

МРНТИ 44.31.01

А.Д. Мехтиев<sup>1</sup> – основной автор, | ©  
Е.Ж. Сарсикеев<sup>2</sup>, С.К. Жумажанов<sup>3</sup><sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, <sup>2</sup>PhD, <sup>3</sup>Канд. техн. наук

ORCID

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>, <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>,  
<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-0400-5488>

Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина



г. Нур-Султан, Казахстан

<sup>1</sup>[barton.kz@mail.ru](mailto:barton.kz@mail.ru), <sup>2</sup>[sarsikeev.ermek@yandex.ru](mailto:sarsikeev.ermek@yandex.ru), <sup>3</sup>[zhumaser@mail.ru](mailto:zhumaser@mail.ru)<https://doi.org/10.55956/QVQL8487>

## ТЕПЛОЙ ДВИГАТЕЛЬ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЛЬСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**Аннотация.** В статье обосновывается идея создания механического преобразователя солнечного излучения в электрический ток. Авторами дается сравнение разработанного двигателя с внешним подводом теплоты с зарубежными аналогами, сведения о которых опубликованы ранее. В статье приведен и обобщен материал использования источников возобновляемой энергии на основе двигателя с внешним подводом теплоты. Особое внимание акцентируется на простоте конструкции, надежности и низкой стоимости двигателя с внешним подводом теплоты. Разработанный двигатель может быть использован в качестве привода электрического генератора, для энергообеспечения автономных потребителей. К тому же он способен преобразовывать низкопотенциальную энергию горячей воды в механическую, а затем в электрическую. На основе проведенных исследований авторами установлено, что использование воздуха в качестве рабочего тела является не оправданным, так как увеличивает массогабаритные размеры. Отмечается, что на КПД оказывает влияние разница температуры между нагревателем и охладителем и давлением рабочего тела.

**Ключевые слова:** тепловой двигатель, солнечное излучение, электрическая мощность, коллектор, генератор, механический преобразователь.



Мехтиев, А.Д. Тепловой двигатель с внешним подводом теплоты для энергообеспечения сельских потребителей [Текст] / А.Д. Мехтиев, Е.Ж. Сарсикеев, С.К. Жумажанов // Механика и технологии / Научный журнал. – 2022. – №1(75). – С.35-44. <https://doi.org/10.55956/QVQL8487>

**Введение.** Казахстан имеет значительный потенциал в развитии возобновляемых источников энергии (НВИЭ) [1]. Учитывая, что в среднем продолжительность солнечного дня составляет 2200÷3000 часов в год, уровень излучение солнечной энергии составляет 1100÷1800 кВт/м<sup>2</sup> в год. Можно отметить, что значительный потенциал имеют Кызылординская и Туркестанская область, где количество солнечных часов в год составляет около 3100 часов, а уровень излучения солнечной энергии доходит до 2000 кВт/м<sup>2</sup> в год.

В настоящее время требуется поиск альтернативных решений преобразования солнечного излучения в электрический ток, так как солнечные

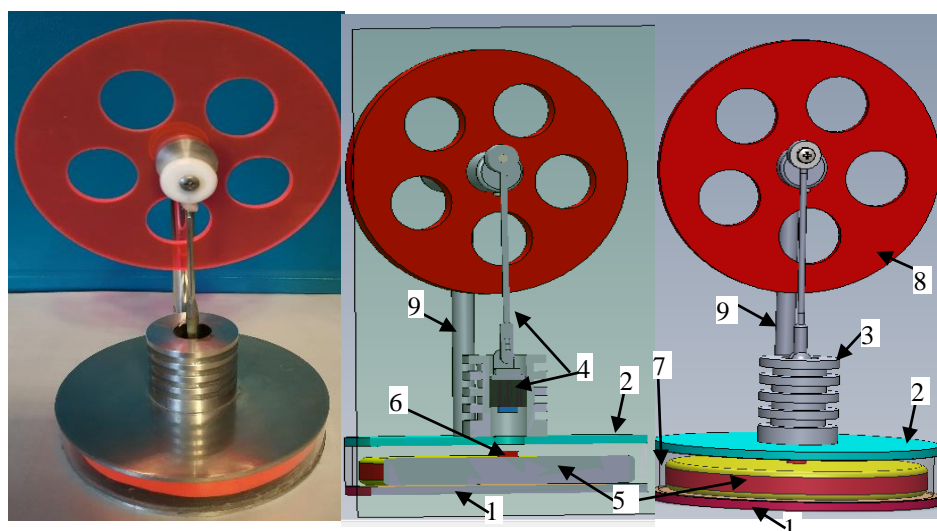
модули остаются пока недоступны для массового использования из-за их высокой стоимости, а также ограниченности их ресурса. Одним из вариантов преобразования солнечной энергии является создание механических преобразователей солнечного излучения в электрический ток на основе двигателя с внешним подводом теплоты (ДВПТ). Анализ литературных источников [2,3] показал, что в прошлом веке разработано множество модификаций ДВПТ, работающих по тепловому циклу Стирлинга (ДС). Есть хорошие примеры практической реализации данной идеи и образцы ДВПТ, выпущенной в различное время зарубежными фирмами: Philips, STM Inc., Daimier Benz, Solo. Например, можно выделить наиболее удачный проект фирмы Philips по использованию ДВПТ для преобразования солнечного излучения в электрический ток с КПД более 40%, что пока не достижимо для современных фотоэлектрических модулей [3,4]. Подробную информацию о конструкциях зарубежных аналогов ДВПТ можно найти [5-11]. Проект фирмы Philips реализован еще в середине прошлого века и их установки работают еще сейчас. Это говорит о значительном ресурсе ДВПТ, который может достигать 120000 часов [5-11]. Нагрев горячего теплообменника ДВПТ осуществлялся при параболическом концентраторе диаметром 6 м. Было осуществлено ряд успешных проектов в Америке и Африке, но данные источники имеют значительную стоимость. Все разработанные ДВПТ имеют определенную технологическую сложность и значительную стоимость, сопоставимую с солнечными модулями на единицу мощности.

В отличие от известных зарубежных аналогов предложенная конструкция ДВПТ, отличается тем, что вместо солнечного концентратора использован солнечный вакуумный коллектор, а в конструкцию ДВПТ внесены существенные изменения для его адаптации к низкотемпературному нагреву в пределах 100 °С. Важным моментом является условие, что ДВПТ должен быть простым по конструкции, надежным в эксплуатации и иметь низкую стоимость по сравнению с зарубежными аналогами. Конечно, КПД преобразования будет ниже, чем у высокотехнологичных зарубежных аналогов и составит в пределах 16-19%, но и стоимости производства будет в разы ниже, чем у зарубежных аналогов. Источником тепла будет, не солнечный концентратор с поворотной системой, а вакуумный коллектор. Возобновляемый источник на основе ДВПТ будет способен к когенерации, соответственно производить одновременно электрическую и тепловую электроэнергию, при этом потребитель будет получать энергию не только в дневное время суток, но и ночное время после захода солнца. Для этого необходимо использовать термоаккумулятор, представляющий собой утепленную емкость для формирования запаса горячей воды. Важным преимуществом является более низкая стоимость накопления 1 Вт энергии и большой ресурс работы без деградации аккумулятора. Объем накопительной емкости зависит от заявленной суточной мощности потребителя и особенно режима потребления в ночное время. При этом стоимость накопителей ниже, чем у электрического аккумулятора. Данный источник может обеспечить горячее водоснабжение и отопление жилых помещений.

**Условия и методы исследований.** Исследования направлены на разработку возобновляемого когенерационного источника для энергообеспечения сельских потребителей на основе низкотемпературного ДВПТ. Проведены предварительные исследования солнечного коллектора, состоящего из 15 вакуумных трубок с медными тепловыми трубками (диаметр конденсатора 14 мм) с поглощающей площадью равной 2,35 м<sup>2</sup>.

Эффективность его работы лежит в пределах 80%, это зависит от солнечной активности, температуры воздуха и времени года, также есть отличия у некоторых производителей, которые заявляют более высокий КПД. Проведенные исследования показали, что современные солнечные коллекторы способны производить при среднем показателе мощности солнечного излучения в  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , более  $700 \text{ Вт/м}^2$  тепловой мощности. Соответственно, если создать ДВПТ с КПД в пределах 16-19% и более, это позволит вырабатывать 0,1-0,15 кВт·ч. Учитывая коэффициент спроса и незначительные мощности бытовых электроприборов можно в какой-то мере обеспечить незначительные потребности сельского потребителя. Имеется возможность использовать в качестве накопителей электрической энергии автомобильные аккумуляторы мощностью от 100-300 А·ч, причем возможно использование уже непригодных стартовых батарей дизельных грузовых автомобилей, которые не способны эффективно запускать двигатель в зимнее время [5]. Соответственно можно создать два буфера накопителя, один термоаккумулятор, а другой – дополнительный электрический накопитель, что повысит надёжность энергоснабжения сельского потребителя.

Разработана собственная конструкция ДВПТ, на основе компьютерной 3D модели, которая позволяет отработать основные элементы конструкции, создать чертежи для его изготовления (рис. 1). В отличие от известной конструкции ДС [2,3] представленный ДВПТ имеет значительный объем полости вытеснителя, объем которого более чем в 20 раз больше, чем объем рабочего поршня, что позволяет ему работать на меньшей разнице температуры между нагревателем и охладителем. В реальном ДВПТ для повышения его КПД и мощности объем вытеснителя будет увеличен до 40 раз по отношению к объему рабочего поршня. Это соотношения выведены путем компьютерного моделирования ДВПТ. Натурная и компьютерная модель ДВПТ, представлена на рисунке 1.



1 – нагреватель; 2 – охладитель; 3 – рабочий цилиндр; 4 – рабочий графитовый поршень со штоком и постоянным магнитом; 5 – вытеснитель; 6 – неодимовый постоянный магнит; 7 – разделительное кольцо; 8 – маховик; 9 – стойка крепления маховика.

Рис. 1. Натурная и компьютерная 3D модель ДВПТ

Отличием его конструкции от известных зарубежных аналогов является отсутствие штока для механической связи с маховиком [2,3]. Данное техническое решение реализуется за счет использования двух постоянных магнитов, расположенных на поршне и вытеснителе, которые притягиваются, когда рабочий поршень спускается в нижнюю часть цилиндра, тем самым вытеснитель притягивается к рабочему поршню. На разрезе, представленном на рисунке 1, показано расположение магнитов на поршне и вытеснителе. При движении поршня в верхнюю часть рабочего цилиндра, магнитная связь разрывается, вытеснитель падает вниз на поверхность нагревателя. При этом рабочее тело перемещается в зону охлаждения. Рабочее тело охлаждается и сжимается, а поршень втягивается внутрь. Когда рабочий поршень занимает крайнее нижнее положение в полости рабочего цилиндра, то вытеснитель притягивается, перемещая рабочее тело в зону нагрева, где оно нагревается и расширяется, толкая поршень вверх. Подробное описание теплового цикла Стирлинга можно найти в [2,3]. В качестве рабочего тела в ДВПТ используется воздух, но в опытном образце он будет заменен на гелий, это позволит при том же объеме поршня и вытеснителя увеличить мощность ДВПТ в более чем два раза. Рабочий диапазон нагревателя лежит в пределах от 80 до 150 °С, что позволяет ему работать от тепловой энергии геотермальных вод или нагретой воды в солнечном коллекторе. Нагреватель 1 и охладитель 2, которые являются соответственно горячим и холодным теплообменниками, разделены кольцом 7 из стеклопластика, имеющим низкую теплопроводность для того, чтобы высокая температура нагревателя не передавалась охладителю, что в последствии сделает работу ДВПТ невозможной.

**Результаты исследований.** Проведены исследования параметров натурной модели ДВПТ. Температура нагревателя поднималась не более 100°С, а охладителя удерживалась на уровне 23-25 °С. Температура воздуха в помещении, где проводились испытания лабораторного образца 24°С. Объемы: вытеснителя 78 см<sup>3</sup>; рабочего поршня 1,7 см<sup>3</sup>. Регенератор не использовался [2], так как конструкция сильно упрощена. Мертвый объем охладителя в пределах 10 см<sup>3</sup>. Разность фазового угла для вытеснителя 90°. В качестве рабочего тела использовался воздух. По полученным данным была построена PV диаграмма (рис. 2), анализируя которую можно сделать вывод, что разработанная натурная модель ДВПТ имеет заметно меньшую площадь PV диаграммы по сравнению с идеальным циклом Стирлинга [2-5], соответственно и более низкий КПД. Это обусловлено потерями на механическое трение его деталей из-за несовершенства конструкции. Пока достигнутый КПД лежит в пределах 6%, для его повышения необходимо снизить потери мощности на механическое трение и повысить давление рабочего тела, что повысит мощность ДВПТ. Проведенные опыты показали зависимость повышения вырабатываемой мощности генератором при повышении температуры нагревателя и понижении температуры охладителя, соответственно необходимо обеспечить хорошее охлаждение ДВПТ и съем тепла в системе охлаждения. Расчеты показали, что при той же мощности, что и двигатель 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 влияют на КПД. Механическая мощность, развиваемая моделью ДВПТ довольно низкая и составила около 1 Вт, так как давление не превышало 1,34 кг/см<sup>2</sup>. На 1 Вт выработанной электрической энергии ДВПТ способен отдать 5 Вт тепловой.

КПД ДВПТ зависит от нескольких важных параметров указанных в [2,3], 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 [2], для повышения мощности ДВПТ требуется повышение давления рабочего тела.

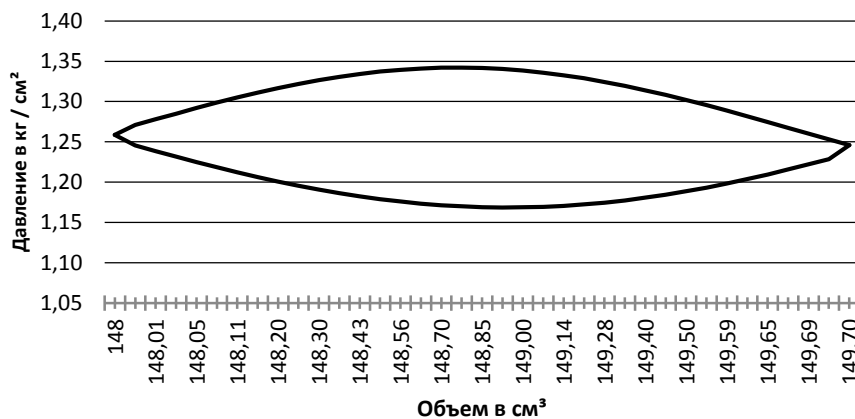


Рис. 2. PV диаграмма

На рисунке 3 приведен график изменения выходной мощности ДВПТ в зависимости от числа его оборотов. Результаты теоретического расчета и компьютерного моделирования позволили построить прогнозный график увеличения мощности модели ДВПТ при увеличении давления рабочего тела (рис. 4). В расчетах использованы результаты исследований зарубежных авторов [2,3]. В будущем прототипе ДВПТ необходимо многократное увеличение давления рабочего тела до 30 МПа, что обеспечит высокие показатели мощности на единицу его веса.

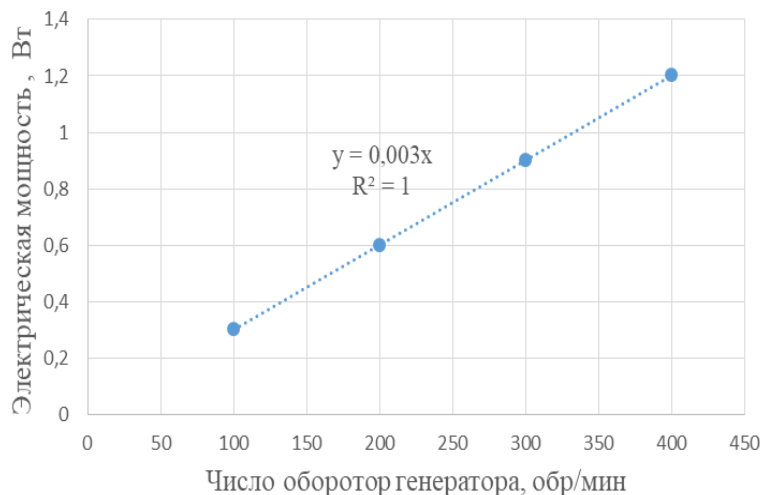


Рис. 3. График зависимостей вырабатываемой мощности от числа его оборотов

На рисунке 5 представлена упрощенная структурная схема возобновляемого когенерационного источника для энергообеспечения

сельских потребителей на основе низкотемпературного теплового двигателя с внешним подводом теплоты.

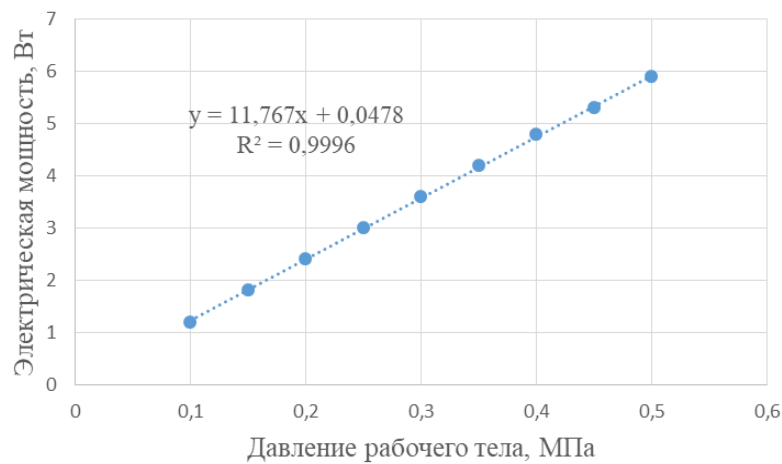
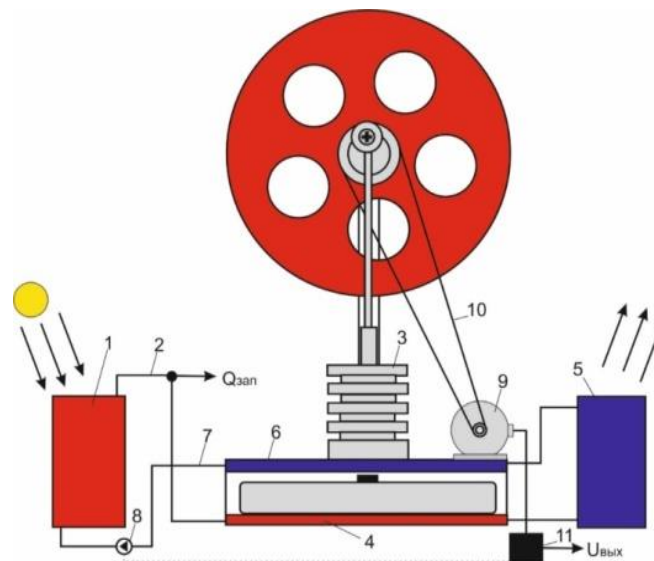


Рис. 4. График зависимостей вырабатываемой мощности от величины давления рабочего тела

*Предложенная конструкция ДВПТ.* Принцип работы ДВПТ и назначение его элементов были рассмотрены ранее. Натурная и компьютерная 3D модель ДВПТ послужили основой предложенной далее конструкции ДВПТ.



1 – солнечный коллектор; 2 – подающий трубопровод; 3 – рабочий цилиндр; 4 – горячий теплообменник; 5 – охладитель; 6 – холодный теплообменник; 7 – обратный трубопровод; 8 – циркуляционный насос; 9 – электрический генератор; 10 – механическая связь для привода электрического генератора; 11 – электрическое распределительно-накопительное устройство.

Рис. 5. Упрощенная структурная схема генерации

Для преобразования солнечной энергии и нагрева воды используется солнечный коллектор 1, который подает нагретую воду по трубопроводу 2

горячий теплообменник 4. К подающей магистрали 2 может быть подключен аккумулятор тепловой энергии для формирования запаса и обеспечения работы ДВПТ в ночное время суток. Источник способен работать в зимнее время, так как в качестве рабочей жидкости используется автомобильный антифриз. После прохождения горячего теплообменника 4, жидкость поступает в охладитель 5, к которому могут быть подключены теплообменники системы горячего водоснабжения и отопления. Тем самым обеспечивается когенерация энергии, и сокращаются ее потери. Чем больше энергии будет отобрано из охладителя, тем выше будет КПД и мощность ДВПТ. Остыв, рабочая жидкость поступает в теплообменник охладителя 6, где охлаждает рабочее тело. Далее по обратному трубопроводу 7 поступает на вход солнечного коллектора для последующего нагрева. Для вращения ротора синхронного генератора 9 имеет фрикционная механическая связь 10. Циркуляция жидкости обеспечивается циркуляционным насосом 8. Произведенная электрическая энергия поступает в распределительно-накопительное устройство 11, 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  $U_{\text{вых}}$ .

**Обсуждение результатов.** В КазАТУ ведутся исследования параметров различных типов солнечных модулей и коллекторов к климатическим условиям г. Нур-Султан (Казахстан). Географическое положение:  $51^{\circ}08'$  с. ш.  $71^{\circ}26'$  в. д. Центральный Казахстан отличается резко континентальным умеренным климатом, излучение солнечной энергии примерно  $1200 \text{ кВт/м}^2$  в год. Для совместной работы с ДВПТ выбран солнечный коллектор, состоящий из 15 вакуумных трубок с медными тепловыми трубками (диаметр конденсатора 14 мм) с поглощающей площадью, равной  $2,35 \text{ м}^2$ . Результаты исследований приведены на рисунке 6.

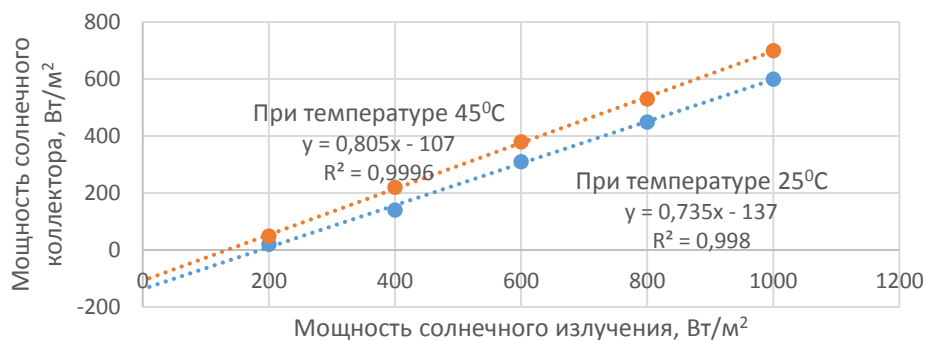


Рис. 6. Зависимость мощности, развиваемой солнечным коллектором при различной мощности солнечного излучения, при температуре воздуха 25 и 45°C

Эффективность работы солнечного коллектора лежит в пределах 70-80%, зависит от солнечной активности, температуры воздуха и времени года, также есть отличия у некоторых производителей, которые заявляют более высокий КПД. Современные солнечные коллекторы способны производить, что при среднем показателе мощность солнечного излучения в  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , более  $700 \text{ Вт/м}^2$  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.

Учитывая коэффициент спроса и незначительные мощности бытовых электроприборов можно в какой-то мере обеспечить незначительные потребности сельского потребителя. Также можно накапливать тепловую энергию в гидравлических аккумуляторах с теплоизоляцией, которые имеет более низкую стоимость и больший ресурс. что будет намного выгоднее в экономическом плане.

Для проведения дальнейших исследований создан опытный образец ДВПТ механической мощностью 300 Вт (рис. 7), который будет работать совместно с солнечным коллектором. Механическая часть полностью готова, остается доработать систему нагрева и охлаждения, а также электрическую часть.

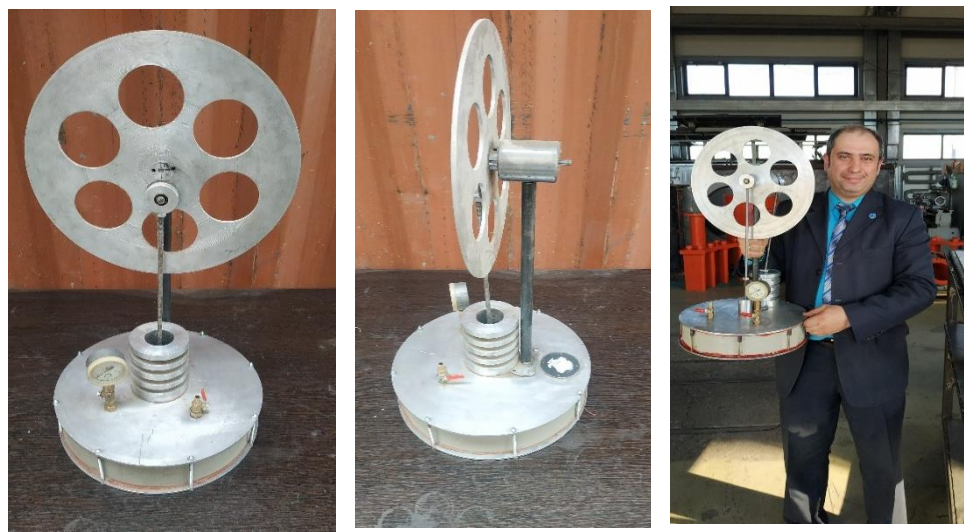


Рис. 7. Опытный образец ДВПТ

**Заключение.** Использование двигателя с внешним подводом теплоты для преобразования солнечного излучения в электрическую энергию является весьма перспективным, так как можно создать механический преобразователь с КПД более 20%, что больше, чем у солнечных модулей массового производства с доступной ценой для сельского жителя. 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 повышения КПД и мощности ДВПТ необходимо увеличение разницы температуры между нагревателем и охладителем, давления рабочего тела и снижение потерь на трение в его механической части.

#### Список литературы

1. Официальный сайт компании KAZENERGY [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kazenergy.com>. Дата обращения: 01.02.2022.
2. Ридер, Г. Двигатели Стирлинга [Текст] / пер. с англ. Г.Т. Ридер, Ч. Хупер. - М.: Мир, 1986. - 464 с.
3. Уокер, Г. Двигатели Стирлинга [Текст] / пер. с англ. Г. Уокер. - М.: Мир, 1985. - 408 с.



4. Галушак, В.С. Солнечные фотоэлементы или двигатель стирлинга – реалии и будущее солнечной энергетики [Текст] / В.С. Галушак, А.Г. Сошинов, О.С. Атрашенко, Т.В. Копейкина // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 12-3. – С. 385-388.
5. Мехтиев, А.Д. Многотопливные микротепловые электростанции для автономных систем энергосбережения [Текст]: монография / А.Д. Мехтиев, В.В. Югай, А.Д. Алькина. - Караганда: Изд-во КарГТУ, 2019. - 159 с.
6. Kruse A., Ruziewicz A., Tajmar M., Gnutek Z. A numerical study of a looped-tube thermoacoustic engine with a single-stage for utilization of low-grade heat // Energy Convers. Manage, 2017. V. 149. P. 206-218.
7. Ward B., Clark G., Swift G. Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion, version 6.3 b11, users guide. Los Alamos National Laboratory, 2012. - 288 p.
8. Wang K., Sun D., Zhang J., Xu Y., Luo K., Zhang N., Zou J., Qiu L. An acoustically matched traveling-wave thermoacoustic generator achieving 750 W electric power // Energy, 2016. V. 103, P. 313-321.
9. Ceperley P. H. A pistonless Stirling engine – the traveling wave heat engine // J. Acoust. Soc. Am, 1979. Vol. 66, № 5. P. 1508 - 1513.
10. Wang K., Qiu L. Numerical analysis on a four-stage looped thermoacoustic Stirling power generator for low temperature waste heat // Energ. Convers. Manage. 2017. Vol. 150, P. 830-837.
11. Piccolo A., Pistone G. Estimation of heat transfer coefficients in oscillating flows: the thermoacoustic case // Int. J. Heat Mass Tran, 2006. Vol. 49, P. 1631-1642.

*Материал поступил в редакцию 08.03.22.*

**А.Д. Мехтиев, Е.Ж. Сарсикеев, С.Қ. Жұмажанов**

*С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті,  
Нұр-Сұлтан қ., Қазақстан*

#### **АУЫЛ ТҰТЫНУШЫЛАРЫН ЭНЕРГИЯМЕН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ ҮШІН СЫРТҚЫ ЖЫЛУ БЕРІЛІСІ БАР ЖЫЛУ ҚОЗҒАЛТҚЫШЫ**

**Аңдатпа.** Мақалада күн радиациясын механикалық түрлендіргіш арқылы электр тогына айналдыру идеясы қарастырылған. Авторлар әзірленген сыртқы жылу берілісі бар қозғалтқышты шетелдік аналогтарымен салыстырады. Мақалада Қазақстанда жаңартылатын энергия көздерін пайдалану материалдары жинақталған. Сыртқы жылу берілісі бар қозғалтқыш дизайнының қарапайымдылығына, сенімділігіне және төмен құнына ерекше назар аударылады. Жобаланған қозғалтқыш автономды тұтынушыларды энергиямен қамтамасыз ету үшін электр генераторының жетегі ретінде пайдаланылуы мүмкін. Сонымен қатар, ол төмен потенциалды ыстық су энергиясын механикалық, содан кейін электрлік энергияға айналдыра алады. Зерттеулер негізінде авторлар ауаны жұмыс денесі ретінде пайдалануы ақталмағанын анықтады, өйткені ол салмақ габаритін арттырады. Жылытқыш пен салқындатқыш арасындағы температура айырмашылығы және жұмыс істейтін дененің қысымы пайдалы әсер ету коэффициентіне ықпал етеді.

**Тірек сөздер:** жылу қозғалтқыш, күн радиациясы, электрлік қуат, коллектор, генератор, механикалық түрлендіргіш.

**A.J. Mekhtiyev, Y.Zh. Sarsikejev, S.K. Zhumazhanov**

*S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

#### **HEAT ENGINE WITH EXTERNAL HEAT SUPPLY FOR ENERGY SUPPLY OF RURAL CONSUMERS**

**Abstract.** This article substantiates the idea of creating a mechanical converter of solar radiation into electric current. The authors compare the developed engine with external heat supply with foreign analogues. The article summarizes the material on the use of renewable energy sources in Kazakhstan. Particular attention is focused on the simplicity of design, reliability and low cost of the engine with external heat supply. The developed engine can be used as a drive for an electric generator for power supply of autonomous consumers. In addition, it is able to convert the low-grade energy of hot water into mechanical energy, and then into electrical energy. On the basis of the studies carried out, the authors have established that the use of air as a working fluid is not justified, since it increases the weight and dimensions. It is noted that the efficiency is influenced by the temperature difference between the heater and the cooler and the pressure of the working fluid.

**Keywords:** heat engine, solar radiation, electric power, collector, generator, mechanical converter.

#### References

1. Oficial'nyj sajt kompanii KAZENERGY [Official site of the KAZENERGY company] [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.kazenergy.com>. Date of access: 02/01/2022.
2. Rider G. Dvigateli Stirlinga [Stirling engines] / transl. from English. G.T. Reeder, C. Hooper. - Moscow: Mir, 1986. - 464 p.
3. Uoker G. Dvigateli Stirlinga [Stirling engines] / transl. from English. G. Walker. - Moscow: Mir, 1985.- 408 p.
4. Galushchak V.S., Soshinov A.G., Atrashenko O.S., Kopeikina T.V. Solnechnye fotoelementy ili dvigatel' stirlinga – realii i budushchee solnechnoj energetiki [Solar photocells or a stirling engine - realities and the future of solar energy] // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij [International Journal of Applied and Fundamental Research]. – 2015. – No. 12-3. – P. 385-388.
5. Mekhtiev A.D., Yugaj V.V, Al'kina A.D. Mnogotoplivnye mikroteplovye elektrostancii dlya avtonomnyh sistem energosberezheniya [Multi-fuel microthermal power plants for autonomous energy saving systems]: monograph. - Karaganda: Izd-vo KarGTU, 2019. - 159 p.
6. Kruse A., Ruziewicz A., Tajmar M., Gnutek Z. A numerical study of a looped-tube thermoacoustic engine with a single-stage for utilization of low-grade heat // Energy Convers. Manage, 2017. V. 149. P. 206-218.
7. Ward B., Clark G., Swift G. Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion, version 6.3 b11, users guide. Los Alamos National Laboratory, 2012. - 288 p.
8. Wang K., Sun D., Zhang J., Xu Y., Luo K., Zhang N., Zou J., Qiu L. An acoustically matched traveling-wave thermoacoustic generator achieving 750 W electric power // Energy, 2016. V. 103, P. 313-321.
9. Ceperley P. H. A pistonless Stirling engine – the traveling wave heat engine // J. Acoust. Soc. Am, 1979. Vol. 66, № 5. P. 1508-1513.
10. Wang K., Qiu L. Numerical analysis on a four-stage looped thermoacoustic Stirling power generator for low temperature waste heat // Energ. Convers. Manage. 2017. Vol. 150, P. 830-837.
11. Piccolo A., Pistone G. Estimation of heat transfer coefficients in oscillating flows: the thermoacoustic case // Int. J. Heat Mass Tran, 2006. Vol. 49, P. 1631-1642.