

УДК 620.92

### **ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОКОГЕНЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОМАСЛА В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА**

**А. С. Матрунчик, А. И. Бурков**

*ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет», г. Пермь*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор А. Г. Мелехин*

**Ключевые слова и фразы:** биомасло; двигатель Стирлинга; дизельное топливо.

**Аннотация:** Представлена общая информация о механизмах, использующих для своей работы двигатель Стирлинга, дано описание его достоинств и недостатков, представлен теоретический справочный материал по тепловому циклу Стирлинга. Проанализирована возможность использования биомасла и дизельного топлива в качестве рабочего тела в микрокогенерационной установке на базе двигателя Стирлинга, проведено сравнение производительности и эффективности генерации электроэнергии устройства с данными источниками тепловой энергии. На основе проведенного исследования представлены рекомендации для увеличения эффективности систем с использованием биомасла, затрагивающие основные компоненты механизма, технологию производства и утилизации тепловой энергии в системе.

В настоящее время задача энергосбережения и повышения энергетической эффективности стоит одной из первоочередных в государстве. По этой причине возрос интерес к нетрадиционным и возобновляемым источникам энергии и устройствам, использующим их. Примерами устройств, которые могут из тепловых источников генерировать электричество, являются устройства, использующие двигатель Стирлинга. За последние 30 лет исследования по созданию двигателей с внешним подводом

---

Матрунчик Андрей Сергеевич – аспирант кафедры «Теплогасоснабжение, вентиляция и водоснабжение, водоотведение», e-mail: andrey.matrunchik@gmail.com; Бурков Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогасоснабжение, вентиляция и водоснабжение, водоотведение», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

тепла, работающих по циклу Стирлинга, получили значительное развитие. Основной причиной возобновления интереса к двигателю этого типа, изобретенному еще в 1816 г., являются его следующие достоинства [1]:

- 1) способность работать от различных источников теплоты с высоким температурным потенциалом;
- 2) высокая экономичность;
- 3) многофункциональность (кроме основного назначения возможность работы в холодильной машине);
- 4) низкий уровень токсичности и дымности отработанных газов при условии использования углеводородных топлив;
- 5) работа двигателя не зависит от наличия атмосферы (возможность работы на подводных лодках и спутниках);
- 6) хорошие виброакустические характеристики.

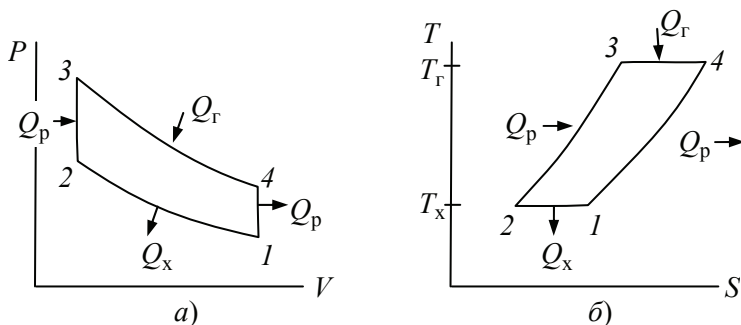
Данные преимущества делают реальным создание эффективных генераторов электроэнергии, работающих на подводимой теплоте для многих аппаратов и сфер малой тепловой энергетики, что в современных условиях приобретает все большее значение.

Недостатки данного механизма [1]:

- 1) относительная сложность производства;
- 2) высокая цена из-за большой металлоемкости;
- 3) коэффициент полезного действия (**КПД**) ниже, чем у двигателей внутреннего сгорания.

Двигатель Стирлинга работает по принципу сжатия холодного рабочего тела и расширения горячего. Однако в отличие от двигателей внутреннего сгорания подвод теплоты в цикле осуществляется через промежуточный теплообменник-нагреватель, а рабочее тело остается всегда в замкнутом контуре.

Идеальный цикл Стирлинга (рис. 1) состоит из двух изотермических процессов и двух процессов с постоянным объемом. Процесс  $1-2$  – изотермическое сжатие рабочего вещества при температуре  $T_x$  с отводом теплоты  $Q_x$ , процесс  $2-3$  – изохорический подвод теплоты  $Q_p$  от регенератора к рабочему веществу, процесс  $3-4$  – изотермическое расширение рабочего вещества при температуре  $T_r$  с подводом теплоты  $Q_r$ , процесс  $4-1$  – изохорический отвод теплоты  $Q_p$  рабочего вещества к регенератору, причем теплота, отводимая от рабочего вещества в процессе  $4-1$ , подводится к рабо-



**Рис. 1. Идеальный цикл Стирлинга в координатах:**  
*a* – «давление – объем»; *б* – «температура – энтропия»

чему веществу в процессе 2–3. Идеальный цикл Стирлинга является обобщенным циклом Карно и имеет одинаковый с ним термический КПД

$$\eta_t = 1 - \frac{T_x}{T_r}. \quad (1)$$

В настоящее время некоторые фирмы (самая известная из них – Phillips) предлагают свои вариации на тему двигателей, использующих принцип работы Стирлинга. Наиболее успешным в плане коммерции является устройство компании WhisperGen. Принцип работы данного механизма: внутри газового котла устанавливают двигатель Стирлинга (цилиндр всего один – горячий с одного конца и холодный с другого); стенки цилиндра делают из материалов с хорошей теплопроводностью. Одну часть помещают в дымовую трубу, где выходят отработавшие газы с высокой температурой, другую совмещают, например, с водой, идущей на нагрев для горячего водоснабжения, то есть ее в любом случае нагревают, и своей температурой (около 5 °С) она охлаждает «холодную» часть цилиндра. Рабочее тело, попеременно сжимаясь и разжимаясь, двигает поршень, подключенный к генератору электрической энергии. Разность температур при этом процессе довольно высокая, что позволяет аккумулировать около 80 – 90 % теплоты уходящих дымовых газов, превратив их в электроэнергию с КПД 20...30. Данное устройство подготавливает теплоноситель для нужд горячего водоснабжения и отопления и утилизирует тепло уходящих дымовых газов. Двигатель micro CHP компании WhisperGen (рис. 2) имеет размеры, сравнимые с посудомоечной машиной. Из-за того, что все компоненты находятся в одном блоке, удается избежать потерь теплоты при движении дымовых газов. Природный газ сжигается в камере сгорания, которая устанавливается в верхней части конструкции. Вода проходит в водяной рубашке двигателя, где она нагревается и обеспечивает его охлаждение. При высоком теплотреблении вспомогательная горелка производит дополнительный нагрев.

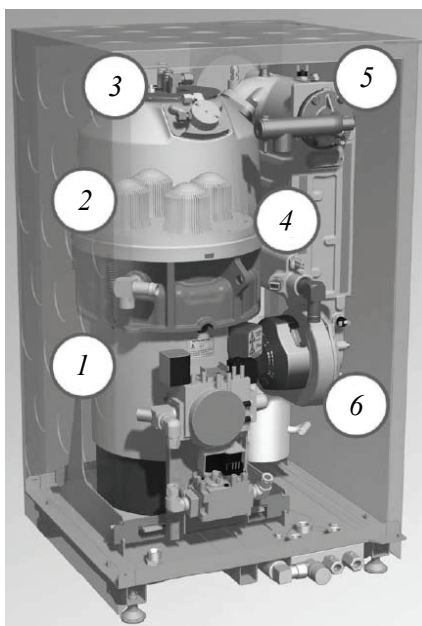


Рис. 2. Двигатель micro CHP компании WhisperGen

В состав устройства входят: 1 – электрический генератор (230 В); 2 – двигатель Стирлинга, создающий движущую силу для генератора; 3 – узел газовой горелки, сохраняющий тепло, необходимое для работы двигателя Стирлинга; 4 – теплообменник, восстанавливающий тепло от горячих газов, полученных с помощью горелки; 5 – вспомогательная горелка, которая поставляет дополнительное тепло в периоды высокой его необходимости; 6 – вытяжной вентилятор, подключенный к дымовой трубе и обеспечивающий движение воздуха.

В состав устройства входят: 1 – электрический генератор (230 В); 2 – двигатель Стирлинга, создающий движущую силу для генератора; 3 – узел газовой горелки, сохраняющий тепло, необходимое для работы двигателя Стирлинга; 4 – теплообменник, восстанавливающий тепло от горячих газов, полученных с помощью горелки; 5 – вспомогательная горелка, которая поставляет дополнительное тепло в периоды высокой его необходимости; 6 – вытяжной вентилятор, подключенный к дымовой трубе и обеспечивающий движение воздуха.

Многие исследования заключаются в смене рабочих тел, использующихся в камере сгорания двигателя. Из результатов исследований [2, 3] следует, что использование биомасла в качестве топлива увеличивает эффективность устройства по сравнению с дизельными топливом. Устройство в его конфигурации изменено по сравнению с базовой комплектацией для быстрого пиролиза жидкости (биомасла), так как оригинальная испарительная горелка не позволяет использовать недистиллированное топливо, к которому и относится биомасло. Изменены и камеры сгорания, и системы управления, перешедшие на программный комплекс LabVIEW. Исследуемые виды топлива: дизельное топливо и биомаслоэтаноловая смесь в пропорциях 80:20 (соответственно биомасло и этанол). Разница в плотности рабочих жидкостей позволяет двигателю с биомасляной смесью в качестве топлива выйти на рабочий режим через 45 мин, для дизельного топлива этот показатель равнялся 35 мин.

В рабочем режиме тепловые и электрические эффективности для дизельного топлива составляли соответственно 12,1 и 71,3 %, для биомасла – 15,4 и 74,4 %. Причинами низких показателей эффективности для дизельного топлива являются: большая потеря теплоты через стенки камеры сгорания в ходе излучения и меньшая, по сравнению с биомаслом, тепловая мощность выхода реакции сгорания. У дизельного топлива количество воды, присутствующее в выхлопных газах, больше, чем у биомасла, из-за этого скрытая теплота реакции в выхлопной трубе теряется в больших количествах в первом случае. Стоит отметить тот факт, что если улучшить изоляцию камеры сгорания, то дизельное топливо по своим характеристикам может достичь показателей биомасла. В таком случае при сопоставимых эффективностях на первый план выходят проблемы, связанные с ценой топлива, количеством уходящих дымовых газов и их концентрациями по основным веществам. Компоненты CO и NO<sub>x</sub> у дизельного топлива превышали аналогичные составляющие в случае биомасла. Чем лучше происходит процесс смешивания топлива с воздухом, тем ниже концентрация CO на выходе и выше эффективность. Объем выбросов компонентов NO<sub>x</sub> напрямую зависит от температуры горения. Проблемой использования биомасла в качестве топлива для сгорания является засоренность теплообменника, которая мешает проходить воздуху, увеличивая давления в местных сопротивлениях, что в дальнейшем провоцирует увеличение соотношения воздух/топливо и приводит к снижению эффективности.

Для последующей коммерциализации и привлечения большего числа потребителей двигателей Стирлинга данной модификации с биомаслом в качестве топлива, могут быть даны следующие рекомендации:

1. В качестве рабочего тела вместо биомасла следует использовать гелий или водород, тем самым увеличивая эффективность примерно на 15 – 20 % [4]. Нельзя забывать о подпитке гелия, а значит необходимо располагать его в непосредственной близости от самого двигателя. Повышение давления гелия способствует повышению эффективности.

2. При установке дополнительного теплообменника (между впуском и выпуском рабочего тела) можно решить проблему плохого воспламенения рабочего тела. При изоляции внутренних стенок камеры сгорания уве-

личивают внутреннюю температуру, тем самым получая повышение эффективности и снижение выбросов CO из-за более высокого уровня окисления биомасла. Возможен вариант предварительного запуска двигателя с другим топливом, схожим с рабочим телом, для увеличения внутренней температуры и улучшения качества сгорания биомасла.

3. Небольшие расстояния между ребрами базового теплообменника в устройстве компании WhisperGen провоцируют проблемы с биомаслом в качестве рабочей жидкости. Рекомендуется применять трубчатые теплообменники такие же, как для жидкостей с высокой плотностью [4]. Узкие проходы необходимо избегать по нескольким причинам: они вызывают засорение, что ограничивает время работы двигателя, а также перепады давления, которые создают нестабильность в сгорании. Любые отложения на таких теплообменниках уменьшают теплоотдачу и выходную мощность, поэтому рекомендуется их прочистка струей воздуха высокого давления.

4. Система подачи топлива должна быть полностью выполнена из нержавеющей стали из-за кислого характера среды биомасла. Топливная система должна включать в себя горячую фильтрацию, которая увеличивает характеристики сгорания и удаляет твердые частицы, что, в свою очередь, снижает коксообразование и время воспламенения [5].

Современные исследования показывают, что использование биомасла для применения в микрогенерационных системах на основе двигателей Стирлинга возможно, хотя существует ряд проблем проектирования самой конструкции двигателя. По эффективности биомасло ненамного превышает дизельное топливо, а если учесть разницу в ценах, то получается, что первый вариант в разы выгодней в настоящее время и более экологически чист. Экономические и технические аспекты таких устройств могут составить большую конкуренцию двигателям Стирлинга, работающим на газе, которые пользуется спросом во многих странах мира благодаря устройству компании WhisperGen.

#### *Список литературы*

1. Ридер, Г. Двигатели Стирлинга : пер. с англ. / Г. Ридер, Ч. Хупер. – М. : Мир, 1986. – 464 с.

2. Mohhamud Umer Khan. Efficiency and Emissions Study of a Residential Micro-Cogeneration System based on a Modified Stirling Engine and Fuelled by a Wood Derived Fast Pyrolysis Liquid-Ethanol Blend : Master Thesis / Mohhamud Umer Khan. – 2012.

3. Farra, N. Efficiency and Emissions Study of a Residential Micro-Cogeneration System based on a Modified Stirling Engine and Fuelled by Diesel and Ethanol : Master Thesis / Nicolas Farra. – 2010.

4. Clucas, D. M. Development of a Stirling Engine Battery Charger Based on a Low Cost Wobble Mechanism : PhD Thesis / D. M. Clucas. – New Zealand, Canterbury, 1993.

5. Vortex Driven Acoustically Coupled Combustion Instabilities / T. Poinsoir [et al.] // Journal of Fluid Mechanics. – 1987. – Vol. 117. – P. 265 – 292.

## References

1. Reader G.T., Hooper C. *Stirling engines*, London, E. & F.N. Spon, 1983.
2. Mohhamud Umer Khan. *Efficiency and Emissions Study of a Residential Micro-Cogeneration System based on a Modified Stirling Engine and Fuelled by a Wood Derived Fast Pyrolysis Liquid-Ethanol Blend*, master thesis, 2012.
3. Nicolas Farra. *Efficiency and Emissions Study of a Residential Micro-Cogeneration System based on a Modified Stirling Engine and Fuelled by Diesel and Ethanol*, master thesis, 2010.
4. Clucas D.M. *Development of a Stirling engine battery charger based on a low cost wobble mechanism*, PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Canterbury, New Zealand, 1993.
5. Poinson T., Trounev A., Veynante D., Candel S., Esposito E. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, vol. 117, pp. 265-292.

---

### **The Possibility of Using a Micro-Cogeneration System Based on a Stirling Engine and Using Bio-Oil as a Working Agent**

**A. S. Matrunchik, A. I. Burkov**

*Perm National Research Polytechnic University, Perm*

**Key words and phrases:** bio-oil; the diesel fuel; Stirling engine.

**Abstract:** This article provides general information about the mechanisms, using the Stirling engine for their operation; its advantages and disadvantages are described; theoretical background material on the thermal Stirling cycle is presented. The possibility of using bio-oil and diesel fuel as the working fluid in micro-cogeneration installation based on the Stirling engine is made to compare the performance and efficiency of electricity generation device with these sources of heat, also the conclusions are corresponding. Based on the study, the authors provide recommendations to increase the effectiveness of using bio-oil affecting the major components of the mechanism, technology of production and utilization of thermal energy in the system.

---

© А. С. Матрунчик, А. И. Бурков, 2014

*Статья поступила в редакцию 14.05.2014 г.*