы работы АТЭГ

На рис. 11 показано, как уменьшается мощность РТП автомобиля  $\Delta W$  (1) с ростом  $W_e$  АТЭГ при последовательном учете вклада масс-фактора  $m^*$  АТЭГ (1  $\rightarrow$  2), а также дополнительных затрат мощности на охлаждение АТЭГ  $\Delta W_C^{АТЭГ}$  (2  $\rightarrow$  3). При расчетах  $m^*$  АТЭГ (рис. 11) полагали  $m^{АТЭГ} = k_m \cdot m_L$ , где  $m_L$  – общая масса материалов ветвей ( $Bi_2Te_3$ ) (2),  $k_m = 2$  – коэффициент, учитывающий массу арматуры АТЭГ. Из рис. 11 видно, что в результате учета потерь на масс-фактор  $m^*$  АТЭГ система переходит от режима идеальной РТП (А) ( $\Delta W = W_e$ ) к режиму реальной РТП (В), где все еще возможна экономия топлива ( $0 < \Delta W < W_e$ ). Затем при дополнительном учете сервисных затрат  $\Delta W_C^{АТЭГ}$  (4) система переходит к режиму ПГЭ (С), где расход топлива автомобилем возрастает ( $\Delta W < 0$ ,  $\delta A > 0$ ) (рис. 11) [17, 18].

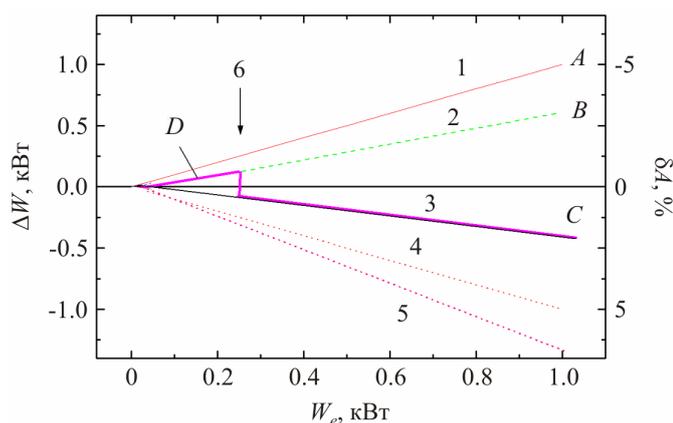


Рис. 11. Зависимость мощности РТП автомобиля  $\Delta W$  от мощности  $W_e$  АТЭГ (1 – 3).

Режимы: 1 – без учета потерь ( $\Delta W = W_e$ ); 2 – учет потерь на движение;

3 – учет потерь на охлаждение СО и движение (5). Потери: 4 – охлаждение СО;

5 – охлаждение СО и движение. Режимы: А – идеальная РТП; В, D – реальная РТП; С – ПГЭ;

D – использование резервов СО. 6 – момент включения дополнительной мощности приводов СО.

(Резерв СО – 30 % (9 кВт),  $Q_0 = 100$  кВт;  $k_m = 2$ ;  $\eta^{АТЭГ} = 0.03$ ;  $l = 6$  мм;  $Bi_2Te_3$ ).

<sup>9</sup> Размещение АТЭГ в ДВС может оказаться эффективным в будущем по достижении паритета  $\eta^{АТЭГ} \sim \eta^{ДВС}$  в результате повышения  $ZT$  ТЭМ.

Из рис. 11 следует, что при малых полезных мощностях  $W_e \geq 0$  и  $\Delta W_C^{ATЭГ} = 0$  (интервал  $D$ ) любой АТЭГ может работать в автомобиле в режиме реальной РТП ( $B$ ) при  $\Delta W_C^{ATЭГ} = 0$ , если использовать для охлаждения холодных спаев АТЭГ резервы штатной СО автомобиля [14]. Протяженность интервала  $D$  на рис. 11 соответствует резерву СО по мощности охлаждения  $\Delta W_C \sim 30\%$  (9 кВт). При поступлении большей мощности от АТЭГ в СО (при  $W_e > 0.2$  кВт) включаются дополнительные приводы СО (стрелка 6, рис. 11) и АТЭГ переходит в режим ПГЭ ( $C$ ), где расход топлива автомобилем увеличивается ( $\Delta W < 0$ ,  $\delta A > 0$ ). Таким образом, используя комбинированный режим работы  $DC$  (рис. 11), можно по необходимости либо, снижая  $W_e$ , повышать мощность РТП  $\Delta W$ , либо наоборот – увеличивать  $W_e$ , переводя АТЭГ в режим ПГЭ.

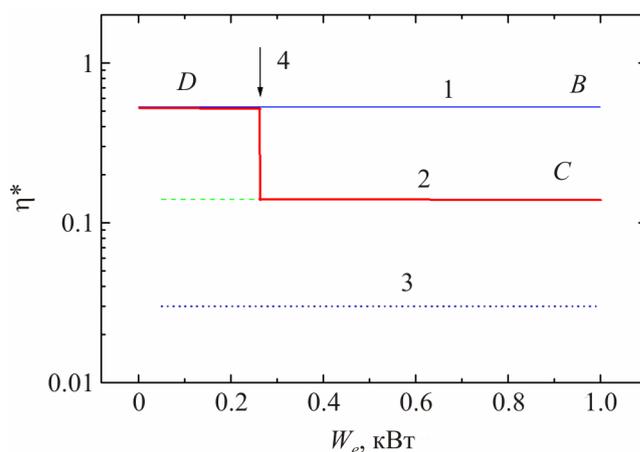


Рис. 12. Зависимости эффективного КПД  $\eta^* = \eta^{ABTO} W_e / \Delta W^{ДВС}$  генерации электрической энергии с помощью АТЭГ в автомобиле. Режимы:  $B, D$  – реальная РТП (1),  $C$  – ПГЭ (2), 3 – КПД АТЭГ как изолированной ТМ. 4 – момент включения дополнительной мощности приводов СО.

На рис. 12 показаны зависимости эффективного КПД АТЭГ  $\eta^* = \eta^{ABTO} W_e / \Delta W^{ДВС}$  в описанных режимах  $B, C$  и  $D$  (рис. 11). Из рис. 12 видно, что в режиме реальной РТП ( $B$  и  $D$ ) величина  $\eta^*$  АТЭГ оказывается достаточно высокой ( $\sim 0.5$ ) ( $B$ ). При переходе к режиму ПГЭ ( $C$ ) величина  $\eta^*$  уменьшается до  $\sim 0.12$ , но также существенно превышает собственный КПД АТЭГ как ТМ ( $\eta^{ATЭГ} \sim 0.03$ ) (3, рис. 12). Механизм увеличения эффективного КПД  $\eta^{*ATЭГ}$  в автомобиле в режимах ( $B, C$  и  $D$ , рис. 11) имеет простой физический смысл [18]. Как известно, АТЭГ использует бросовое тепло автомобиля, что само по себе не требует увеличения расхода топлива  $\delta A$  [1]. Увеличение расхода топлива ( $\delta A > 0$ ) необходимо только для компенсации сервисных затрат ДВС на транспортировку ( $\Delta W_T > 0$ ) и охлаждение холодных спаев АТЭГ ( $\Delta W_C^{ATЭГ} \geq 0$ ). Эти компенсации производятся за счет роста мощности ДВС, который является ТМ с более высоким КПД, чем АТЭГ ( $\eta^{ДВС} = 0.2 - 0.4$ ). Таким образом, соотношение  $\eta^{*ATЭГ} > \eta^{ATЭГ}$  (1 – 3, рис. 12) является следствием кооперативного эффекта в системе «АВТОМОБИЛЬ + АТЭГ» [18]. Описанные энергосберегающие режимы работы АТЭГ ( $B, C, D$ , рис. 11 и 12) представляют практический интерес. При этом во всех режимах ( $B, C, D$ , рис. 11 и 12) эффективность работы АТЭГ может быть повышена за счет использования новых ТЭМ с улучшенными характеристиками [13, 14].

#### 4. Термоэлектрические материалы для АТЭГ

На рис. 13 приведены температурные зависимости безразмерной добротности  $ZT$  и оптимальная ширина запрещенной зоны  $E_g^{opt} \sim 8k_0T$  (здесь  $k_0$  – постоянная Больцмана) ТЭМ,

пригодных для использования в АТЭГ [15]. Показаны располагаемые перепады температур  $\Delta T_0$  для бензиновых и дизельных двигателей (*b, d*) и их реальные значения (*a, c*), уменьшенные из-за тепловых сопротивлений теплообменников. Из рис. 13 видно, что теории Иоффе [19] и Охотина [20] приводят к существенно различным критериям поиска ТЭМ для АТЭГ. Согласно теории Иоффе [19] для АТЭГ нужны материалы с шириной запрещенной зоны  $E_g^{omn} = 0.4 - 0.6$  эВ ( $T_{max} = 700 - 1100$  К) (*d, b*, рис. 13). Из [30, 31] следует, что именно ТЭМ с  $E_g^{omn} = 0.4 - 0.6$  эВ интенсивно разрабатывались специалистами в последнее время (5, 7, рис. 13). Однако при учете правила Ленца для тепловых цепей АТЭГ (рис. 9), реальные перепады температур на ветвях АТЭГ  $\Delta T$  и оптимальная ширина запрещенной зоны ТЭМ будут меньше –  $E_g^{omn} \sim 0.25 - 0.4$  эВ ( $T_{max} = 400 - 700$  К) (*a, c*, рис. 13) [20]. Такие сплавы с  $E_g^{omn} \sim 0.25 - 0.4$  эВ в настоящее время отсутствуют, на что указывает «провал», существующий на семействе кривых  $ZT = f(T)$  в интервале температур  $T = 400 - 700$  К (отмечен стрелкой 9, рис. 13). Из ТЭМ, имеющихся в настоящее время, для АТЭГ лучше всего подходят сплавы типа *Bi-Sb-Te-Se* с  $E_g \sim 0.2$  эВ (2, рис. 9), которые широко используются разработчиками АТЭГ (табл. 1). Недавно максимум  $ZT$  этих сплавов нам удалось несколько увеличить и сдвинуть в сторону высоких температур путем их легирования индием (1, рис. 13) [29]. Среди других материалов, пригодных для АТЭГ, можно отметить сплавы на основе *Mg-Si-Sn* с малой плотностью  $d \sim 3$  г/см<sup>3</sup> и шириной запрещенной зоны  $E_g = 0.5$  эВ, слегка большей оптимальной (6, 7, рис. 13). Использование сплавов на основе *Mg-Si-Sn* может привести к существенному снижению масс-фактора  $m^*$  АТЭГ [23, 32].

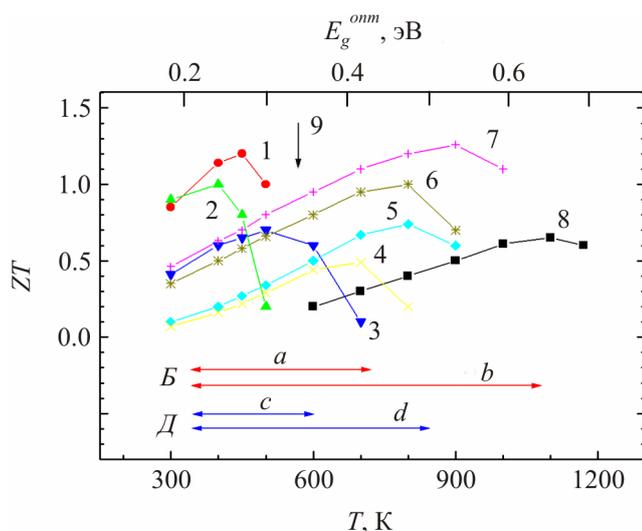


Рис. 13. Температурные зависимости безразмерной добротности  $ZT$  и оптимальная ширина запрещенной зоны  $E_g^{omn}$  ТЭМ. 1 – *n-Bi<sub>2</sub>Te<sub>2.7</sub>Se<sub>0.3</sub><I, In>* [29]; 2, 3 – *Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>* [30, 31]; 4 – *p-Mg<sub>2</sub>Si<sub>0.4</sub>Sn<sub>0.6</sub>* [23]; 5 – *PbTe* [31]; 6 – *n-Mg<sub>2</sub>Si<sub>0.4</sub>Sn<sub>0.6</sub>* [32]; 7 – *AgPb<sub>x</sub>(SbTe)<sub>1-x</sub> (LAST)* [31]; 8 – *Ge-Si* [31]; 9 – «провал». Располагаемые  $\Delta T_0$  (*b, d*) и реальные  $\Delta T$  (*a, c*) перепады температур на ветвях АТЭГ. Двигатели: *a, b* – бензиновые (Б); *c, d* – дизельные (Д).

## 5. Обобщение результатов

Технология РТП автомобилей с помощью АТЭГ развивается с середины XX столетия в разных странах [12]. Однако эффективный АТЭГ до настоящего времени так и не создан, что обычно связывается разработчиками АТЭГ с техническими трудностями [1, 3-7]. Указанный срок (более 50 лет) существенно превышает обычное время разработки любого технического продукта (несколько лет). Это показывает, что успешному решению проблемы АТЭГ

препятствуют не одни только технические трудности [13-14].

В настоящей работе установлено, что РТП автомобилей с помощью АТЭГ имеет жесткие термодинамические ограничения. Вывод основан на анализе результатов экспериментальных исследований прототипов серийных АТЭГ, разработанных в последнее время для мотоциклов, легковых автомобилей и грузовиков [1, 3-7]. Показано, что во всех случаях экспериментальные характеристики АТЭГ оказываются существенно ниже расчетных [1, 3-7], что связано в работе с использованием при расчетах теории Иоффе [19], которая не учитывает высокие тепловые сопротивления теплообменников на границе «ВГ/ВТ». В результате ожидаемые характеристики АТЭГ оказались завышенными, а перспективы использования АТЭГ в автомобилях излишне оптимистичными [1, 3-7].

С другой стороны, полученные на практике низкие экспериментальные характеристики современных АТЭГ (табл. 1) были объяснены с помощью теории Охотина [20], учитывающей систематически высокие паразитные тепловые сопротивления теплообменников АТЭГ на границах «ВГ/ВТ» [2]. Дополнительно факторами, снижающими характеристики АТЭГ, является разнородность АТЭГ и ДВС как ТМ, в результате чего в системе (автомобиль + АТЭГ) возникают трудности теплообмена. Кроме того, с ростом  $W_e$  в системе (автомобиль + АТЭГ) развивается конфликт ТМ (ДВС и АТЭГ), ограничивающий рост  $W_e$  и  $\Delta W$  АТЭГ. Как следствие, удельные мощности АТЭГ  $\dot{W}^{АТЭГ}$  существенно уступают по величине удельной мощности ТЭГ других типов, использующих жидкие, либо твердые теплоносители (табл. 2) [18].

Соответственно, основным способом улучшения характеристик АТЭГ в настоящее время представляется совершенствование их теплообменников (резерв по удельной мощности  $\dot{W}^{АТЭГ}$  до 10 раз и более) [18]. При этом повышение термоэлектрической эффективности  $ZT$  ТЭМ, по нашим оценкам, в настоящее время может иметь лишь вспомогательный характер (реальный резерв по  $\dot{W}^{АТЭГ}$  до 2 раз). Полученный вывод подтверждается литературными данными. Действительно, наибольший прогресс в улучшении характеристик АТЭГ в последнее время достигнут именно путем улучшения конструкций теплообменников АТЭГ [3, 9, 11, 26]. Думается, что сейчас, наряду с совершенствованием теплообменников, не следует отказываться также от использования энергосберегающих режимов работы АТЭГ, описанных в настоящей работе (рис. 11 и 12). В литературе имеются примеры использования подобных режимов работы АТЭГ фирмами-разработчиками. Это – демонстрация эффективности РТП автомобилей на примере АТЭГ малой мощности  $W_e \leq 0.2$  кВт [6]. Выдвигались также предложения замены (полной или частичной) автомобильных генераторов с ременным приводом более современными АТЭГ с увеличенным КПД  $\eta^{*АТЭГ} > 0.1 - 0.5$  [10].

## Выводы

При установке автомобильного термоэлектрического генератора (АТЭГ) на выхлопную трубу (ВТ) автомобиля возникают существенные термодинамические ограничения на величину получаемой полезной электрической мощности  $W_e$  и рекуперированной энергии  $\Delta W$ .

Перспективы использования АТЭГ большой мощности для рекуперации тепловых потерь и сокращения расхода топлива в автомобилях ( $\Delta W > 0$ ,  $\delta A < 0$ ) в настоящее время существенно ограничены.

АТЭГ умеренной мощности могут эффективно использоваться в автомобилях в режимах РТП и ПГЭ, учитывая их высокие эффективные КПД ( $\eta^{*АТЭГ} > 0.1 - 0.5$ ), повышенные за счет кооперативного эффекта в системе «автомобиль + АТЭГ».

## Литература

1. Вайнинг К.Б. Ограниченные возможности термоэлектричества в условиях климатического кризиса / К.Б. Вайнинг // Термоэлектричество. – 2008. – № 4. – С. 7 – 20.
2. Кириллин В.А. Техническая термодинамика. / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.В. Шейндлин. – М.: Энергия. – 1974, 448 с.
3. K.M. Saqr, M.K. Mansour, and M.N. Musa, Thermal Design of Automobile Exhaust-based Thermoelectric Generators: Objectivities and Challenges, *International J. Automotive Technology* 9(2), 155-160 (2008).
4. D.M. Rowe, J. Smith, G. Thomas and G. Min, Weight Penalty Incurred in Thermoelectric Recovery of Automobile Exhaust Heat, *J. Electronic Materials* 40 (5), 784-788 (2011).
5. J. Lieb, S. Neugebauer, A. Eger, M. Linde, B. Masar, W. Stütz, The Thermoelectric Generator from BMW is Making Use of Waste Heat, *MTZ* 70 (4) 4-11 (2009).
6. A. Eger, M. Linde, *The BMW Group. Roadmap for the Application of Thermoelectric Generators* (San Diego, 2011), 23 p.
7. Кадзикава Т. Успехи в области термоэлектрической технологии генерирования электроэнергии в Японии / Т. Кадзикава // Термоэлектричество. – 2011. – № 3. – С. 5 – 19.
8. N. Espinosa, M. Lazard, L. Aixala, and H. Scherrer, Modeling Thermoelectric Generator Applied to Diesel Automotive Heat Recovery, *JEMS* 39 (9), 1446-1455 (2010).
9. L.I. Anatyshuk, O.J. Luste, and R.V. Kuz, Theoretical and Experimental Study of Thermoelectric Generators for Vehicles, *JEMS* 40 (5), 1326-1331 (2011).
10. J.W. Fairbanks, Development of Automotive Thermoelectric Generators and Air Conditioner / Heaters, *Proceedings of XIV International Forum on Thermoelectricity* (Moscow 17-20.05.2011), [On line: <http://forum.inst.cv.ua/>].
11. Анатычук Л.И. Термоэлектрический генератор для бензинового двигателя. / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоэлектричество. – 2012. – № 2. – С. 81 – 94.
12. Файнзильбер Э.М. Использование тепла отработавших газов двигателей в термоэлектрическом генераторе для питания элементов электрооборудования автомобилей / Э.М. Файнзильбер, Л.М. Дабкин // Автомобильная промышленность. – 1966. – № 7. – С. 9 – 10.
13. Коржуев М.А. Некоторые узкие места автомобильных термоэлектрических генераторов и поиск новых материалов для их устранения / М.А. Коржуев, Ю.В. Гранаткина // Термоэлектричество. – 2012. – № 1. – С. 81 – 94.
14. Коржуев М.А. О конфликте двигателей внутреннего сгорания и термоэлектрических генераторов при рекуперации тепловых потерь в автомобилях / М.А. Коржуев // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37, № 4. – С. 8 – 15.
15. M.A. Korzhuev, I.V. Katin, On the Placement of Thermoelectric Generators in Automobiles, *JEMS* 39 (9), 1390-1394 (2010).
16. M.A. Korzhuev, I.V. Katin, Reduced Life Time of the Vehicles by Installation of Thermoelectric Generator on Exhaust Pipe of the Internal Combustion Engine, *Chaos and Structures in Nonlinear Systems. Theory and Experiment* (Karaganda: E.A. Buketov State University, 2012), p. 250-254.
17. Коржуев М.А. Возможные экономические последствия для термоэлектрической и автомобильной отраслей, связанные с началом массового производства автомобильных термоэлектрических генераторов. / М.А. Коржуев, И.В. Катин // Термоэлектрики и их применения. Под ред. М.И. Федорова, Л.Н. Лукьяновой. [On line:] <http://www.ioffe.ru/Thermolab>
18. Коржуев М.А. Некоторые особенности автомобильных термоэлектрических генераторов

- (АТЭГ), а также перспективы их использования на транспорте. / М.А. Коржуев, И.В. Катин // Термоэлектрики и их применения. Под ред. М.И. Федорова, Л.Н. Лукьяновой. [On line:] <http://www.ioffe.ru/Thermolab>
19. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. / А.Ф. Иоффе. – М-Л: Изд-во АН СССР, 1956. – 104 с.
  20. Термоэлектрические генераторы. / [А.С. Охотин, А.А. Ефремов, В.С. Охотин, А.С. Пушкарский] – М.: Атомиздат, 1976. – 320 с.
  21. Поздняков Б.С. Термоэлектрическая энергетика. / Б.С. Поздняков, Е.А. Коптелов. – М.: Атомиздат, 1974. – 264 с.
  22. Котырло Г.К. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов. / Г.К. Котырло, Ю.Н. Лобунец. – Киев: Наукова Думка, 1980. – 328 с.
  23. Термоэлектрические свойства твердых растворов между соединениями  $Mg_2X$  ( $X = Si, Ge, Sn$ )  $p$ -типа / [Г.Н. Исаченко, В.К. Зайцев, М.И. Федоров и др.] // Термоэлектрики и их применения. Под ред. М.В. Ведерникова, Л.Н. Лукьяновой. СПб.: ПИЯФ. – 2010. – С. 99 – 102.
  24. G.J. Snyder, Thermoelectric Power Generators. Efficiency and Compatibility, In: *Thermoelectric Handbook. Macro to Nano*. Ed: D.M. Rowe (CRC Press. Taylor & Francis.: Boca Raton, London, N.Y., 2006), P. 9.1-9.26.
  25. L.I. Anatyshuk, *Thermoelectricity. V. 2. Thermoelectric power converters* (Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2003), 376 p.
  26. Плеханов С.Н. Термоэлектричеству в России – 250 лет. / С.Н. Плеханов, В.Э. Новиков, А.Я. Терехов // Термоэлектрики и их применения. Под ред. М.И. Федорова, Л.Н. Лукьяновой. [On line:] <http://www.ioffe.ru/Thermolab>
  27. Академия наук СССР. Персональный состав (1724 – 1917). Книга 1 – М., Наука, 1974. – 480 с.
  28. M. Gliozzi, *Storia della fisica* (Torino, Italy, 1965), 464 p.
  29. Свечникова Т.Е. Термоэлектрические свойства кристаллов  $n-Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3} <I, In>$  / Т.Е. Свечникова, И.Ю. Нихезина, М.А. Коржуев // Неорганические материалы. – 2011. – Т. 47, № 12. – С. 1314 – 1318.
  30. G.S. Nolas, J. Sharp, H.J. Goldsmid, *Thermoelectrics. Basic Principles and New Materials Developments* (Springer, Berlin, Heidelberg, N.Y, 2001).
  31. J.R. Sootsman, D.Y. Chung, and M.G. Kanatzidis, New and Old Concepts in Thermoelectric Materials, *Angew. Chem. Int. Ed.* 48, 8616-8639 (2009).
  32. G.N. Isachenko, V.K. Zaitsev, M.I. Fedorov, T.A. Gurieva, and P.P. Konstantinov, Thermodynamic Properties of Solid Solutions between  $p$ -type Compounds  $Mg_2X$  ( $X = Si, Ge, Sn$ ), *Thermoelectrics and their Applications*. Ed. by M.V. Vedernikov and L.N. Lukyanova (SPb: PIYF, 2010), P. 99-102.

Поступила в редакцию 01.03.2013.