

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

А.Д. Мехтеев^{1, 2}, В.В. Югай¹, Е.Г. Нешина¹, А.Д. Алькина¹

¹ Карагандинский технический университет, г. Караганда,
Республика Казахстан,

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

Введение. Актуальность заключается в использовании двигателя с внешним подводом теплоты для преобразования солнечного излучения в электрическую энергию, при этом источником тепловой энергии служит солнечный коллектор. **Цель исследования.** Разработка альтернативного источника энергии для автономных потребителей сельской местности на основе низкотемпературного двигателя Стирлинга, способного преобразовывать низкопотенциальное тепло нагретой воды в механическую энергию с последующей генерацией электрического тока промышленной частоты. В отличие от классической конструкции известного двигателя Стирлинга представленный ДВПТ имеет значительный объем вытеснителя, который более чем в 20 раз больше объема рабочего поршня, что позволяет ему работать на меньшей разнице температур между нагревателем и охладителем. Рабочая температура нагревателя составляет 90–100 °С, что в 7–9 раз меньше по сравнению с известным двигателем Стирлинга. **Материалы и методы.** Теоретические исследования с помощью компьютерного моделирования процессов ДВПТ использованы законы термодинамики и метод Шмидта для построения PV-диаграммы и установления характера протекания термодинамического цикла Стирлинга. Использованы методы 3D-моделирования, метод постепенного приближения. Использован метод натурального эксперимента с последующим внесением изменений в компьютерную модель и лабораторный образец для достижения сходимости результатов и получения адекватной компьютерной модели. Результаты экспериментов обработаны и аппроксимированы, получены детерминированные математические модели и выполнен регрессивный анализ. **Результаты.** Приведено краткое описание конструктивных особенностей низкотемпературного двигателя с внешним подводом теплоты, работающего по циклу Стирлинга, а также приведены некоторые результаты исследований и компьютерного моделирования. **Заключение.** Использование воздуха в качестве рабочего тела является не оправданным, так как при его применении массогабаритные размеры ДВПТ на единицу производимой мощности будут больше, чем у двигателей внутреннего сгорания. Для низкотемпературного ДВПТ обязательным условием является разница в объемах вытеснителя и рабочего поршня, для температуры нагревателя в пределах 90 °С вытеснитель должен быть в 20–40 раз больше по своему объему. На КПД оказывают влияние разницы температуры между нагревателем и охладителем и давлением рабочего тела.

Ключевые слова: двигатель с подводом теплоты, солнечное излучение, электрическая мощность, коллектор, генератор.

Введение

Двигатель Стирлинга (ДС) известен уже более 200 лет, но до сих пор ученые и инженеры работают над совершенствованием его конструкции. Разработано множество модификаций двигателей с внешним подводом теплоты (ДВПТ), работающих по циклу Стирлинга, с участием зарубежных фирм Philips, STM Inc., Daimier Benz, Solo, United Stirling [1, 2]. Особенных успехов добилась фирма Philips, производившая компактные электрогенераторы на основе двигателя с внешним подводом теплоты, работающего по циклу Стирлинга, с КПД около 40 %, что пока не достижимо для современного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [3, 4]. Идея использования ДС для преобразования солнечной радиации в электрический ток уже рассматривалась ранее [5–8]. Положительный опыт фирмы Philips в использовании солнечного кон-

центратора и ДС, способного преобразовывать солнечную радиацию с КПД более 40 %, что пока не достижимо для кремниевых солнечных модулей, послужил основой предложенной далее конструкции автономного источника энергии для удаленных сельских потребителей.

1. Актуальность темы исследования и постановка задачи

Целью исследований является разработка альтернативного источника энергии для удаленных потребителей, в первую очередь сельской местности, на основе низкотемпературного двигателя Стирлинга, способного эффективно преобразовывать низкопотенциальное тепло нагретой воды при помощи солнечного коллектора и термального источника в механическую энергию с последующей генерацией электрического тока промышлен-

ной частоты. В южных регионах Казахстана является весьма актуальным использование, особенно в фермерских хозяйствах, автономного источника на основе ДВПТ как альтернативы солнечным электростанциям и электрическим генераторам с ДВС. Предложенный ниже источник также актуален по возможности использования более эффективного термоаккумулятора вместо электрического для обеспечения энергоснабжения потребителя в вечернее и ночное время суток.

2. Методология проведения исследований

Для достижения цели разработан механический преобразователь солнечного излучения в электрический ток на основе ДВПТ, работающего по циклу Стирлинга. После изучения известных конструкций двигателя Стирлинга (ДС) [4–7] была разработана собственная конструкция низкотемпературного ДВПТ (рис. 1). Предварительным этапом конструирования было создание компьютерной 3D-модели (см. рис. 1). 3D-модель позволяет отработать основные элементы конструкции и создать чертежи для его изготовления, а также выполнять любые сечения и виды, необходимые для конструирования, с использованием компьютера. Отличием от классической конструкции известного ДС [4–7] предложенный ДВПТ имеет значительный объем вытеснителя, который более чем в 20 раз больше объема рабочего поршня, что позволяет ему работать на меньшей разнице температур меж-

ду нагревателем и охладителем. Рабочая температура нагревателя составляет 90–100 °С, что в 7–9 раз меньше по сравнению с известным двигателем Стирлинга [1]. Опытный образец был изготовлен и испытан в Карагандинском государственном техническом университете в рамках проекта «Микротепловая электростанция когенерационного типа с рекуперацией тепла» (№ АР05131751).

Данный ДВПТ разрабатывался для преобразования низкопотенциального тепла в механическую энергию. Его отличием является отсутствие штока для механической связи с маховиком, что существенно упрощает конструкцию и снижает потери на трение в уплотнениях штока вытеснителя [4–7]. Исключение уплотнений штока вытеснителя позволяет повысить герметичность ДВПТ, так как повышение давления рабочего тела в значительной степени увеличивает мощность, а исключение уплотнений штока частично решает проблему надежности ДВПТ в целом. Повреждение уплотнений штоков приводит к утечке рабочего тела и падению мощности ДВПТ. Работа ДВПТ на давлении, близком к атмосферному, не эффективна [4–7] и при диаметре нагревателя около 400 мм составит всего несколько десятков ватт.

Значительные показатели мощности на единицу массы данного типа двигателя достигаются при давлениях от 10 до 20 МПа [4–7], а также при использовании в качестве рабочего тела водорода и гелия, но это сопровождается рядом технических

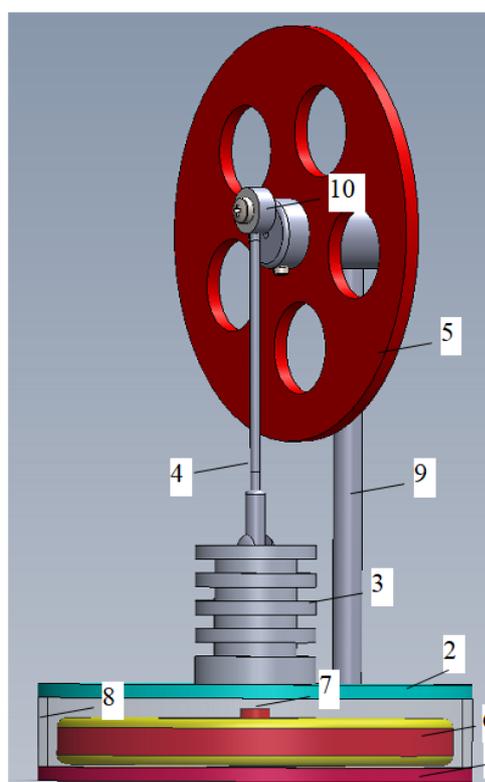


Рис. 1. Конструкция низкотемпературного ДВПТ и его компьютерная 3D-модель: 1 – нагреватель, 2 – охладитель, 3 – рабочий цилиндр, 4 – шток, 5 – маховик, 6 – вытеснитель, 7 – неодимовый магнит, 8 – кольцо, 9 – стойка, 10 – элементы крепления

Альтернативные источники энергии

проблем, связанных с удержанием рабочего тела во внутренней полости ДВПТ. Соответственно, исключение уплотнений штока вытеснителя позволит частично решить данную проблему надежности работы [9, 10]. Предложенный ДВПТ состоит из нагревателя и охладителя, выполненных из дюралюминия, которые являются теплообменниками. На охладителе находится рабочий цилиндр, в котором перемещается рабочий поршень с постоянным магнитом. Рабочий поршень выполнен из графита, что позволило снизить механические потери на трение поршня о стенки рабочего цилиндра. Поршень совершает поступательные движения, перемещаясь внутри рабочего цилиндра, и через шток приводит во вращение маховик. В дальнейшем возможно заменить массивный маховик на упругий элемент и использовать линейный генератор, что существенно упростит конструкцию, и на мощности до 1 кВА данный вариант может быть вполне приемлемым. Между нагревателем и охладителем находится вытеснитель, выполненный из пенополистирола, сверху крепится неодимовый магнит, второй магнит находится в нижней части поршня. Нагреватель и охладитель разделены кольцом из стеклопластика, материал кольца должен иметь низкую теплопроводность, для того чтобы высокая температура нагревателя не передавалась охладителю, что впоследствии сделает работу ДВПТ не возможной. Для синхронизации работы поршня и вытеснителя используется маховик, который удерживается стойкой со ступицей и подшипниками. Элементы крепления используются для фиксации оси маховика.

3. Научная новизна

Конструктивной новизной является отличие от известных ДВПТ [4–7], использование двух постоянных магнитов, расположенных на поршне и вытеснителя, которые притягиваются, когда рабочий поршень спускается в нижнюю часть цилиндра, тем самым вытеснитель притягивается к рабочему поршню. Когда поршень поднимается в верхнюю часть рабочего цилиндра, магнитная связь разрывается, вытеснитель падает вниз на поверхность нагревателя [4–7]. В качестве рабочего тела используется воздух, но это неэффективное рабочее тело, при работе ДВПТ на температуре выше 120 °С используется паровоздушная смесь, которая превосходит по своим параметрам гелий, при $T = 150$ °С начальное давление рабочего тела будет составлять $P = 0,5$ МПа, соответственно мощность ДВПТ увеличится в несколько раз. Рабочий диапазон нагревателя лежит в пределах 50–150 °С, что дает возможность работать, например, от геотермальных вод или нагретой воды в солнечных коллекторах. Таким образом, все полученные результаты имеют новизну, так как изменения конструкции положительно влияют на улучшение технических параметров ДВПТ в отличие от ранее известных конструкций [4–7].

4. Результаты компьютерного моделирования и лабораторных исследований

Результаты компьютерного моделирования низкотемпературного ДВПТ с указанными параметрами приведены на рис. 2 и представлены гра-

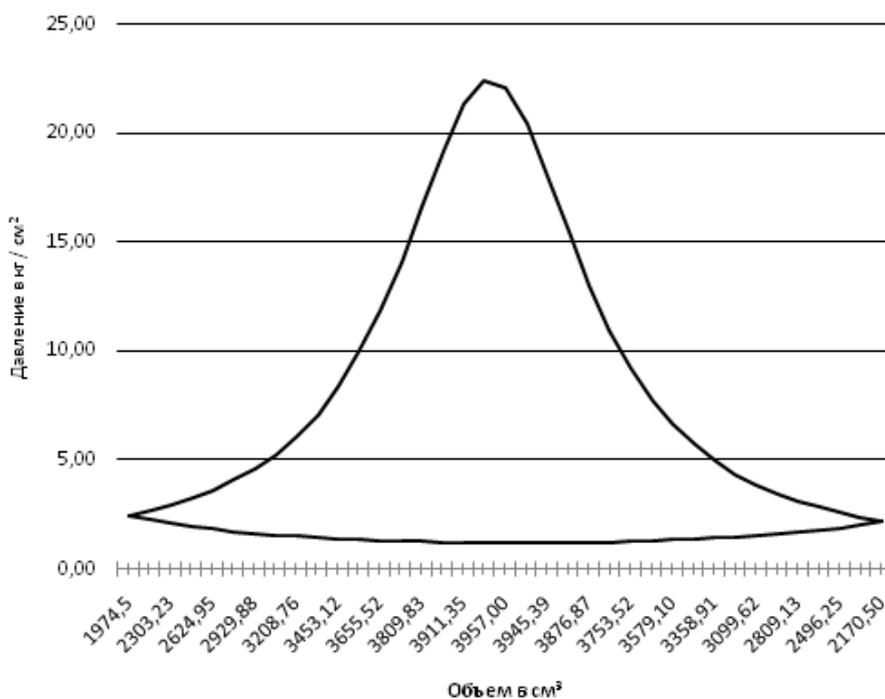


Рис. 2. PV-диаграмма

фином зависимости изменения давления рабочего тела и его объема при сжатии рабочим поршнем. В идеальном случае может ДВПТ выйти на максимальное значение механической мощности в пределах 200 Вт при максимальном значении давления рабочего тела, равного 2,2 МПа. Используя результаты компьютерного моделирования, можно утверждать, что предложенная конструкция с разными объемами рабочего поршня и вытеснителя является пригодной и способна выдавать большую мощность при температуре нагревателя по сравнению с классической компоновкой двигателя Стирлинга [4–7]. Моделирование показало, что увеличение объема вытеснителя до 40 раз по сравнению с объемом рабочего поршня позволит увеличить мощность ДВПТ в 1,6 раза.

Теоретические исследования основаны на методах компьютерного моделирования выходных параметров низкотемпературного ДВПТ. Для проведения исследований разработана автоматизированная система расчета и моделирования параметров двигателя с внешним подводом теплоты с использованием программы Microsoft Office Excel для построения PV-диаграммы и установления характера протекания термодинамического цикла Стирлинга, что позволяет вести работу по разработке конструкций различного типа и мощности, а также выполнять техническую оптимизацию их параметров. Используем метод расчета Шмидта, так как ему не нужно множество параметров, необходимых для аналитического решения интегралов. В процессе моделирования используется численное интегрирование с высокой точностью трёх знаков после запятой. Расчет средней температуры в регенераторе также отличается от метода Шмидта, использующего среднеарифметическое значение, в то время как мы используем эффективную среднюю температуру, рассчитанную аналитически. Используемый математический аппарат и алгоритмы функционирования программы представлены в [9–12].

Анализируя полученную PV-диаграмму и сопоставляя ее с уже известными результатами исследований предыдущих авторов, приведённых в [4–7, 13–16], можно сказать, что предложенная конструкция ДВПТ будет иметь КПД до 20 %, так как ее интегральная площадь меньше идеальной площади PV-диаграммы цикла Стирлинга. Также реальный КПД будет зависеть от величины давления рабочего тела, разницы температуры нагревателя и охладителя, потерь на трение в уплотнениях поршня. КПД в 10–20 % для альтернативного источника энергии, преобразующего солнечную радиацию в электрический ток, вполне достаточно.

Полученные параметры были использованы при проектировании лабораторного образца ДВПТ (см. рис. 1).

Объектом исследований является созданный лабораторный образец низкотемпературного ДВПТ

(см. рис. 1), созданный на основе 3D-модели. В качестве имитации солнечного коллектора используется электрический дисковый нагреватель, температура нагрева регулировалась путем изменения напряжения на его зажимах при помощи регулируемого источника питания переменного тока. Температура нагревателя составляла 90 °С, а охладителя удерживалась на уровне 23–25 °С. Температура воздуха в помещении, где проводились испытания лабораторного образца, составляла 24 °С. Объемы вытеснителя – 3769 см³; рабочего поршня – 196 см³. Регенератор не использовался [4–7], так как конструкция сильно упрощена. Максимальное число оборотов маховика до 500 об/мин. Мертвый объем охладителя в пределах 30 см³. Разность фазового угла для вытеснителя – 90°. В качестве рабочего тела использовался воздух. Максимальное внутреннее давление перед запуском $P_0 = 0,49$ МПа. Для измерения оборотов вращения двигателя использовался лазерный бесконтактный тахометр Victor DM6234P. Для измерения температуры нагревателя использовался пирометр С–20.3. Давление нагнеталось через штуцер с ниппелем, установленным в холодном цилиндре, при помощи поршневого компрессора. Использовались методы компьютерной обработки экспериментальных данных.

Результаты исследования выходной мощности электрического генератора постоянного тока представлены на рис. 3 и 4, на которых приведены графики зависимостей вырабатываемой мощности генератором от числа его оборотов и давления рабочего тела в цилиндре.

Можно отметить зависимость повышения вырабатываемой мощности генератором при повышении температуры нагревателя и понижении температуры охладителя, соответственно необходимо обеспечить хорошее охлаждение ДВПТ и съём тепла в системе охлаждения. Расчеты показали, что при той же мощности, что и у двигателя внутреннего сгорания для ДВПТ, понадобится радиатор охлаждения в 4–5 раз больший по площади, так как разница температур между нагревателем и охладителем в значительной мере влияет на КПД. На 1 Вт выработанной электрической энергии ДВПТ способен отдать 5 Вт тепловой.

КПД ДВПТ зависит от нескольких важных параметров, указанных в [8, 9]. В работе произведен расчёт КПД согласно температуре нагревателя и холодильника, но наблюдается его зависимость от давления рабочего тела. В качестве рабочего тела использован воздух, который считается наименее эффективным рабочим телом [4–7]. Для повышения КПД ДВПТ в дальнейшей работе необходимо использовать гелий или смесь воздуха с насыщенным водяным паром, это позволит достичь следующих расчетных показателей сухого насыщенного пара.

Для отработки возможности практического применения ДВПТ для преобразования энергии

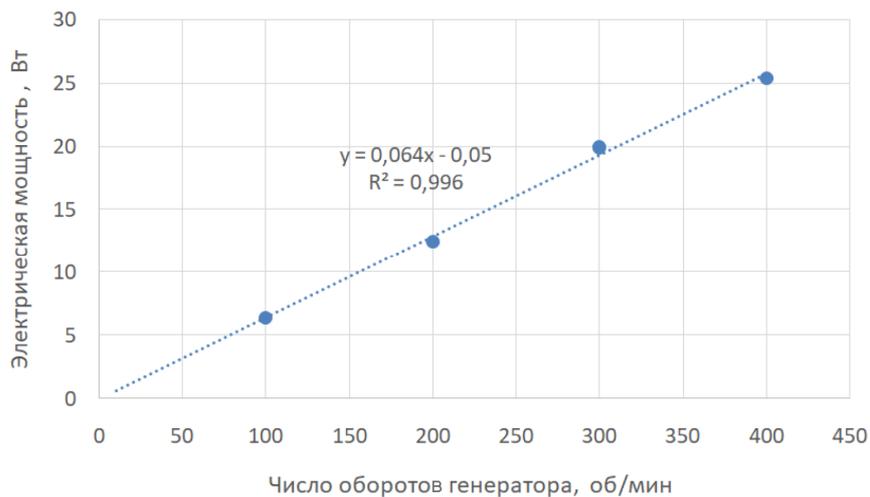


Рис. 3. График зависимостей вырабатываемой мощности генератора от числа его оборотов при минимальном давлении 0,1 МПа

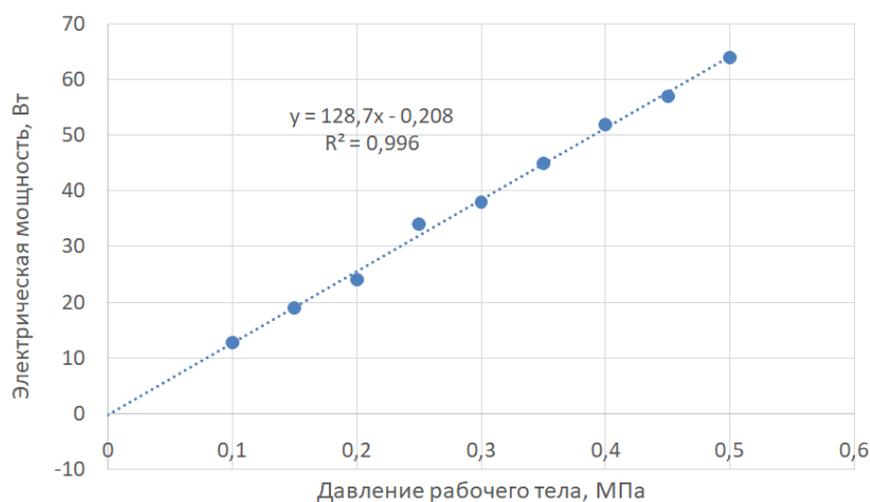


Рис. 4. График зависимостей вырабатываемой мощности генератора от величины давления рабочего тела

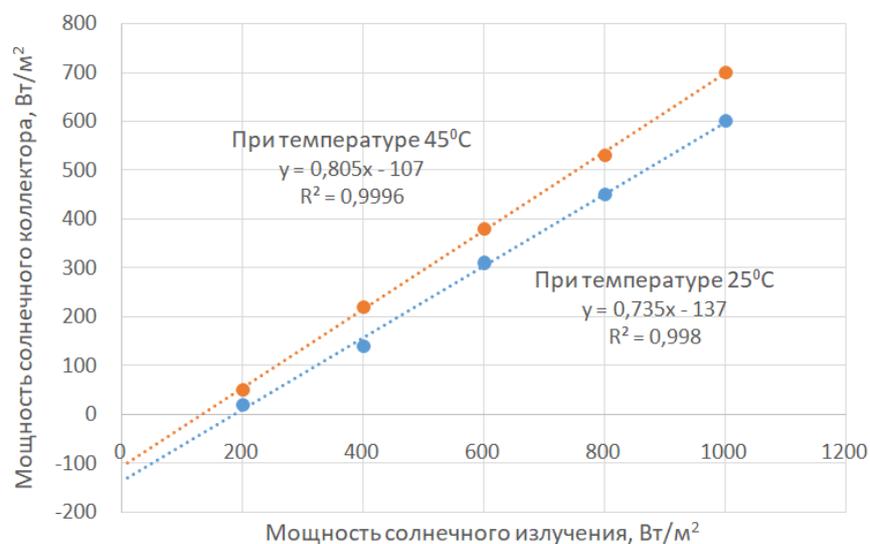


Рис. 5. Зависимость мощности, развиваемой солнечным коллектором при различной мощности солнечного излучения, при температуре воздуха 25 и 45 °C

нагретой воды в электрический ток в Карагандинском техническом университете (КарГУ) организована площадка по исследованию технических параметров и уровня адаптации солнечных модулей и коллекторов к климатическим условиям города Караганды, расположенного в Центральном Казахстане, с резко континентальным умеренным климатом; географическое положение: 49°48' с. ш. 73°07' в. д. Продолжительность солнечного дня составляет около 2300 ч в год, а излучение солнечной энергии – в среднем в пределах 1200 кВт/м² в год, а средняя мощность – 120 Вт/м². Проведены исследования солнечного коллектора, состоящего из 15 вакуумных трубок с медными тепловыми трубками (диаметр конденсатора 14 мм) с поглощающей площадью, равной 2,35 м². Эффективность его работы составляет ≈ 70–80 %, зависит от солнечной активности, температуры воздуха и времени года, также есть отличия у некоторых производителей, которые заявляют более высокий КПД. Результаты исследований (рис. 5) показали, что современные солнечные коллекторы способны производить при среднем показателе мощности солнечного излучения в 1000 Вт/м² более 700 Вт/м² тепловой мощности солнечного коллектора, соответственно, если создать ДВПТ с КПД в пределах 20 %, то можно получить электрическую мощность синхронного генератора в пределах 0,1 кВт·ч.

5. Практическая значимость использования низкотемпературного ДВПТ

Основным практическим применением предложенного альтернативного источника энергии для удаленных потребителей на основе низкотемпературного ДВПТ является преобразование энергии нагретой воды в солнечных коллекторах, а также в перспективе работа от геотермальных вод. В южных регионах Казахстана сложилась острая потребность в автономных источниках энергии, способных преобразовывать солнечную радиацию и энергию термальных вод. Развитие тепличного хозяйства требует значительных затрат электроэнергии на подсветку растений, при этом в данном регионе количество солнечных дней в году превышает 300 дней. Сегодня для полива растений, как в открытом грунте, так и в теплицах, в большинстве случаев используются насосы с двигателем ДВС. Местные энергокомпании выдвигают ряд жёстких условий, связанных с прокладкой кабельной линии и подключением потребителей согласно выдвинутым техническим условиям, также для фермерских хозяйств стоимость электроэнергии более чем в 2,5 раза выше, чем для городских потребителей. Изношенные и морально устаревшие электрические сети 6 и 35 кВ, имеющие значительные потери энергии, требуют модернизации и не способны в данный момент времени обеспечить удаленные крестьянские хозяйства достаточ-

ным количеством электроэнергии. На основании этого фермерам приходится использовать бензогенераторы и дизельные электрические генераторы для обеспечения собственных нужд. Отсутствие доступных по стоимости источников энергии существенно образом сдерживает развитие и конкурентоспособность сельского хозяйства Республики Казахстан. Данные проблемы свойственны всем республикам бывшего СССР, находящимся в Центральной Азии.

Учитывая мировой опыт построения подобных автономных источников энергии [8, 9], от использования солнечного концентратора с системой направленных зеркал пришлось отказаться, так как он имеет ряд существенных недостатков. В первую очередь, его значительная стоимость, а также необходимость поворотной следящей системы и многое другое, что делает солнечную электростанцию не доступной по стоимости для массового потребителя, особенно в сельской местности. Механический преобразователь солнечного излучения в электрический ток на основе ДВПТ должен быть простым по конструкции, надежным в эксплуатации и иметь низкую стоимость по сравнению с зарубежными аналогами. В качестве источника тепла используется вакуумный коллектор, который намного проще по своей конструкции, чем концентратор с системой направленных зеркал, и не требует поворотной следящей системы, а также имеет значительно меньшую стоимость. Автономная электростанция на основе механического преобразователя солнечного излучения в электрический ток с ДВПТ способна производить электроэнергию не только днем при солнечном свете, но и вечером, и ночью. Для этого необходимо использовать термоаккумулятор – утепленную емкость для формирования запаса горячей воды. Можно использовать один или два бытовых электрических водонагревателя емкостью 150–200 л, что будет приемлемо для небольшого по площади сельского дома. Данная система может обеспечить горячее водоснабжение и отопление жилых помещений. Система отопления может быть комбинированного типа, например, когда твердотопливный или газовый котел и солнечный коллектор работают в паре. При этом солнечный коллектор является дополнительным источником тепла и необходим для экономии топлива, так как в зимний период времени солнечной энергии будет недостаточно. Учитывая коэффициент спроса и незначительные мощности бытовых электроприборов, можно в какой-то мере обеспечить незначительные потребности сельского потребителя. Излишки тепловой энергии могут накапливаться в буфере – накопителе, состоящем из автомобильных аккумуляторов мощностью от 100–300 А·ч, причем возможно использование уже непригодных стартовых батарей дизельных грузовых автомобилей, которые уже не способны эффективно запускать двигатель в зимнее время [8, 9].

Альтернативные источники энергии

Упрощенная структурная схема альтернативного источника энергии для удаленных потребителей на основе низкотемпературного ДВПТ приведена на рис. 6. В качестве источника тепловой энергии используется солнечный коллектор, в его системе трубопроводов имеются подающая и обратная ветви, внутри которых непрерывно циркулирует нагнетаемая незамерзающая рабочая жидкость (автомобильный антифриз), которая является теплоносителем. Теплоноситель попадает по прямому трубопроводу в нагреватель, отдавая свое тепло, и затем, пройдя через теплообменник системы отопления (охлаждения), остывает. Далее теплоноситель нагнетается при помощи насоса (помпы) в теплообменник солнечного коллектора для последующего нагрева и цикл повторяется вновь. Рабочая жидкость в нагревателе отдает тепло рабочему телу низкотемпературного механического преобразователя или ДВПТ.

Рабочее тело, расширяясь, заставляет двигаться поршень в рабочем цилиндре, через кривошипно-шатунный механизм поступательное движение преобразуется во вращательное движение маховика, который соединен через приводной ремень фрикционной передачи с валом синхронного электрического генератора.

Рабочая жидкость поступает в теплообменник системы охлаждения, откуда можно взять тепло-

вую энергию для нагрева воды системы горячего водоснабжения и отопления, чем выше эффективность работы системы охлаждения, тем выше будет общий КПД цикла производства электрической энергии. Циркуляция жидкости обеспечивается насосом (помпой), привод которого может быть механическим от маховика или электрическим. Произведенная генератором электрическая энергия поступает в распределительно-накопительное устройство, к которому могут подключаться потребители переменного и постоянного тока. Разделение по роду тока позволит создать гибридную систему электроснабжения с номиналом напряжения постоянного тока 12 В и переменного 220 В. Стрелками показаны места присоединения теплового аккумулятора $Q_{\text{зап}}$ и электрической нагрузки $U_{\text{вых}}$. Кран соединительного обводного трубопровода (байпас) необходим для шунтирования теплообменника системы отопления и горячего водоснабжения при необходимости перевода ее состояния ремонта или бездействия, при этом необходимо перекрыть краны подающего и обратного трубопровода. Для обеспечения работы альтернативного источника энергии после заката солнца и прекращения процесса нагрева теплоносителя в солнечном коллекторе используется тепловой аккумулятор, который представляет собой герметичный резервуар с теплоизоляцией.

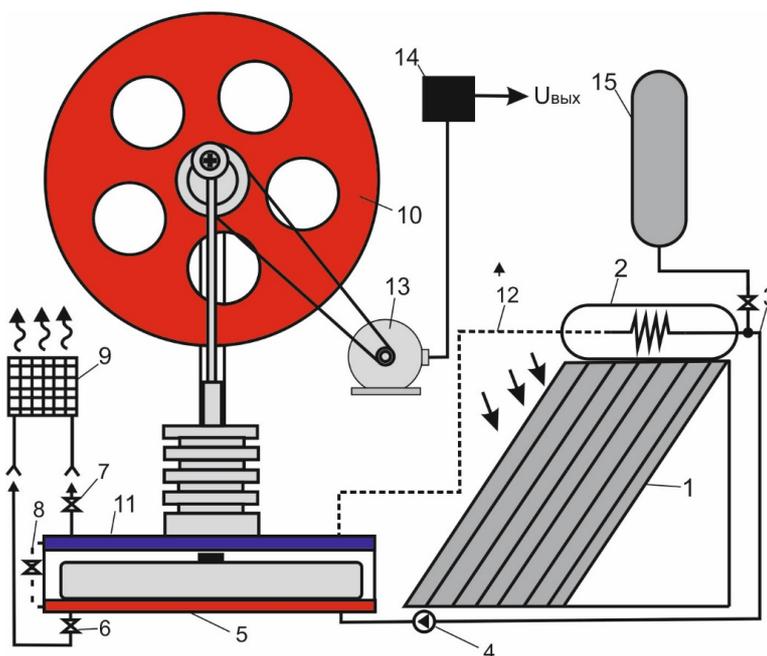


Рис. 6. Альтернативный источник энергии для удаленных потребителей на основе низкотемпературного ДВПТ: 1 – солнечный коллектор, 2 – теплообменный аппарат солнечного коллектора, 3 – подающий трубопровод, 4 – нагреватель (помпа), 5 – нагреватель, 6 – кран подающего трубопровода теплообменника системы отопления, 7 – кран обратного трубопровода теплообменника системы отопления, 8 – кран соединительного обводного трубопровода (байпас), 9 – теплообменник системы отопления (охлаждения), 10 – маховик, 11 – охладитель, 12 – обратный трубопровод, 13 – синхронный генератор, 14 – распределительно-накопительное устройство, 15 – тепловой аккумулятор

Обсуждение и заключение

Использование ДВПТ для преобразования солнечного излучения в электрическую энергию является весьма перспективным для южных регионов Республики Казахстан, где излучение солнечной энергии в среднем составляет 1900–2000 кВт/м² в год, при этом солнечных дней в году более 300. Данный источник электрической энергии способен круглый год производить достаточный объем электроэнергии для фермерского хозяйства и может стать альтернативой бензиновым (дизельным) электрическим генераторам, которые в настоящее время очень широко используются для энергообеспечения нужд сельскохозяйственного производства. Новизна проведенных исследований заключается в создании альтернативного источника электрической энергии, более доступного по стоимости, чем солнечные модули, и превосходящего их по эффективности, при этом способного работать после захода солнца благодаря накоплению энергии нагретой воды в тепловом аккумуляторе. Получены новые научно обоснованные

результаты, позволяющие отказаться от использования штока вытеснителя для сокращения механических потерь и повышения вырабатываемой мощности до 15 %, при этом установлено, что объем вытеснителя должен быть в 20–40 раз больше объема рабочего поршня для температуры нагревателя в пределах 90–100 °С; после дальнейшего увеличения вытеснителя особого прироста мощности не наблюдается. Исключение уплотнений штока вытеснителя позволит существенно повысить надежность и герметичность ДВПТ. Использование воздуха в качестве рабочего тела является не оправданным, так как при его использовании массогабаритные размеры ДВПТ на единицу производимой мощности будут большими, чем у двигателей внутреннего сгорания. Для низкотемпературного ДВПТ важно обеспечение эффективного охлаждения рабочего тела, для этого возможно размещение теплообменника охладителя в грунте на глубине более 2,5 м, что позволит обеспечить достаточно высокоэффективное охлаждение ДВПТ в летнее время.

Литература

1. Лежнев, Л.Ю. Способы повышения энергоэффективных показателей двигателей с внешним подводом теплоты, работающих в составе установок автономного энергоснабжения / Л.Ю. Лежнев, Д.А. Иванов. – <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10139> (дата обращения: 10.08.2020).
2. Кириллов, Н.Г. Двигатели Стирлинга – технологический прорыв в автономной энергетике XXI века / Н.Г. Кириллов. – <https://www.sovmash.com/node/98> (дата обращения: 08.08.2020).
3. Конюхов, Д. Двигатель с внешним подводом теплоты / Д. Конюхов. – <https://www.eprussia.ru/epr/66/4470.htm> (дата обращения: 08.08.2020).
4. Двигатель Стирлинга https://ru.qwe.wiki/wiki/Stirling_engine (дата обращения: 18.07.2020).
5. Ридер, Г. Двигатели Стирлинга / Г. Ридер. – М.: Мир, 1986. – 464 с.
6. Уокер, Г. Двигатели Стирлинга / Г. Уокер. – М.: Мир, 1985. – 408 с.
7. Жаукешов, А.М. К выбору компонентов солнечной электростанции с двигателем Стирлинга / А.М. Жаукешов // Вестник КазНУ. Серия «Физика». – 2014. – № 4. – С. 85–89.
8. Langlois, Justin L.R. Dynamic computer model of a Stirling space nuclear power system / Justin L.R. Langlois // Trident Scholar project report no. 345. – Annapolis: US Naval Academy, 2006. – 348 с.
9. Юрченко, А.В. Пути повышения эффективности солнечных электростанций / А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев, А.Д. Алькина. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2017. – 181 с.
10. Мехтиев, А.Д. Многотопливные микротепловые электростанции для автономных систем энергосбережения / А.Д. Мехтиев, В.В. Югай, А.Д. Алькина. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2019. – 159 с.
11. Использование двигателя Стирлинга для когенерационной тепловой электростанции сверхмалой мощности с возможностью использования тепловых потерь металлургического производства / А.Д. Мехтиев, В.В. Югай, Н.Б. Калиаскаров и др. // Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина. – 2018. – № 3 (98). – С. 186–195.
12. Мини-ТЭЦ и миниэлектростанции на основе двигателя Стирлинга для энергообеспечения жилых и промышленных объектов / А.Д. Мехтиев, В.И. Эйрих, В.В. Югай и др. // Актуальные проблемы современности. – 2014. – № 3. – С. 94–97.
13. 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 технологии». – 2012. – № 1. – С. 78–83.
14. Горожанкин, С.А. Комбинированные газотурбинные установки с двигателями Стирлинга / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков, А.В. Чухаркин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – № 2. – С. 57–66.
15. Веревкин, М.Г. Метод комплексного теплового и конструкторского расчета термомеханического генератора / М.Г. Веревкин // Известия вузов. – 2004. – № 10. – С. 33–37.
16. Ильин, Р.А. Эффективность использования двигателей Стирлинга в составе газо-газовых теплоэнергетических установок / Р.А. Ильин // Вестник АГТУ. – 2008. – № 5. – С. 136–139.

Мехтиев Али Джаванширович, канд. техн. наук, ассоциированный профессор, Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; Томский политехнический университет, г. Томск; barton.kz@mail.ru.

Югай Вячеслав Викторович, доктор PhD, заведующий кафедрой, Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; slawa_v@mail.ru.

Нешина Елена Геннадьевна, магистр технических наук, заведующий кафедрой, Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; 1_neg@mail.ru.

Алькина Алия Даулетхановна, магистр технических наук, старший преподаватель, Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; alika_1308@mail.ru.

Поступила в редакцию 26 августа 2020 г.

DOI: 10.14529/power200308

ALTERNATIVE LOW TEMPERATURE STIRLING ENGINE BASED SOURCE OF ENERGY FOR AUTONOMOUS CONSUMERS

A.D. Mekhtiyev^{1,2}, barton.kz@mail.ru,

V.V. Yugay¹, slawa_v@mail.ru,

E.G. Neshina¹, 1_neg@mail.ru,

A.D. Alkina¹, alika_1308@mail.ru

¹ Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan,

² Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Introduction. The relevance lies in the use of a motor with an external heat supply to convert solar radiation into electrical energy, while the source of thermal energy is a solar collector. **Aim.** To develop an alternative energy source for remote consumers based on a low-temperature Stirling engine capable of converting low-grade heat of heated water into mechanical energy with subsequent generation of electric current of industrial frequency. In contrast to the classical design of the well-known Stirling engine, the presented DVPT has a significant displacer volume, which exceeds the volume of the working piston by more than 20 times; this allows it to operate at a lower temperature difference between the heater and the cooler. The operating temperature of the heater is 90–100 °C, which is 7–9 times less than the known Stirling engine. **Materials and methods.** To work out the results of full-scale experiments, computer modeling was used; the dependence graphs for the change in the pressure of the working fluid and its volume when compressed by the working piston are presented. **Results.** A brief description of the design features of a low-temperature engine with an external heat supply operating according to the Stirling cycle is given, as well as some results of research and computer modeling. **Conclusion.** The use of air as a working fluid is not justified, since when using it, the mass and size dimensions of the DVPT per unit of power produced are larger than that of internal combustion engines. For a low-temperature DVPT, a prerequisite is the difference in the volumes of the displacer and the working piston; for a heater temperature within 90 °C, the displacer must be 20 to 40 times larger in volume. The efficiency is influenced by the temperature difference between the heater and the cooler and the pressure of the working fluid.

Keywords: engine with warm supply, solar radiation, electric power, collector, generator.

References

1. Lezhnev L.Yu. *Sposoby povysheniya jenergojeffektivnyh pokazatelej dvigatelej s vneshnim podvodom teploty, rabotajushhih v sostave ustanovok avtonomnogo jenergosnabzhenija* [Methods for improving the energy-efficient performance of motors with external heat supply operating as part of autonomous power supply units Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10139> (accessed 10.08.2020).

2. Kirillov N.G. *Dvigateli Stirlinga – tehnologicheskij proryv v avtonomnoj jenergetike XXI veka* [Stirling engines – a technological breakthrough in the autonomous energy of the XXI century]. Available at: <https://www.sovmash.com/node/98> (accessed 08.08.2020).

3. Konyukhov D. *Dvigatel' s vneshnim podvodom teploty* [Engine with external heat supply]. Available at: <https://www.eprussia.ru/epr/66/4470.htm> (accessed 08.08.2020).

4. *Dvigatel' Stirlinga* [Stirling engine]. Available at: https://ru.qwe.wiki/wiki/Stirling_engine (accessed 18.07.2020).
5. Rider G. *Dvigateli Stirlinga* [Stirling engines]. Moscow, Mir Publ., 1986. 464 p.
6. Uoker G. *Dvigateli Stirlinga* [Stirling engines]. Moscow, Mir Publ., 1985. 408 p.
7. Zhaukeshov A.M. [To the selection of components for a solar power plant with a Stirling engine]. *KazNU Bulletin. Physical series*, 2014, no. 4, pp. 85–89. (in Russ.)
8. Langlois Justin L.R. Dynamic computer model of a Stirling space nuclear power system. *Trident Scholar project report no. 345*. Annapolis: US Naval Academy. 2006. 348 p.
9. Yurchenko A.V., Mekhtiev A.D., Al'kina A.D. *Puti povysheniya effektivnosti solnechnykh elektrostantsiy* [Ways to improve the efficiency of solar power plants]. Karaganda, KarGTU Publ., 2017. 181 p.
10. Mekhtiev A.D., Yugay V.V., Al'kina A.D. *Mnogotoplivnye mikroteplovye elektrostantsii dlya avtonomnykh sistem energosberezheniya* [Multi-fuel micro-thermal power plants for autonomous energy-saving systems]. Karaganda, KarGTU Publ., 2019. 159 p.
11. Mekhtiev A.D., Yugay V.V., Kaliaskarov N.B., Al'kina, A.D., Turdybekov, D.M. [The use of a Stirling engine for a cogeneration thermal power plant of ultra-low power with the possibility of using heat losses of metal production]. *Bulletin of Science of the Kazakh Agrotechnical*, 2018, no. 3 (98), pp. 186–195. (in Russ.)
12. Mekhtiev A.D., Eyrikh V.I., Yugay V.V., Rakhimberlinova Zh.B., Buzyakov R.R. [Mini-CHP and mini-power plants based on the Stirling engine for power supply of residential and industrial facilities]. *Actual Problems of Our Time*, 2014, no. 3, pp. 94–97. (in Russ.)
13. Afanas'ev V.A., Tseytlin A.M., Polyakov P.B., Gavlovich R.Yu. [Evaluation of the efficiency of a cryogenic Stirling engine, which is a part of a liquefied natural gas gasifier of a marine engine's gas flow supply system]. *Vestnik AGTU. Series: Marine Engineering and Technology*, 2012, no. 1, pp. 78–83. (in Russ.)
14. Gorozhankin S.A., Savenkov, N.V., Chukharkin, A.V. [Combined gas turbine units with Stirling engines]. *Scientific and technical news of the St. Petersburg Polytechnic University*, 2015, no. 2, pp. 57–66.
15. Verevkin M.G. [Metod kompleksnogo teplovogo i konstruktorskogo rascheta termomekhanicheskogo generatora]. *Izvestiya vuzov*, 2004, no. 10, pp. 33–37. (in Russ.)
16. Il'in R.A. [Efficiency of using Stirling engines as part of gas-gas heat and power plants]. *Bulletin of AGTU*, 2008, no. 5, pp. 136–139. (in Russ.)

Received 26 August 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Альтернативный источник энергии для автономных потребителей на основе низкотемпературного двигателя Стирлинга / А.И. Мехтиев, В.В. Югай, Е.Г. Нешина, А.Д. Алькина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 78–87. DOI: 10.14529/power200308

FOR CITATION

Mekhtiyev A.D., Yugay V.V., Neshina E.G., Alkina A.D. Alternative Low Temperature Stirling Engine Based Source of Energy for Autonomous Consumers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 78–87. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200308
