

УДК 001.92/621.4

## УЛУЧШЕНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПОРШНЯХ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА ЗА СЧЕТ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

С.А. ШАЛАВИН

(Представлено: канд. техн. наук, доц. Е.М. ШЕСТОПАЛОВ)

*Рассматривается проблема утилизации вторичных энергетических ресурсов с низкими потенциалами, используя двигатель Стирлинга. Показано, что несмотря на малую удельную мощность двигателей Стирлинга их потенциальное применение имеет ряд неоспоримых преимуществ, которые и мотивируют исследователей продолжать дальнейшую работу для преодоления физических ограничений конструкций двигателя.*

### Применение двигателя Стирлинга в целях утилизации вторичных энергетических ресурсов

На сегодняшний день наряду с довольно эффективным и промышленно осуществимым циклом Каллины и различными экзотическими термофотонными, термоэлектрическими, пьезоэлектрическими генераторами, двигатель Стирлинга все ещё имеет ряд неоспоримых преимуществ в сфере утилизации вторичных энергетических ресурсов с низкими потенциалами (100...250 °С) [1; 2]. Главное достоинство цикла Стирлинга заключается в его высокой теоретической эффективности, замкнутости цикла и возможности создания двигателя, работающего даже на крайне низком градиенте температур ( $\Delta T = 0,5$  °С) [3]. Эти факторы заставляют исследователей совершенствовать имеющиеся конструкции и создавать новые модификации двигателя или находить им новое применение [4–7]. Более подробно сама работа двигателя описана ранее в работе [8].

Существенным недостатком двигателя Стирлинга, как и любого двигателя внешнего сгорания, является высокая материалоемкость и, соответственно, крайне низкая удельная мощность двигателя. Это связано с тем, что вся энергия в виде тепла, получаемая и отдаваемая двигателем в окружающую среду, проходит через поверхности теплообмена стенки цилиндров к рабочему телу, что и является лимитирующим фактором для повышения удельной мощности двигателя. Для того чтобы удельная мощность двигателя была сопоставима с двигателями внутреннего сгорания, давление рабочего тела должно составлять более 100 атмосфер [8], что накладывает значительные требования к конструкции и сложности в эксплуатации. Многие работы посвящены измерению и поиску путей интенсификации передачи тепла от стенки цилиндров к рабочему телу газа [9; 10].

Известные пути интенсификации теплообмена:

- подбор лучшего теплопроводящего материала (медь, серебро);
- увеличение числа Рейнольдса (повышение скорости газа, разрушение конвективного слоя – повышение оборотов двигателя, завихрения потока).

Цель данной работы – изучение возможности увеличения удельной мощности двигателя за счет использования излучения в процессе теплоотдачи и оценки её возможности применения для увеличения удельной мощности двигателя Стирлинга. Это направление особенно перспективно при использовании прямого концентрированного солнечного излучения через прозрачную стенку для непосредственного разогрева рабочего тела, что возможно при изготовлении стенок цилиндров из стекла или прозрачного полимера.

### Теоретическое обоснование

Известны различные светонепроницаемые газы – окислы азота, галогенов и прочее. Практически все несимметричные молекулы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{C}_n\text{H}_n$  и прочие парниковые газы имеют основные спектры поглощения в световом и инфракрасном диапазоне [11].

В работе [9] получена экспериментальная зависимость коэффициента теплоотдачи для нержавеющей стали к воздуху в качестве рабочего тела.

- для горячего цилиндра:

$$a_r = 0,042D^{-0,42} w^{0,58} p^{0,58} T^{-0,19}; \quad (1)$$

- для холодного цилиндра:

$$a_x = 0,0236D^{-0,47} w^{0,53} p^{0,53} T^{-0,11}, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр цилиндра;  $w$  – средняя скорость поршня;  $P$  – давление;  $T$  – температура газа.

Стоит отметить, что при всех прочих равных показателях коэффициент теплоотдачи холодного цилиндра минимум в 2...3 раза меньше, чем для горячего цилиндра.

Нет сомнений, что сконцентрированный солнечный свет через прозрачную стенку может передать рабочему телу значительное количество тепловой энергии, однако ввиду того, что конструкция двигателя Стирлинга также подразумевает процесс отбора тепла от рабочего тела в окружающую среду – следует оценить эффективность излучающей составляющей на холодном цилиндре. А также оценить, какую долю теплового потока можно получить от охлаждающего цилиндра при чисто лучевом теплообмене от парниковых газов, и сравнить с известными результатами, полученными для воздуха.

Плотность излучения, приходящаяся на поверхность площадью  $F$  для двуокиси углерода по опытным данным:

$$Q_{\text{рад CO}_2} = 3,5(\rho L)^{0,33} \left( \frac{T}{100} \right)^{3,5} F. \quad (3)$$

Заметим, что здесь  $L = D/2$  – длина свободного пути луча к поверхности теплообмена;  $F$  – площадь поверхности теплообмена.

Предположим что температура стенки при конвективном охлаждении цилиндра будет равна 100 °С, тогда

Для конвективного теплообмена в холодном цилиндре согласно формуле (2) имеем:

$$Q_{\text{конв}} = aF\Delta T = (0,236D^{-0,17} w^{0,53} p^{0,53} T^{0,11}) F\Delta T, \quad (4)$$

Здесь  $\Delta$  – разность температур рабочего тела и холодной стенки при конвективном теплообмене.

Используя уравнения (3) и (4), проведем численный анализ роли излучающей составляющей в общем потоке передаваемого тепла от рабочего тела к окружающей среде.

На рисунке 1 представлена зависимость роста конвективного теплообмена согласно формуле (4). Стоит заметить, что при прочих равных условиях плотность интегрального излучения двуокиси углерода превосходит плотность конвективного теплообмена воздуха на всех диапазонах рабочих оборотов двигателя. То есть использование парникового газа в качестве рабочего тела позволяет отойти от ограничений конвективного теплообмена, при котором лимитирующим фактором была площадь теплообмена.

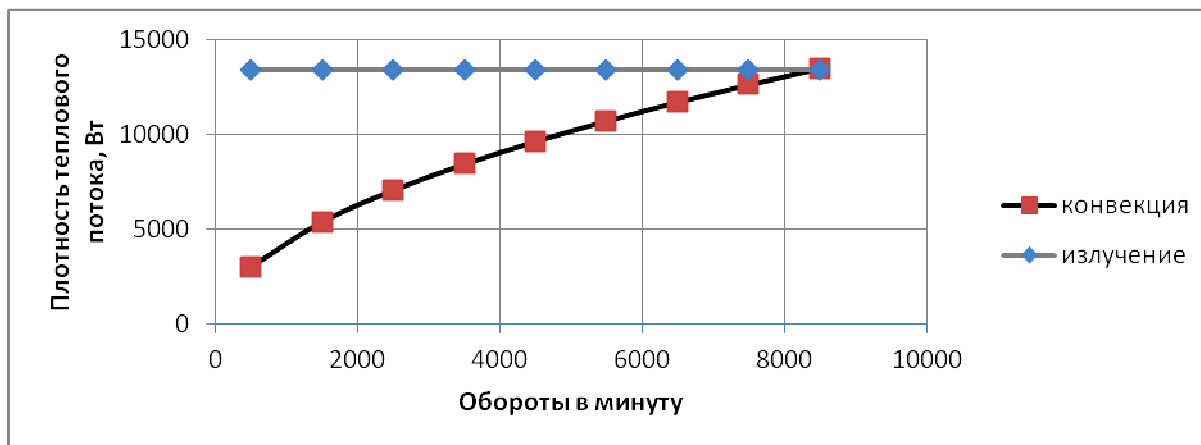


Рисунок 1. – Изменение плотности теплового потока от скорости движения поршня в цилиндре

На рисунке 2 представлена зависимость плотности теплового потока конвективного и теплообмена излучением от температуры рабочего тела.

Из формул (3) и (4) следует, что с ростом температуры рабочего тела конвективная составляющая растет линейно, в то время как темп роста излучающей составляющей является экспоненциальным. Соответственно, получаем, что при больших значениях температур рабочего тела, которые могут быть получены при концентрации солнечного света, конвективный способ теплообмена значительно проигрывает теплообмену излучением парниковым газом.

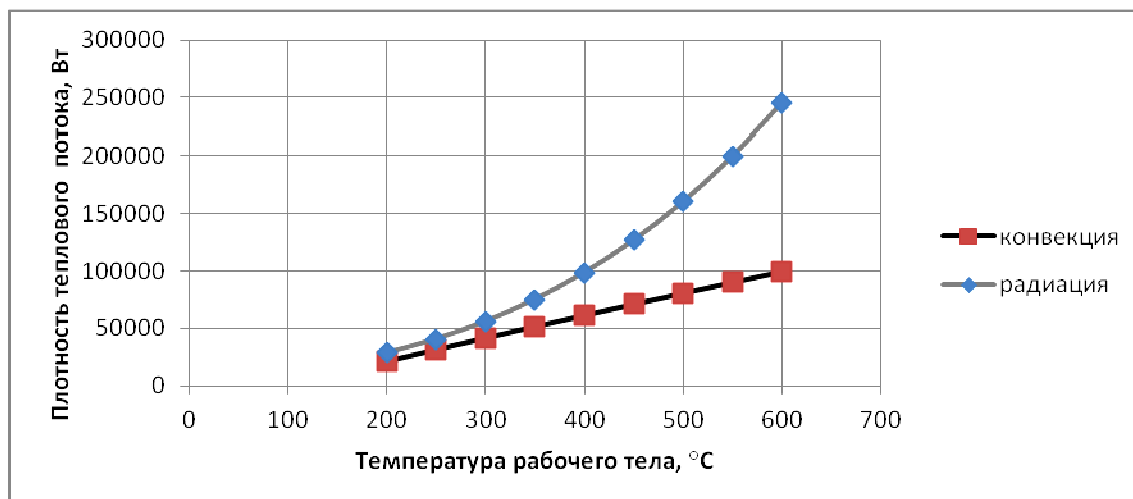


Рисунок 2. – Изменение плотности теплового потока от температуры рабочего тела в цилиндре

Таким образом, можно сделать следующий **вывод**: даже для холодного цилиндра при применении парникового газа  $\text{CO}_2$  доля излучающей составляющей теплообмена по отношению с конвективным теплообменом воздуха является не только сопоставимой, но и превышает его, что позволяет увеличить удельную мощность двигателя Стирлинга в процессе утилизации концентрированного потока теплового излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Waste Heat to Power Market Assessment [Electronic resource]. – Mode of access: <http://web.ornl.gov/sci/buildings/docs/ORNL%20TM-2014-620%20Waste%20Heat%20to%20Power.pdf>. – Date of access: 27.09.2016.
2. Low Temperature Stirling Engine for Waste Heat Recovery from Distributed Power Sources [Electronic resource]. – Mode of access: <https://cfpub.epa.gov/ncer/abstracts/index.cfm/fuseaction/display.highlight/abstract/9486>. – Date of access: 27.09.2016.
3. Prof. Alpesh V. Mehta\*, bRajdevsinh K. Gohil, c Jaydeepkumar P. Bavarva, dBiren J. Saradava. Waste heat recovery using stirling engine: research paper // IJAET. – 2012. – Vol. III, Issue I. – January–March. – P. 305–310.
4. Da Vinci Co.'s Rotary Heat Engine [Electronic resource]. – Mode of access: [http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/02/30\\_Da\\_Vinci\\_RHE.pdf](http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/02/30_Da_Vinci_RHE.pdf). – Date of access: 27.09.2016.
5. Роторный стирлинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nkj.ru/archive/articles/9311>. – Дата доступа: 27.09.2016.
6. Design of a Stirling Engine for Electricity Generation [Electronic resource]. – Mode of access: [https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-032814-103716/unrestricted/StirlingMQP\\_Final\\_2014.pdf](https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-032814-103716/unrestricted/StirlingMQP_Final_2014.pdf). – Date of access: 27.09.2016.
7. Recovery of Exhaust Waste Heat for ICE Using the Beta Type Stirling Engine [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.hindawi.com/journals/jen/2015/495418>. – Date of access: 27.09.2016.
8. Шалавин, С.А. О возможности использования двигателя стирлинга для утилизации вторичных тепловых энергетических ресурсов / С.А. Шалавин, В.В. Чернявский // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – 2012. – С. 192–194.
9. Кое-что о двигателях Стирлинга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://rosinmn.ru/ecovillage/STIRLING\\_stirling.htm](http://rosinmn.ru/ecovillage/STIRLING_stirling.htm). – Дата доступа: 27.09.2016.
10. Recovery Heat Transfer on a Small Stirling Engine -Heat Transfer in Expansion Chamber Wall [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.jime.jp/e/publication/bulletin/english/pdf/mv19n011991p49.pdf>. – Date of access: 27.09.2016.
11. Теплообмен излучением [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://stringer46.narod.ru/Radiation.htm#11>. Тема 11. – Дата доступа: 27.09.2016.