



## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОТОПЛИВНЫХ МИКРО ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА ДЛЯ СЕЛЬСКИХ РАЙОНОВ

А.Д. Мехтиев, А.Д. Алькина, В.В. Югай,  
У.С. Есенжолов, Н.Б. Калиаскаров

Карагандинский государственный технический университет,  
г. Караганда, Казахстан

ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>, <https://orcid.org/0000-0003-4879-0593>, <https://orcid.org/0000-0002-7249-2345>, <https://orcid.org/0000-0003-2536-6810>, <https://orcid.org/0000-0003-3684-1488>

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Проведение сравнительного анализа проблем эффективного электроснабжения сельских потребителей. Предложение решений проблем путем использования многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя стирлинга для сельских районов. Обоснование и описание перспектив использования многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя стирлинга для сельских районов. *МЕТОДЫ.* Проведен научный анализ современного состояния и уровня развития альтернативных источников на основе двигателя с внешним подводом теплоты, работающий по термодинамическому циклу Стирлинга. Используются методы компьютерного моделирования термодинамических процессов многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя с внешним подводом теплоты. Разработан метод компьютерной симуляции, позволяющий построить PV диаграмму и визуализировать процессы изменения давления и объема рабочего тела зависимостей от положения рабочего поршня и вытеснителя. Используются математические методы анализа и описания термодинамического цикла двигателя с внешним подводом теплоты. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Выполнен анализ достижений и уровня современных достижений в области микро электростанций. Установлено направление развития научных исследований по разработке двигателя с внешним подводом тепла. Приведены некоторые результаты исследований по эффективности работы двигателя с внешним подводом теплоты. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Одним из решений проблемы эффективного электроснабжения сельских потребителей может быть внедрения микро тепловых электростанций. Их использование позволит снизить стоимость электроэнергии и обеспечить ее бесперебойную поставку. Основой микро тепловой электростанции является двигатель с внешним подводом теплоты, работающий по термодинамическому циклу Стирлинга.

**Ключевые слова:** Тепловая электростанция, двигатель Стирлинга, когенерация, электроснабжение, теплоснабжение, альтернативная энергетика, тепловой двигатель.

**Благодарности:** Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по грантовому финансированию на 2018-2020 г. проекта ИРН АР05131751 НТП «Микро тепловая электростанция когерационного типа с рекуперацией тепла».

**Для цитирования:** Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Югай В.В., Есенжолов У.С., Калиаскаров Н.Б. Сравнительный анализ и перспективы использования многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя стирлинга для сельских районов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5. С. 3-17. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-3-17.

## COMPARATIVE ANALYSIS AND PROSPECTS OF THE USE OF MULTI-FUEL MICRO-THERMAL POWER STATIONS ON THE BASIS OF THE STEELING ENGINE FOR RURAL AREAS

AD. Mekhtiyev, AD. Al'kina, VV. Yugay,  
US. Esenzholov, NB. Kaliaskarov

Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan

ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>, <https://orcid.org/0000-0003-4879-0593>, <https://orcid.org/0000-0002-7249-2345>, <https://orcid.org/0000-0003-2536-6810>,  
<https://orcid.org/0000-0003-3684-1488>

**Abstract:** *THE PURPOSE.* Conducting a comparative analysis of the problems of efficient power supply for rural consumers. Offering solution to problems by using multi-fuel micro-thermal power plants based on the Stirling engine for rural areas. Justification and description of prospects for the use of multi-fuel micro-thermal power plants based on the Stirling engine for rural areas. *METHODS.* Methods of computer simulation of thermodynamic processes of multi-fuel micro-thermal power plants based on an engine with external heat supply are used. A computer simulation method has been developed that allows constructing a PV diagram and processes of changes in the pressure and volume of the working fluid depending on the position of the working piston and the displacer. Mathematical methods of analysis and description of the thermodynamic cycle of an engine with external heat supply are used. *RESULTS.* Выполнен анализ достижений и уровня современных достижений в области микро электростанций. Установлено направление развития научных исследований по разработке двигателя с внешним подводом тепла. Приведены некоторые результаты исследований по эффективности работы двигателя с внешним подводом теплоты. *CONCLUSIONS.* Одним из решений проблемы эффективного электроснабжения сельских потребителей может быть внедрения микро тепловых электростанций. Их использование позволит снизить стоимость электроэнергии и обеспечить ее бесперебойную поставку. Основой микро тепловой электростанции является двигатель с внешним подводом теплоты, работающий по принципу Стирлинга.

**Keywords:** *Thermal power station, Stirling engine, cogeneration, power supply, heat supply, alternative energy, heat engine.*

For citation: Mekhtiyev AD, Al'kina AD, Yugay VV, Esenzholov US, Kaliaskarov NB. Comparative analysis and prospects of the use of multi-fuel micro-thermal power stations on the basis of the steeling engine for rural areas. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):3-17. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-3-17.

### Введение

Еще полностью не решена проблемой электроснабжения удаленных потребителей, когда прокладка линии электропередачи сопряжена со значительными затратами, которые не могут окупиться в течении длительного времени или вовсе. Для решения данной проблемы можно использовать альтернативные источники энергии, например, ветрогенераторы и солнечные модули, которые могут обеспечить удаленного потребителя достаточным количеством энергии, но не все так просто, стоимость первоначальных вложений очень высока и срок окупаемости может составлять более 10 лет, нет полной гарантии что приобретенные солнечные модули не деградируют или не выйдут из строя. Необходимость в использовании накопителей сильно повышает стоимость солнечной электростанции в целом. Вырабатываемая мощность ветрогенератора и солнечной электростанции сильно зависит от погодных условий и поэтому их трудно регулировать и рассчитывать на сбалансированную работу не приходится. В данной статье мы не будем обсуждать достоинства и недостатки данных источников энергии, так как об это много уже написано [1]. Не все гладко и безоблачно с их эксплуатацией. Есть еще важный момент, касающийся их стоимости, например, солнечный комплект "Коттедж" 5000 (Вт), обойдется в 4 млн тенге, без монтажа и доставки по Казахстану. Есть варианты найти и дешевле, но нет гарантии качества или собрать самостоятельно из купленных солнечных

модулей Китайского производства. То же самое положение будет с приобретением и монтажом ветрогенератора мощностью 5 кВт, по сравнению с солнечными модулями этот источник обойдется дешевле процентов на 10-15. Просто данные источники не по карману фермеру и сельскому жителю, поэтому они не находят в отдаленных селениях широкого применения. Можно использовать тривиальный подход, основанный на известных принципах генерации электрической энергии на месте при помощи электростанции с двигателем внутреннего сгорания. Сотни различных марок таких электростанций выпускаются по всему миру их можно свободно купить в фирменных магазинах и на рынке. Их конструкция достаточно отработанная и можно сказать условно надежная, но они отличаются друг от друга по качеству и стоимости. Примерно схожи по своим показателям производительности, например, электрогенератор номинальной мощностью 5кВт с бензиновым двигателем внутреннего (далее ДВС) сгорания *HONDA* потребляет 2,2 литра за один час работы, около 440 граммов бензина марки АИ – 92 (по характеристикам производителя стоит), что обойдется потребителю в 75 тенге за один кВт·ч, но житель Караганды заплатит за то же кВт·ч больше чем в пять раз меньше. Есть множество предложений от различных производителей из Китая и России, некоторые из испытанных нами расходовали примерно от 500 до 600 г бензина АИ – 92, при различной нагрузке. Соответственно необходимо вложить определенные средства, например, бензиновый генератор *Mateus 6500 HOME* (Кипр) выполненным по технологии *HONDA*, номинальной мощностью 5 кВт, обойдется примерно в 180000 тенге. Намного экономичнее выглядят дизельные электрогенераторы, но их стоимость выше, например, электростанция номинальной мощностью 5,5 кВт с дизельным двигателем *HYUNDAI DHG7500*, стоит около 580000 тенге, конечно дизельный двигатель более экономичный. На один кВт·ч выработанной энергии он будет расходовать 280-350 г топлива в зависимости от загрузки и условий эксплуатации. Зная эту особенность, производители ставят цену на дизельные генераторы гораздо выше, чем на бензиновые.

В последние 10 лет на Европейских странах появились микро инано тепловые электростанции следующих мощностей: до 1 кВт; 1-2,5 кВт; 3-7,5 кВт; 8-14,5 кВт; 15-20 кВт; 20,5-50 кВт. Различный диапазон мощности позволяет им удовлетворить потребности практически любого сельского потребителя. Электрический КПД на уровне 15...25%, коэффициент использования топлива до 70...80%. В основе энергоисточника может быть двигатель Стирлинга, карбюраторный двигатель по циклу Отто, паровой двигатель внешнего сгорания с двумя свободными поршнями, топливные элементы. Микро тепловая электростанция (далее МТЭС) имеет низкий уровень шума, что позволяет размещать ее не посредственно в доме. В качестве топлива преимущественно используется газ, жидкие углеводороды, но есть различные модификации способные работать на твердом топливе, в том числе, пеллеты. Анализ показал, что средняя стоимость МТЭС (*Ecopower, WhisperGen, Microgen, Lion-Powerblock, EcoGen*) в зависимости от их электрической мощности (1 – 20 кВт) составляет около 10 тыс. евро за кВт. Например, фирма *Ecopower* (США) продала в Европе за последние 5 лет, главным образом в Великобритании, около 5 тыс. МТЭС на базе одноцилиндрового четырехтактного двигателя внутреннего сгорания мощностью 3 кВт. Стоимость от 6 тыс. евро. Тепловая мощность нагрева воды – 12 кВт, температура нагреваемой воды не превышает 40-50 °С. Поэтому производители рекомендуют использовать микро-ТЭС совместно с водяными теплыми полами вместо традиционных радиаторов. Аналогичные агрегаты *Dachs* производит фирма *Senertec* [2]. На внутреннем рынке Японии уже год представлена модульная микро-когенерационная установка фирмы *Honda* электрической мощностью 1 кВт и тепловой 3,25 кВт.

Основой МТЭС, является, одноцилиндровый четырёхтактный мотор с присоединённым к нему генератором. Для теплоснабжения используется тепло системы охлаждения и энергия выхлопных газов двигателя. Тепловой КПД установки достигает 60%, что вместе с электрическим КПД в 20%, позволяет достичь суммарного коэффициента использования топлива в 80%.

Мощность МТЭС рассчитана из условия обеспечения средней электро- и тепловой нагрузки частного дома. Для покрытия пиковых нагрузок предполагается использовать дополнительные системы. Так, для покрытия повышенных тепловых нагрузок (отопление и горячая вода) наиболее эффективной является комбинация установки с газовым котлом. Пики электрической нагрузки должна брать на себя центральная сеть. Через это же соединение излишки произведённой электроэнергии могут передаваться в электросеть [3].

Мы предлагаем немного другой путь решения проблемы эффективного

энергоснабжения удаленных сельских потребителей. Проведя анализ мировых разработок электрических генераторов и микро тепловых электростанций, показал, что сегодня есть альтернатива двигателю внутреннего сгорания двигатель Стирлинга (ДС). Его создателем является пастор Р. Стирлингом, который получил на него патент в 1817 году. В первоначальном виде он весил более тонны и развивал мощность около 1000 Вт, его большим недостатком являлось значительная металлоёмкость и низкий КПД в пределах 4%, но на то время его преимуществом была безопасность и простота конструкции, в отличии от паровой машины. Понадобилось 20 лет чтобы его доработать, обеспечить его герметичность и повысить его эффективность за счет использования регенератора. В дальнейшем Р. Стирлинг получил патент на тепловой двигатель с закрытым циклом и регенератором (аккумулятор тепла), который накапливал и отдавал рабочему телу тепловую энергию при различных частях термодинамического цикла. Все это позволило увеличить КПД до 10 % и уменьшить его вес практически в двое. Используя принцип работы двигателя Стирлинга, инженеры и изобретатели разработали различные его модификации [4]. Двигатель Р. Стирлинга не смог оказать паровой машины, паровой турбиной и двигателю внутреннего сгорания. Все эти двигатели имели лучше показатель по КПД и отношению «вес/габарит/мощность». Развитие ДВС и электродвигателей в начале 20 века сделал нерентабельным их производство. С течением времени в 50 - 60 годы прошлого века, инженеры снова взялись за разработки новых конструкций и эти разработки выдуться и сегодня. Есть значительные достижения в данной сфере, например, фирма *Philips* производившая компактные электрогенераторы на основе двигателя с внешним подводом теплоты работающий по циклу Стирлинга добилась КПД более 40 %, что пока не достижимо для современного ДВС [5]. Еще больший КПД показал, так называемый «Солнечный Стирлинг» фирмы *Philips*, с КПД около 45 %, что тоже не достижимо для солнечных модулей выполненных на основе кремния.

Если использовать в МТЭС тепловой двигатель с внешним подводом теплоты, работающий по принципу Р.Стирлинга, то можно получить весьма перспективный агрегат, который производит электрическую и тепловую энергию. В прошлом веке разработаны множество модификаций двигателя с внешним подводом теплоты работающий по циклу Стирлинга с участием зарубежных фирм *Philips*, *STM Inc.*, *DaimierBenz*, *Solo*, *UnitedStirling*, выпущены серийные образцы, которые эксплуатировались на транспорте, быту и сельском хозяйстве, есть передовые разработки для подводных лодок и космических кораблей [6]. В этом направлении на протяжении прошлого века и по настоящий момент зарубежными компания сделано очень много, в плане развития данной технологии. Сегодня в Казахстане подобные научные разработки не ведутся, нет также действующих образцов разработанных учеными, есть только отдельные энтузиасты, собравшие небольших моделей, которые не способны обеспечить энергией не только крестьянское хозяйство, но и небольшой сельский дом. Все работы производятся разрознено, а разработчики не имеют связи между собой. Основной их разработок является информация, полученная из интернета, которая не позволяет создать эффективную МТЭС с высокими техническими характеристиками.

За рубежом напротив имеются разработки МТЭС с высокими технико-экономическими показателями и характеристиками. Для потребителей с небольшой потребляемой мощности предлагается МТЭС на основе ДС, *VISSMANN — VITOTWIN 300-W* (Германия), которая способная производить тепловую и электрическую энергию (рис. 1).

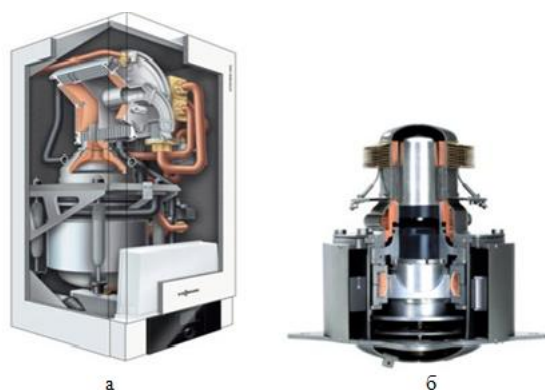


Рис. 1. МТЭС с двигателем Стирлинга: а) разрез МТЭС; б) разрез ДС

Таким образом, агрегат занимает в кухне столько же места, сколько стандартная посудомоечная машина. Для сравнения: габариты американской МТЭС *Ecopower* (Д × В × Ш) – 1280 × 980 × 700 мм, масса – 400 кг.

Электростанция подойдет как для энергоснабжения сельского дома, так и для загородного коттеджа. Правда она способна работать только на природном или сжиженном газе. Ее стоимость составляет около 11 тысяч евро. Преимущества агрегата состоят в экономичности, низком уровне создаваемого при работе шума. Установка любой МТЭС, это в первую очередь работа на перспективу. Учитывая достаточно высокую стоимость оборудования, целесообразно коллективное применение данных агрегатов [7]. Компании *WhisperGen* (Новая Зеландия) разработала для Европейского рынка МТЭС с тепловым двигателем внешнего сгорания Стирлинга, стоимостью около 7 тыс. евро, электрическая мощность – 1 кВт, тепловая – 5,5 кВт. Фирма *Microgen* (Великобритания) выпускает аналогичные по конструкции МТЭС. Их отличает бесшумность работы, по сравнению с уровнем шума на расстоянии 2 м от работающей *Ecopower* составляет 56 дБ (ДВС), а при аналогичных условиях для *WhisperGen* – не более 40 дБ (ДС). Это позволяет устанавливать *WhisperGen* внутри дома, так как создаваемый ей шум не выше шума бытового холодильника. Оптимальное для средневропейского дома количество вырабатываемой горячей воды; Размеры установки, например, *WhisperGen* (В × Ш × Д) составляют 650 × 500 × 450 мм, масса 137 кг (рис. 2).



Рис. 2. МТЭС *WhisperGen* с двигателем Стирлинга

Отсутствие техобслуживания (ресурс работы – до 40 тыс. ч): в них нет масла внутри цилиндра, нет фильтров и свечей зажигания, не надо регулировать клапаны и систему зажигания. Для ДВС американской установки после 8 тыс. ч необходим ремонт.

Топливная «всеядность», это важное преимущество двигателя Стирлинга, он способен использовать разные виды газообразного, жидкого и твердого топлива. Совместно с МТЭС сельский потребитель может использовать вакуумные коллекторы и солнечные фото панели (альтернативные источники тепла и электроэнергии). В зимний период эффективность работы фото панелей весьма низкая, но ее достаточно для того, чтобы обеспечить действие циркуляционных насосов, поддерживающих движение воды в системе ГВС, нагретой от вакуумных коллекторов. Летом, когда солнечные фотоэлектрические панели функционируют с максимальной отдачей электроэнергии, можно ограничить время работы МТЭС, сэкономить газообразное топливо и сберечь моторесурс двигателя. В Нюрнберге фирма *Sunmachine* (Германия) производит когенерационные МТЭС электрической мощностью 3 кВт с двигателем Стирлинга, работающим на пеллетах (рис. 3). Аналогичные МТЭС выпускает фирма KWB (Австрия, Ирландия). Двигателем Стирлинга фирмы *Microgen* комплектуется конденсационный газовый котел фирмы *Remeha*, “*Remeha-HRE*”. Аналогичные МТЭС выпускают фирмы *KIRSCH*, *Viessmann*, *Baxi – Ecogen*.



Рис. 3. Микро-ТЭЦ на древесных галетках

На рис. 4 приведены данные по сравнительному анализу КПД современных тепловых двигателей, выпускаемых промышленностью. Использование ДС позволит создать многотопливную МТЭС с более высокими показателями производства тепловой энергии, чем при использовании ДВС. ДС имеет ряд преимуществ и недостатков [8], но его использование в качестве силового агрегата для МТЭС весьма предпочтительно.

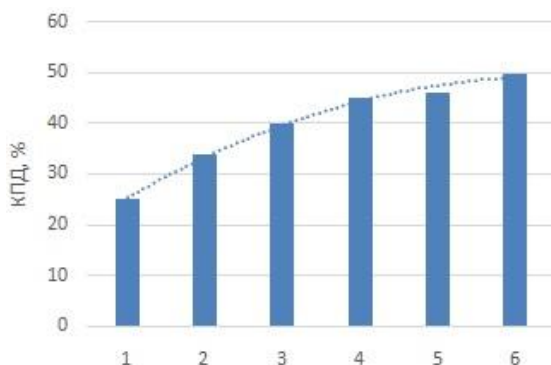


Рис. 4. Сравнительный анализ КПД различных типов двигателя:

1 – бензиновый ДВС; 2 – газотурбинная установка; 3 – атмосферный дизельный ДВС, 4 – двигатель Стирлинга (высокого давления); 5 – реактивный двигатель; 6 – дизельный ДВС с турбонаддувом

#### Эффективность применения свободнопоршневого двигателя Стирлинга

Проведя анализ источников [9-10] Для будущей МЭТС используется ДС свободно поршневого типа [9-10], которые будут нами сначала отработаны на лабораторных моделях мощностью до 100 Вт, затем постепенным приближением будем двигаться к прототипу мощность которого составляет 1 кВт. Поршневые ДВС при своей дешевизне и высокой электрической эффективности имеют малую тепловую мощность, требуют применения масла в цилиндрах и содержат в своем составе большое количество трущихся элементов, что приводит к малому ресурсу работы. Классические двигатели Стирлинга более массивные, материалоемкие и работают под высоким давлением рабочего тела [11-12], но свободнопоршневой тип обладает рядом преимуществ и в первую очередь отсутствие массивного маховика с кривошипно-шатунным механизмом, также поршень и вытеснитель находятся в герметичном корпусе, что решает ряд проблем с уплотнениями [13-14].

Для достижения цели необходимо выполнить ряд мероприятий, связанных с совершенствованием конструкции описанных в [15] и их адаптация к Казахстанским условиям эксплуатации на доступном в сельских регионах топливе. Необходимо отметить, что современные свободнопоршневые ДС, имеют много достоинств: низкий уровень шума, многотопливность, простота конструкции (нет поршней, каленвала,

распредвала и другие), значительный ресурс (более 40 тыс. часов), высокий КПД, возможность когенерация, а отсутствие, зажигания, высоковольтных проводов, коробки передач, стартера с аккумулятором делают его удобным в эксплуатации. Нашей задачей является создание МТЭС с ДС без вращающихся частей, высоким значением электрического КПД, низкий уровень выбросов вредных веществ. В перспективе будет создано принципиально нового типа акустической МТЭС, которая способна с помощью звуковых колебаний превращать тепловую энергию в электричество.

#### **Технологическая схема микро тепловой электростанции.**

Эффективность применения свободнопоршневого двигателя Стирлинга в когенерационных установках, по сравнению с ДВС, обусловлена особенностью его теплового баланса. На рис. 5 показана компоновка многотопливной микроэлектростанции мощностью в 1 кВт с двигателем с внешним подводом теплоты, в трех возможных вариантах, основанных на использовании энергосберегающего эффекта «Тандыра». Данная установка производит 1 кВт/ч электрической энергии и 5-6 кВт/ч тепловой, что в полнее достаточно для небольшого сельского дома. Контур охлаждения работает в летнее время, а в холодное время года его заменяет система отопления жилого дома площадью около 70 м<sup>2</sup>. Установка работает на накопительный буфер, который состоит из аккумулятора электрической и тепловой энергии. Накопители позволяют добиться стабильности в ее работе и обеспечить пики максимальной нагрузки, а также сбалансировать объемы произведенной и потребляемой энергии при минимальных потерях. Установка монтируется в печь или «Тандыр», которую предварительно разжигают, возможна также работа установки в длительном режиме с поддержанием процесса горения топлива.

Установка состоит из: свободнопоршневого двигателя внешнего сгорания 1; линейного генератора переменного тока на постоянных магнитах 2 и кабельной линии 3 с напряжением 220 В. Кабель подключается к преобразователю AC220/DC24В, для зарядки аккумулятора емкостью примерно 200 А/ч; система охлаждения (отопления) 4, чем эффективнее она работает тем выше КПД всей установки; нагреватель рабочего тела 5 из нержавеющей жаропрочной стали; система подвода воздуха 6; основание земли 7; кирпичная кладка из шамотного кирпича 8; трубопровод для системы охлаждения 9; колосниковая решетка 10; бетонное основание печи 11; теплоизоляция 12; обшивка 13; люк для чистки 14; дымоход для удаления продуктов горения 15.

Установка работает следующим образом, под действием высокой температуры от 300 до 700<sup>0</sup> С силовая установка на основе свободнопоршневого двигателя внешнего сгорания 1 приводит в движение линейного генератора переменного тока на постоянных магнитах 2, выработанный ток по кабельной линии 3 с напряжением 220 В поступает на преобразователь переменного тока в постоянный AC220/DC24В который имеет контроллер заряда и осуществляет зарядку аккумуляторов минимальной емкостью 200 А/ч, желательно увеличить емкость аккумуляторов в 2-3 раза, для исключения дефицита электроэнергии и избежание аварийного отключения автономной системы при разрядке аккумулятора. Если в доме есть несколько мощных приемников, то необходимо отдельно рассчитать необходимое для их работы емкость.

Постоянный ток может напрямую доставляться потребителям, например, светодиодным электрическим лампам и частично инвертироваться для приводов холодильника и стиральной машины. Важным моментом эффективной работы установки является система охлаждения (отопления) 4, чем эффективнее она работает, тем выше КПД всей установки, поэтому желательно лучше охлаждать рабочее тело, чем повышать температуру нагревателя. Система охлаждения подключается через трубопроводы 9 и разделяется на прямой и обратный, в качестве охлаждающей жидкости может быть использован автомобильный антифриз. Для циркуляции охлаждающей жидкости используется электрический насос(помпа), а подключение системы отопления дома осуществляется через теплообменный аппарат. Для хранения излишек тепловой энергии необходим бак с тепловой изоляцией емкостью 200 – 500 литров.

Нагреватель рабочего тела 5 непосредственно воспринимает высокую температуру и должен быть выполнен из жаропрочной стали, для повышения эффективности он снабжен дополнительными трубчатыми нагревателями и внутренним регенератором. Для обеспечения процесса горения топлива печь или «Тандыр» должны быть оснащены системой подачи воздуха 6. Важным моментом является конструкция самой печи, главное ее качество должно быть энергосбережение и сохранение тепла, поэтому теплоизоляции уделяется особое внимание.

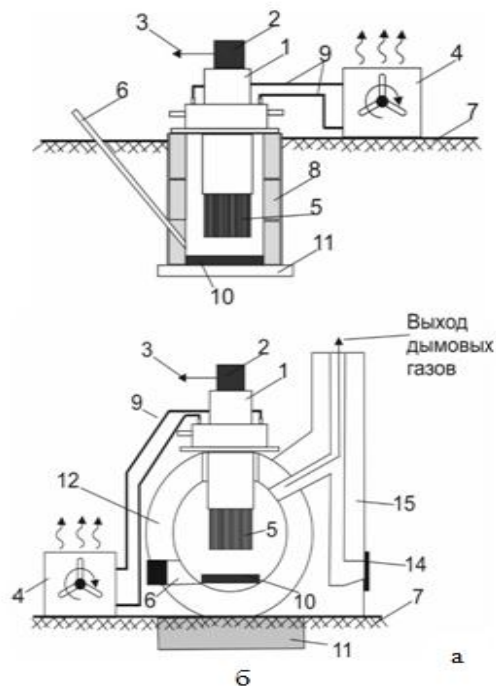


Рис. 5. Возможные варианты компоновки многопливной МТЭС мощностью в 1 кВт с двигателем с внешним подводом теплоты: а) подземное расположение МТЭС; б) надземное МТЭС

Электрическая схема установки показана на рис. 6, основная идея заключается в разделении нагрузки на переменную и постоянную. Это позволит избежать излишних преобразований и потерь, так как большинство современного бытового электрооборудования работает на постоянном токе, например, ноутбук или сотовый телефон. Светодиодные электрические лампы тоже могут работать на постоянном токе без драйвера. Переменный ток необходим только холодильнику, стиральной машине, микроволновой печи, поэтому для них предусматривается инвертор.

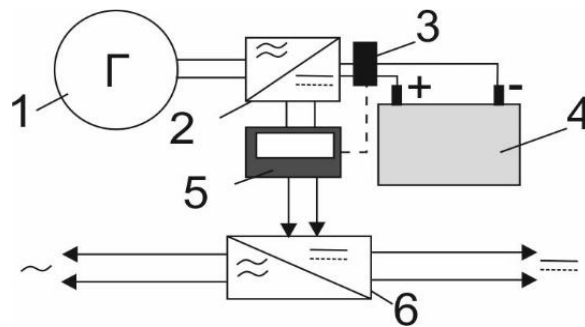


Рис. 6. Электрическая схема генерации

Система выработки электрической энергии состоит из линейного синхронного генератора переменного тока 1, выполненного на постоянных магнитах, полупроводникового выпрямителя переменного тока 2, контроллера заряда аккумулятора с реле 3 и 5, аккумуляторной батареи 4, распределительного устройства 6 для разделения нагрузки на переменный ток с питанием от инвертора и на постоянный ток для питания нагрузки постоянного тока напрямую от аккумуляторной батареи.

**Экспериментальная часть**

Для проведения исследований нами был разработан экспериментальный свободнопоршневой двигатель с внешним подводом теплоты, представленный на рисунке 7, максимальная мощность линейного электрического генератора на постоянных магнитах составляет 80 Вт. Данная конструкция является наиболее перспективной и эффективной для разработки будущей конструкции МТЭС. Частота колебаний 48-56 Гц. В качестве рабочего тела используется воздух с добавлением небольшого в процентном отношении воды, что позволяет создавать давление до 12 МПа, также можно использовать гелий. Сухой насыщенный пар и вода по кривые насыщения составляет при T=150 0С, P=0,5 МПа., при T=200<sup>0</sup>С P=1,5 МПа., при T=300<sup>0</sup>С, P=8,5 МПа., при T=330<sup>0</sup>С P=12,8 МПа. Нагрев



осуществлялся газовой горелкой до 5492 ккал (6 кВт). Температура измерялась инфракрасным термометром снаружи цилиндра выше днища на 3 мм. Значения достигали 270-340<sup>0</sup>С. Цилиндр выполнен из медной трубы диаметром 108 мм, с толщиной 1 мм. Диаметр рабочего поршня и вытеснителя 101,8 мм. Длина поршня составляет 120 мм, при длине вытеснителя в 250мм. Требуется использования термоизолированной камеры сгорания, так как значительный объем теплоты открытого пламени горелки рассеивается в окружающей среде. Температура воды с системы охлаждения изменялась от 23 до 34<sup>0</sup>С. Время работы образца составило в пределах 30 минут.

Проведено компьютерное моделирование свободнопоршневого двигателя для создания оптимальной конструкции с максимально возможным КПД. Установлен ряд зависимостей, влияющих на мощность связанных с температурой нагревателя и охладителя, диаметром и ходом поршней, фазой и другими параметрами. Внешний вид образца приведен на рис. 7.



Рис. 7. Экспериментальная лабораторная установка МТЭС  
свободнопоршневого типа мощностью 80 Вт: а) Расположение электрического генератора;  
б) Подвод тепла при помощи газовой горелки

Свободнопоршневой двигатель работает по такому же принципу, как и двигатель Стирлинга с приводным механизмом. Под действием давления газа в рабочих полостях происходит перемещение поршней, а движение в обратном направлении происходит благодаря силам упругости механической пружины. Жесткая кинематическая связь между поршнями отсутствует. Вытеснитель, по сравнению с рабочим поршнем, обладает меньшей массой. И как следствие опережает рабочий поршень на некоторый фазовый угол. Данное условие является необходимым для получения полезной работы в двигателях, работающих по циклу Стирлинга.

Рабочий процесс в двигателе протекает следующим образом. При запуске двигателя давления газа в рабочих полостях равны между собой. При включении нагревателя происходит повышение температуры и давление газа в полости расширения. Вследствие этого начинается движение вытеснителя, а затем перетекание рабочего тела из холодной полости в горячую. При этом давление газа повышается. Под действием разницы давлений газа в рабочих полостях, вытеснитель продолжает движение, переталкивая рабочее тело в горячую полость. Вследствие возрастания давления начинает движение рабочий поршень. При достижении минимального значения объема полости сжатия, давление газа в рабочих полостях начинает уменьшаться. Перемещение поршней происходит до момента уравнивания сил инерции и действия газовых сил.

Вследствие того, что вытеснительный поршень намного легче рабочего поршня, он первым начинает движение в обратную сторону. При этом рабочий поршень еще продолжает перемещаться. Рабочее тело начинает перетекать из горячей полости в холодную, его давление падает и уменьшается по отношению к силе, проявляемой механической пружиной, это вызывает перемещение рабочего поршня в обратном направлении. Перемещение продолжается до момента выравнивания давлений в полостях несколько дольше за счет действия силы инерции рабочего поршня. Газ при этом начинает перетекать из холодной полости в горячую и цикл повторяется. Полезную работу можно снимать непосредственно с рабочего поршня, преобразуя кинетическую энергию его колебательных движений при помощи соответствующего нагрузочного устройства. В совокупности с линейным электрическим генератором, свободнопоршневой двигатель является автоколебательной системой, которая при определенных обстоятельствах может само запускаться при подведении теплоты к нагревателю. Очевидно, что такой термомеханический генератор обладает рядом уникальных особенностей, которые позволяют разработчикам двигателей с внешним подводом теплоты обходить некоторые специфические трудноразрешимые проблемы, возникающие при создании классических конструкций двигателей Стирлинга с приводными механизмами, например, проблемы уплотнения внутреннего контура и смазки приводного механизма, проблемы создания работоспособного механизма газовой пружины.

Описанные выше автономные электростанции с двигателем ДВС имеют ряд недостатков и не высокий КПД, так как большая часть в них энергии теряется. Если выполнить рекуперацию потерь и направить их на получение тепловой энергии для нагрева теплоносителя системы теплоснабжения, можно отопить в холодное время жилые и производственные помещения. Соответственно, использование когенерационной тепловой электростанции, позволит получить не только электрическую энергию, но и тепловую, в виде нагретой воды. Как отмечалось выше, промышленностью выпускаются дизельные электростанции, но некоторые производители оснащают их когенерационной установкой, что трансформирует ее в микро тепловую электростанцию с тепловой централью (далее ТЭЦ).

Если установить такую электростанцию в частном или производственном помещении можно рекуперировать тепловые потери, характерные для дизельного генератора, для отопления помещений в зимний период времени. ДВС приводит в действие электрический генератор производящий электроэнергию, а тепловая мощность снимается с системы охлаждения двигателя и с выхлопной системы по выбросу продуктов сгорания топлива. Есть проблемы связанные, например, с эксплуатацией дизельных микроТЭЦ, так как требуется ее работа на полную мощность иначе двигатель плохо разогревается и снять с него достаточное количество тепловой энергии не получится.

Предложенный тип двигателя может свободно эксплуатироваться в жилых помещениях, а также эффективно работать практически на любом виде топлива или отходах сельскохозяйственного производства подверженных горению. Для увеличения мощности МТЭС от 1 до 5 кВт вместо линейного генератора на постоянных магнитах будет использоваться много ступенчатая турбина с высокочастотным генератором с регулируемым возбуждением, имеющим малые габариты, по сравнению с тихоходными синхронными генераторами на постоянных магнитах.

#### **Теоретическая основа расчета основных параметров МТЭС на основе свободнопоршневой двигателя с внешним подводом теплоты**

Описание физических процессов разработанного свободнопоршневого процесса можно основывать на приведенных выражений в источнике [7-8]. Предложенный свободнопоршневой двигатель для МТЭС работает по известному тепловому циклу двигателя Стирлинга. Предлагается свой вариант расчета физических параметров свободнопоршневого двигателя на основании известных процессов работы двигателя Стирлинга [7-8]. Первоначальным условием является, что движение вытеснителя сдвигается на угол  $\psi$  по сравнению с поршнем. Этот угол  $\psi$  отрицательный для заднего смещения и положительный для прямого смещения по сравнению с поршнем. Сдвиг вперед обычен для двигателя Стирлинга. То есть, вытеснитель находится над силовым поршнем, вытеснитель предшествует силовому поршню. Максимальная мощность достигается при смещении при сдвиге фазы между поршнем и вытеснителем на  $90^\circ$  и минимальная при  $0^\circ$ .

Объем полости с высокой температурой:

$$V_h = \frac{V_d}{2} \cdot (1 - \cos(\phi + \psi)) + V_{\text{гор}} \quad (1)$$

где  $V_d$  – объем вытеснителя,  $V_{\text{гор}}$  – горячий мертвый объем, который содержит нагреватель.

Объем полости с холодной температуры:

$$V_b = \frac{V_m}{2} \cdot (1 - \cos(\alpha)) + \frac{V_d}{2} \cdot (1 + \cos(\phi + \psi)) + V_{\text{хол}} \cdot V_{\text{общ}} \quad (2)$$

где  $V_m$  – объем, охватываемый силовым поршнем,  $V_{\text{хол}}$  – холодный мертвый объем [5...10], который содержит охладитель,  $V_{\text{общ}}$  – общий объем, охватываемый двумя поршнями и

$$\frac{V_d}{2} \cdot (1 + \cos(\phi + \psi)) - \text{холодный объем под вытеснителем.}$$

$$V_{\text{сост}} \text{ и } \frac{V_d}{2} \cdot (1 + \cos(\phi + \psi)) = 0$$

Постоянный объем регенератора  $V_r$  в любое время, итоговый объем

$$V = V_h + V_b + V_r \quad (3)$$

и итоговая масса газа

$$m = m_h + m_b + m_r \quad (4)$$

Индексы  $h$ ,  $b$  и  $r$  означают объемы при горячей температуре или холодной температуре, и одного из регенераторов

По закону идеального газа мы можем написать все три объема:

$$P \cdot V_h = m_h \cdot R \cdot T_h \quad (5)$$

$$P \cdot V_b = m_b \cdot R \cdot T_c \text{ et} \quad (6)$$

$$P \cdot V_r = m_r \cdot R \cdot (T_{mr} + dt) \quad (7)$$

где  $dT$  разница температур в регенераторе по сравнению с теоретической средней.

Три массы:

$$m_h = \frac{P \cdot V_h}{R \cdot T_h} \quad (8)$$

$$m_b = \frac{P \cdot V_b}{R \cdot T_c \text{ et}} \quad (9)$$

$$m_r = \frac{P \cdot V_r}{R \cdot (T_{mr} + dt)} \quad (10)$$

для, соответственно, холодного объема, горячего объема и объема регенератора.

Итоговая масса газа:

$$m = \frac{P_0 \cdot V_{\text{max}}}{R \cdot T_0} \quad (11)$$

где  $P_0$ ,  $V_{\text{max}}$  и  $T_0$  – давление, объем и температура в момент заполнения газом. Во время этого заполнения внутренний объем максимален.  $V_{\text{max}}$  рассчитывается как:

$$V_{\text{max}} = V_h + V_b + V_r \quad (12)$$

Заменяя значения масс газа [8] в уравнении (4) на значения, заданные уравнениями (8), (9) и (10), получаем:

$$\frac{P_0 \cdot V_{\max}}{R \cdot T_0} = P \cdot \left( \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_c}{T_c} + \frac{V_r}{T_{mr} + dt} \right) \quad (13)$$

которое дает нам значение давления:

$$P = \frac{\frac{P_0 \cdot V_{\max}}{R \cdot T_0}}{\left( \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_c}{T_c} + \frac{V_r}{T_{mr} + dt} \right)} \quad (14)$$

### Результаты экспериментов и обсуждение

Отдельно проведены эксперименты, позволяющие построить  $PV$  диаграмму замкнутого теплового цикла Карно и рассмотреть зависимость давления и объема при различных положениях поршней. Результаты приведены на рис. 8, 9 и 10. Проведенные исследования позволяют найти оптимальные параметры конструктивных частей теплового двигателя. Точно установить геометрические размеры поршня и вытеснителя, а также величину их хода с оптимальным значением фазового сдвига. Если происходит изменения фазного сдвига с  $90^\circ$  до  $0^\circ$ , то МТЭС перестает производить работу.

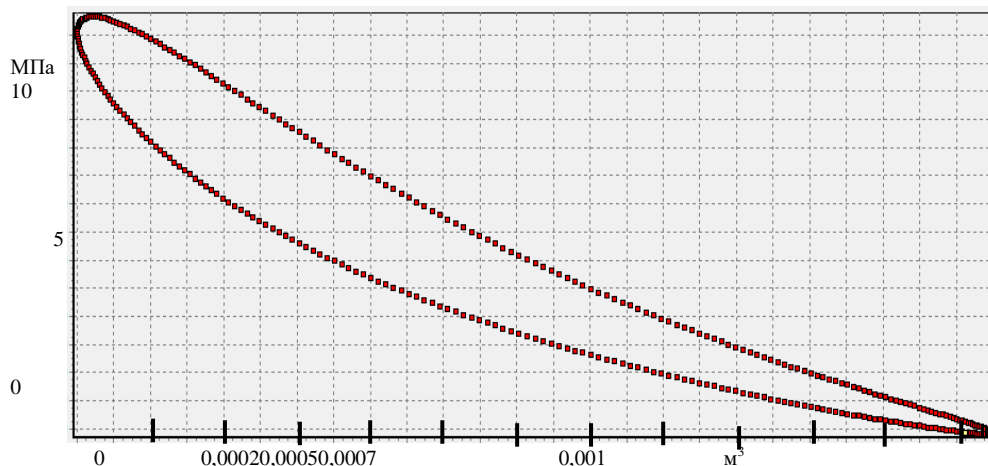


Рис. 8. Зависимости основных параметров свободнопоршневого двигателя при его работе при температуре нагревателя  $340^\circ\text{C}$  и охладителя  $30^\circ\text{C}$  при сдвиге фазы между поршнем и вытеснителем на  $90^\circ$ , при ходе вытеснителя в 3 раза больше чем у поршня

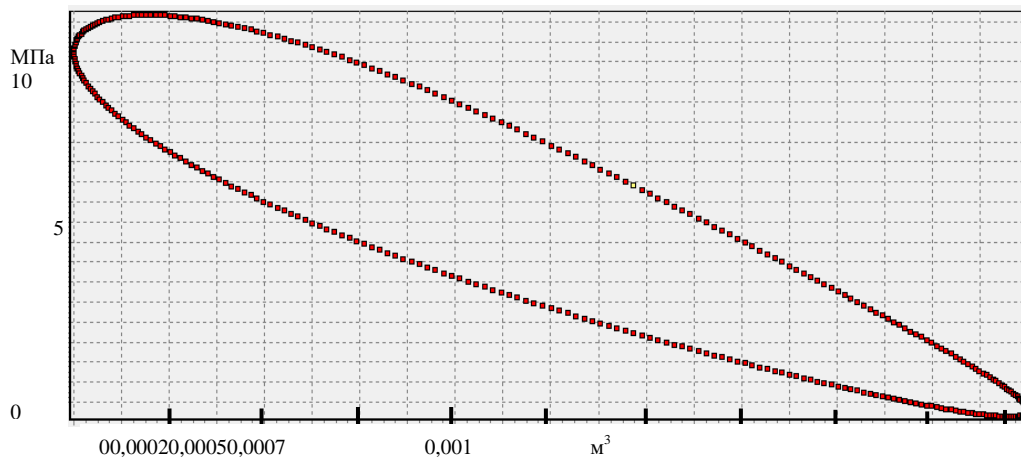


Рис. 9. Зависимости основных параметров свободнопоршневого двигателя при его работе при температуре нагревателя  $340^\circ\text{C}$  и охладителя  $30^\circ\text{C}$  при сдвиге фазы между поршнем и вытеснителем на  $90^\circ$ , при ходе вытеснителя в 6 раза больше чем у поршня

Также можно отметить, что в отличие от идеальной диаграммы  $p$ - $V$  зависимости давления и объём рассмотренной характеристики цикла Стирлинга [10] реальный график имеет намного меньшую площадь, соответственно меньший КПД и для его увеличения необходимо увеличить разницу температуры между нагревателем и охладителем, повышение температуры нагревателя более  $340^{\circ}\text{C}$ , что позволит увеличить давление рабочего тела, а также многократное снижение массы вытеснителя и его хода по отношению к рабочему поршню.

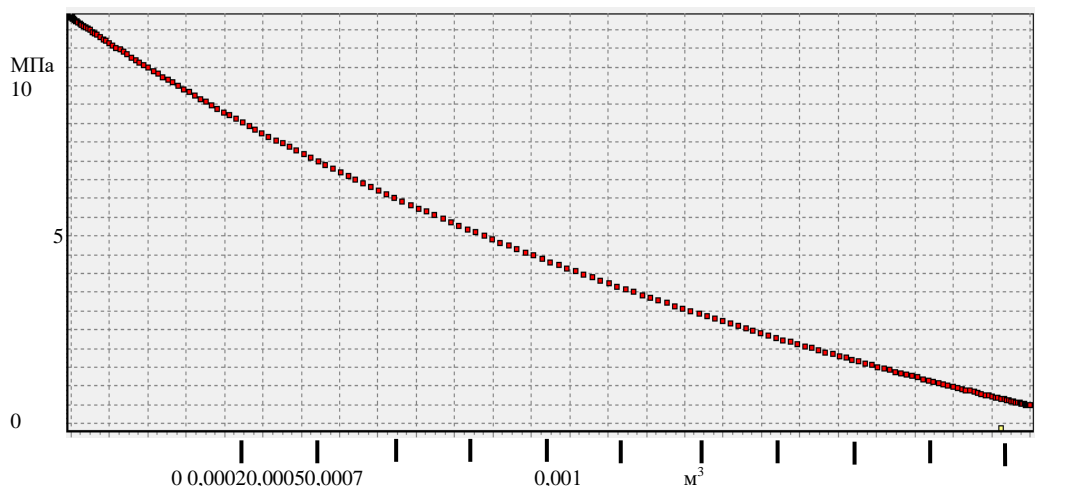


Рис. 10. Зависимости основных параметров свободнопоршневого двигателя при его работе при температуре нагревателя  $340^{\circ}\text{C}$  и охладителя  $30^{\circ}\text{C}$  при сдвиге фазы между поршнем и вытеснителем на  $0^{\circ}$

### Выводы

Для получения значительно большей мощности свободно поршневого двигателя при меньшей массе по сравнению с дизельным ДВС, необходимо достижение давления в пределах 10 МПа, что даст существенные преимущества при использовании свободнопоршневого двигателя с внешним подводом теплоты для многотопливной МТЭС, позволяет ей эффективно работать в условиях сельской местности на доступном топливе и отходах производства. Наиболее перспективной конструкцией привода силового агрегата является свободнопоршневой двигатель с внешним подводом теплоты, по сравнению с классическими конструкциями поршневых Двигателей Стирлинга. Максимальная мощность достигается при смещении при сдвиге фазы между поршнем и вытеснителем на  $90^{\circ}$  и минимальная при  $0^{\circ}$ , при этом КПД двигателя растет с увеличением хода вытеснителя по отношению к поршню. При этом вытеснитель должен быть минимум в три раза легче чем рабочий поршень, а его ход многократно больше.

### Литература

1. Мехтиев А.Д. Эйрих В.И., Югай В.В., и др. Мини-ТЭЦ и миниэлектростанции на основе двигателя Стирлинга для энергообеспечения жилых и промышленных объектов // Международный научный журнал «Актуальные проблемы современности». 2014. №3(5). С. 94–97.
2. Garcia M., Trujillo E., Godino J., et al. Thermodynamic Model for Performance Analysis of a Stirling Engine Prototype // Energies. 2018. V.11. N10.
3. Zare S., Shourangiz-Haghighi A., Tavakolpour-Saleh A. Higher order modeling of a free-piston Stirling engine: analysis and experiment // International journal of energy and environmental engineering. 2018. V.9. N3. pp. 273-293.
4. Athanasios A., Kolios J., Fidalgo B, et al. Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in an energy recovery system // Energy conversion and management. 2018. V.165. pp. 528-540.
5. Stamford L., Greening B., Azapagic A. Life cycle environmental and economic sustainability of Stirling engine micro-CHP systems // Energy technology. 2018. V.6. N6. pp. 1119-1138.
6. Egas J., Clucas D. Stirling Engine Configuration Selection // Energies. 2018. V.11. N3.
7. Kaluzhskii D., Mekhtiev A., Alkina A. Title of article. Optimization of the parameters of the synchronous motor for a special high-speed electric drive. 17th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM); 30 Jun-04 Jul 2016; Novosibirsk: NSTU; 2016.
8. Kaluzhskii D., Makarov D., Mekhtiev A. Title of article. Inductor Motor with Axial Excitation Flux. 17th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron

devices(EDM); 30 Jun-04Jul 2016; Novosibirsk: NSTU; 2016.

9. Sowale A., Anthony E., Kolios A. Optimisation of a Quasi-Steady Model of a Free-Piston Stirling Engine // *Energies*. 2019. V.12. N1.

10. Шалай В.В., Макушев Ю.П. Двигатель внешнего сгорания // Омский научный вестник. 2018. №1. С.110-114.

11. Волков А.В., Рыженкова А.В., Парыгина А.Г., и др. Проблемы развития автономных когенерационных энергетических комплексов на основе микрогидроэнергетики // *Теплоэнергетика*. 2018. №11. С. 32-39.

12. Эфендиев А.М., Николаев Ю.Е., Евстафьев Д.П. Возможности энергообеспечения фермерских хозяйств на базе малых возобновляемых источников энергии // *Теплоэнергетика*. 2016. №2. С. 38-45.

13. Зиновьев Е.А., Довгялло А.И. Упрощённая методика расчёта термоакустического двигателя // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2012. №3(34). с.206-211.

14. Namood A., Jaworski A.J., Mao X., et al. Design and construction of a two-stage thermoacoustical electricity generator with push-pull linear alternator // *Energy*. 2018. N.144. pp. 61-72.

15. Wang K., Sun D., Zhang J., et al. An acoustically matched traveling-wave thermoacoustic generator achieving 750 W electric power // *Energy*. 2016. N.103. pp. 313-321.

### Авторы публикации

**Мехтиев Али Джаваниширович** – к.т.н., заведующий кафедрой «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, e-mail: barton.kz@mail.ru.

**Алькина Алия Даулетхановна** – магистр технических наук, старший преподаватель, кафедра «Измерительная техника и приборостроение», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, e-mail: alika\_1308@mail.ru.

**Югай Вячеслав Викторович** – д-р PhD., и.о. доцента, кафедра «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, e-mail: slawa\_v@mail.ru.

**Есенжолов Улан Серикович** – магистр технических наук, старший преподаватель, кафедра «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, e-mail: newneil@mail.ru.

**Калиаскаров Нурбол Балтабаевич** – магистр технических наук, преподаватель, кафедра «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, e-mail: 90nurbol@mail.ru.

### References

1. Mekhtiyev AD, Eirikh VI, Yugai VV, et al. Mini-TETs i minielektrostantsii na osnove dvigatelya Stirlinga dlya energoobespecheniya zhilykh i promyshlennykh ob"ektov. *Actual problems of modernity*. 2014; 3(5):94-97

2. Garcia M ,Trujillo E, Godino J, et al. Thermodynamic Model for Performance Analysis of a Stirling Engine Prototype. *Energies*. 2018;11:10. doi:10.3390/en1102655.

3. Zare S, Shourangiz-Haghighi A, Tavakolpour-Saleh A. Higher order modeling of a free-piston Stirling engine: analysis and experiment. *International journal of energy and environmental engineering*. 2018;9(3):273-293. doi:10.1007/s40095-018-0267-7.

4. Athanasios A, Kolios J, Fidalgo B, et al. Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in an energy recovery system. *Energy conversion and management*. 2018;165:528–540. doi:10.1016/j.enconman.2018.03.085.

5. Stamford L, Greening B, Azapagic A. Life cycle environmental and economic sustainability of Stirling engine micro-CHP systems. *Energy technology*. 2018;6(6):1119–1138. doi:10.1002/ente.201700854.

6. Egas J, Clucas D. Stirling Engine Configuration Selection. *Energies*. 2018;11(3). doi:10.3390/en11030584.

7. Kaluzhskii D, Mekhtiyev A, Alkina A. Title of article. Optimization of the parameters of the synchronous motor for a special high-speed electric drive. 17th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devic ES (EDM); 30 Jun-04Jul 2016; Novosibirsk: NSTU; 2016.

8. Kaluzhskii D, Makarov D, Mekhtiyev A. Title of article. Inductor Motor with Axial Excitation

*Flux. 17th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM); 30 Jun-04Jul 2016; Novosibirsk: NSTU; 2016.*

9. Sowale A, Anthony E, Kolios A. Optimisation of a Quasi-Steady Model of a Free-Piston Stirling Engine. *Energies*. 2019;12(1). doi:10.3390/en12010072.

10. Shalai VV, Makushev YuP. Dvigatel' vneshnego sgoraniya. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2018; 1:110-114.

11. Volkov AV, Ryzhenkov AV, Parygin AG, et al. Matters Concerned with Development of Autonomous Cogeneration Energy Complexes on the Basis of Microhydropower Plants. *Thermal Engineering*. 2018;11:32-39.

12. Efendiev A.M, Nikolaev Yu.E, Evstaf'ev D.P. Vozmozhnosti energoobespecheniya fermerskikh khozyaistv na baze malykh vozobnovlyаемых istochnikov energii. *Thermal Engineering*. 2016; 2:38-45.

13. Zynovyev EA, Dovgyallo AI. A simplified method of thermoacoustic engine analysis. *Vestnik of samara university. AEROSPACE AND MECHANICAL ENGINEERING*. 2012; 3(34):206-2011.

14. Hamood A, Jaworski A.J, Mao X, et al. Design and construction of a two-stage thermoacoustic electricity generator with push-pull linear alternator. *Energy*. 2018;144:61-72.

15. Wang K, Sun D, Zhang J, et al. An acoustically matched traveling-wave thermoacoustic generator achieving 750 W electric power. *Energy*. 2016;103:313-321.

### **Authors of the publication**

*Ali D. Mekhtiyev* – Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan.

*Aliya D. Al'kina* – Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan.

*Vyachaslav V. Yugay* – Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan.

*Ulan S. Esenzholov* – Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan.

*Nurbol B. Kaliaskarov* – Karagandy State Technical University, Karagandy, Kazakhstan.

*Поступила в редакцию*

*21 октября 2020г.*