



Максимук Н.В.

Максимук Н.В.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕДПУСКОВОГО НАГРЕВАТЕЛЯ НА ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ

Приведены результаты компьютерного проектирования термоэлектрического нагревателя на газовом топливе выходной электрической мощностью 230 – 250 Вт для предпускового подогрева двигателей транспортных средств в условиях пониженных температур окружающей среды.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, предпусковой нагреватель, термоэлектрический генератор, физическая модель, компьютерное проектирование.

This paper presents the results of computer design of thermoelectric heater on gas fuel with electric power output 230 – 250 W for start heating of vehicle engines under low ambient temperatures.

Key words: internal combustion engine, starting pre-heater, thermoelectric generator, physical model, computer design.

Введение

Согласно данным Международного энергетического агентства, количество автомобилей в мире по состоянию на 2015 год превысило 1 миллиард. Из них около 22.5 миллионов используют в качестве топлива сжиженный пропан-бутан. В Украине ~ 10 % автомобильного парка (800 тыс. машин) оснащены газобаллонным оборудованием (ГБО) 3 и 4 поколений. Можно ожидать, что за 2 – 3 года не меньше 20 % будут составлять модели, работающие на газовом топливе [1].

Повышенный спрос на такие автомобили обусловлен рядом преимуществ в использовании пропан-бутана по сравнению с бензином:

- большее октановое число (112 для пропан-бутана, 80 – 98 для бензина), что обеспечивает надежную работу двигателя на всех режимах практически без детонации;
- уменьшенная нагрузка на поршни двигателя;
- увеличение межремонтного периода двигателя в 1.5 раза;
- повышение срока эксплуатации моторного масла в 1.5 – 2 раза;
- снижение уровня шума при работе двигателя на 3 – 8 дБ (минимум в два раза);
- повышение срока эксплуатации свечей зажигания до 40 %;
- уменьшение уровня токсичных выхлопных газов: CO – в 2 – 3, NO – в 1.2, а CH – в 1.3 – 1.9 раз.

Одним из основных недостатков применения сжиженного пропан-бутана, как топлива для автомобилей, является образование и замерзание конденсата в редукторе и трубках ГБО при понижении температуры. В результате двигатель глохнет и завести его снова практически

невозможно. Кроме того, обледенение редуктора существенно сокращает срок эксплуатации его мембран.

Для предотвращения преждевременного выхода из строя мембран и клапанов редуктора, а в целом – обеспечения надежного запуска автомобиля при пониженных температурах, двигатель необходимо предварительно прогревать.

В настоящее время наиболее эффективным средством, обеспечивающим прогрев двигателей, является автономный предпусковой подогрев [2].

Однако основным фактором, ограничивающим использование предпусковых газовых нагревателей для автомобилей, оборудованных ГБО-3 и ГБО-4, является нестабильная работа и низкая надежность газовой системы. В этом случае необходимо запускать и прогревать двигатель на жидком топливе с последующим переходом на газовое, что хоть и экономит горючее, однако нивелирует все преимущества предпускового подогрева.

В настоящее время открываются широкие перспективы в применении газовых предпусковых нагревателей, связанные с использованием в автомобилях газобаллонного оборудования «нового поколения» – ГБО-5 и ГБО-6. Отличие данных разработок заключается в том, что подача газа во впускной коллектор осуществляется не в газообразном, а в жидком состоянии – через специальные форсунки. Поэтому эти системы имеют абсолютно новую конструкцию. Так, редуктор заменен регулятором давления и газотопливным насосом, который прокачивает сжиженный газ в направлении к форсункам. Поскольку в такой конструкции отсутствует необходимость испарять газ в редукторе, это дает возможность запускать двигатель при любых низких температурах окружающей среды.

С появлением систем ГБО-5 и ГБО-6 на рынке предпусковых нагревателей появились модели (Webasto LGW 300, Trumatic E2400-E4400), работающие на пропан-бутане и осуществляющие предпусковой подогрев транспортных средств на газовом топливе.

Во избежание разрядки аккумулятора автомобиля во время предпускового подогрева, в качестве источника электричества для таких нагревателей рационально использовать термоэлектрический генератор [3 – 5].

В работе [6] показано, что общая электрическая мощность термогенератора для предпусковых нагревателей транспортных средств с объемом двигателя до 4 л должна составлять 70 – 90 Вт; для транспортных средств с объемом двигателя 4 – 10 л и больше 10 л – 130 – 150 Вт, 230 – 250 Вт соответственно. Такие электрические мощности термогенераторов обеспечивают автономное питание компонент обогревателей и дополнительно позволяют осуществлять подзарядку аккумуляторной батареи и питание другого автомобильного оборудования.

В [7, 8] описаны устройство, принцип работы и результаты компьютерного проектирования термоэлектрического автомобильного предпускового нагревателя на жидком топливе электрической мощностью 70 – 90 Вт и 130 – 150 Вт.

Целью данной работы является проектирование конструкции термоэлектрического автомобильного предпускового нагревателя на сжиженном газовом топливе электрической мощностью 230 – 250 Вт для предпускового подогрева двигателя в условиях пониженных температур окружающей среды.

Выбор конструкции термоэлектрического предпускового нагревателя

В качестве источника тепла использована газовая горелка (рис. 1) жидкостного предпускового нагревателя «Webasto LGW 300». Принимая во внимание её конструкцию,

наиболее рациональной формой горячего теплообменника, с точки зрения эффективного теплообмена с источником тепла, является цилиндрическая труба, во внутреннем объеме которой находится горелка, а внешняя поверхность выполнена в виде плоскостей, на которых располагаются термоэлектрические модули.

Термоэлектрический преобразователь состоит из термоэлектрических генераторных модулей на основе теллурида висмута «Алтек-1061», которые при поступлении необходимого количества тепла к горячей стороне и достижении оптимальных рабочих температур обеспечивают генерирование заданной электрической мощности.



Рис. 1. Внешний вид газовой горелки жидкостного предпускового нагревателя «Webasto LGW 300» [9].



Рис. 2. Внешний вид циркуляционной помпы жидкостного предпускового нагревателя «Webasto LGW 300» [9].

На рис. 3 приведено трехмерное графическое изображение зависимости электрической мощности P' и коэффициента полезного действия (КПД) η' от температуры горячей T_2 и холодной T_x сторон термоэлектрического модуля «Алтек-1061».

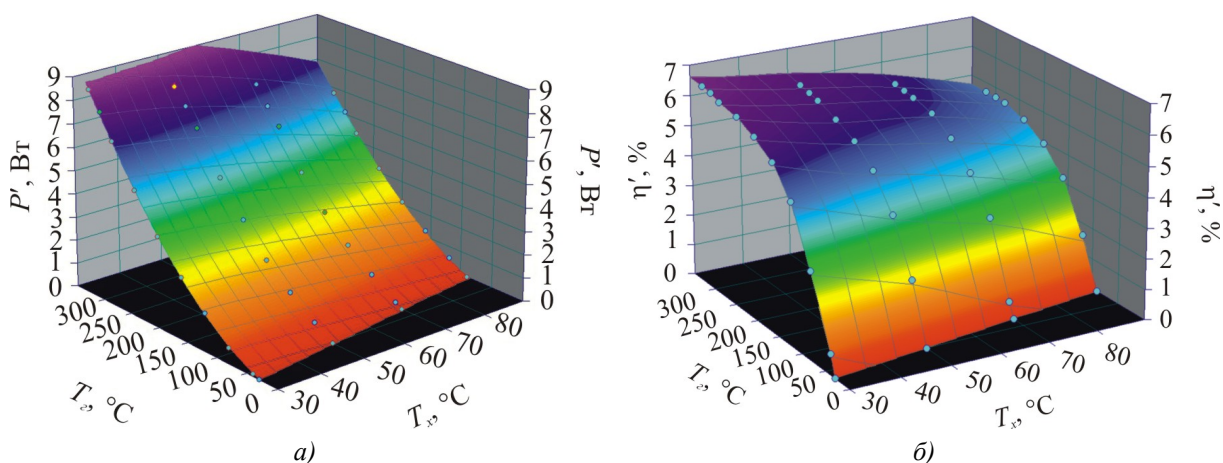


Рис. 3. Зависимость электрической мощности P' (а) и КПД η' (б) от температуры горячей T_2 и холодной T_x сторон термоэлектрического модуля «Алтек-1061» [10].

Из анализа представленных на рис. 3 данных следует, что для обеспечения выходной электрической мощности нагревателя на уровне 230 – 250 Вт необходимы 32 модуля «Алтек-1061». Исходя из этих соображений, наиболее эффективной конструкцией горячего теплообменника является правильный восьмигранник, на каждой стороне которого размещены по 4 термоэлектрических модуля. При этом температура горячей стороны модулей должна составлять $280 \div 330$ °C, холодной – $30 \div 70$ °C.

Если учесть, что эффективность термоэлектрических генераторов с однокаскадными

модулями на основе теллурида висмута составляет 3 – 3.5% [11], то для обеспечения выходной электрической мощности нагревателя на уровне 230 – 250 Вт необходимо затратить ~ 6.6 – 7.2 кВт тепла, что соответствует расходу пропан-бутана на уровне 510 – 550 г/ч. Следует также заметить, что подача топлива к горелке осуществляется насосом системы ГБО, поэтому в конструкции газового нагревателя, в отличие от бензинового и дизельного аналогов, индивидуальный топливный насос отсутствует, а расход регулируется изменением отверстий форсунок.

В качестве циркуляционного насоса использована циркуляционная помпа жидкостного предпускового нагревателя «LGW 300» (Webasto). Данный тип помпы специально спроектирован для прокачки теплоносителя в транспортных средствах с объемом двигателя больше 10 л. Номинальное напряжение питания помпы составляет 24 В, максимальный расход теплоносителя составляет 5.2 м³/ч.

Физическая модель термоэлектрического предпускового нагревателя и ее описание

В [7] показано, что для расчетов основных энергетических и конструктивных параметров нагревателя удобно использовать физическую модель, показанную на (рис. 4), где процесс теплопередачи от источника тепла к термоэлектрической батарее (ТЭБ) происходит вследствие прохождения через горячий теплообменник потока газов со скоростью v и температурой T_G .

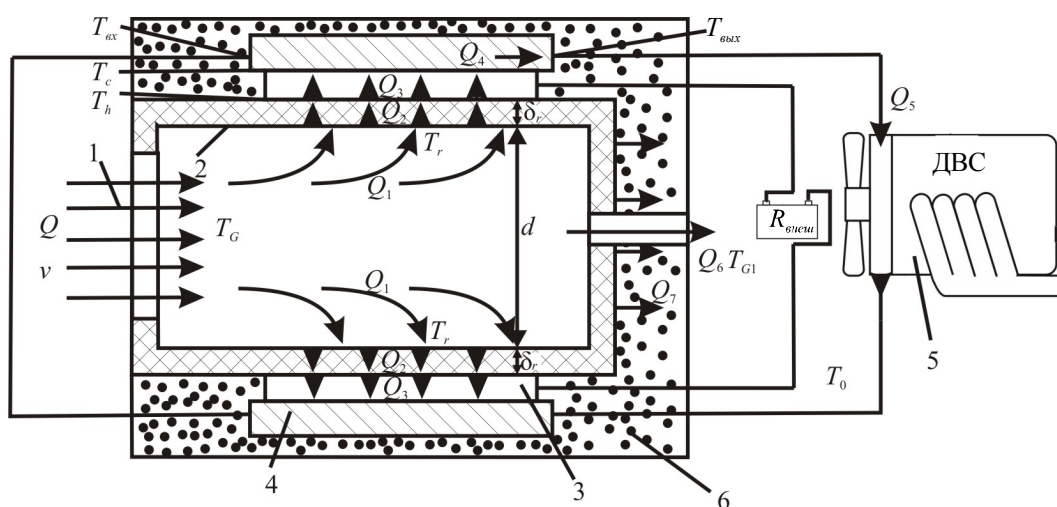


Рис. 4. Физическая модель термоэлектрического автомобильного нагревателя:
 1 – поток газов; 2 – горячий теплообменник; 3 – термоэлектрическая батарея;
 4 – холодный теплообменник; 5 – двигатель автомобиля; 6 – теплоизоляция.

При этом количество теплоты Q , выделяемое вследствие сгорания топлива, используется для нагревания газов, которые образовались в результате полного сжигания топлива:

$$g_n G_n = C_p (T_G - T_0), \quad (1)$$

где g_n и G_n – расход и теплотворная способность топлива, соответственно; C_p – суммарная теплоемкость газов (CO_2 , H_2O , N_2 и воздух), образовавшихся в результате сгорания топлива; T_0 – температура окружающей среды.

Количество теплоты Q_1 , поступающего от нагретых газов к горячему теплообменнику, передается конвективным путем

$$Q_1 = \alpha (T_G - T_r) S_R, \quad (2)$$

где α – конвективный коэффициент теплоотдачи от газа к теплоприемной поверхности горячего теплообменника;

T_r – температура теплоприемной поверхности горячего теплообменника;

S_R – площадь теплоприемной поверхности горячего теплообменника.

Вследствие теплопроводности тепло Q_2 передается от теплоприемной поверхности горячего теплообменника горячей стороне термобатареи; так что его количество

$$Q_2 = \frac{S_r \lambda_r}{\delta_r} (T_r - T_2). \quad (3)$$

Здесь S_r – площадь теплоотдающей поверхности горячего теплообменника;

λ_r – теплопроводность материала теплообменника;

δ_r – толщина основы теплообменника;

T_2 – температура горячей стороны ТЭБ.

Полезное тепло Q_3 , поступающее в термоэлектрические модули, рассчитано, исходя из мощности P' одного модуля при определенных температурах горячей T_2 и холодной T_x сторон ТЭБ, его КПД η' и количества модулей n :

$$Q_3(T_2, T_x) = n \frac{P'(T_2, T_x)}{\eta'(T_2, T_x)}. \quad (4)$$

Тепло Q_4 отводится от холодной стороны ТЭБ потоком теплоносителя, который циркулирует в холодном жидкостном теплообменнике 4:

$$Q_4 = g_T c_{pT} (T_{ex} - T_{вых}), \quad (5)$$

где g_t – расход теплоносителя; c_{pT} – теплоемкость теплоносителя; T_{ex} , $T_{вых}$ – температуры теплоносителя на входе и на выходе системы охлаждения ТЭБ соответственно.

Поскольку холодные жидкостные теплообменники объединены в один гидравлический контур с системой охлаждения двигателя 5, отведенное теплоносителем тепло от модулей используется на предпусковой прогрев двигателя:

$$Q_5 = c_D m_D (T_{вых} - T_0), \quad (6)$$

где c_D , m_D – теплоемкость и масса двигателя автомобиля соответственно; T_0 – температура окружающей среды.

Основные потери тепла:

1) Q_6 – с продуктами реакции (водой H_2O , углекислым газом CO_2 и азотом N_2):

$$Q_6 = C_c m_c (T_{G1} - T_0), \quad (7)$$

где C_c – средняя теплоемкость продуктов реакции; m_c – масса продуктов реакции; T_{G1} – температура продуктов реакции.

2) Q_7 – на тепловой изоляции:

$$Q_7 = \frac{\lambda S_{p2}}{L} (T_B - T_0), \quad (8)$$

где λ – теплопроводность изоляционного материала; S_{p2} – площадь поверхности горячего теплообменника, не занятой термоэлектрической батареей; L – толщина слоя теплоизоляции.

Таким образом, уравнения теплового баланса для избранной модели термоэлектрического автомобильного нагревателя можно записать в виде:

$$\begin{cases} Q = Q_1 + Q_6, \\ Q_1 = Q_2 + Q_7, \\ Q_2 = Q_3, \\ Q_3 - P = Q_4, \end{cases} \quad (9)$$

где P – выходная электрическая мощность нагревателя.

Решение системы уравнений теплового баланса (9) дает возможность определить основные энергетические и конструктивные параметры термоэлектрического автомобильного нагревателя.

Цель компьютерного проектирования состояла в определении:

- температуры газов T_G в горячем теплообменнике и эффективной площади теплоприемной поверхности горячего теплообменника S_R для обеспечения на горячей стороне термобатареи температуры $T_2 = 280 - 330$ °С.
- тепловой мощности Q_5 , которая отводится теплоносителем, для оценки скорости прогрева двигателя автомобиля.

Результаты расчетов

Методика расчетов температуры газов T_G детально описана в [7].

В результате соответствующих вычислений получено соотношение (10), определяющее зависимость скорости подачи воздуха v в горячий теплообменник от температуры T_G :

$$v = 5 \left[\frac{\frac{G_n}{T_G - T_0} - 20.29}{18.15} + 1 \right] \frac{3.62 g_n}{\rho_{T_0} S_R}, \quad (10)$$

где 20.29 и 18.15 – коэффициенты, определяющие содержание углекислого газа, воды, азота и воздуха, образовавшихся в результате полного сгорания пропан-бутана; 3.62 – коэффициент, который определяет количество кислорода, необходимого для полного сжигания пропан-бутана; ρ_{T_0} – плотность воздуха при заданной температуре окружающей среды.

С помощью пакета прикладных программ Mathcad определяли обратную зависимость температуры горячих газов T_G от скорости воздуха v (рис. 5) при $G_n = 46.8$ МДж/кг, $g_n = 550$ г/ч., $T_0 = 0$ °С, $\rho_{T_0} = 1.29$ кг/м³ и диаметре камеры сгорания $d = 80$ мм.

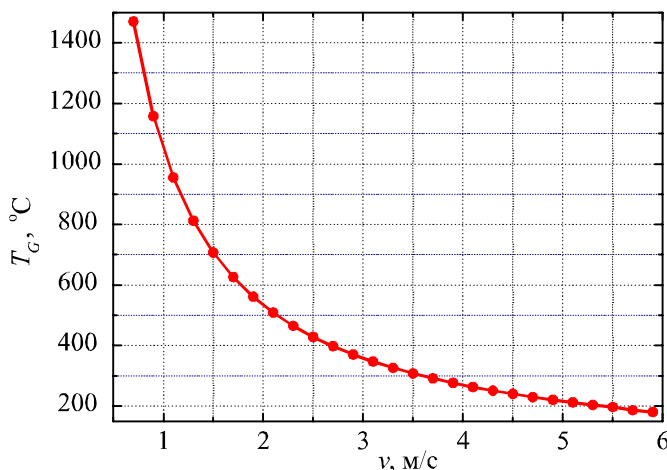


Рис. 5. Зависимость температуры газов T_G от скорости подачи воздуха v в горячий теплообменник.

Из анализа приведенных на рис. 5 данных следует, что для дальнейших расчетов конструкции горячего теплообменника нецелесообразно использовать $T_G < 300$ °С и $T_G > 500$ °С: в первом случае необходимых температур на горячей стороне модуля достичь невозможно, во втором – повышение температуры ведет к увеличению габаритных размеров теплообменника вследствие вероятности перегрева термобатареи.

Поэтому для определения зависимости температуры горячей стороны модулей T_2 от площади теплоприемной поверхности использовали температуру горячих газов $T_G = 300 \div 500$ °С, что соответствует скоростям воздуха $2.1 \div 3.5$ м/с.

Проектирование проводилось с использованием программной среды «Comsol Multiphysics» [12] численным методом конечных элементов.

В процессе компьютерного проектирования в качестве исходных данных использовались следующие величины:

- температура горячих газов $T_G = (300; 400; 500)$ °С;
- скорость газов в теплообменнике $v = (3.5; 2.6; 2.1)$ м/с;
- площадь теплоприемной поверхности $S_R = (0.05; 0.085; 0.115; 0.15; 0.185)$ м²;
- теплопроводность материала горячего теплообменника $\lambda_r = 140$ Вт/м·К;
- тепловое сопротивление термоэлектрического модуля $\kappa_m = 0.7$ К/Вт.

При этом считали, что стоки тепла находятся в месте выхода продуктов сгорания из теплообменника и в местоположениях модулей, а на всех других границах наложены условия тепловой адиабатической изоляции.

На рис. 6 приведены полученные в результате компьютерного проектирования зависимости температуры горячей стороны модуля T_2 от площади теплоприемной поверхности S_R при температурах горячих газов T_G в пределах 300 – 500 °С.

Из представленных на рис.6 данных видно, что температура на горячей стороне модуля 330 °С достигается при температуре газов $T_G = 400$ °С и площади теплоприемной поверхности горячего теплообменника $S_R = 0.12$ м². Дальнейшее наращивание количества каналов на внутренней поверхности теплообменника приводит к возникновению дополнительных аэродинамических сопротивлений, вследствие чего снижается скорость движения газов и, соответственно, температура на горячей стороне термоэлектрической батареи падает.

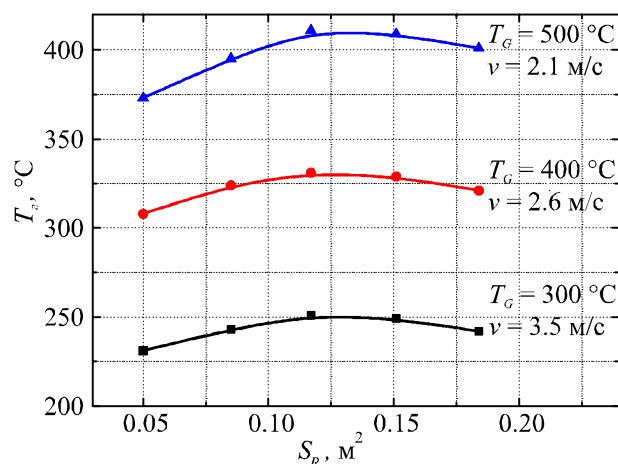


Рис. 6. Зависимость температуры горячей стороны модуля T_2 от площади теплоприемной поверхности S_R теплообменника.

На рис. 7 приведено распределение температур в системе «горячий теплообменник-термоэлектрические модули», а на рис. 8 – сетка метода конечных элементов.

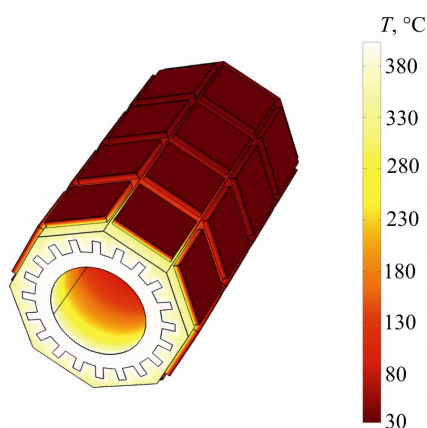


Рис. 7. Распределение температур в системе «горячий теплообменник-термоэлектрические модули». $T_G = 400\text{ }^\circ\text{C}$, $S_R = 0.12\text{ м}^2$.

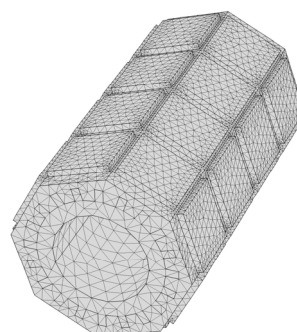


Рис. 8. Сетка метода конечных элементов.

Как следует из анализа температурного распределения, по мере протекания газов к стоку тепла T_G уменьшается, что приводит к снижению температуры $T_2 \sim$ на $200\text{ }^\circ\text{C}$. Однако в реальной конструкции нагревателя источник тепла находится непосредственно в теплообменнике, поэтому можно считать, что температура горячей стороны модулей одинакова.

Аналогичные расчеты по определению T_G при постоянной $S_R = 0.12\text{ м}^2$ и $g_n = 510\text{ г/ч}$ показывают, что для обеспечения на горячей стороне термобатареи температуры $280\text{ }^\circ\text{C}$ необходимо, чтобы температура горячих газов в теплообменнике находилась на уровне $350\text{ }^\circ\text{C}$. В этом случае скорость подачи воздуха должна составлять 2.8 м/с .

Для быстрого прогрева двигателя автомобиля и эффективной работы термоэлектрического преобразователя необходимо с одной стороны обеспечить максимальную передачу тепловой мощности от модулей к холодному теплоносителю, с другой – создать такие условия, при которых различие температур теплоносителя между входом и выходом из теплообменников была минимальной.

С этой целью на данном этапе проектирования определялись эффективная площадь каналов холодных теплообменников и оптимальный расход жидкого теплоносителя. Моделирование холодного теплообменника осуществлялось методом конечных элементов с использованием пакета прикладных программ «Comsol Multiphysics».

В процессе компьютерного проектирования как исходные данные использовались следующие величины:

- температура холодного теплоносителя на входе в холодный теплообменник $T_{вх} = 30\text{ }^\circ\text{C}$;
- суммарная тепловая мощность, которая отводится от модулей в рабочем режиме $Q_4 = 3.68\text{ кВт}$ (115 Вт в расчете на один модуль);
- расход теплоносителя (теплоноситель – антифриз) $g_t = (1.6; 2.6; 3.6; 4.6; 5.2)\text{ м}^3/\text{ч}$;
- площадь каналов холодного теплообменника $S_k = (55 - 300)\text{ см}^2$;
- теплопроводность материала холодного теплообменника $\lambda_{r1} = 105\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
- теплоемкость теплоносителя $c_{pT} = 3151\text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$;
- теплопроводность теплоносителя $\lambda_T = 0.34\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

При проектировании сток тепла задавался в местах выхода теплоносителя из теплообменника, а на всех других границах наложены условия адиабатической тепловой изоляции.

На рис. 9 приведена зависимость тепловой мощности Q_5 , отводимой от

термоэлектрических модулей к двигателю автомобиля, от суммарной площади каналов S_k холодных теплообменников при разных расходах теплоносителя.

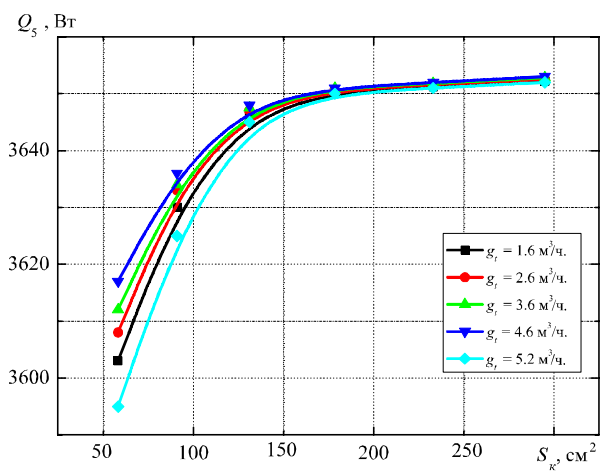


Рис. 9. Зависимость тепловой мощности Q_5 от площади каналов S_k холодных теплообменников.

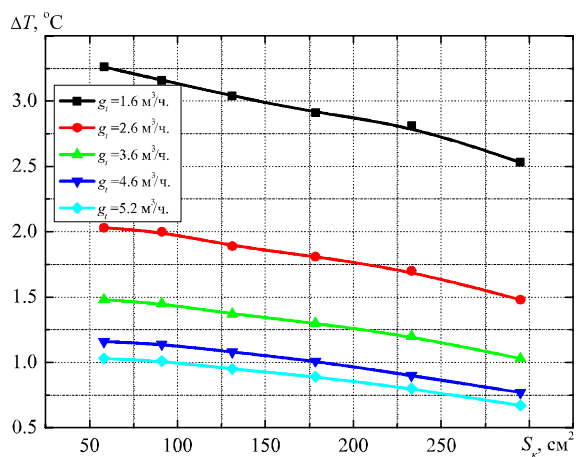


Рис. 10. Зависимость разности температур ΔT теплоносителя между входом и выходом из холодных теплообменников от площади каналов S_k .

Из анализа данных, представленных на рис. 9, следует, что для полной передачи тепловой мощности от модулей к двигателю необходимо, чтобы площадь каналов холодных теплообменников составляла не меньше 170 cm^2 . При такой площади каналов Q_5 практически не зависит от расхода теплоносителя, что в свою очередь позволяет уменьшить затраты выходной электрической мощности нагревателя на питание циркуляционной помпы. Кроме того, как видно из рис. 10, при $S_k = 170 \text{ cm}^2$ расход теплоносителя существенно не влияет на разность температур между входом и выходом теплоносителя из холодных теплообменников ($\Delta T = 1 - 3 \text{ }^\circ\text{C}$). Поэтому выбор оптимальной g_t будет обусловлен лишь объемом двигателя и контуром охлаждения автомобиля.

На рис. 11 и рис. 12 приведены сетка метода конечных элементов и распределение температур для холодного теплообменника.

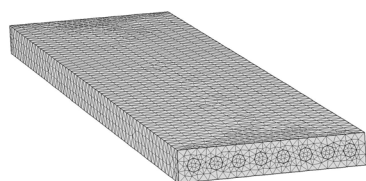


Рис. 11. Сетка метода конечных элементов.

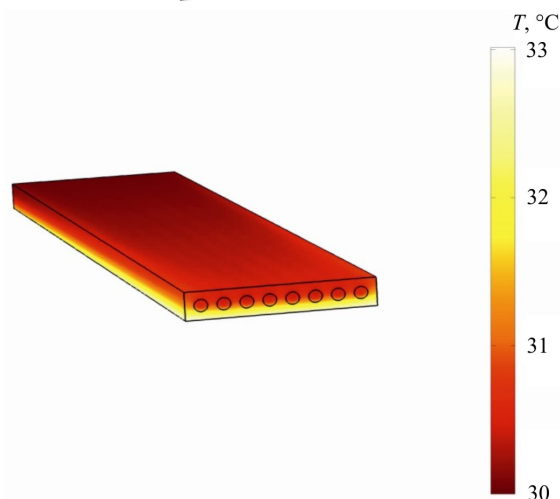


Рис. 12. Распределение температур в холодном теплообменнике.
 $S_k = 170 \text{ cm}^2, g_t = 5.2 \text{ m}^3/\text{ч}$.

Для прогрева двигателя транспортных средств объемом больше 10 л (современные 8 – 12 цилиндры ДВС), теплоемкостью 0.462 кДж/(кг·К) от 0 °С до 30 °С необходимо ~ 13.9 МДж тепловой энергии. Если учесть, что суммарная тепловая мощность, отводимая от термобатареи теплоносителем с температурой 30 – 70 °С, составляет ~ 3.65 кВт (рис. 13), то для предпускового прогрева такого двигателя необходим примерно один час.

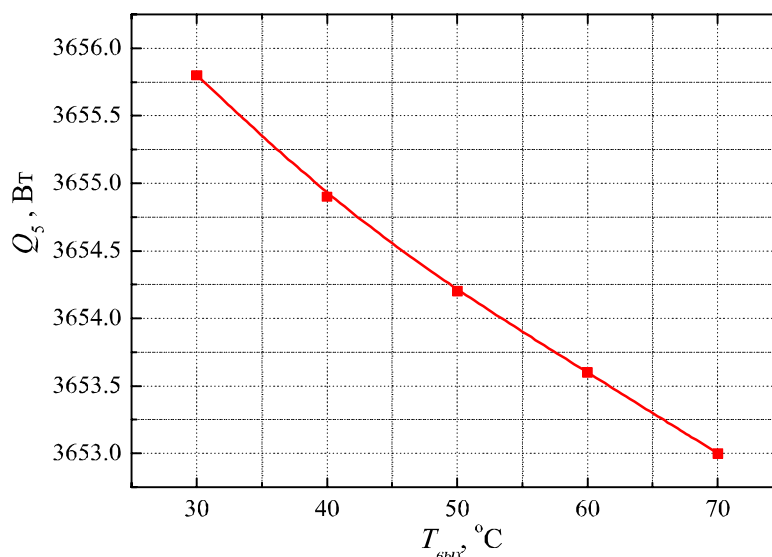


Рис.13. Зависимость тепловой мощности Q_5 , отводимой теплоносителем, от температуры теплоносителя $T_{\text{вых}}$ на выходе из холодных теплообменников.

В реальных условиях время прогрева двигателя будет несколько большим, что связано с потерями тепла вследствие теплообмена двигателя с окружающей средой, с потерями при перенесении тепла по контуру охлаждения, а также с наличием гидравлических сопротивлений в системе «нагреватель-двигатель».

Выводы

1. Установлено, что выходная электрическая мощность нагревателя на уровне 230 – 250 Вт достигается при использовании 32 модулей «Алтек-1061» с температурами на горячей и холодной сторонах 280 – 330 °С и 30 – 70 °С соответственно. При КПД нагревателя в пределах 3 – 3.5%, для достижения такой электрической мощности необходимо затратить ~ 6.6 – 7.2 кВт тепла, что соответствует расходу топлива на уровне 510 – 550 г/ч.
2. Показано, что необходимый уровень температур на горячей стороне термобатареи 280 – 330 °С достигается при температуре газов в горячем теплообменнике в интервале 350 – 400 °С, скорости подачи воздуха в камеру сгорания 2.6 – 2.8 м/с и площади теплоприемной поверхности горячего теплообменника 0.12 м².
3. Установлено, что суммарная тепловая мощность, которая передается от термобатареи нагревателя к теплоносителю двигателя, составляет ~ 3.65 кВт. При температуре теплоносителя в интервале 30 – 70 °С для предпускового прогрева двигателей объемом больше 10 л от 0 °С до 30 °С необходимо ~ 60 мин.

Автор статьи выражает благодарность акад. Анатычуку Л.И. за тему и идею научной работы и м.н.с. Мочернюку Р.М. за полезные советы по компьютерному моделированию.

Литература

1. <https://www.iea.org>.
2. Найман В.С. Все о предпусковых обогревателях и отопителях. – В.С. Найман / Москва: АСТ, 2007. – 213 с.
3. Михайловский В.Я. Режимы работы автомобилей при пониженных температурах. Необходимость использования нагревателей и рациональность применения термогенераторов для их работы / В.Я. Михайловский, Н.В. Максимук // Термоэлектричество. – 2015. – №3. – С. 20 – 31.
4. Патент (UA) № 72304. МПК: F01N 5/00; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 10.08.2012, бюл. № 15, Заявка u2012 02055 від 23.02.2012.
5. Патент (UA) №89039 МПК F02M 1/00 Система живлення і підігріву газового двигуна внутрішнього згорання / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я., Максимук М.В. – Опубл. 10.04.2014, бюл. № 7, Заявка u2013 12585 від 28.10.2013.
6. Михайловський В.Я. Рациональные мощности термогенераторов для предпусковых нагревателей транспортных средств / В.Я. Михайловський, Н.В. Максимук // Термоэлектричество. – 2015. – №4. – С. 65 – 73.
7. Михайловский В.Я. Компьютерное проектирование термоэлектрического автомобильного предпускового нагревателя на дизельном топливе / В.Я. Михайловский, Н.В. Максимук // Термоэлектричество. – 2016. – №1. – С. 55 – 68.
8. Максимук Н.В. Компьютерное проектирование термоэлектрического автомобильного предпускового нагревателя на бензиновом топливе // Термоэлектричество. – 2016. – №2. – С. 55 – 66.
9. <http://www.webasto.com/ua>.
10. <http://www.inst.cv.ua>.
11. Анатичук Л.И. Двухсекционный термоэлектрический генератор на газовом топливе / Л.И. Анатичук, В.Я. Михайловский // Термоэлектричество. – 2008. – №1. – С.76 – 86.
12. www.comsol.com.

Поступила в редакцию 23.05.16.