

ДВИГАТЕЛЬ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ АВТОНОМНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

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

*Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда,
Республика Казахстан*

Проблема эффективного электроснабжения не решена в полном объеме до сих пор. Одним из путей решения данной проблемы является разработка микротепловой электростанции, способной функционировать практически на любом топливе. Использование собственного источника энергии позволит снизить затраты на ее производство. Существенно повышаются показатели надежности электроснабжения и обеспечивается ее бесперебойная поставка потребителю. Предложенная нами электростанция приводится в действия тепловым двигателем с внешним подводом теплоты. Целью является создание альтернативного когенерационного источника энергии для удаленных потребителей сельской местности, способного работать практически на любом виде топлива или отходах, подверженных горению. Это позволит сельскому жителю на месте без оплаты транспортных потерь электроэнергии, производить электрическую и тепловую энергию в комплексе. В статье приведены некоторые результаты компьютерного моделирования двигателя с внешним подводом тепла, который работает по принципу Стирлинга. Рассмотрены конструктивные особенности разрабатываемого двигателя.

Ключевые слова: тепловая электростанция, двигатель Стирлинга, когенерация, тепловая энергия, комплексное производство, альтернативная энергетика.

Введение

Поиск альтернативных источников энергии является одним из важных направлений современной науки и техники. Разрабатываются новые технологии, позволяющие получать электричество альтернативным путем, не сжигая уголь и другие углеводороды. Активно развивается и параллельное направление, связанное с возобновляемыми источниками, в которых электроэнергия вырабатывается за счет преобразования солнечной радиации, энергии потока ветра и воды. Современные запросы потребителей диктуют разработчикам ряд условий, например, обеспечение высокой эффективности и КПД, а также долговечности и низкой стоимости производимой энергии, включая первоначальные затраты на строительство [1]. Еще больший вызов перед современной энергетикой формируется со стороны глобальной экологии: принятие соответствующих мер для сокращения выбросов парниковых газов. В данной работе рассмотрены некоторые вопросы создания автономных альтернативных источников с высокими технико-экономическими показателями, при этом вложение для потребителей должно быть минимальным, а срок службы источника максимальным [2]. Применение возобновляемых источников не всегда возможно в силу изменчивости погодных условий в течение года и полного отсутствия сбалансированности в работе, а также необходимости аккумулировать произведенную энергию, что не всегда может оправдать вложенные средства [3]. Общемировая стоимость 1 Вт солнечной электро-

станции оценивается в пределах 1 доллара США, а ветряной электростанции составит около 0,9 доллара США. Значительные затраты и несбалансированная работа не позволяют пока повсеместно внедрять их, но в мире есть определенные успехи развития возобновляемой энергетики, например, по итогам 2018 г. Германия получила 40 % от возобновляемых источников [4]. В Казахстане доля возобновляемой энергии составляет менее 1 %. Данное направление активно поддерживается правительством Казахстана в рамках закона «О поддержке использования возобновляемых источников энергии», что предоставляет возможности для формирования концепции по переходу Казахстана к «зеленой экономике», в рамках которой доля возобновляемой энергии в 2050 г. должна составить 50 %. Огромная территория Казахстана в 2,7 млн км² и низкая плотность населения (менее 5 чел./км²), а также значительное потребление электроэнергии на юге страны и концентрация электростанций на севере и востоке формируют определенные проблемы с централизованным электроснабжением и потерями электроэнергии при ее транспортировке. Использование альтернативных источников для решения данных проблем приобретает особое значение для сокращения транспортных потерь [5].

Постановка задачи

Целью работы является создание альтернативного когенерационного источника энергии для удаленных потребителей сельской местности, спо-

собного работать практически на любом виде топлива или отходах, подверженных горению. Это позволит сельскому жителю на месте без оплаты транспортных потерь производить электрическую и тепловую энергию в комплексе [6].

Высокая стоимость энергии приводит к значительным затратам при производстве сельхозпродукции и делает ее дорогой, то есть снижается ее конкурентоспособность. По всем областям Казахстана наблюдается ежегодный рост тарифов не только на электрическую энергию, но и на тепловую. Порядка 300 малых сельских населенных пунктов вообще не имеют централизованного энергообеспечения. Для построения системы собственного автономного электроснабжения современная промышленность может предложить помимо бензиновых и дизельных электрических электростанций когенерационные источники, основой которых является двигатель с внешним подводом тепла, работающий по циклу Стирлинга [7]. Имеются зарубежные разработки микротепловых электростанций (МТЭС), использующие двигатели с внешним подводом теплоты, с экономическими показателями и техническими характеристиками, превосходящими двигатели внутреннего сгорания (ДВС) и газотурбинные установки (ГУ) [8].

Теоретическая часть исследования

Двигатель с внешним подводом теплоты (ДВПТ) был усовершенствован и запатентован пастором Стирлингом в 1817 г. В первоначальном виде он был металлоемкий, весил больше тонны и развивал мощность около 1 кВт, его реальный КПД составлял 4 %, так как был негерметичен и не имел эффективного регенератора. Основными достоинствами ДВПТ на то время были простота и безопасность в отличие от паровой машины. Позднее, через 15 лет, Стирлинг запатентовал двигатель с закрытым циклом и предложил использовать регенератор: некий аккумулятор тепла, который накапливал и отдавал рабочему телу тепловую энергию при различных частях термодинамического цикла. Модернизация позволила уменьшить вес и добиться КПД в 10 % [9]. Бум развития ДВПТ, работающего по принципу Стирлинга, продолжался примерно до конца XX века; были разработаны десятки различных модификаций, которые поставлялись в основном в колонии (США), и некоторые работают и по сей день. Их вес стал меньше, а КПД поднялся до 10 % [10]. Но машина Стирлинга была вытеснена с рынка вначале паровой машиной, затем паровой турбиной и двигателями внутреннего сгорания, двигателем Дизеля. Новые машины за счет повышенного давления в рабочей полости (в цилиндрах и камерах) имели лучше показатель «вес/габарит/мощность» [11]. С развитием ДВС и электромоторов в начале XX в. к нему полностью пропал интерес. С развитием металлургии и синтетических материалов к ДВПТ

снова появилась заинтересованность у инженеров, и в 50–60-х гг. прошлого века снова начались разработки различных конструкций, которые продолжают до сих пор. Есть примеры определенных успехов: фирма Philips, производившая компактные электрогенераторы, использовала ДВПТ, также данный тип двигателя использовался совместно с солнечным концентратором, его КПД составлял около 40 %, что пока недостижимо для современных солнечных модулей [12].

При проектировании собственной модели ДВПТ за основу взяты теоретическая база и положительные практические результаты, а также опыт и достижения разработчиков прошлого века, создавших множество модификаций двигателя с внешним подводом теплоты, работающего по циклу Стирлинга [13]. Также необходимо учесть опыт современных производителей: Ecorpower, WhisperGen, Microgen, Lion-Powerblock, Honda, EcoGen, использующих схожие технологии. Разработанные ими образцы позволяют комплексно производить электрическую и тепловую энергию для автономной системы энергообеспечения, при этом на 1 кВт электрической энергии производится 5 кВт тепловой энергии для системы отопления [14]. Современные зарубежные образцы имеют высокую эффективность и приемлемую стоимость за 1 кВт мощности, при этом работают в основном на природном газе. К примеру, WhisperGen мощностью 1 кВт стоит около 6 млн тенге [15]. Копирование данных образцов в рамках настоящего исследования полностью отвергается, ставится задача разработки двигателя ДВПТ собственной конструкции и способного эффективно работать практически на любом виде топлива, доступного в сельской местности, или отходах, подверженных горению. На втором этапе настоящей разработки должна быть решена задача его дальнейшего производства по минимально возможной цене с использованием Казахстанских материалов и технологий [16]. Максимальное исключение импортных комплектующих для проектируемого ДВПТ сильно усложняет задачу на первоначальном этапе, но будущие научные и опытно-конструкторские разработки должны послужить основой успешной реализации проекта и востребованности настоящей разработки. Для этого будет внесен ряд изменений в типовые известные конструкции ДВПТ, включая механическую и электрическую часть. Предстоит отработать свою конструкцию нагревателя, регенератора, охладителя и уплотнений для достижения максимально возможного КПД. В качестве системы охлаждения будет использоваться жидкостный охладитель с обдуваемым радиатором [17].

Как сказано ранее, основой разработки является ДВПТ, работающий по циклу Стирлинга, но на совершенно другом принципе в отличие от классических конструкций, и этим отличием является использование термоакустического эффекта.

Теплоэнергетика

Это известный способ возбуждения звука при помощи тепла, который был описан еще 1877 г. Рэлеем в книге «Теория звука». Используя приведенные теоретические и практические достижения, были разработаны различные лабораторные образцы, на которых производилась отработка будущего термоакустического ДВПТ для когенерационной тепловой электростанции сверхмалой мощности [18]. Преимуществом термоакустического ДВПТ по отношению к классическим вариантам двигателя Стирлинга («Альфа», «Бета», «Гамма» а также свободнопоршневого) является высокое КПД. Термоакустический двигатель с бегущей волной преобразует тепловую энергию в акустическую. Акустическая энергия, полученная путем нагрева его теплообменника, преобразовывается в электрическую, которую вырабатывают при помощи линейного генератора переменного тока на постоянных магнитах или двунаправленной турбины синхронным электрогенератором. Тепловая энергия снимается с контура охлаждения и может быть направлена в систему отопления автономного объекта. Конструктивно получается ДВПТ при минимальном количестве движущихся частей и электрическим КПД, равным 30–50 % от КПД цикла Карно [19], при этом у него отсутствуют поршень и вытеснитель, без чего не может работать ДВПТ «Альфа», «Бета» и «Гамма». Соответственно ряд сложных проблем с уплотнениями и трением поршня просто не существует [20].

Практическая часть исследования

Один из разработанных нами лабораторных образцов представлен на рис. 1. Как сказано ранее, одним из преимуществ ДВПТ данного типа явля-

ется отсутствие поршней и вытеснителя с уплотнениями, массивного маховика и других вращающихся деталей. Это позволяет составить конкуренцию по параметрам «вес/габарит/мощность» любому дизельному ДВС. В качестве основных частей можно выделить линейный генератор 1, намотанная на каркас катушка с медным эмалированным двойным проводом диаметром 0,4 мм с тремя неодимовыми магнитами 5×30 мм. Катушка намотана вручную навалкой, без строгого соблюдения последовательности ряда примерно 2500 витков. В качестве материала выбрана нержавеющая сталь марки AISI310, что является не самым лучшим вариантом по теплопроводности стенки теплообменника. Нагрев осуществляется при помощи открытого пламени газовой горелки или сухого горючего в зоне нагрева 2. Проволочный регенератор расположен в области 3, выполнен из стальной проволоки диаметром 1 мм. Охлаждение рабочего тела (воздух) осуществляется в области 4. В качестве охладителя использована хлопчатобумажная ткань, смоченная водой.

Конструкция кольцевого резонатора прикрепляется к деревянной доске 9 толщиной 5 см при помощи 4 шурупов и фланца 5. Без жесткого крепления фланца к опорной доске 9 невозможна нормальная работа резонатора 8. Резонатор выполнен из стальной трубки диаметром 25 мм, его длина от кламп соединений 10 до отвода составляет 450 мм. В опытах использовались резонаторы длиной 250 и 350 мм, но наилучшие показатели дал резонатор длиной 450 мм. Резонатор приварен к двум трубкам диаметром 63 мм. Основным рабочим элементом являются две мембраны 6, выполненные из гелевых воздушных шариков, или можно исполь-

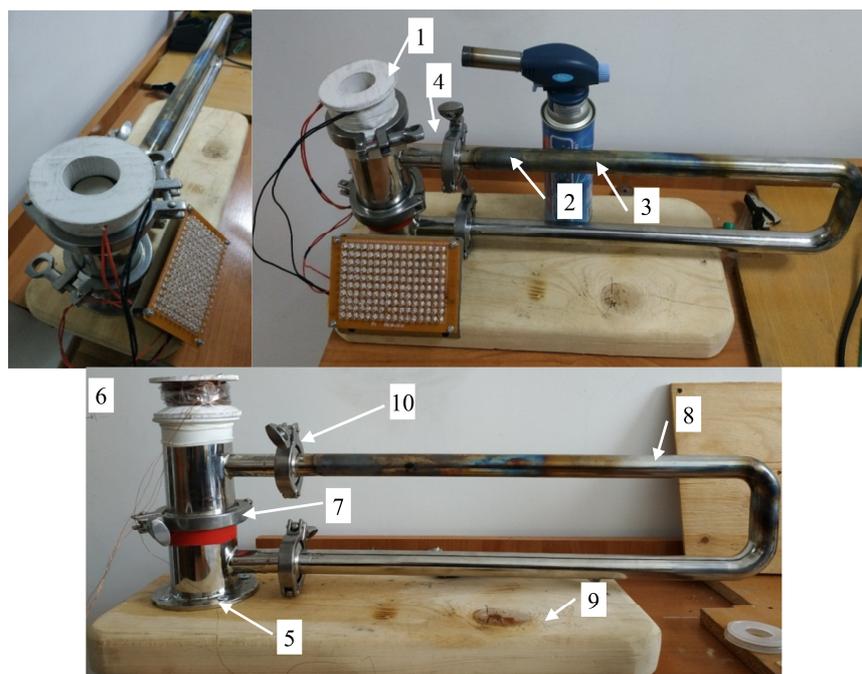


Рис. 1. Действующая модель термоакустического двигателя с внешним подводом теплоты

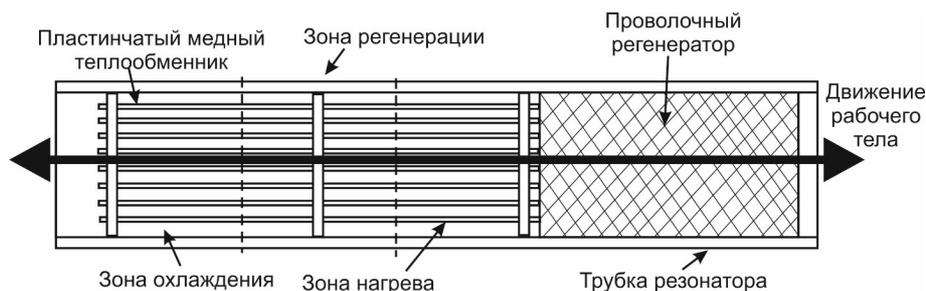


Рис. 2. Внутренняя конструкция нагревателя, охладителя и регенератора

зовать медицинские перчатки. В качестве нагрузки используется 160 светодиодов мощностью 0,06 Вт. Линейный генератор, состоящий из двух параллельных катушек, выдает общую электрическую мощность переменного тока около 10 Вт, при этом напряжение достигает 12 вольт, частота до 58 Гц, в зависимости от интенсивности нагрева рабочего тела в теплообменнике в области 2. Двигатель имеет возможность самозапуска (самостоятельного старта) в отличие от классических двигателей Стирлинга.

В основе принципа действия разработанного двигателя эффект акустических волн, которые генерируются при нагреве регенератора и пропускаемых через резонатор с двумя мембранами, создающими резонанс. На верхней мембране закреплены три постоянных магнита, которые вибрируют с частотой акустической волны. Магнитное поле пересекает обмотку катушки индуктивности, и генерируется переменный ток. Вторая мембрана 7 необходима для предотвращения круговой циркуляции рабочего тела (воздуха) в резонаторе 8. Важным моментом является хорошая герметизация стыков, где установлены мембраны и резонатор, для этого были использованы кламп соединения 10 с винтовым зажимом и уплотнениями. Большая часть резонатора не нагревается и остается холодной (температура окружающей среды), поэтому ее можно выполнить из АВС пластика или полипропилена, что может существенно облегчить конструкцию и снизить стоимость.

Основные рабочие зоны резонатора (рис. 2):

- зона охлаждения;
- зона нагрева;
- зона регенератора.

Рабочее тело совершает поочередное движение от нагревателя к охладителю и обратно, проходя через регенератор, отдавая частично тепло потоку воздуха (рабочему телу) и потом забирая его при его движении в зону охлаждения. Пластинчатый теплообменник должен быть установлен в области 1/16 длины трубки резонатора от его начала мембраны 6, при этом концом резонатора будет мембрана 7.

На рис. 3 показано движение рабочего тела внутри резонатора. Воздух циркулирует в замкнутом объеме, проходя цикл нагрева и охлаждения.

Циркулирующий воздух приводит в движение мембраны.

При нагреве внутри резонатора генерируется шум с широким спектром частот. Резонатор усиливает именно ту звуковую частоту звуковых колебаний, длина волны которой равна длине трубы, и двигатель начинает работать. Незначительные начальные звуковые колебания усиливаются до максимально возможной величины. Максимальная громкость звука внутри двигателя наступает тогда, когда мощность усиления звука с помощью теплообменников равна мощности потерь, то есть мощности затухания звуковых колебаний. При этом максимальное значение достигает около 160 дБ. Это больше, чем звук взлетающего реактивного самолета, такое звуковое давление способно причинить травму человеческому уху, но звук не способен выйти за пределы резонатора, который является герметичным. Разогретый ДВПТ практически не слышен. Усиление звука происходит в регенераторе. На рис. 4 приведен график изменения давления и скорости бегущей акустической волны в функции времени.

В процессе эксперимента теплота подводилась к области нагревателя. В качестве нагревателя использовалась газовая горелка мощностью до 1,2 кВт. В данном случае нагрев рабочего тела в горячем теплообменнике является неэффективным, так как около 60 % нагрева, подводимого к циклу, теряется. В дальнейшем планируется заменить газовую горелку спиральным электрическим нагревателем с тепловой изоляцией контура, что позволит уменьшить расход энергии, подводимой к области нагрева.

Важным моментом является понижение температуры рабочего тела в зоне охлаждения, соответственно обеспечение более интенсивного отвода теплоты от рабочего тела в зоне охлаждения повышает мощность ДВПТ. Также на мощность двигателя влияет температура окружающей среды и при ее повышении производительность ДВПТ снижается. Для повышения эффективности работы ДВПТ необходимо использование жидкостной системы охлаждения на основе антифриза, что будет выполнено в дальнейшей работе по совершенствованию конструкции. Отведенное тепло из зоны охлаждения, которое сейчас бесполезно рассеивается

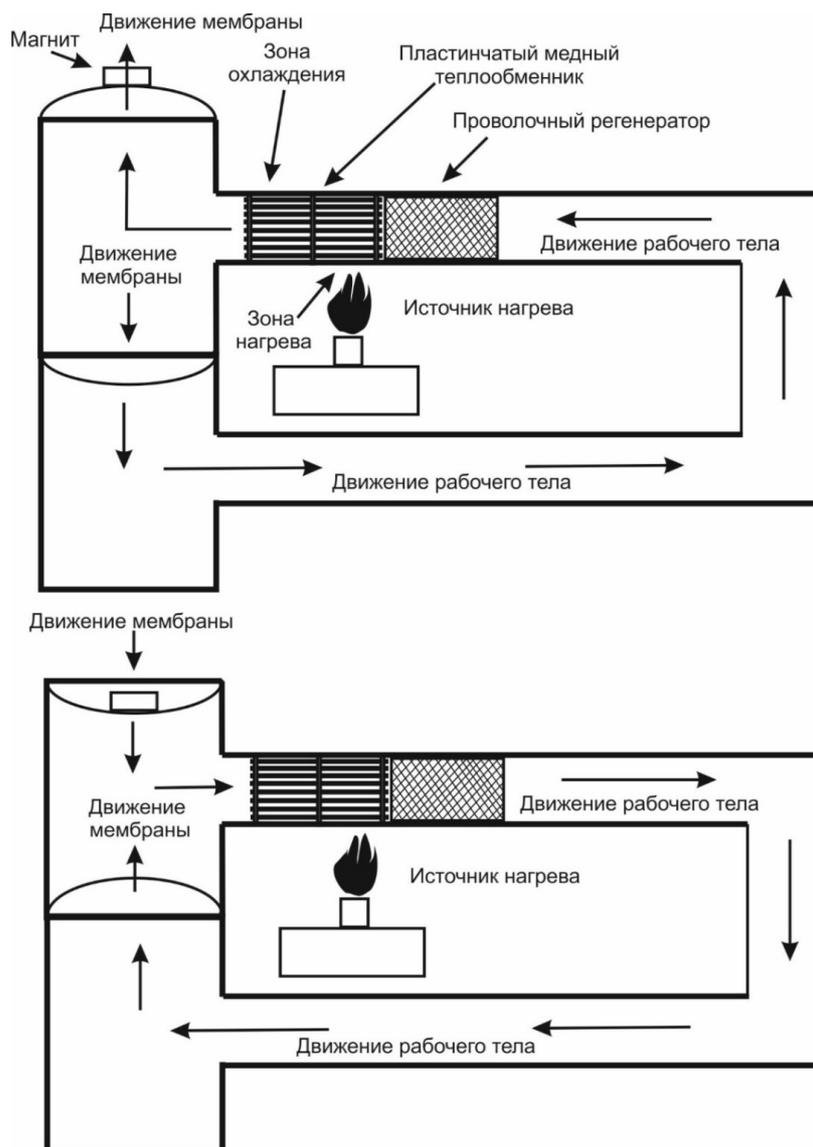


Рис. 3. Движение рабочего тела внутри резонатора

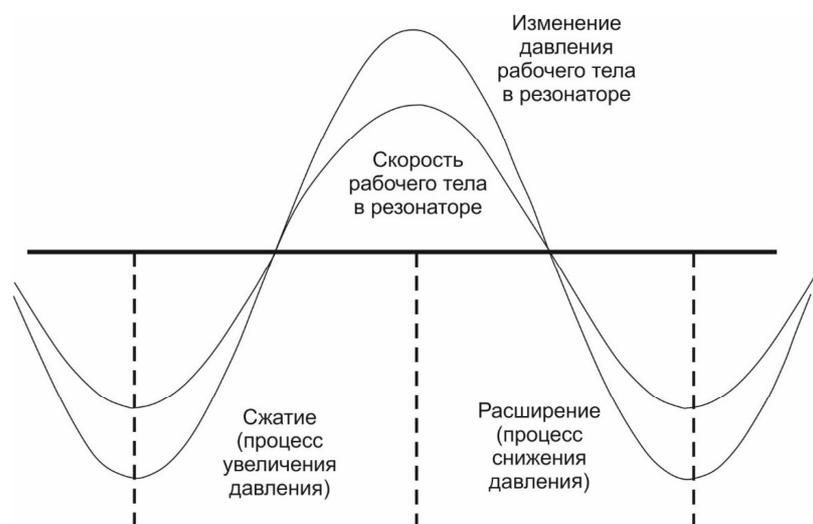


Рис. 4. График изменения давления и скорости бегущей акустической волны в функции времени

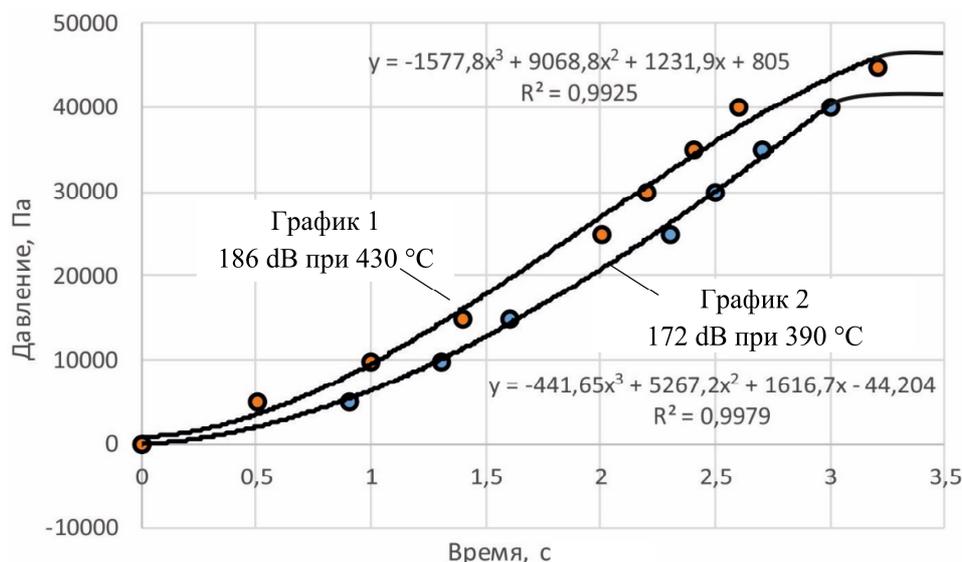


Рис. 5. График зависимости роста давления и звукового давления при температуре рабочего тела 390 и 430 °C

в окружающей среде, можно использовать для нагрева теплоносителя контура теплоснабжения. Данный двигатель может использоваться как комбинированный источник электрической и тепловой энергии.

На рис. 5 приведены некоторые результаты экспериментов, которые были обработаны с использованием полиномиальной аппроксимации третьей степени с определением регрессивного значения достоверности результатов эксперимента. График 1 построен при эксперименте со значением температуры нагрева рабочего тела до 430 °C, что позволило достичь звукового давления в 186 дБ, график 2 построен при эксперименте со значением температуры нагрева рабочего тела до 390 °C, что позволило достичь звукового давления в 172 дБ. Повышение давления и температуры позволяет увеличить мощность термоакустического двигателя с внешним подводом теплоты, также снижается время самозапуска и начала его работы.

Выводы

Использование двигателя с внешним подводом теплоты на основе термоакустического эффекта позволит разработать автономную тепловую электростанцию когенерационного типа с высокими показателями эффективности (КПД) и экологичности по сравнению с ДВС. МТЭС способна комплексно вырабатывать электрическую энергию при помощи линейного генератора и тепловую энергию за счет контура охлаждения примерно в соотношении 1 к 5. Конструктивная простота двигателя и отсутствие трущихся и вращающихся частей позволит обеспечить высокий ресурс более 100 000 часов непрерывной работы, а также может составить конкуренцию по отношению параметров «вес/габарит/мощность» любому турбинно-

му дизельному ДВС. Единственной проблемой является ресурс мембран, которые в процессе испытаний часто выходили из строя.

Литература

1. Бобылев, А.В. Математическая модель свободнопоршневого двигателя Стирлинга / А.В. Бобылев, В.А. Зенкин // *Техника. Технологии. Инженерия*. – 2017. – № 1. – С. 22–27.
2. Оценка КПД криогенного двигателя Стирлинга, входящего в состав газификатора сжиженного природного газа системы питания газовым потоком судового двигателя / В.А. Афанасьев, А.М. Цейтлин, П.Б. Поляков, Р.Ю. Гавлович // *Вестник АГТУ. Серия «Морская техника и технология»*. – 2013. – № 1. – С. 78–83.
3. Горожанкин, С.А. Комбинированные газотурбинные установки с двигателями Стирлинга / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков, А.В. Чухаркин // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета*. – 2015. – № 2 (219). – С. 57–66. DOI: 10.5862/JEST.219.7
4. Жаукешов, А.М. К выбору компонентов солнечной электростанции с двигателем Стирлинга / А.М. Жаукешов // *Вестник КазНУ. Серия «Физическая»*. – 2014. – № 4 (51). – С. 85–89.
5. Langlois, Justin L.R. Dynamic computer model of a Stirling space nuclear power system / Justin L.R. Langlois // *Annapolis: US Naval Academy*. – 2006. – Trident Scholar project report no. 345.
6. Ильин, Р.А. Эффективность использования двигателей Стирлинга в составе газовых теплоэнергетических установок / Р.А. Ильин // *Вестник АГТУ*. – 2008. – Вып. 5 (46). – С. 110–113.
7. Абакишин, А.Ю. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена в цилиндрах двигателя с внешним подводом теплоты / А.Ю. Абак-

шин, Г.А. Ноздрин, М.И. Куколев // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2012. – № 2–2 (1477). – С. 164–167.

8. Уокер, Г. *Двигатели Стирлинга: пер. с англ.* – М.: Мир, 1985. – 408 с.

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

10. Методика определения параметров теплообмена во внутреннем контуре двигателя Стирлинга / В.А. Светлов, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, А.В. Сячинов // *Материалы международной научно-технической конференции*. – М.: Изд-во МГТУ. – 1997. – С. 45–47.

11. Веревкин, М.Г. *Метод комплексного теплового и конструкторского расчета термомеханического генератора* / М.Г. Веревкин // *Известия вузов. Машиностроение*. – 2004. – № 10. – С. 33–37.

12. Boluriaan, S. *Acoustic streaming: from Rayleigh to today* / S. Boluriaan, P.J. Morris // *International Journal of Aeroacoustics*. – 2009. – No. 11. – P. 255–292.

13. *Towards Time-Stable and Accurate LES on Unstructured Grids* / F. Ham, K. Mattsson, G. Iaccarino, P. Moin // *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*. – 2007. – Vol. 56. – P. 235–249. DOI: 10.1007/978-3-540-34234-2_17

14. *Nonlinear two-dimensional model for thermoacoustic engines* / C.A. Kassinos, G. Langer, Y.A. Ilinskii, E.A. Zabolotskaya // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2004. – Vol. 111, no. 5.

15. Nijeholt, J.L. *Simulation of a traveling-wave thermoacoustic engine using computational fluid dynamics* / J.L. Nijeholt, M. Tijani, S. Spoelstra //

J. Acoust. Soc. Am. – 2005. – No. 4 – P. 2265–2270. DOI: 10.1121/1.2035567

16. Thomas, B. *Update on the evaluation of different correlations for the flow friction factor and heat transfer of Stirling engine regenerators* / B. Thomas, D. Pittman // *Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit*. – 2000. – Vol. 1. – P. 76–84. DOI: 10.2514/6.2000-2812

17. Thompson, M.W. *Influences of a temperature gradient and fluid inertia on acoustic streaming in a standing wave* / M.W. Thompson, A.A. Atchley, M.J. Maccarone // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2004. – P. 1939–1849.

18. Ward, W. *Fully tested software and users guide available from energy science and technology software center U.S. Dept. of energy* / W. Ward, G.W. Swift // *Oak Ridge, Tenn. J. Acoust. Soc. Am.* – 1997. – P. 3671.

19. *Мини ТЭЦ и мини электростанции на основе двигателя Стирлинга для энергообеспечения жилых и промышленных объектов* / А.Д. Мехтиев, В.И. Эйрих, В.В. Югай и др. // *Международный научный журнал «Актуальные проблемы современности»*. – Караганда: Болашақ-Баспа. – 2014. – № 3 (5). – С. 94–97.

20. *Мини ТЭЦ с линейным генератором тока с рекуператором для утилизации отходов подержанных горению: свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права Республики Казахстан № 0956* / А.Д. Мехтиев, В.В. Югай, А.Д. Алькина, П.М. Ким, О.В. Алдошина, Р.А. Мехтиев, Д.Д. Балапанова, А.В. Федорова. – Оубл. 23.05.2016.

Мехтиев Али Джаванширович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; barton.kz@mail.ru.

Югай Вячеслав Викторович, Ph.D., и.о. доцента, кафедра «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; slawa_v@mail.ru.

Калиаскаров Нурбол Балтабаевич, магистр технических наук, преподаватель, кафедра «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; 90nurbol@mail.ru.

Есенжолов Улан Серикович, магистр технических наук, старший преподаватель, кафедра «Технологии и системы связи», Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; newneil@mail.ru.

Поступила в редакцию 18 апреля 2019 г.

THERMOACOUSTICS-BASED EXTERNALLY HEATED ENGINE FOR STAND-ALONE THERMAL POWER PLANTS

A.D. Mekhtiev, barton.kz@mail.ru,
V.V. Yugay, slawa_v@mail.ru,
U.S. Esenzholov, newneil@mail.ru,
N.B. Kaliaskarov, 90nurbol@mail.ru

Karaganda State Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

Efficient power supply is still challenging. One way to address this challenge is to design a small-scale thermal power plant that can fire any fuel. Using an internal energy source helps reduce the production costs while enabling more reliable and uninterrupted power supply. The proposed power plant is designed to be driven by an externally heated heat engine. The goal is to create an alternative cogeneration source of energy for remote rural consumers that can fire virtually any fuel or combustible waste. This will enable rural residents to generate electricity and heat on the spot without incurring transportation-related losses. The paper presents some results of computer simulation of an externally heated Stirling engine and discusses some of its design specifics.

Keywords: thermal power plant, Stirling engine, cogeneration, thermal energy, integrated production, alternative energy.

References

1. Bobylev A.V., Zenkin V.A. [The Mathematical Model of Stirling's Free-Piston Engine]. *Bulletin of Equipment. Technologies. Engineering*, 2017, no. 1, pp. 22–27. (in Russ.)
2. Afanas'ev V.A., Tseytlin A.M., Polyakov P.B., Gavlovich R.Yu [Estimation of the Efficiency of the Cryogenic Stirling Engine, which is Part of the Gasifier of Liquefied Natural Gas, the Gas-Powered System of the Marine Engine]. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Ser. Marine Engineering and Technologies*, 2013, no. 1, pp. 78–83. (in Russ.)
3. Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Chukharkin A.V. [Combined Gas Turbine Units with Stirling Engines]. *Bulletin of the Founder and Publisher of the Journal is the St. Petersburg State Polytechnical University*, 2015, no. 2 (219), pp. 57–66. (in Russ.) DOI: 10.5862/JEST.219.7
4. Zhaukeshov A.M. [To the Selection of Components of a Solar Power Station with a Stirling Engine]. *Bulletin of Herald of the Kazakh National University. Ser. Physical*, 2014, no. 4 (51), pp. 85–89. (in Russ.)
5. Langlois Justin L.R. Dynamic Computer Model of a Stirling Space Nuclear Power system. Annapolis: US Naval Academy, 2006. Trident Scholar project report no. 345.
6. Il'in R.A. [Efficiency of Using Stirling Engines in Gas-and-Gas Heat and Power Plants]. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2008, no. 5 (46), pp. 110–113. (in Russ.)
7. Abakshin A.Yu., Nozdrin G.A., Kukolev M.I. [Numerical Modeling of Heat and Mass Transfer Processes in Engine Cylinders with External Heat Input]. *Bulletin of the Founder and Publisher of the Journal is the St. Petersburg State Polytechnical University*, 2012, vol. 2, no. 2 (1477), pp. 164–167. (in Russ.)
8. Uoker G. *Dvigateli Stirlinga* [Stirling Engines]. Transl. from Engl. Moscow, Mir Publ., 1985. 408 p.
9. Rider G. *Dvigateli Stirlinga* [Stirling Engines]. Transl. from Engl. Moscow, Mir Publ., 1986. 464 p.
10. Svetlov V.A., Efimov S.I., Ivashchenko N.A., Syachinov A.V. [Method of Determining the Parameters of Heat Exchange in the Inner Circuit of the Stirling Engine]. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*, 1997, pp. 45–47. (in Russ.)
11. Verevkin M.G. [The Method of Complex Thermal and Thermo-Mechanical Design Calculation of the Generator]. *News Universities. Engineering*, 2004, no. 10, pp. 33–37. (in Russ.)
12. Boluriaan S., Morris, P.J. [Acoustic Streaming: from Rayleigh to Today]. *International Journal of Aeroacoustics*, 2009, no. 11, pp. 255–292.
13. Ham, F., Mattsson, K., Iaccarino, G. & Moin, P. [Towards Time-Stable and Accurate LES on Unstructured Grids]. *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, 2007, vol. 56, pp. 235–249. DOI: 10.1007/978-3-540-34234-2_17
14. Kassinos C.A., Langer G., Ilinksii, Y.A., Zabolotskaya E.A. [Nonlinear Two-Dimensional Model for Thermoacoustic Engines]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, vol. 111, no. 5.
15. Nijeholt J.L., Tijani M., Spoelstra S. [Simulation of a Traveling-Wave Thermoacoustic Engine Using Computational Fluid Dynamics]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005, no. 4, pp. 2265–2270. DOI: 10.1121/1.2035567

16. Thomas B., Pittman D. [Update on the Evaluation of Different Correlations for the Flow Friction Factor and Heat Transfer of Stirling Engine Regenerators]. *Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit*, 2000, vol. 1, pp. 76–84. DOI: 10.2514/6.2000-2812

17. Thompson M.W., Atchley A.A., Maccarone M.J. [Influences of a Temperature Gradient and Fluid Inertia on Acoustic Streaming in a Standing Wave]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, pp. 1849–1939.

18. Ward W., Swift G.W. [Fully Tested Software and Users Guide Available from Energy Science and Technology Software Center U.S. Dept. of Energy]. *Oak Ridge, Tenn. J. Acoust. Soc. Am.*, 1997, p. 3671.

19. Mekhtiev A.D., Ejrih V.I., Yugaj V.V., Rahimberlinova Zh.B., Buzyakov R.R. [Mini-CHP and Mini Power Plant Based on Stirling Engine for Power Supply of Residential and Industrial Facilities]. *International Scientific Journal “Actual Problems of Modernity”*. Karaganda, Bolashak-Baspa, 2014, no. 3, pp. 94–97.

20. Mekhtiev A.D., Yugaj V.V., Al'kina A.D., Kim P.M., Aldoshina O.V., Mekhtiev R.A., Balapanova D.D., Fedorova A.V. *Mini TETS s lineynym generatorom toka s rekuperatorom dlya utilizatsii otkhodov pod-verzhennykh goreniiyu* [Mini CHP Plant with a Linear Generator with Heat Recovery to Recycle the Waste Subject to Burning]. Certificate of State Registration of Rights to the Object of Copyright of the Republic of Kazakhstan, no. 0956, publ. 23.05.2016.

Received 18 April 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Двигатель с внешним подводом теплоты на основе термоакустического эффекта для автономной тепловой электростанции / А.Д. Мехтиев, В.В. Югай, У.С. Есенжолов, Н.Б. Калиаскаров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 22–30. DOI: 10.14529/power190203

FOR CITATION

Mekhtiev A.D., Yugaj V.V., Esenzholov U.S., Kaliaskarov N.B. Thermoacoustics-Based Externally Heated Engine for Stand-Alone Thermal Power Plants. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 22–30. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190203