

УДК 621.315.592:541.124.16:536.75

Коржуєв М.О., Свєчнікова Т.Є.



Коржуєв М.О.

Інститут металургії й матеріалознавства  
ім. О.О. Байкова РАН,  
Ленінський проспект, 49, Москва 119991,  
Російська Федерація



Свєчнікова Т.Є.

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОБМЕЖЕННЯ  
КОРИСНОЇ ПОТУЖНОСТІ

АВТОМОБІЛЬНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ  
І ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Аналізуються експериментальні характеристики автомобільних термоелектричних генераторів (АТЕГ), установлених на вихлопну трубу (ВТ) автомобіля. Показано, що низькі корисні потужності  $W_e = 0.2-0.6$  кВт і неефективність рекуперації теплових втрат (РТВ) автомобіля за допомогою АТЕГ (загальний виграш у потужності автомобіля  $\Delta W \sim 0$ ) пов'язані із труднощами теплообміну на границі «вихлопні гази (ВГ)/ АТЕГ». У результаті питомі потужності АТЕГ виявляються низькою  $\hat{W}^{ATEG} = W_e/m^{ATEG} \sim 20-30$  Вт/кг (тут  $m^{ATEG}$  – маса АТЕГ), що пояснюється в роботі в рамках теорії О.С.Охотіна, що враховує високі теплові опори теплообмінників АТЕГ. Показано, що використання для розрахунків АТЕГ теорії А.Ф.Іоффе, яка не враховує теплових опорів теплообмінників, дає завищені оцінки  $W_e$ ,  $\Delta W$ ,  $\hat{W}^{ATEG}$  і ККД  $\eta^{ATEG}$ , а також невірний прогноз оптимальної ширини забороненої зони  $E_g^{opt}$  матеріалів віток. Показано, що перспективи використання АТЕГ великої потужності в автомобілях у цей час істотно обмежені. Обговорюються можливості поліпшення характеристик АТЕГ.

**Ключові слова:** термоелектрика, автомобілі, рекуперація теплових втрат.

Experimental characteristics of the exhaust pipe automotive thermoelectric generators (ATEGs) analyzed. It is shown that low useful power  $W_e = 0.2-0.6$  kW and inefficiency of the ATEGs for the automotive waste heat recovery (WHR) (The general prize in power of the car is  $\Delta W \sim 0$ ) are a consequence of the difficulties for heat exchange on border «exhaust gas (EG) - ATEG». As a result specific power ATEG also appears low  $\hat{W}^{ATEG} = W_e/m^{ATEG} \sim 20-30$  W/kg (Here  $m^{ATEG}$  is mass ATEG). Low values  $W_e$  and  $\hat{W}^{ATEG}$  are explained using the theory of A.S.Okhotin, considering regularly high parasitic thermal resistance of the heat exchangers ATEG. It is shown that use for calculations the theory of A.F. Ioffe which does not consider high thermal resistance of heat exchangers, gives overestimated values for  $W_e$ ,  $\Delta W$ ,  $\hat{W}^{ATEG}$  and efficiency  $\eta^{ATEG}$ , and also the incorrect forecast of optimum energy gap  $E_g^{opt}$  of the materials necessary for ATEG. It is shown that prospects of use ATEG of the big power in cars are essentially limited now. Discussed some ways to improve performance of the modern ATEGs.

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

**Вступ**

У цей час світовий автомобільний парк перевищив  $\sim 1$  млрд. одиниць, у результаті автомобілі стали основними забруднювачами атмосфери Землі вихлопними газами (ВГ) і непридатним теплом [1]. Сучасні двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) автомобілів мають досить високий ККД  $\eta^{ДВЗ} \sim 0.4$ . Однак значна частина потужності палива, що згоряє,  $Q_0$  і частина корисної потужності ДВЗ  $W^{ДВЗ} = \eta^{ДВЗ} Q_0$

безповоротно губиться в атмосферу через вихлопну трубу (ВТ) ( $Q_0^{BT} \sim 0.3Q_0$ ), систему охолодження (СО) ( $Q_0^{CO} \sim 0.3Q_0$ ), трансмісію й допоміжні механізми автомобіля (L) ( $Q_0^L \sim 0.2 Q_0$ ) (рис. 1а). У результаті на подолання сили опору руху автомобіля  $FR$  звичайно витрачається потужність не більш  $WT^{ABTO} \sim \frac{1}{2} W^{ДВЗ} \sim 0.2 Q_0$  [3, 4] (рис. 1а). Звідси виникає необхідність збору й наступного використання (рекуперації) теплових втрат (РТП) і економії палива автомобілем [1, 4-6]. Для цих цілей із середини ХХ століття в різних країнах розробляються автомобільні термоелектричні генератори (АТЕГ), які розміщуються на вихлопній трубі (ВТ) автомобіля (рис.1б) [3- 12]. При цьому частина тепла ВТ  $Q_0^{АТЕГ} < Q_0^{BT}$  приділяється на вхід АТЕГ, де перетвориться в корисну електричну потужність  $We = \eta^{АТЕГ} Q_0^{АТЕГ}$  за допомогою ефекту Зеебека. (Тут  $\eta^{АТЕГ} \leq 0.01-0.05$  і  $Q_0^{АТЕГ}$  – ККД і потужність теплового потоку на вході АТЕГ) (рис.1б) [1, 2]. У результаті за умови  $V_0 = \text{const}$  потужність автомобіля збільшиться на величину  $\Delta W = We$ , а відносна витрата палива відповідно зменшиться  $\delta A = \Delta A/A \sim -\Delta W / 0.2 Q_0 < 0$  (Тут  $A$  і  $\Delta A$  – вихідна витрата палива автомобілем і його зміна при установці АТЕГ,  $V_0$  – швидкість руху автомобіля) [4, 13].

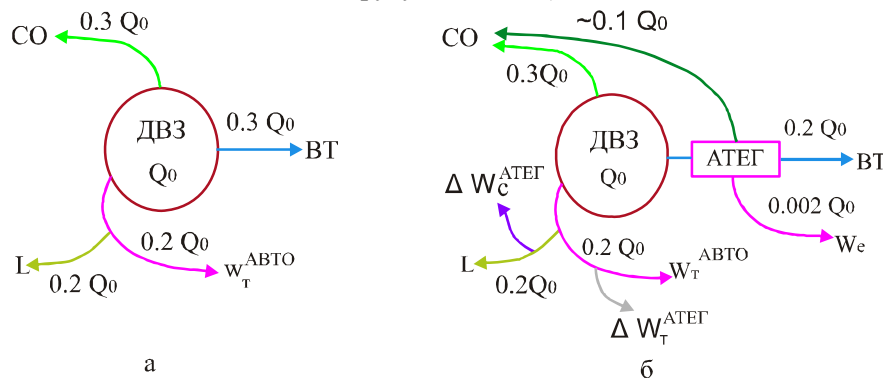


Рис. 1. Потіки тепла і енергії в автомобілі до (а) й після (б) установки АТЕГ на ВТ. Тут  $Q_0$  і  $W_T^{ABTO}$  – потужність згораючого палива і її частина, витрачена на рух автомобіля;  $L$  – втрати в механізмах автомобіля;  $\Delta W_T^{АТЕГ}$  і  $\Delta W_C^{АТЕГ}$  – затрати на транспортування й охолодження АТЕГ ( $\eta^{АТЕГ} = 0.02$ ;  $W_e = 0.2 \text{ кВт}$ ;  $\Delta W_T^{АТЕГ} = 0.1 \text{ кВт}$ ;  $\Delta W_C^{АТЕГ} = 0.2 \text{ кВт}$ ).

Однак, на практиці співвідношення  $\Delta W = We$  в автомобілі ніколи не виконується, оскільки АТЕГ потребує витрат частини потужності ДВЗ  $\Delta W^{ДВЗ} = \Delta W_T^{АТЕГ} + \Delta W_C^{АТЕГ}$  на своє транспортування ( $\Delta W_T^{АТЕГ} > 0$ ) і примусове охолодження холодних спаїв ( $\Delta W_C^{АТЕГ} \geq 0$ ) (рис.1б) [13-15].

$$\Delta W = We - \Delta W_T^{АТЕГ} - \Delta W_C^{АТЕГ} \quad (1)$$

При цьому потужність РТВ автомобіля відповідно зменшується і навіть може стати негативною у випадку, якщо сервісні витрати  $\Delta W_T^{АТЕГ}$  і  $\Delta W_C^{АТЕГ}$  виявляться значними [13- 15]. Таким чином, на практиці можливі два основні режими роботи АТЕГ в автомобілі. Це- 1) режим реальної РТВ із економією палива ( $0 < \Delta W < We$ ,  $\delta A < 0$ ); 2) режим простої генерації енергії (ПГЕ), коли РТВ не відбувається, а загальна витрата палива й викид парникових газів автомобілем збільшується ( $\Delta W < 0 < We$ ,  $\delta A > 0$ ) [13-18].

Метою даної роботи було дослідження сучасного стану проблеми АТЕГ. Аналізуються експериментальні характеристики прототипів серійних АТЕГ, розроблених останнім часом для мотоциклів, автомобілів і вантажівок [1- 5, 7]. Показано, що у всіх випадках експлуатаційні характеристики АТЕГ виявляються суттєво нижче очікуваних розроблювачами, у результаті більшість АТЕГ працюють у малоефективному режимі ПГЕ [3, 6, 13]. Низька ефективність сучасних АТЕГ зв'язується в роботі з термодинамічними обмеженнями їх питомої потужності  $\hat{W}^{АТЕГ} = We/m^{АТЕГ} < 20- 30 \text{ Вт/кг}$  (тут  $m^{АТЕГ}$  – маса АТЕГ) у системі «АВТОМОБІЛЬ + АТЕГ». Низькі значення  $\hat{W}^{АТЕГ}$  пояснені в роботі за допомогою теорії А.С. Охотіна [20], що враховує більші паразитні теплові

опори теплообмінників АТЕГ  $R_{TO}^{АТЕГ}$  на границі «ВГ/ АТЕГ». Показано, що через систематично більші  $R_{TO}^{АТЕГ}$  перспективи використання АТЕГ великої потужності в автомобілях у цей час істотно обмежені. Обговорюються різні шляхи поліпшення характеристик АТЕГ, серед яких основним представляється вдосконалювання їх теплообмінників.

## 1. Система «АВТОМОБІЛЬ + АТЕГ»

При установці АТЕГ в автомобілі утворюється складна термодинамічна система «АВТОМОБІЛЬ + АТЕГ», що містить дві різні теплові машини (ТМ) (ДВЗ і АТЕГ) [13- 15]. Установка АТЕГ збільшує загальну масу автомобіля  $m^{АВТО+АТЕГ} = m^{АВТО} + m^{АТЕГ}$  і його фронтальні габарити  $\Delta S^{АВТО+АТЕГ} \approx \Delta S^{АВТО} + \Delta S^{АТЕГ}$ , у результаті зростає сила опору руху  $FR \rightarrow FR + \Delta FR$  (Тут  $m^{АВТО}$  – маса автомобіля,  $S^{АВТО}$  й  $\Delta S^{АТЕГ}$  – фронтальні габарити автомобіля й АТЕГ) (а  $\rightarrow$  б, рис.2) [3]. Крім того, з ростом  $We > 0$  у системі «АВТОМОБІЛЬ + АТЕГ» розвивається конфлікт теплових машин (ТМ) (ДВЗ і АТЕГ). Причиною конфлікту є конкуренція ТМ за джерела й стоки тепла в системі [14]. Розвиток конфлікту ТМ у системі «АВТОМОБІЛЬ + АТЕГ» знижує ефективність роботи ДВЗ і обмежує ріст  $We$  і  $\Delta W$  АТЕГ [13- 18]. Нижче розглянуто, як впливають усі перераховані вище фактори на експериментальні характеристики АТЕГ.

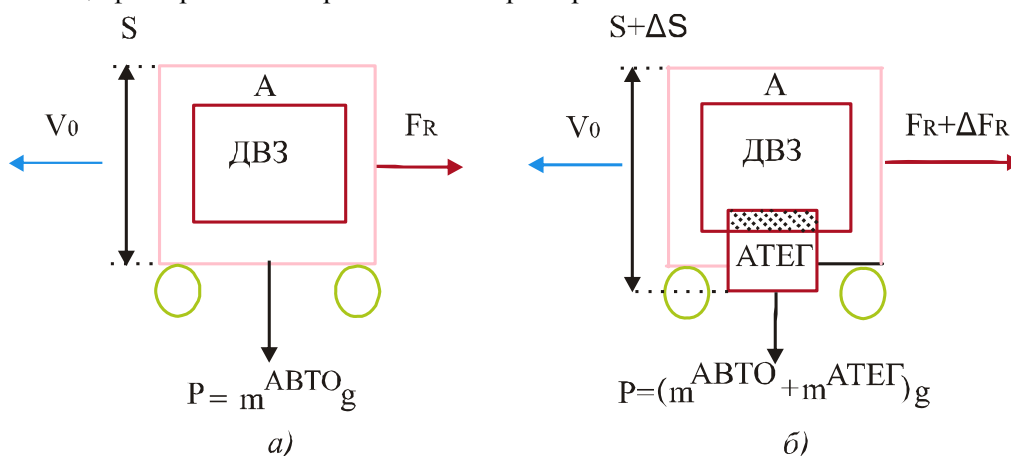


Рис. 2. Зміна маси  $m$ , ваги  $P$ , фронтальних габаритів  $\Delta S$ , сили опору рухові  $\Delta F_R$  й поява області конфлікту теплових машин (ДВЗ і АТЕГ) (зашифрована) при установці АТЕГ на автомобіль (А) (а  $\rightarrow$  б).

### 1.1. Експериментальні характеристики АТЕГ

У табл.1 наведені експериментальні характеристики прототипів серійних АТЕГ, розроблених для мотоциклів, автомобілів, пікапів і вантажівок [1, 2- 7]. За даними робіт [1, 2- 7] нами були розраховані питома потужність транспортних засобів  $\dot{W}^{АВТО} = W^{АВТО} / m^{АВТО}$ , а також питома потужність установлених на них АТЕГ  $\dot{W}^{АТЕГ} = We / m^{АТЕГ}$ , потужність РТВ  $\Delta W$  і зміна відносної витрати палива  $\delta a$  автомобілем при роботі АТЕГ на повну потужність (табл.1). При розрахунках використовували співвідношення (1), де для простоти вважалися  $\Delta W_c = 0$ ;  $\Delta W_T^{АТЕГ} = \Delta W_T^{АТЕГ} + \Delta W_2^{АТЕГ}$ . (Тут  $\Delta W_T^{АТЕГ} = 0.1 \Delta W^{ДВЗ} m^*$  і  $\Delta W_2^{АТЕГ} = 0.1 W^{ДВЗ} S^*$  – додаткові витрати потужності ДВС на подолання тертя катання й опору повітря при русі автомобіля,  $m^* = m^{АТЕГ} / m^{АВТО}$  й  $S^* = \Delta S^{АТЕГ} / S^{АВТО}$  – мас – фактор і форм – фактор АТЕГ в автомобілі). З табл. 1 видно, що ефективність роботи сучасних АТЕГ (табл.1), у цілому, виявляється низькою. <sup>1</sup> Максимальні величини  $We$  АТЕГ не перевищували  $\sim 1/3$ -  $2/3$  від розрахункових значень, необхідних для електроживлення транспортних засобів. При цьому всі АТЕГ (табл.1) працювали переважно в малоефективному режимі ПГЕ ( $\Delta W < 0$ ) (мотоцикли, легкові автомобілі), або в режимі РТВ, близькому до режиму

ПГЕ (пікапи, вантажівки). Зміна режимів ПГЕ → РТВ (табл.1) була пов'язана зі зменшенням мас - фактору  $m^*$  і форм – фактору  $S^*$  АТЕГ у ряді мотоцикл → вантажівка.

Таблиця 1

Характеристики прототипів серійних АТЕГ, розроблених для різних транспортних засобів [1, 2- 7]

№	Характеристики	Мотоцикл <sup>a</sup>	Легковий автомобіль <sup>b</sup>	Пікап <sup>c</sup>	Вантажівка <sup>d</sup>
1. Транспортний засіб	Літраж $V$ , л	0.4	3.4	5.3	14
	і тип двигуна	Б	Д	Б	Д
	Потужність ДВЗ, $W^{ДВЗ}$ , кВт	7.4	125	146	162
	Маса, $m^{АВТО}$ , кг	150	1545	2770	10000
	Питома потужність, $\dot{W}^{АВТО}$ , Вт/ кг	49	81	53	16,2
	Питома потужність руху, $\dot{W}T = \frac{1}{2} \dot{W}^{ДВЗ}$ , Вт/ кг	24	40	26	8
	Фронтальні габарити, $S^{АВТО}$ , м <sup>2</sup>	0.7	2.5	4	5
2. АТЕГ	Потужність ДВЗ, $W^{ДВЗ}$ , кВт	7.4	125	146	162
	Досягнута максимальна потужність, $W_e$ , Вт	10	200	300* 600**	400*** 1000**
	Необхідна потужність, $W_e$ , Вт	100- 200	~600	~1000	>1000
	Матеріал віток АТЕГ	Fe <sub>2</sub> Val	(Bi, Sb) <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	Pbte	(Bi, Sb) <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>
	Маса, $m^{АТЕГ}$ , кг	~3	13	39.1	13
	Питома потужність, $\dot{W}^{АТЕГ}$ , Вт/ кг	3.3	15	7.7* 15.4**	30.8*** 76.9****
	Габарити, $\Delta S^{АТЕГ}$ , див <sup>2</sup>	100	220	590	412
3. Втрати потужності	Мас – фактор, $m^*$	0.02	0.008	0.014	0.001
	Форм – фактор, $S^*$	0.014	0.009	0.015	0.008
	Втрати на мас – фактор $m^*$ , $\Delta W T_1^{АТЕГ}$ , Вт	20	143	279	29
	Втрати на форм – фактор $S^*$ , $\Delta W T_2^{АТЕГ}$ , Вт	14	149	292	180
	Загальний вигравш у потужності (РТП), $\Delta W$ , Вт	- 24	- 92	- 271*29**	191***791***
3. Втрати потужності	Зміна витрати палива, $\delta A = \Delta W / (0.2 Q_0)$ , %	0.65	0.15	0.37* - 0.04**	- 0.24*** 0.97****
	Втрати на мас – фактор $m^*$ , $\Delta W T_1^{АТЕГ}$ , Вт	20	143	279	29

<sup>a)</sup> Suzuki [7]; <sup>b)</sup> BMW531 [5, 6]; <sup>c)</sup> GM Sierra 1500 [3]; <sup>d)</sup> ДВЗ NTC-350 [3]; \* - рух у місті ( $V_0 \sim 60$  км/год); \*\* - рух по швидкісній автостраді ( $V_0 \sim 110-150$  км/год) [3]; \*\*\* – отримане на практиці; \*\*\*\* – очікуване розрахункове значення. Тип двигуна: Б – бензиновий; Д – дизельний.

У результаті на практиці РТВ виявлялася можливою тільки для вантажівок ( $m^{АВТО} > 6$  Т;  $\Delta W > 0$ ,  $\delta A < 0$ ), але не для легкових автомобілів, пікапів ( $m^{АВТО} = 2-5$  Т;  $\Delta W$ ,  $\delta A \sim 0$ ) і мотоциклів ( $m^{АВТО} \ll 1$ Т;  $\Delta W < 0$ ,  $\delta A > 0$ ). З табл.1 видно також, що при  $m^* = \text{const}$  потужність РТВ  $\Delta w$  можна збільшити шляхом зменшення форм – фактору АТЕГ ( $S^* \rightarrow 0$ ).<sup>1</sup> У цьому випадку величина  $\Delta w$  буде

<sup>1</sup> Це можна зробити за рахунок використання обтікачів і «утопленого» монтажу АТЕГ [3, 9].

обмежуватися тільки двома основними факторами –  $We$  і  $m^{\text{АТЕГ}}$ , що визначають питому потужність АТЕГ  $\hat{W}^{\text{АТЕГ}}$ . Згідно з нашими розрахунками, питомі потужності АТЕГ для всіх транспортних засобів виявлялися низькими  $\hat{W}^{\text{АТЕГ}} < 20-30$  Вт/кг і іноді не перевищували навіть питомої потужності ДВЗ, витраченої на рух транспортного засобу  $\hat{W}_T^{\text{АВТО}} = \frac{1}{2} \hat{W}^{\text{ДВЗ}} \sim 15-26$  Вт/кг (табл.1) [4, 13]. У результаті для мотоциклів, легкових автомобілів і пікапів маємо  $\hat{W}_T^{\text{АВТО}} > \hat{W}_e$  тобто виграш у загальній потужності автомобіля, одержуваний за рахунок корисної потужності  $We$  АТЕГ, не компенсує сервісних витрат ДВЗ навіть на транспортування АТЕГ (табл.1). Навпаки, для вантажівок одержуємо  $We > WT$ , що пов'язано з відносно низькими питомими витратами потужності на рухи ( $\hat{W}^{\text{АВТО}} < \hat{W}^{\text{АТЕГ}}$ ) (табл.1). Питання про низьку питому потужність  $\hat{W}^{\text{АТЕГ}}$  вимагає спеціального обговорення.

## 1.2. Низька питома потужність АТЕГ

У табл.2 дане порівняння питомої потужності  $\hat{W}^{\text{АТЕГ}}$  з питомою потужністю термоелектричних генераторів (ТЕГ) інших типів ( $\hat{W}^{\text{ТЕГ}}$ ), що використовують рідкі або тверді теплоносії [19, 21- 23]. Згідно табл.2, при використанні тих самих термоелектричних матеріалів (ТЕМ) маємо  $\hat{W}^{\text{ТЕГ}}/\hat{W}^{\text{АТЕГ}} \geq 10-20$ . Відповідно за умови  $We = \text{const}$  маси АТЕГ будуть суттєво перевищувати маси ТЕГ інших типів ( $m^{\text{АТЕГ}}/m^{\text{ТЕГ}} \sim 10-30$  і більше) (табл.2).

Таблиця 2

Порівняння питомої потужності  $\hat{W}^{\text{АТЕГ}}$  з питомою потужністю термоелектричних генераторів інших типів  $\hat{W}^{\text{ТЕГ}}$ , що використовують рідкі або тверді теплоносії

Матеріал віток	Густина, $d$ , г/см <sup>3</sup>	Питома потужність, $\hat{W}$ , кВт/кг		Відношення $\hat{W}^{\text{ТЕГ}}/\hat{W}^{\text{АТЕГ}}$
		АТЕГ	Інші ТЕГ	
<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]	$\leq 1.2$ [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

Як відомо, маса віток  $ml$ , необхідна для одержання заданої корисної потужності  $We$  ТЕГ, дається виразом

$$ml = Vd = 2Wel^2d / (A\Delta T^2), \quad (2)$$

де  $V$  і  $d$  – об'єм і густина ТЕМ,  $l$  – висота віток,  $A = Z\kappa = \alpha^2\sigma$  – параметр термоелектричної потужності;  $\alpha$ ,  $\sigma$  і  $\kappa$  – диференціальна термоЕРС, питома електропровідність і теплопровідність матеріалу,  $\Delta T$  – робочий перепад температур на вітках термопари [22]. З виразу (2) випливає, що для тих самих ТЕМ ( $A, d = \text{const}$ ), співвідношення  $\hat{W}^{\text{ТЕГ}}/\hat{W}^{\text{АТЕГ}} \sim 10-30$  (табл.2) можна пояснити збільшеною висотою віток  $l$  АТЕГ і зменшеними робочими перепадами температур на їхніх вітках  $\Delta T$ . Порівняння конструктивних особливостей АТЕГ і ТЕГ підтвердило зазначене припущення. Дійсно, висота віток АТЕГ досягає  $l^{\text{АТЕГ}} \sim 5; 7.5$  і  $10$  мм [3, 4, 7, 22], тоді як у ТЕГ інших типів вона значно менша (звичайно  $l^{\text{ТЕГ}} \leq 1-3$  мм) [21, 23]. У такий же спосіб, робочі перепади температур на вітках АТЕГ виявляються суттєво меншими  $\Delta T^{\text{АТЕГ}} \sim \frac{1}{2} \Delta T_0$  [9, 24] у порівнянні з ТЕГ інших типів, де звичайно  $\Delta T^{\text{ТЕГ}} \sim \Delta T_0$  (Тут  $\Delta T_0$  – розташовуваний перепад температур, забезпечуваний джерелом тепла) [21, 23]. У результаті за інших рівних умов маємо  $W_e^{\text{ТЕГ}}/W_e^{\text{АТЕГ}} \sim 2, m^{\text{АТЕГ}}/m^{\text{ТЕГ}} \sim 2-10$ , що дає  $\hat{W}^{\text{ТЕГ}}/\hat{W}^{\text{АТЕГ}} \sim 10-20$  згідно з табл.2.

Низькі значення  $\dot{W}^{\text{АТЕГ}}$  зв'язані нижче із труднощами теплообміну в системі «АВТОМОБІЛЬ+ АТЕГ» [2, 13- 15].

## 2. Розрахунки АТЕГ

### 2.1. Теплообмін у системі «АВТОМОБІЛЬ + АТЕГ»

Будучи, на відміну від ДВЗ, двигуном «зовнішнього» згоряння, АТЕГ потребує двох додаткових теплообмінників, що підключаються до джерел і стоків тепла в автомобілі [2, 15]. Для стоку тепла АТЕГ звичайно використовується «штатна» або додаткова автономна СО з водяним або повітряним охолодженням [3- 6].<sup>2</sup> В якості джерел тепла для АТЕГ, крім ВТ, ми розглянемо також ДВЗ і з якими зв'язані додаткові резерви РТВ автомобілів (рис.1). Тепло у ДВЗ, ВТ і СО переноситься за рахунок руху нагрітих газів і рідин у трубах. Тепло в АТЕГ переноситься фононами й електронами за рахунок теплопровідності віток і ефекту Пельтье (у режимі генерації енергії) [2, 17]. При цьому механізми теплопереносу в АТЕГ виявляються менш ефективними, ніж комбінована тепло – і масопередача у трубах [13- 15]. У результаті тепловий опір АТЕГ ( $R_{\text{T}}^{\text{АТЕГ}}$ ), суттєво перевищує теплові опори ДВЗ, ВТ, СО ( $R_{\text{T}}^{\text{ДВЗ, ВТ, СО}}$ ), що визначає труднощі теплообміну в системі [13, 14]. Крім того, оскільки масопередача у вітках АТЕГ неможлива,<sup>2</sup> для відводу тепла до АТЕГ в автомобілі можна використовувати тільки паралельне підключення АТЕГ до труб [13, 16]. У цьому випадку до АТЕГ можна відвести не весь тепловий потік у трубі ( $Q_0^{\text{ДВЗ, ВТ, СО}}$ ), а тільки його малу частину  $Q_0^{\text{АТЕГ}} \sim Q_0^{\text{ДВЗ, ВТ, СО}} \cdot R_{\text{T}}^{\text{ДВЗ, ВТ, СО}} / (R_{\text{T}}^{\text{АТЕГ}} + R_{\text{T}}^{\text{ДВЗ, ВТ, СО}}) \ll Q_0$ , обернено пропорційну  $R_{\text{T}}^{\text{АТЕГ}}$ .

Схема паралельного підключення АТЕГ до ВТ показана на рис. 3. З рис.3 видно, що процесу відводу тепла від ВГ до АТЕГ (стрілка) перешкоджають нерухливі шари газу й нагару (коксу) з низькою теплопровідністю, адсорбовані на границі теплообміну «ВГ/ ВТ» (2, 4) [2, 23, 26]. Шар адсорбованого газу (товщиною  $d \sim 1-2$  мкм) постійно є присутнім на внутрішній стороні ВТ при будь-яких швидкостях руху ВГ у ВТ ( $V^{\text{ВГ}}$ ) (2, рис.3) [2]. При цьому шари коксу (4, рис.3) можуть досягати товщини  $z \sim 1$  мм і більше в «холодних» частинах ВТ [13, 16].

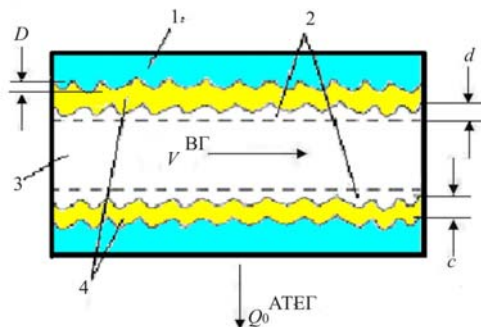


Рис. 3. Паралельне підключення АТЕГ до ВТ. 1 – корпус ВТ; 2 – шар адсорбованого газу; 3 – ВГ; 4 – кокс; d, c – товщина шарів газу і коксу;  $V^{\text{ВГ}}$  – швидкість ВГ; D – широкуюватість внутрішньої поверхні ВТ,  $Q_0^{\text{АТЕГ}}$  – вхідний тепловий потік АТЕГ

Внаслідок високих теплових опорів адсорбованих шарів (2, 4, рис.3) теплові опори АТЕГ суттєво збільшуються. При цьому вхідні теплові потоки  $Q_0^{\text{АТЕГ}}$  і робочі перепади температур на вітках АТЕГ відповідно зменшуються  $\Delta T \sim \Delta T_0 \cdot R_{\text{T}}^{\text{АТЕГ}} / (R_{\text{T}}^{\text{ТО}} + R_{\text{T}}^{\text{АТЕГ}})$  [11, 13, 24]. Зазначені особливості теплообміну в системі (АВТОМОБІЛЬ + АТЕГ) були враховані нами при виборі теплової моделі АТЕГ [13].

### 2.2. Теплова модель АТЕГ

Використана в роботі теплова модель АТЕГ показана на рис. 4 [13]. Модель (рис. 4) враховує теплові опори ВТ  $R_{\text{ВТ}}^{\text{T}} = R_0^{\text{T}} + R_1^{\text{T}}$  (тут  $R_0^{\text{T}}$  і  $R_1^{\text{T}}$  – початкова частина й залишкова ВТ), віток термопар  ${}^{\text{R}}3\text{T}$ , а також «гарячого» і «холодного» теплообмінників  $R_3^{\text{T}}$  і  $R_4^{\text{T}}$   $R_{\text{ТО}}^{\text{T}} (R_{\text{ТО}}^{\text{T}} = R_3^{\text{T}} + R_4^{\text{T}})$ . У табл.3 наведені формули розрахунків параметрів АТЕГ для моделі (рис.4), що відповідають

режимам максимальної потужності (I) і максимального ККД (II). Граничні умови відповідали: 1) постійній температурі спаїв ( $T_h = \text{const}$ ,  $T_c = \text{const}$ ) (теорія А.Ф. Іоффе) [19] і 2) постійній температурі теплоносіїв ( $T_h' = \text{const}$ ,  $T_c' = \text{const}$ ) (теорія О.С. Охотіна) [20].

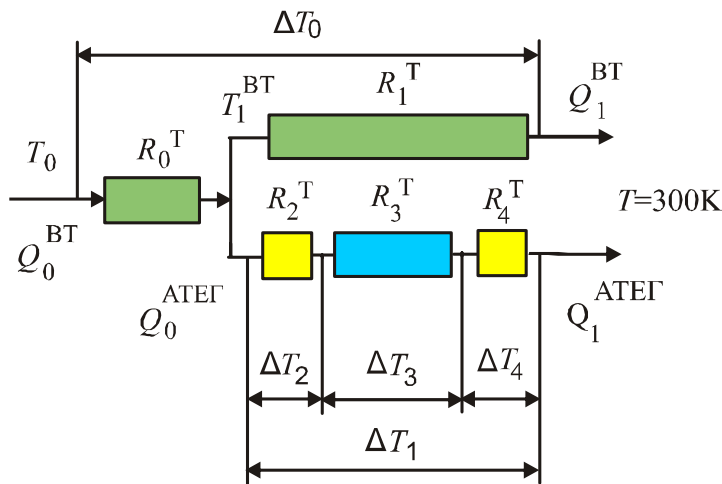


Рис. 4. Теплова модель паралельного підключення АТЕГ до ВТ й відповідні перепади температур  $\Delta T_i$  (режим холостого ходу АТЕГ).

Теплові опори секцій:

$R_0^T$  – початок ВТ;  $R_1^T$  – залишкова частина ВТ;  $R_3^T$  – віток термопар;  
 $R_2^T$  і  $R_4^T$  – «гарячий» і «холодний» теплообмінники АТЕГ [13].

Порівняння рис. 4 і табл. 3 показує, що теорія Іоффе [19] урахує тільки внесок віток термопар ( $R_3^T$ ) і їх контактних електричних опорів (через параметр  $\beta$ ) у загальний тепловий і електричний баланс АТЕГ ( $R_3^T \neq 0$ ,  $R_0^T = R_1^T = R_2^T = R_4^T = 0$ , інтегральний критерій Бю АТЕГ  $Bi = R_3^T / (R_2^T + R_4^T) = \infty$ ) (рис.4). Однак, на практиці для всіх АТЕГ маємо  $Bi \sim 1$  [13], так що теорія Іоффе [19] виявляється для АТЕГ не кращим наближенням [20]. Нижче показано, що для розрахунків АТЕГ краще підходить теорія Охотіна [20], яка враховує внесок теплообмінників  $R_{TO}^T$  АТЕГ у тепловий баланс системи ( $R_2^T, R_3^T, R_4^T \neq 0$ ,  $Bi \sim 1$ , рис.4).

### 2.3. Теорії Іоффе й Охотіна

Для розрахунків АТЕГ використовували шарувату циліндричну модель довжиною  $L = 0.6$  м, з внутрішнім діаметром  $D = 0.05$  м [13]. Оптимальну висоту віток АТЕГ  $l = 0.5$  див ( $Bi_2Te_3$ ) оцінювали з умови  $Bi = M_0$  (табл.3). При розрахунках товщину плівки адсорбованого газу на поверхні теплообміну «ВТ/ ВТ» вважали рівною шорсткості ВТ ( $d \sim D \approx 0.0001$  м) (2, рис. 3). Внесок шару коксу (4, рис. 3) в  $R_2$  для простоти не враховували [13]. Розрахунки вели з використанням законів Ома й Кірхгофа для електричних і теплових ланцюгів АТЕГ [13]. При розрахунках використовували значення  $Q_0^{ДВЗ, ВТ, CO} = Q_0; 0.3 Q_0; 0.3 Q_0$ ;  $\Delta T_0^{ДВЗ, ВТ, CO} \sim 1400, 650$  і  $50$  К, і  $Q_0 = 100$  кВт (бензиновий двигун потужністю  $W^{ДВЗ} \approx 54$  л.с.).

На рис. 5 наведені результати розрахунків теплових опорів  $RT = \Delta T / Q$  (А) і розташовуваних теплових напорів ( $Q\Delta T$ ) (В) для ДВЗ (область камери згоряння), ВТ і З (область від водяної «сорочки» ДВЗ до радіатора) при водяному (4) і повітряному охолодженні (5) АТЕГ. З рис.5 випливає, що у всіх випадках для АТЕГ виконується співвідношення  $RT^{ATEG} \gg RT^{ДВЗ, ВТ, CO}$ , причому при переході від водяного охолодження до повітряного охолодження тепловий опір  $RT^{ATEG}$  додатково зростає  $\sim 2$  рази (4  $\rightarrow$  5). Тому нижче ми розглядаємо тільки випадок водяного охолодження АТЕГ ( $R_4^T = 0$ ).<sup>1</sup>

На рис. 6–8 показані залежності ККД  $\eta^{ATEG}$ , а також робочого перепаду температур на вітках  $\Delta T$  і оптимальної висоти віток  $l$  залежно від  $ZT$  зразків, розраховані за допомогою теорій Іоффе [19] і Охотіна [20] у режимах максимального ККД і максимальної потужності (табл.3). Згідно із проведеними розрахунками, у режимі максимального ККД значення  $\eta$  у теоріях Іоффе [19] і

<sup>1</sup> Повітряне охолодження АТЕГ по необхідності використовується тільки в мотоциклах [1, 7].

Охотіна [20] збігаються (крива 1, рис.6). Однак, при переході до режиму максимальної потужності (у якому і працює АТЕГ) ці теорії дають різні значення  $\eta W$ . Теорія Іоффе дає  $\eta W \sim 0.8 \cdot \eta$ , а теорія Охотіна –  $\eta W \sim 0.22 \cdot \eta$  (криві 2 і 3, рис.6).

Таблиця 3

Оптимальні значення параметрів ТЕГ у режимах максимальної потужності (I) і максимального ККД (II) при різних граничних умовах. Затемнена область співвідношень, придатних для розрахунків АТЕГ\*

Режим	Параметри	Граничні умови	
		Фіксована температура спаїв: $Th = \text{const}, Tc = \text{const}$ [19]	Фіксована температура теплоносіїв: $Th' = \text{const}, Tc' = \text{const}$ [20]
I. Максимальної потужності	Відносне електричне навантаження, $M = R/r$	1	$A^* = M_0$
	Потужність, $We$	$E_{xx}^2 / (4r) = W \Delta T^2$	$E_{xx}^2 / (4A^*r) = W \Delta T^2 / (4A^*)$
	Перепад температури на вітках, $\Delta T$	$(Th - Tc)$	$(Th' - Tc') (A^* + 1) / (4A^*)$
	ККД, $\eta (W_{max})$	$\eta_3 / (2 + 4/Zth - \eta_3/2)$	$\sim 0.22 \eta_3 (M_{0-1}) / (M_0 + Tc' / Th')$
	Оптимальна безрозмірна висота віток, $l_0$	$\beta \sim 0.1$	$Bi = M_0$
II. Максимального ККД	Відносне електричне навантаження, $M = R/r$	$M_0$	$M_0$
	Потужність, $We$	$M_0 E_{кс}^2 / [r(1+M_0)^2]$	0
	Перепад температури на вітках, $\Delta T$	$(Th - Tc)$	$(Th' - Tc')$
	ККД, $\eta (W_{max})$	$\eta_3 (M_{0-1}) / (M_0 + Tc / Th)$	$\eta_3 (M_{0-1}) / (M_0 + Tc' / Th')$
	Оптимальна безрозмірна висота віток, $l_0$	$\infty$	$\infty$

\* Тут  $M = R/r$  – відносне електричне навантаження АТЕГ;  $R$  – електричний опір навантаження;  $r = r_0 (1 + \beta)$  – електричний опір АТЕГ;  $r_0$  – електричний опір віток;  $\beta = (rj+rc) / rsc$  – коефіцієнт електричних втрат;  $rj$ ,  $rc$  і  $rsc$  – електричні опори контактів, комутаційних пластин і напівпровідникового матеріалу віток,  $M_0 = (1 + Z \bar{T})^{1/2}$ ;  $Z = Z_0 / (1 + \beta)$  і  $Z_0$  – термоелектрична добротність ТЕГ з врахуванням і без врахування електричних втрат;  $T = 1/2 (Th + Tc)$  – середня температура;  $E_{xx, кс} = (ap - an) \Delta T_{xx, кс}$  – ЕРС холостого ходу й короткого замикання термопар;  $ap$  і  $an$  диференціальна термоЕРС з  $p$ - $p$ - і  $n$ - $n$ - віток термопар;  $\eta_c = (Th - Tc) / Th$  – фактор Карно;  $A^* = E_{xx} / E_{кс} = (1 + Z \bar{T}) / (1 + Bi)$  – постійна АТЕГ,  $RT = (R_3 + R_4 + R_5)$  – сума теплових опорів віток і теплопереходів;  $Bi = R_{пп}^T / R_{то}^T$  – відношення теплових опорів напівпровідникових віток АТЕГ і теплообмінників (інтегральний критерій Бю АТЕГ).

Крім того, у режимі максимальної потужності теорія Охотіна [20] передбачає залежність перепаду температур  $\Delta T$  на вітках АТЕГ від співвідношення його теплових і електричних характеристик ( $A^*$  і  $M$ ). У результаті очікувані значення  $We$  і оптимальна висота віток  $l$  також виявляються залежними від теплових опорів теплообмінників ( $R_2^T, R_4^T \neq 0$ ) і відносного електричного навантаження  $M = R/r$  АТЕГ (I, табл.3). Настільки значна відмінність теорій Іоффе [19] і Охотіна [20] (рис. 6- 8) пов'язана з врахуванням у теорії [20] внеску більших паразитних теплових опорів теплообмінників  $R_2^T$  і  $R_4^T$  (мал.4), які в теорії [19] покладаються рівними нулю. Отриманий результат можна пояснити за допомогою відомого правила Х. Ленца (рис.9), яке



застосовно до будь-якого джерела енергії, що працює в режимі максимальної потужності [27, 28]. Оскільки будь-який ТЕГ є тепловою й електричною машиною одночасно, правило Ленца, загалом кажучи, повинно застосовуватися до нього двічі, а саме, спочатку до теплових, а потім до електричних кіл [17].

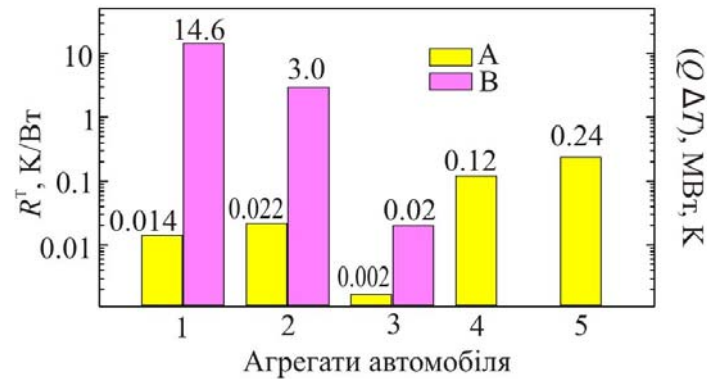


Рис. 5. Теплові опори  $R^T = \Delta T / Q$  (A) й наявні теплові напори  $(Q\Delta T)$  (B) для різних агрегатів автомобіля. 1 – ДВЗ; 2 – ВТ; 3- СО; 4- 5- АТЕГ стандартних розмірів з вітками з  $Bi_2Te_3$  ( $l=5$  мм). Оолодження АТЕГ: 4 - водяне; 5 – повітряне (розрахунок по моделі рис.4, при  $R_0 = 0$ ).

## 2.4. Правило Ленца

Згідно із правилом Ленца для електричних кіл, максимальна потужність  $We$  АТЕГ як електричної машини досягається при рівності електричних опорів віток ( $r$ ) і навантаження ( $R$ ) ( $r = R$ ) (рис.9б) [19, 20]. З іншого боку, згідно із правилом Ленца для теплових ланцюгів, максимум теплового напору  $(Q\Delta T)$  на вітці АТЕГ досягається за умови рівності теплових опорів теплообмінників і віток ( $R_{TO}^T = rt$ , рис.9в;  $R_{TO}^T = R_2^T + R_4^T$ ,  $rt = R_3^T$ , рис.4). Обидві теорії [19, 20] застосовують правило Ленца до електричних кіл АТЕГ (рис.9б), однак, тільки теорія Охотіна [20] додатково застосовує правило Ленца до його теплових ланцюгів (рис.9в) (табл.3). У теорії Іюффе [19] тепловим опором теплообмінників нехтують ( $R_{TO}^T = 0$ , табл.3), відповідно правило Ленца до теплових ланцюгів АТЕГ не застосовується. У результаті перепад температур на вітках виявляється рівним розташованому перепаду температур, заданому джерелом тепла ( $\Delta T_0 = \Delta tr$ , рис. 9в). Таке наближення гарно виконується у випадку ТЕГ, що використовують тверді, або рідкі теплоносії (табл.2).

У теорії Охотіна [20], де  $R_{TO}^T \neq 0$  (рис. 9в), у результаті застосування правила Ленца до теплових ланцюгів АТЕГ одержуємо для режиму холостого ходу  $\Delta T = \frac{1}{2} \Delta T_0$  (3, мал.7) [20].<sup>1</sup> У режимі максимальної потужності величина  $\Delta t$  на вітках АТЕГ у теорії [20] додатково зростає з ростом  $ZT$  (крива 2, мал.7) [20]. Відповідно, у теорії [20] оптимальна довжина віток  $l$  АТЕГ зростає в порівнянні з теорією Іюффе [19], при цьому збільшення  $l$  виявляється пропорційним теплопровідності до ТЕМ (криві 4  $\rightarrow$  1, рис.8).

Теорії [19] і [20] дають також різний прогноз для величини корисної потужності  $We$ , АТЕГ в автомобілі (рис.10). На рис.10 наведені вихідні теплові потоки  $Q_0^{ДВЗ}$ ,  $Q_0^{ВТ}$  і  $Q_0^{СО}$  в автомобілі (а) ( $I \rightarrow III$ ), зазначена їхня частка, яку можна відвести до АТЕГ ( $Q_0^{АТЕГ}$ ) (б), і розрахована корисна потужність  $We = \eta^{АТЕГ} Q_0^{АТЕГ}$  ( $\eta^{АТЕГ} = 0.05$ ) при роботі АТЕГ у режимі

<sup>5</sup> Раніше правило Ленца для теплових ланцюгів АТЕГ враховувалось в [9, 24].

максимальної потужності без врахування теплових опорів теплообмінників (теорія Іоффе [19]) (в) і з врахуванням їх внеску (теорія Охотіна [20]) (г).

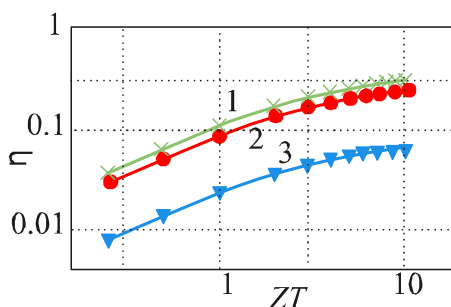


Рис. 6. ККД  $\eta^{АТЕГ}$  в залежності від термоелектричної добротності матеріалів віток термопар  $ZT$ . Режими:

1- максимального ККД; 2, 3 – максимальної потужності. Теорії: 1, 2- Іоффе [19]; 1, 3 - Охотіна [20] ( $T_h = 300\text{ K}$ ;  $T_c = 300\text{ K}$ ).

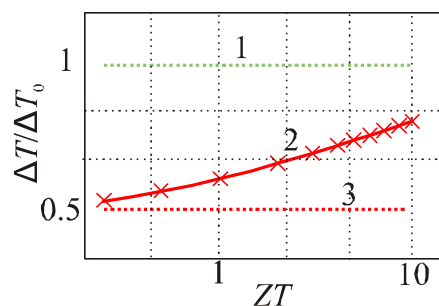


Рис. 7. Відношення робочого перепаду температур  $\Delta T$  на вітках АТЕГ до різниці температур теплоносіїв  $\Delta T_0 = (T_h - T_c)$  в режимі максимальної потужності в залежності від термоелектричної добротності віток  $ZT$ . Теорії: 1- Іоффе [19]; 2, 3 – Охотіна [20]; 3 – правило Ленца.

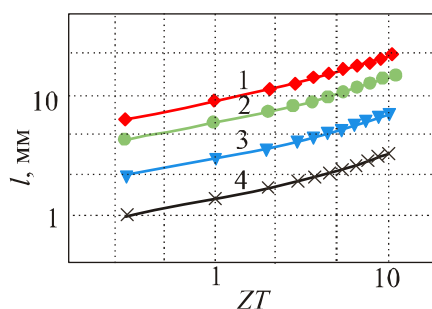
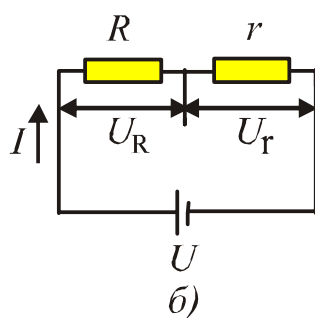


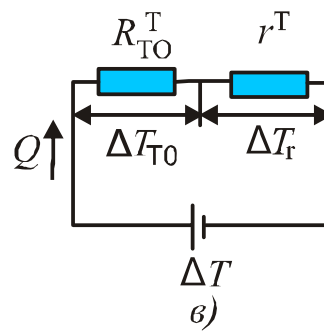
Рис. 8. Оптимальна Довжина віток  $l$  АТЕГ (1-3) і ТЕГ (4) в залежності від термоелектричної добротності  $ZT$  (водяне охолодження). Матеріали віток: 1 –  $PbTe$ ; 2, 4 –  $Bi_2Te_3$ ; 3 – «фононні скла». Теплопровідності:  $\kappa$ , Вт / (см К): 1 – 0.025; 2, 4 – 0.015; 3 – 0.005. Теорії: 4 – Іоффе [19]; 1-3 – Охотіна [20].



а)



б)



в)

Рис. 9. Академік Е. Х. Ленц (1804- 1865) (офіційний портрет РАН) [27, 28] (а) й використання його правила до електричних ( $R=r$ ) (б) і теплових ( $R_{TO}^T=r^T$ ) (в) ланцюгів АТЕГ.  $R$  і  $r$  – електричні опори зовнішнього

З рис.10 видно, що теорія Іоффе дає в  $\sim 3$  рази завищені оцінки потужності АТЕГ  $We = 0.5$ ; 0.17 і 0.003 кВт при установці АТЕГ на ДВЗ (I), ВТ (II) і СО (III) (с). У дійсності, при врахуванні паразитного теплового опору теплообмінників  $R_{TO}^T \approx R_2^T$  маємо  $We < 0.5$ ; 0.17 і 0.003 кВт (d, рис.10), що становить  $\sim 0.5$ ; 0.2 і 0.03% від потужності, що виділяється при згорянні палива  $Q_0$ .

Останні оцінки відповідають експерименту (таб.1), тому теорія Охотіна [20] є більш гарним наближенням для розрахунків АТЕГ, ніж теорія Іоффе [20].<sup>1</sup> Подальший розвиток теорії АТЕГ припускає детальне врахування взаємодії ТМ у системі «АВТОМОБІЛЬ+АТЕГ».

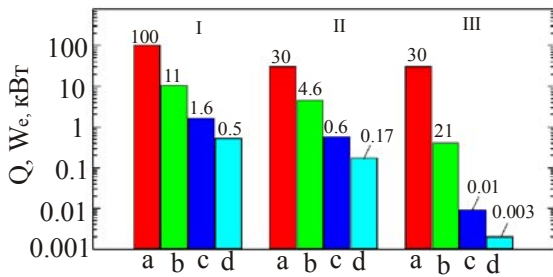


Рис. 10. Наявні входні теплові потоки автомобіля  $Q$  (a), їх доля, котру можна відвести до АТЕГ ( $Q_0^{АТЕГ}$ ) (b) і максимальна корисна потужність  $We^{max}$  АТЕГ (c, d) (водяне охолодження). Теорії: c – Іоффе [19]; d – Охотіна [20]. Місце встановлення АТЕГ: I- ДВЗ; II- ВТ; III- СО. ( $Q_0=100$  кВт,  $ZT=1$ ).

### 3. Конфлікт ДВЗ і АТЕГ

#### 3.1. Розміщення АТЕГ в автомобілі

Конфлікт різних ТМ, що утворюють одну термодинамічну систему, являє собою широко розповсюджене в техніці явище [2]. Особливістю конфлікту ДВЗ і АТЕГ у системі «АВТОМОБІЛЬ – АТЕГ» є його залежність від місця розташування АТЕГ в автомобілі [13]. Згідно рис. 3 і 10, у якості джерела тепла для АТЕГ в автомобілі по параметрах  $RT$  і  $(Q_0\Delta T)$  підходять ВТ ( $Q_0^{АТЕГ} \leq 0.3Q_0$ ) і ДВЗ ( $Q_0^{АТЕГ} \leq Q_0$ ). Установка АТЕГ на СО ( $Q_0^{АТЕГ} \leq 0.3Q_0$ ) виявляється неефективною внаслідок малості  $RT$  і  $(Q_0^{СО}\Delta T)$  СО.<sup>1</sup> Однак установка АТЕГ у ДВЗ також виявляється неефективною через конфлікт ДВЗ і АТЕГ, що розвивається з ростом  $We$  у системі «АВТОМОБІЛЬ + АТЕГ» [13- 15]. Дійсно, при установці АТЕГ у ДВЗ ТМ конкурують за потужність палива, що спалюється,  $Q_0$  [15]. У цьому випадку конфлікт ТМ швидко розвивається з ростом  $We$ , що приводить до різкого зниження загального ККД системи (ДВЗ+ АТЕГ)

$$h^{ДВЗ+АТЕГ} = h^{ДВЗ} (1 - \delta) + h^{АТЕГ} \delta, \quad (3)$$

де  $\delta = Q_0^{АТЕГ} / Q_0$  – частка тепла, що приділяється від ДВЗ до АТЕГ [15]. Зниження  $\eta^{ДВЗ+АТЕГ}$  системи має простий фізичний зміст, оскільки частина потужності палива, що згоряє,  $Q_0$  використовується менш ефективно ТМ ( $\eta^{АТЕГ} \ll \eta^{ДВЗ}$ ) [2, 15]. Із цієї причини АТЕГ у ДВЗ в цей час не встановлюється, незважаючи на великий наявний тепловий напір ( $Q\Delta T$ ) і прийнятне значення теплового опору  $R_T^{ДВЗ}$  (1, рис.5) [17, 18].<sup>2</sup>

З іншого боку, при установці АТЕГ на ВТ, ТМ конкурують за периферійні теплові потоки в системі ( $Q_0^{ВТ}$  і  $Q_0^{СО}$ ), при цьому конфлікт ТМ відповідно зменшується. У цьому випадку, основний вплив АТЕГ на роботу ДВЗ виражається в зниженні температури ВТ ( $T^{ВТ}$ ) і в підвищенні температури З ( $T^{СО}$ ). Теорія Іоффе [19] не передбачає зниження  $T^{ВТ}$  (табл.3), однак у теорії Охотіна [20] зниження  $T^{ВТ}$  при роботі АТЕГ великої потужності може виявитися значним ( до 100 К) [13]. У результаті величина  $We$  АТЕГ обмежується за рахунок зниження фактору Карно  $\eta_c$ , а також внаслідок відкладання при цьому на внутрішній стороні ВТ шару коксу, що утрудняє теплообмін (4, рис.4) [13- 14]. Згідно з нашою оцінкою, при товщині шару коксу  $d=0.3$  мм величина  $We$  АТЕГ може зменшитися в 3- 5 раз [17- 18]. З іншого боку, підвищення  $T^{СО}$  веде до перевантаження СО, що викликає необхідність збільшення потужності приводів З ( $\Delta WC^{АТЕГ}$ ) [13- 15]. Беручи до уваги, що  $\Delta WC^{АТЕГ} \sim 0.03 Q_1^{АТЕГ}$  (тут  $Q_1^{АТЕГ}$  – потужність теплового потоку на виході АТЕГ), одержуємо  $\Delta WC^{АТЕГ} \sim We$ . Таким чином, при

<sup>6</sup> Згідно нашій оцінці, ефективність РТВ СО можна збільшити до 10 раз і більше, при розміщенні гарячих стиків термопар АТЕГ в корпус ДВЗ.

<sup>7</sup> Розміщення АТЕГ в ДВЗ може виявитись ефективним в майбутньому по досягненню паритету  $\eta^{АТЕГ} \sim \eta^{ДВЗ}$  в результаті підвищення  $ZT$  ТЕМ.

врахуванні  $\Delta W_C^{ATEG}$  реальна потужність РТВ  $\Delta W$  може суттєво знизитися в порівнянні з врахуванням тільки мас – фактору  $m^*$  АТЕГ (табл.1) [18].

### 3.2. Реальні режими роботи АТЕГ

На рис.11 показано, як зменшується потужність РТП автомобіля  $\Delta W$  (1) з ростом  $W_e$  АТЕГ при послідовному врахуванні внеску мас – фактору  $m^*$  АТЕГ (1  $\rightarrow$  2), а також додаткових витрат потужності на охолодження АТЕГ  $\Delta W_C^{ATEG}$  (2  $\rightarrow$  3). При розрахунках  $m^*$  АТЕГ (рис.11) вважалось  $m^{ATEG} = km \cdot ml$ , де  $ml$  – загальна маса матеріалів віток ( $Bi_2Te_3$ ) (2),  $km = 2$  – коефіцієнт, що враховує масу арматури АТЕГ. З рис.11 видно, що в результаті врахування втрат на мас – фактор  $m^*$  АТЕГ система переходить від режиму ідеальної РТП (А) ( $\Delta W = W_e$ ) до режиму реальної РТП (В), де усе ще можлива економія палива ( $0 < \Delta W < W_e$ ). Потім при додатковому врахуванні сервісних витрат  $\Delta W_C^{ATEG}$  (4) система переходить до режиму ППЕ (С), де витрата палива автомобілем зростає ( $\Delta W < 0$ ,  $\delta A > 0$ ) (рис.11) [17, 18].

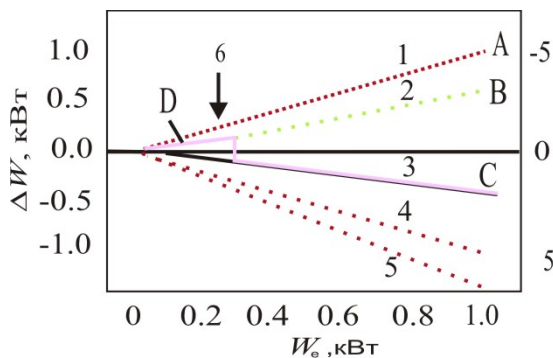


Рис. 11 Залежність потужності РТВ автомобіля  $\Delta W$  від потужності  $W_e$  АТЕГ (1-3). Режими: 1 – без врахування втрат ( $\Delta W = W_e$ ); 2 – врахування втрат на рух; 3 – врахування втрат на охолодження СО й рух (5). Втрати: 4 – охолодження СО; 5 – охолодження СО й рух. Режими: А – ідеальна РТВ; В, D – реальна РТВ; С – ППЕ; D – використання резервів СО. 6 – момент включення додаткової потужності приводів СО. (Резерв СО- 30% (9 кВт),  $Q_0 = 100$  кВт;  $k_m = 2$ ;  $\eta^{ATEG} = 0.03$ ;  $l = 6$  мм;  $Bi_2Te_3$ ).

З рис. 11 випливає, що при малих корисних потужностях  $W_e \geq 0$  і  $\Delta W_C^{ATEG} = 0$  (інтервал D) будь-який АТЕГ може працювати в автомобілі в режимі реальної РТВ (В) при  $\Delta W_C^{ATEG} = 0$ , якщо використовувати для охолодження холодних спайв АТЕГ резерви штатної СО автомобіля [14]. Довжина інтервалу D на рис.11 відповідає резерву СО по потужності охолодження  $\Delta W_C \sim 30\%$  (9 кВт). При надходженні більшої потужності від АТЕГ у СО (при  $W_e > 0.2$  кВт) включаються додаткові приводи 3 (стрілка 6, рис.11) і АТЕГ переходить у режим ППЕ (3), де витрата палива автомобілем збільшується ( $\Delta W < 0$ ,  $\delta A > 0$ ). Таким чином, використовуючи комбінований режим роботи DC (рис.11) можна по необхідності, або, знижуючи  $W_e$ , підвищувати потужність РТВ  $\Delta W$ , або навпаки – збільшувати  $W_e$ , переводячи АТЕГ у режим ППЕ.

На рис. 12 показані залежності ефективного ККД АТЕГ  $\eta^* = \eta^{ABTO} W_e / \Delta W_{ДВЗ}$  в описаних режимах В, С і D (рис.11). З рис. 12 видно, що в режимі реальної РТП (В і D) величина  $\eta^*$  АТЕГ виявляється досить високою ( $\sim 0.5$ ) (В). При переході до режиму ППЕ (3) величина  $\eta^*$  зменшується до  $\sim 0.12$ , але також суттєво перевищує власний ККД АТЕГ як ТМ ( $\eta^{ATEG} \sim 0.03$ ) (3, рис.12). Механізм збільшення ефективного ККД  $\eta^*$  АТЕГ в автомобілі в режимах (В, С і D, рис.11) має простий фізичний зміст [18]. Як відомо, АТЕГ використовує непридатне тепло автомобіля, що саме по собі не вимагає збільшення витрати палива  $\delta A$  [1]. Збільшення витрати палива ( $\delta A > 0$ ) необхідно тільки для компенсації сервісних витрат ДВЗ на транспортування ( $\Delta W_T > 0$ ) і охолодження холодних спайв АТЕГ ( $\Delta W_C^{ATEG} \geq 0$ ). Ці компенсації проводяться за рахунок росту потужності ДВЗ, який є ТМ із більш високим ККД, ніж АТЕГ ( $\eta^{ДВЗ} = 0.2-0.4$ ). Таким чином, співвідношення  $\eta^{*ATEG} > \eta^{ATEG}$  (1-3, рис.12) є наслідком кооперативного ефекту в системі «АВТОМОБІЛЬ+ АТЕГ» [18]. Описані енергозберігаючі режими роботи АТЕГ (В, С, D, рис.11 і 12) становлять практичний інтерес. При цьому у всіх режимах (В, С, D, рис.11 і 12)

ефективність роботи АТЕГ може бути підвищена за рахунок використання нових ТЕМ з поліпшеними характеристиками [13, 14].

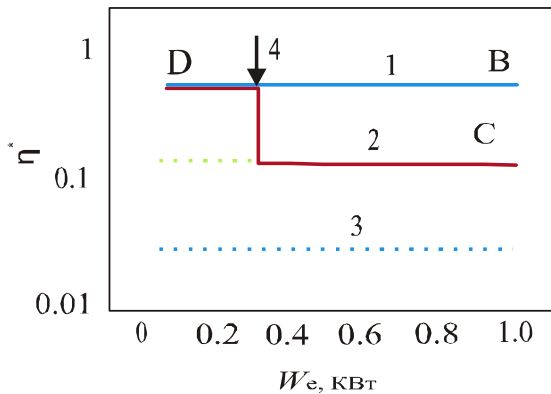


Рис. 12. Залежності ефективного ккд  $\eta^* = \eta^{ABTO} W_e / \Delta W^{ДВЗ}$  генерації електричної енергії за допомогою АТЕГ в автомобілі. Режими: В, D – реальна РТВ (1), С – ПГЕ (2), 3 – ККД АТЕГ як ізольованої ТМ. 4 – момент включення додаткової потужності приводів СО.

#### 4. Термоелектричні матеріали для АТЕГ

На рис. 13 наведені температурні залежності безрозмірної добротності  $ZT$  і оптимальна ширина забороненої зони  $E_g^{opt} \sim 8k_0T$  (тут  $k_0$  – постійна Больцмана) ТЕМ, придатних для використання в АТЕГ [15]. Показані перепади температур  $\Delta T_0$  для бензинових і дизельних двигунів (b, d) і їх реальні значення (a, c), зменшені через теплові опори теплообмінників. З рис.13 видно, що теорії Іоффе [19] і Охотіна [20] приводять до суттєво різних критеріїв пошуку ТЕМ для АТЕГ. Згідно з теорією Іоффе [19] для АТЕГ потрібні матеріали із шириною забороненої зони  $E_g^{opt} = 0.4- 0.6$  еВ ( $T_{max} = 700- 1100$  К) (d, b, рис.13). З [30, 31] випливає, що саме ТЕМ з  $E_g^{opt} = 0.4- 0.6$  еВ інтенсивно розроблялися фахівцями останнім часом (5, 7, рис.13). Однак при врахуванні правила Ленца для теплових ланцюгів АТЕГ (рис.9), реальні перепади температур на вітках АТЕГ  $\Delta T$  і оптимальна ширина забороненої зони ТЕМ будуть менше -  $E_g^{opt} \sim 0.25- 0.4$  еВ ( $T_{max} = 400- 700$  К) (a, c, рис.13) [20]. Такі сплави з  $E_g^{opt} \sim 0.25- 0.4$  еВ у цей час відсутні, на що вказує «провал», що існує на сімействі кривих  $ZT=f(T)$  в інтервалі температур  $T = 400- 700$  К (відзначений стрілкою 9, рис.13). З ТЕМ, наявних у цей час, для АТЕГ найкраще підходять сплави типу  $Bi - Sb - Te - Se$  з  $E_g \sim 0.2$  еВ (2, рис.9), які широко використовуються розробниками АТЕГ (табл.1). Недавно максимум  $ZT$  цих сплавів нам вдалося трохи збільшити й зрушити у бік високих температур шляхом їхнього легування індієм (1, рис.13) [29]. Серед інших матеріалів, придатних для АТЕГ, можна відзначити сплави на основі  $Mg- Si- Sn$  з малою густиною  $d \sim 3$  г/см<sup>3</sup> і шириною забороненої зони  $E_g = 0.5$  еВ, злегка більшою оптимальної (6, 7, рис.13). Використання сплавів на основі  $Mg- Si- Sn$  може привести до істотного зниження мас – фактору  $m^*$  АТЕГ [23, 32].

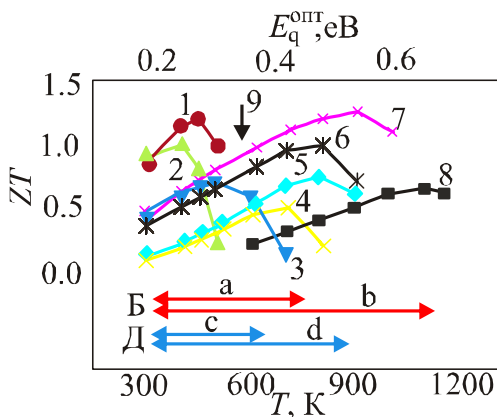


Рис. 13. Температурні залежності безрозмірної добротності  $ZT$  і оптимальна ширина забороненої зони  $E_g^{opt}$  ТЕМ. 1 - n-  $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}<I, In>$  [29]; 2, 3 -  $Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3$  [30, 31]; 4 - p-  $Mg_2Si_{0.4}Sn_{0.6}$  [23]; 5 –  $PbTe$  [31]; 6 - n-  $Mg_2Si_{0.4}Sn_{0.6}$  [32]; 7 –  $AgPb_x(SbTe)_{1-x}$  (LAST) [31]; 8 –  $Ge-Si$  [31]; 9 – «провал». Очікувані  $\Delta T_0$  (b, d) і реальні  $\Delta T$  (a, c) перепади температур на вітках АТЕГ. Двигуни: a, b - бензинові (B); c, d – дизельні (D).

## 5. Обговорення результатів

Технологія РТВ автомобілів за допомогою АТЕГ розвивається із середини ХХ сторіччя в різних країнах [12]. Однак ефективний АТЕГ дотепер так і не створений, що звичайно пов'язується розробниками АТЕГ з технічними труднощами [1, 3 – 7]. Зазначений термін (більш 50 років) суттєво перевищує звичайний час розробки будь-якого технічного продукту (кілька років). Це показує, що успішному розв'язку проблеми АТЕГ перешкоджають не одні тільки технічні труднощі [13 – 14].

У даній роботі встановлено, що РТВ автомобілів за допомогою АТЕГ має тверді термодинамічні обмеження. Висновок заснований на аналізі результатів експериментальних досліджень прототипів серійних АТЕГ, розроблених останнім часом для мотоциклів, легкових автомобілів і вантажівок [1, 3 – 7]. Показано, що у всіх випадках експериментальні характеристики АТЕГ виявляються суттєво нижчі розрахункових [1, 3- 7], що зв'язано в роботі з використанням при розрахунках теорії Іоффе [19], яка не враховує високі теплові опори теплообмінників на границі «ВГ/ВТ». У результаті очікувані характеристики АТЕГ виявилися завищеними, а перспективи використання АТЕГ в автомобілях надто оптимістичними [1, 3- 7].

З іншого боку, отримані на практиці низькі експериментальні характеристики сучасних АТЕГ (табл.1), були пояснені в роботі за допомогою теорії Охотіна [20], що враховує систематично високі паразитні теплові опори теплообмінників АТЕГ на границях «ВГ/ ВТ» [2]. Додатково факторами, що знижують характеристики АТЕГ, є різномірність АТЕГ і ДВЗ як ТМ, у результаті чого в системі (АВТОМОБІЛЬ + АТЕГ) виникають труднощі теплообміну. Крім того, з ростом  $We$  у системі (АВТОМОБІЛЬ + АТЕГ) розвивається конфлікт ТМ (ДВЗ і АТЕГ), що обмежує  $We$  і  $W$  АТЕГ. Як наслідок, питомі потужності АТЕГ  $\hat{W}^{АТЕГ}$  суттєво поступаються по величині питомої потужності ТЕГ інших типів, що використовують рідкі, або тверді теплоносії (табл.2) [18].

Відповідно, основним способом поліпшення характеристик АТЕГ у цей час представляється вдосконалювання їх теплообмінників (резерв по питомій потужності  $\hat{W}^{АТЕГ}$  до 10 раз і більш) [18]. При цьому підвищення термоелектричної ефективності  $ZT$  ТЕМ, за нашими оцінками, у цей час може мати лише допоміжний характер (реальний резерв по  $\hat{W}^{АТЕГ}$  до 2 раз). Отриманий висновок підтверджується літературними даними. Дійсно, найбільший прогрес у поліпшенні характеристик АТЕГ останнім часом досягнеться саме шляхом поліпшення конструкцій теплообмінників АТЕГ [3, 9, 11, 26]. Здається, що зараз, поряд з удосконалюванням теплообмінників, не слід відмовлятися також від використання енергозберігаючих режимів роботи АТЕГ, описаних в даній роботі (рис.11 і 12). У літературі є приклади використання подібних режимів роботи АТЕГ фірмами – розробниками. Це – демонстрація ефективності РТП автомобілів на прикладі АТЕГ малої потужності  $We \leq 0.2$  кВт [6]. Висувалися також пропозиції заміни (повної, або часткової) автомобільних генераторів з ремінним приводом більш сучасними АТЕГ зі збільшеним ККД  $\eta^{*АТЕГ} > 0.1-0.5$  [10].

## Висновки

1. При установці автомобільного термоелектричного генератора (АТЕГ) на вихлопну трубу (ВТ) автомобіля виникають істотні термодинамічні обмеження на величину одержуваної корисної електричної потужності  $We$  і рекуперованої енергії  $\Delta W$ .
2. Тому перспективи використання АТЕГ великої потужності для рекуперації теплових втрат і скорочення витрати палива в автомобілях ( $\Delta W > 0$ ,  $\delta A < 0$ ) у цей час істотно обмежені.

3. Проте, АТЕГ помірної потужності можуть ефективно використовуватися в автомобілях у режимах РТВ і ПГЕ, враховуючи їхні високі ефективні ККД ( $\eta^{*АТЕГ} > 0.1-0.5$ ), підвищені за рахунок кооперативного ефекту в системі «АВТОМОБІЛЬ + АТЕГ».

## Література

1. Vining C.B. The Limited Role for Thermoelectrics in Climate Crisis // J. Thermoelectricity. 2008. – №4. – P.7-19.
2. Техническая термодинамика. / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.В. Шейндлин М.: Энергия. 1974. 448 с.
3. Saqr K.M., Mansour M.K., Musa N.N., Thermal Design of Automobile Exhaust-based Thermoelectric Generator Objectivities and Challenges // International Journal of Automotive Technology. 2008. V.9. № 2..P.155- 160.
4. Rove D.M., Smith J., Thomas G., and Min G. Weight Penalty Incurred in Thermoelectric Recovery of Automobile Exhaust Heat // J. Electronic Materials. 2011. - V.40. - № 5. - P.784-788.
5. Lieb J., Neugebauer S., Eger A., Linde M., Masar B., Stütz W. The Thermoelectric Generator from BMW is Making Use of Waste Heat // MTZ. 2009. - V.70. - №4. - P. 4- 11.
6. Eger A., Linde M. The BMW Group. Roadmap for the Application of Thermoelectric Generators. San Diego. 2011. - 23 p.
7. Kajikawa T. Advanced Thermoelectric Power Generation in Japan // J. Thermoelectrisity. 2011. - №3 – P. 5- 18.
8. Espinosa N., Lazard M., Aixala L., Scherrer H. Modeling Thermoelectric Generator Applied to Diesel Automotive Heat Recovery // J. Electronic Materials. - 2010. - V.39.- №9.- P.1446-1455.
9. Anatyчук L.I., Luste O.J., and Kuz R.V. Theoretical and Experimental Study of Thermoelectric Generators for Vehicles // J. Electronic Materials. - 2011.- V.40. - № 5. - P.1326-1331.
10. Fairbanks J. W., Development of automotive thermoelectric generators and air conditioner/heaters // Proceedings of XIV International Forum on Thermoelectricity, Moscow 17- 20.05.2011, Report 1.1 [On line: <http://forum.inst.cv.ua/> ].
11. Термоелектричний генератор для бензинового двигателю. / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоелектричество. – 2012. – №2. –С.81 –94.
12. Файнзильбер Э. М. Использование тепла отработавших газов двигателей в термоелектрическом генераторе для питания элементов электрооборудования автомобилей / Э.М. Файнзильбер, Л.М. Драбкин // Автомобильная промышленность. – 1966. – №7 – С.9 – 10.
13. Коржуєв М.А. Некоторые узкие места автомобильных термоелектрических генераторов и поиск новых материалов для их устранения / М.А. Коржуєв, Ю.В. Гранаткина // Термоелектричество. – 2012. – №1. – С.81 – 94.
14. Коржуєв М.А. О конфликте двигателей внутреннего сгорания и термоелектрических генераторов при рекуперации тепловых потерь в автомобилях / М.А. Коржуєв // Письма в ЖТФ.- 2011. – Т.37. – №4. – С.8 – 15.
15. Korzhuev M.A., Katin I.V. On the Placement of Thermoelectric Generators in Automobiles // Journal of Electronic Materials. 2010. - V.39. - №9. - P. 1390-1394.
16. Korzhuev M.A., Katin I.V. Reduced life time of the vehicles by installation 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. Коржуєв М.А., Катин И.В. Возможные экономические последствия для термоэлектрической автомобильной отраслей, связанные с началом массового производства автомобильных термоэлектрических генераторов. // Термоэлектрики и их применения. Под ред. М.И. Федорова, Л.Н. Лукьяновой. Спб.: Rep.68p Korjuev. [Online] [http:// www.ioffe.ru/Thermolab](http://www.ioffe.ru/Thermolab)
18. Коржуєв М.А. Некоторые особенности автомобильных термоэлектрических генераторов (АТЭГ), а также перспективы их использования на транспорте. / М.А. Коржуєв., И.В. Катин // Термоэлектрики и их применения. Под ред. М.И. Федорова, Л.Н. Лукьяновой. Спб.: Rep.67p Korjuev. [Online] [http:// www.ioffe.ru/Thermolab](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 [и др.] М.: Атомиздат. 1976. 320 с.
21. Поздняков Б. СТермоэлектрическая 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. Исаченко Г.Н., Зайцев В.К., Федоров М.И., Гуриева Е.А., Константинов П.П. Термоэлектрические свойства твердых растворов между соединениями  $Mg_2X$  ( $X= Si, Ge, Sn$ ) р- типа // Термоэлектрики и их применения. Под ред. М.В.Ведерникова, Л.Н.Лукьяновой. СПб.: ПИЯФ. - 2010. - С. 99- 102.
24. Snyder G. J. Thermoelectric Power Generators. Efficiency and Compatibility // In: Thermoelectric Handbook. Macro to Nano. Ed: D.M.Rowe. CRC Press. Taylor & Francis.: Boca Rato, London, N.Y. 2006. P. 9.1 – 9.26.
25. Anatyshuk L.I. Thermoelectricity. V. 2. Thermoelectric power converters. – Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity. – 2003. - 376 p.
26. Плеханов С.Н., Новиков В.Э., Терекоев А.Я. Термоэлектричеству в России – 250 лет. // Термоэлектрики и их применения. Под ред. Plehanov. Спб.: Rep.19p Korjuev. [Online] [http:// www.ioffe.ru/Thermolab](http://www.ioffe.ru/Thermolab)
27. Академия наук СССР. Персональный состав (1724- 1917). Книга 1 – М., Наука, 1974. – 480 с.
28. Gliozzi M. Storia della fisica. Torino: Italy. - 1965. - 464 p.
29. Свєчнікова Т.Є., Нихезина И.Ю., Коржуєв М.А. Термоэлектрические свойства кристаллов  $n-Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}<I, In>$  // Неорганические материалы. - 2011. - Т.47. - №12. - С. 1314–1318.
30. Nolas G.S., Sharp J., Goldsmid H.J. Thermoelectrics. Basic Principles and New Materials Developments. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer. - 2001.- 293 с.
31. Sootsman J.R., Chung D.Y., Kanatzidis M.G. New and Old Concept in Thermoelectric Materials // Angew. Chem. Int. Ed. – 2009. – V.48 – P.8616 –8639/
32. Fedorov M.I. Band structure parameters influence on the thermoelectric figure of merit // Proc. 5-th European Conf. on Thermoelectrics. Ukraina. Odessa: Thermion Comp. - 2007. - P.35- 40.

Надійшла до редакції 20.03.2013