

Автономный источник энергии на основе свободнопоршневого двигателя Стирлинга

Данная статья посвящена перспективному источнику энергии для удаленных потребителей. В настоящее время предлагается разработка свободнопоршневого двигателя Стирлинга в совокупности с твердотопливным котлом и использование его в качестве автономного источника теплоэлектроэнергоснабжения.

Бұл мақалада алыстатқан тұтынушыларға келешектегі энергия көзі жатады. Қазіргі уақытта жылу электр жабдығының дербес көзінің сапасымен оның қолданылуы қазандағы қатты отынның жиынтығын Стирлинг қозғалғыштың еркін поршенді өңдеу ұсынылған.

This article is devoted to a perspective source of energy for remote consumers. Currently, we proposed to use the free-piston Stirling's engine in combination with a solid-fuel boiler as an autonomous source of heat-and-power supply.

Ключевые слова: двигатель Стирлинга, теплоэлектроэнергоснабжение, автономный источник питания.

Түйін сөздер: Стирлинг қозғалтқышы, жылу және электрмен жабдықтау, автономды қорек көзі.

Key words: thermal power supply, autonomous power supply, Stirling's engine.

А. С. АСКАРОВА¹, С. А. БОЛЕГЕНОВА¹,
В. ЛАПТЕВ¹, И. Э. БЕРЕЗОВСКАЯ¹,
С. А. БОЛЕГЕНОВА¹, А. А. АДИБЕКОВ²,
Э. С. КАЙМУЛЬДИНОВА¹,

*Казахский национальный университет имени аль-Фараби¹,
Алматинский университет энергетики и связи²,
г. Алматы*

Введение. Для Республики Казахстан тема автономных источников теплоэлектроэнергоснабжения для удаленных потребителей является весьма актуальной. По сведениям Всемирного Банка развития и реконструкции, в Казахстане имеется несколько тысяч сельских поселков, в которых отсутствует стационарное электроснабжение. Это вынуждает жителей удаленных сельских хозяйств искать альтернативные источники энергии.

К таким источникам можно отнести микро-ГЭС, ветровые установки, дизельные или бензиновые электростанции, солнечные установки, а также малые котельные на твердом топливе, использующие современные технологии его сжигания с низкими выбросами вредных газов в атмосферу. Каждая из этих технологий имеет свои достоинства и недостатки [1].

Одним из перспективных проектов среди автономных источников теплоэлектроэнергоснабжения являются котлы длительного горения (желательно работающих на универсальном топливе: угле, газе, дровах, торфе, сланцах, древесной щепе, отходах сельского хозяйства, бытовом мусоре и т.д.).

В качестве преобразователя тепловой энергии в электрическую предлагается использование двигателя внешнего сгорания — двигателя Стирлинга, открытый еще в 1816 году шотландским священником Робертом Стирлингом, получил свое второе рождение в пятидесятых годах XX века, благодаря высокому к.п.д. около 40% (теоретически до 70%) [2,3]. Двигатель состоит из двух поршней (основного — рабочего и поршня вытеснителя) совершающих автоколебательные движения в едином или в двух различных цилиндрах. Имеются две камеры: первая-сжатия

и вторая-нагрева (со стороны вытеснительного поршня). В качестве рабочего газа используется водород, гелий или воздух. Использование водорода затруднительно в связи с большой текучестью и опасностью взрыва. Идеальный цикл Стирлинга состоит из двух изохор и двух изобар. Постоянный нагрев осуществляется со стороны вытеснительного поршня. При перемещении вытеснителя рабочий газ через кольцевой зазор перетекает из камеры нагрева в камеру сжатия. После этого цикл повторяется. Таким образом машина перекачивает рабочий газ и с ним тепло из камеры нагрева с высокой температурой (300-600° С) в камеру сжатия с температурой окружающей среды. При этом энергия нагретого газа превращается в механическую энергию, которую с помощью электрического генератора можно преобразовать в электрическую энергию [2,3].

К достоинствам двигателя Стирлинга кроме высокого к.п.д. можно отнести способность работать на любом виде топлива, а также бесшумность и плавность хода. В качестве привода, связующего оба поршня, вначале использовался кривошипношатунный механизм, но привод был шумным из-за невозможности его уравновесить. В дальнейшем появляется параллелограмный привод, в котором проблема вибрации была устранена.

Объект исследования. В настоящее время существуют около 18 различных модификаций двигателя Стирлинга с внешним подводом теплоты, в том числе так называемый свободнопоршневой (СПДС), одним из видов которых являются термомеханические генераторы (ТМГ). Отсутствие приводного механизма упрощает решение ряда технических проблем, стоящих перед разработчиками. При снятии мощности непосредственно с рабочего поршня значительно улучшаются массогабаритные показатели двигателя. В пределах мощности ТМГ превосходят двигатели Стирлинга с приводными механизмами от нескольких Вт до 50 кВт. Эти особенности термомеханических генераторов выдвигают их в ряд наиболее перспективных силовых установок, предназначенных для работы в составе автономных энергосиловых установок различного базирования (наземного, водного, космического) [4]. К преимуществам СПДС можно отнести, во-первых, относительную простоту конструкции

(по сравнению с классическим кривошипно-шатунным приводом число элементов меньше на 40%). Во-вторых, в нем отсутствуют вращающиеся части, что позволяет улучшить массогабаритные показатели двигателя и снизить инерционные нагрузки.

Свободнорпоршневой двигатель Стирлинга, предложенный Билом, представляет из себя замкнутый цилиндр в котором автоколебательно движутся два поршня — вытеснитель и рабочий. Связь между ними осуществляется через рабочий газ. При нагревании рабочего газа со стороны вытеснителя он перетекает через узкую щель-регенератор в область сжатия. При этом газ проходит через область охлаждения и в область сжатия поступает уже охлажденным.

Полная герметичность подобных конструкций является серьезным преимуществом, что дает возможность работать с повышенными давлениями. Еще одно преимущество свободнорпоршневого двигателя — возможность использования его совместно с линейным электрическим генератором.

Одним из первых предложений в качестве автономного источника на основе твердотопливного котла и двигателя Стирлинга была разработка немецкой фирмы «SOLO Stirling Engine». Она позволяла вырабатывать около 26 кВт тепловой мощности и около 4 кВт электрической мощности. В качестве преобразователя тепловой энергии в электрическую использовался двигатель этой фирмы «Стирлинг 161» [5].

В 2011 году на международной выставке отопления и энергосбережения ISH 2011 фирмой «Viessman» была выставлена микро-тэц Mikro-KWK Viessmann Vitotwin 300-W [5]. Установка состояла из газового котла и свободнорпоршневого двигателя Стирлинга, преобразующего тепловую энергию в электрическую. Установка обеспечивала потребителя теплом, но и одновременно вырабатывала электроэнергию для покрытия нагрузки. С учетом размеров и мощности котла его предназначение возможно для небольших коттеджей. Котел работает совершенно бесшумно, в связи с чем его можно установить на кухне или даже в гостиной комнате. Общий ее к.п.д. составляет 96% (15% по электричеству и 81% по теплу).

Двигатель Стирлинга герметически закрыт, в обслуживании не нуждается. В качестве рабочего газа используется гелий. Совместно с рабочим поршнем смонтирован линейный электрический генератор. Установка вырабатывает 1 кВт электрической мощности и от 6 до 20 кВт тепловой мощности.

Американская компания «Onergi» с 2014 года ведет производство серийных свободнорпоршневых двигателей Стирлинга в двух типоразмерах — 3,5 и 7,5 кВт. На основе этих двигателей компанией разработаны типовые продукты: газовая микро-тэц и солнечная электростанция с фокусировкой солнечных лучей на двигатель Стирлинга параболическим зеркалом. Таким образом, вопрос автономных источников энергии с применением двигателей Стирлинга можно считать в принципе решенным. Однако в реальности нашей республики этих установок нет. Что же мешает использовать эти готовые разработки в условиях Казахстана? Существуют два основных препятствия. Первое — высокая цена. Установки мощностью 5-10 кВт

стоят 15-30 тысяч евро. Второе препятствие, пожалуй, главное — это ограничение поставок двигателей Стирлинга в страны СНГ при использовании их в качестве двигателей в подводных лодках (Швеция, Япония, Америка и др).

Результаты и обсуждение. В настоящее время в КазНУ имени аль — Фараби ведутся исследования по разработке свободнорпоршневых двигателей Стирлинга, которые можно бы было в качестве автономного источника теплоснабжения реализовать в Казахстане. На данном этапе сконструирован, смонтирован, запущен и исследуется свободнорпоршневой двигатель Стирлинга.

Установка, предлагаемая фирмой «Viessman», работает при достаточно высоком давлении рабочего газа гелия (10-14 МПа). Это накладывает дополнительные требования к прочности конструкции. Поршень-вытеснитель также должен быть специальной конструкции, выдерживающей эти давления. Это достигается за счет применения укрепляющих перегородок внутри поршня вытеснителя. Нами предлагается замена рабочего газа гелия на водяной насыщенный пар. Двигатель представляет собой замкнутую систему из двух цилиндров. В одном из них размещен легкий поршень-вытеснитель. Во втором находится рабочий поршень, выполненный из неодимового магнита. Там же находится еще один магнит, выполняющий роль возвращающей пружины. Эти магниты направлены навстречу друг к другу одноименными полюсами. Снаружи этого цилиндра расположена катушка линейного электрического генератора. На цилиндре, где находится поршень-вытеснитель, снаружи монтируется водяная рубашка охлаждения. В нижней части этого цилиндра находится патрубок 5 для наполнения установки газом и дистиллированной водой. Применение воды с последующим переводом ее в насыщенный пар вместо гелия высокого давления значительно упрощает эксплуатацию подобного свободнорпоршневого двигателя. Обоснованием для применения насыщенного пара можно считать его уникальные теплофизические характеристики.

Так как на данный момент нет корректного уравнения состояния насыщенного водяного пара, мы воспользовались таблицей, разработанной в Московском энергетическом институте под руководством проф. М.П. Вукаловича [7]. Из этих табличных данных видно, что при температуре насыщенного пара 603 К давление этого пара достигает 12,8 МПа (128 атм.). При температуре 747 К давление достигает 22 МПа (220 атм.). Этого давления достаточно для начального перемещения поршня вытеснителя.

Для решения задач проектирования в настоящее время применяют математические модели различного уровня сложности. Эти модели необходимы для того, чтобы подобрать параметры двигателя, и, исходя из заданных требований, получить его предварительные характеристики. Разработка и реализация этих требований в настоящее время активно продолжается как в России [8-10], так и за рубежом [11-13].

Принципиальная схема предлагаемого нами свободнорпоршневого двигателя внешнего сгорания представлена на рис. Двигатель состоит из двух цилиндров 6 и 9. В цилиндре 9 совершает автоколебательные перемещения

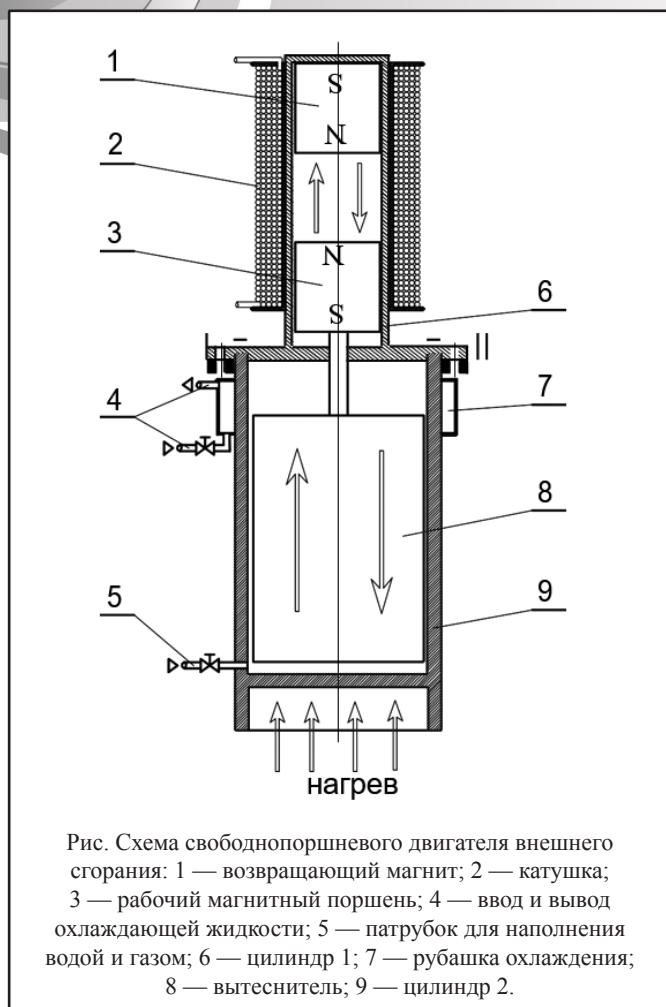


Рис. Схема свободнопоршневого двигателя внешнего сгорания: 1 — возвращающий магнит; 2 — катушка; 3 — рабочий магнитный поршень; 4 — ввод и вывод охлаждающей жидкости; 5 — патрубок для наполнения водой и газом; 6 — цилиндр 1; 7 — рубашка охлаждения; 8 — вытеснитель; 9 — цилиндр 2.

поршень-вытеснитель 8. В цилиндре 6 находится рабочий поршень 3, выполненный из неодимового круглого магнита. Оба поршня связаны друг с другом через шток. На дно цилиндра 9 через заполнитель 5 впрыскивается 50 мл дистиллированной воды. Верхняя часть цилиндра 9 охлаждается водой через рубашку охлаждения 7. 4 — ввод и вывод охлаждающей воды. Одноименные полюса магнитов 1 и 3 направлены навстречу друг к другу. Вокруг цилиндра 6 намотана катушка линейного электрического генератора 2.

Свободнопоршневой двигатель внешнего сгорания функционирует следующим образом. Нагрев цилиндра 9 осуществляется снизу газовой горелкой тепловой мощностью 15 кВт. Зазор между стенками вытеснителя и внутренним диаметром цилиндра 9 составляет 0,3 мм. Соотношение между диаметром вытеснителя к его длине равно 1 к 2. При нагреве пара и достижении достаточного давления вытеснительный поршень начинает перемещаться вверх. Одновременно и синхронно с ним перемещается рабочий поршень. При движении вытеснительного поршня вверх происходит увеличение объема насыщенного пара и падение его температуры (чему способствует также действие охлаждающей воды), что приводит к замедлению движения поршней. Одновременно приближение рабочего поршня к отталкивающему магниту увеличивает силу отталкивания между магнитами и при достижении некоторого значения начинается обратное движение поршней. Таким образом

осуществляется их непрерывное возвратно-поступательное автоколебательное движение. При колебательном движении рабочего поршня внутри линейного электрического генератора возникает электрическое напряжение. Установка вырабатывает до 150 Вт электрической мощности и до 5 кВт тепловой мощности, а частота автоколебаний достигает 20 Герц. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с оценочными расчетами, проведенными ранее в работе авторов [14].

Литература

1. Фолькер Куашилинг. Системы возобновляемых источников энергии. 2013, Изд. «Фолиант», Астана, Агентство «ИНТЕРРА ГРУПП», пер. с нем., 2013.
2. Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга. М., Энергия, 1978.
3. Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга. Мир, 1986.
4. Веревкин М.Г. Экспериментальное исследование рабочего процесса термомеханического генератора // Актуальные проблемы современной науки. 2003, №6. с. 121-125.
5. Sommer Klaus/ Prof. Dr.-Ing. Mikro-KWK-Anwendungen für 1- und 2- Familienhauser. BHKS-Almanach. 2012.
6. Мусабеков Р.А. Лантев В. Джаманкулова Н.О. Ахметгалиев Р.С. Расмухаметова А.С. Мусабеков Н.Р. Адильбеков М.Ж. Микро-тэц как автономный источник теплоснабжения для удаленных потребителей. Вестник автоматизации №4, 2015, с. 29-32.
7. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Изд. Стандартов Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача М. Высшая школа/ — 1980.
8. Светлов, В.А., Ефимов С.И., Иващенко Н.А., Сячинов А.В. Методика определения параметров теплообмена во внутреннем контуре двигателя Стирлинга//Двигатель 97. Материалы международной научно-технической конференции. М.: Изд. МГТУ, 1997.
9. Веревкин, М.Г. Метод комплексного теплового и конструкторского расчета термомеханического генератора// Известия ВУЗов. Машиностроение, 2004, №10. с. 33-37.
10. Абакишин А.Ю. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена в цилиндрах двигателя с внешним подводом теплоты / А.Ю. Абакишин, Г.А. Ноздрин, М.И. Куколев // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2012. — № 2-2 (1477). — с. 164-167.
11. Kouji Kumagai, Hiroyuki Yamasaki. Performance Prediction of Linear Stirling Power Generator with Two Displacers// 6th International Energy Conversion Engineering Conference. 2008.
12. Kwanchai Kraitong. Numerical modelling and design optimisation of Stirling engines for power production//World Renewable Energy Congress. — 2011.
13. Hang-Suin Yang, Chin-Hsiang Cheng. A Nonlinear Non-dimensional Dynamic Model for Free Piston Thermal-lag Stirling Engine// Energy Procedia. 2014.
14. Бобылев А.В., Зенкин В.А. Математическая модель свободнопоршневого двигателя Стирлинга. Техника//Технологии. Инженерия №1 (03). 2017 с. 22-27.