

УДК 621.433

**В. А. САФОНОВ, П. Н. КУЗНЕЦОВ, И. Л. БЕЛЕЦКИЙ***Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОПОРШНЕВОГО ТЕРМООБРАТИМОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*В данной статье проведён анализ разработок свободнопоршневых двигателей, работающих от внешнего тепла. Показаны преимущества использования свободнопоршневых двигателей в сравнении с другими силовыми энергоустановками. Рассмотрены экспериментальные исследования в области работы свободнопоршневого термообратимого двигателя. Приведены экспериментальные характеристики: мощность и частота холостого хода от температуры в камере нагрева, мощность от относительного диаметра диафрагмы, индикаторная диаграмма. Показана работа двигателя от концентрированного солнечного излучения. Рассмотрены экспериментальные исследования в области работы теплоизолированного термообратимого двигателя. Показана работоспособность термообратимого двигателя при исключении теплоотвода от рабочего цилиндра двигателя в окружающую среду. Приведены экспериментальные характеристики теплоизолированного термообратимого двигателя: мощность от температуры в цилиндре, мощность от температуры в камере нагрева. Представлена схема измерительной установки с датчиками. Проведено сравнение работы теплоизолированного и охлаждаемого двигателя.*

**Ключевые слова:** термообратимый двигатель, внешний подвод тепла, двигатель внешнего сгорания, экспериментальные исследования.

Большинство существующих двигателей работают на ископаемом топливе, углеводородах, цены на которые растут пропорционально сокращению запасов углеводородов на планете, причем спрос на энергоносители в будущем, только будет возрастать. Также с точки зрения экологии эти двигатели имеют большое количество недостатков.

Одним из основных направлений решения этих проблем, является внедрение установок, работающих на возобновляемых источниках энергии, а именно силовых установок, которые способны преобразовывать первичные энергоресурсы планеты: солнечную и геотермальную энергию.

В настоящее время, значительное внимание уделяется двигателям с внешним подводом тепла, работающим на тепловой энергии. Эти установки являются достаточно экологичными, из-за отсутствия выхлопных газов и относительно низким уровнем шумового загрязнения.

На сегодняшний день разработаны несколько классов двигателей с внешним подводом теплоты. К одному из них относят свободнопоршневые двигатели Стирлинга, обладающие длительным сроком службы, способностью самозапускаться и не требующие высококвалифицированного обслуживающего персонала. В таблице 1 показаны сравнительные данные различных космических силовых систем [1 – 3].

Как видно из таблицы свободнопоршневой двигатель с изотопной системой подвода теплоты имеет наибольший коэффициент полезного действия, в сравнении с другими системами, представленными в таблице, и приемлемые массогабаритные характеристики.

Таблица 1

Сравнительные данные по силовым системам

Система	Масса установки мощностью 2 кВт (кг)	Удельная мощность (Вт/кг)	КПД (%)	Относительная стоимость установки
Фотоэлектрическая	120 - 200	10-17	9-12	1
Радиоизотопный термоэлектрический генератор	300 - 560	6-7	7-12	15
Изотопная система подвода теплоты - цикл Брайтона	240 - 260	8-9	20	н.д.
Изотопная система подвода теплоты-свободнопоршневой двигатель Стирлинга	145	13	30	н.д.-

В таблице 2 приведены характеристики нескольких устройств на базе свободнопоршневых двигателей Стирлинга, созданных американской компанией «Stirling Technology Company» из которых видно, что эти устройства не только эффективны (коэффициент полезного действия достигает

39 %), но и имеют достаточно высокий ресурс. Мас-согабаритные характеристики также находятся в допустимых пределах [4].

Таблица 2  
 Модели систем энергообеспечения, разработанные фирмой «Stirling Technology Company»

Модель	RG-55	RG-350	RG-450	RG-1000	RG-3000
Электрическая мощность, Вт (частота 50 Гц)	60-80	350	450	1000	3000
К.п.д. системы, %	29	23	30	23	39
Ресурс, ч	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000
Габариты, мм	400x125	600x200	600x200	700x250	900x250
Вес, кг	3,5	8	10	13	16

Первый опытный образец свободнопоршневого двигателя, работающего от внешнего тепла, был разработан в начале шестидесятых годов XX века в Англии сотрудниками университета города Харруэлл. Рассмотрим принцип действия СПДС на примере двигателя, показанного на рисунке 1, разработанного в «NASA» (США) [8].

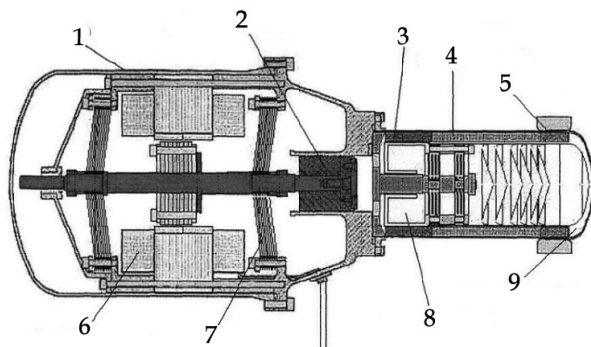


Рис. 1. Свободнопоршневой двигатель разработанный в NASA (США):

- 1- корпус, 2 – рабочий поршень, 3 – холодильник,
- 4 – регенератор, 5 – нагреватель, 6 – линейный генератор, 7 – пружины, 8 – вытеснительный поршень, 9 – камера нагрева

Двигатель состоит из трех основных элементов - корпуса 1, рабочего 2 и вытеснительного 8 поршней. Рабочий 2 и вытеснительный 8 поршни размещаются в цилиндре и разделяют его объем на три полости – полость расширения, полость сжатия и буферную полость. Полости расширения и сжатия сообщаются между собой через тракт нагревателя, регенератора и холодильника. Принцип работы СПДС аналогичен принципу работы двигателя Стирлинга с приводным механизмом. Движение поршни совершают под воздействием давления газа в рабочих полостях, а перемещение в обратном на-

правлении совершают под воздействием силы упругости механической пружины.

Полезную работу можно снимать непосредственно с рабочего поршня, преобразуя кинетическую энергию его колебательных движений при помощи соответствующего нагрузочного устройства. На показанном рисунке нагрузочным устройством служит линейный генератор с подключенной к нему нагрузкой.

По описанной выше схеме выполнены практически все двигатели, разработанные фирмой "Sunpower", которая занимает на сегодняшний день ведущее место по разработке свободнопоршневых термомеханических генераторов.

Авторами был проведен ряд исследований в области работы свободнопоршневых двигателей, который показал, что работа этого двигателя при некотором изменении его геометрии возможна и без вытеснительного поршня, что делает конструкцию двигателя значительно проще, дешевле и надежней. Также упрощается настройка рабочего режима двигателя из-за отсутствия фазового угла между вытеснительным и рабочим поршнем. Авторами такой двигатель был назван – «Термообратимый».

На рис. 2 показан эскиз свободнопоршневого двигателя без вытеснительного поршня (Термообратимый двигатель), разработанный авторами.

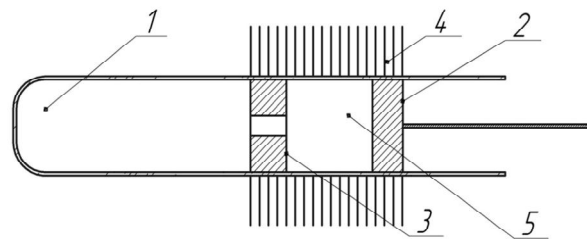


Рис. 2. Свободнопоршневой двигатель без вытеснительного поршня – термообратимый двигатель:  
 1– камера нагрева, 2 – поршень, 3 – диафрагма, 4 – радиатор, 5 – цилиндр

Как видно из рисунка двигатель состоит из камеры нагрева (1), подвижного рабочего поршня (2), диафрагмы (3), радиатора охлаждения (4) и цилиндра (5). Для исследования характеристик двигателя была изготовлена установка, схема которой показана на рис. 3.

Тепло в камеру нагрева двигателя подводится от электрической спирали, мощность которой контролируется по напряжению и току. Для измерения температуры рабочего тела двигателя внутри камеры нагрева расположена хромель-алюмелевая термопара типа К (ТХА) с диапазоном измеряемых температур от -200 до 13000С, такая же термопара была расположена снаружи камеры нагрева под электрической спиралью, для измерения температу-

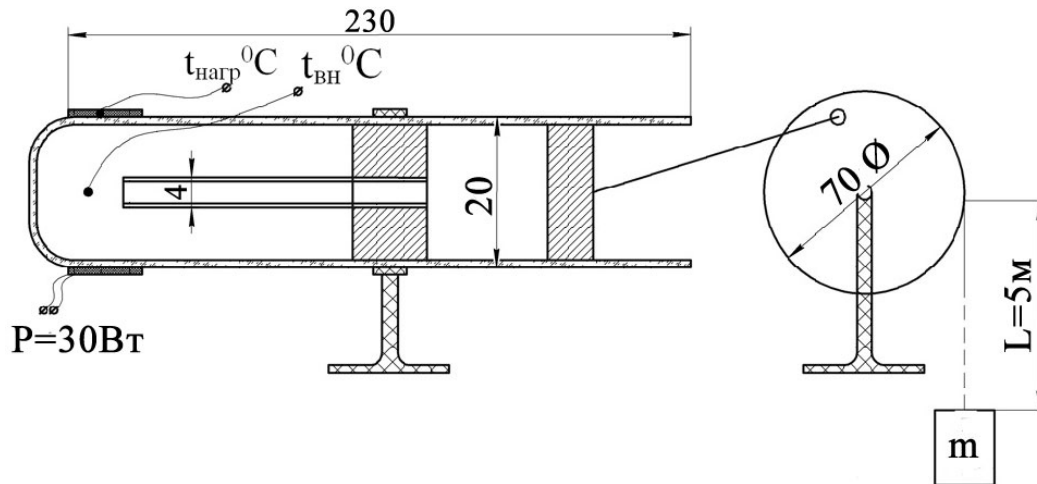


Рис. 3. Схема измерения мощности термообратимого двигателя

ры наружной стенки камеры нагрева. Обе термопары были подключены к входу мультиметра Mastech M838. Тарировка термопар осуществлялась в муфельной печи, в которой повышалась температура, контролируемая ртутным термометром погрешность измерений не превысила 1,8%.

Диафрагма в двигателе сделана удлиненной для того, чтобы разнести в разные стороны нагреватель и цилиндр двигателя, для того чтобы исключить теплопередачу от спирали к стенке цилиндра. Поступательное движение поршня преобразуется во вращательное движение маховика при помощи кривошипно-шатунного механизма. На маховике подвешен груз, который, в результате вращения маховика, поднимается на высоту 5 метров. Время подъема груза измерялось секундомером. По потенциальной энергии подъема груза была определена мощность двигателя в различных режимах работы.

На рисунке 4 изображен график зависимости мощности термообратимого двигателя от температуры в камере нагрева.

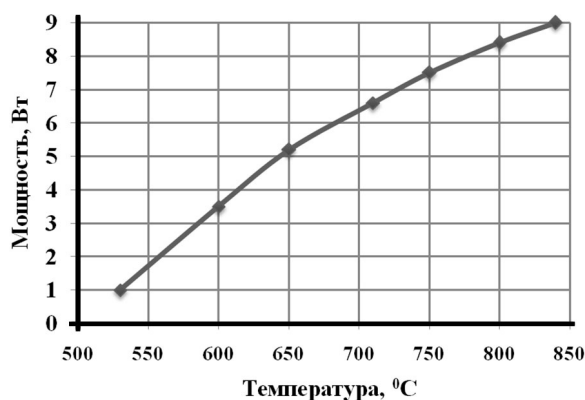


Рис. 4. График зависимости мощности термообратимого двигателя от температуры в камере нагрева

Частота работы двигателя измерялась акустическим методом при помощи микрофона, подклю-

ченного ко входу осциллографа. Для этого на поршне был закреплен упругий стержень, который совершал удары о корпус микрофона. В результате этих ударов микрофон вырабатывал импульсы напряжения, которые регистрировал осциллограф.

На рис. 5 изображен график зависимости частоты холостого хода термообратимого двигателя от температуры рабочего тела в камере нагрева.

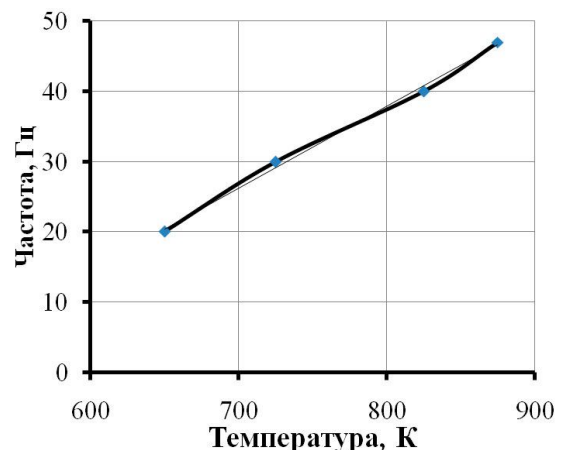


Рис. 5. График зависимости частоты холостого хода термообратимого двигателя от температуры в камере нагрева

Из приведенных выше графиков видно, что с ростом температуры рабочего тела в камере нагрева увеличивается частота и мощность термообратимого двигателя. В исследуемой установке максимальная мощность составила 9 Вт, частота холостого хода – 47 Гц.

Было проведено исследование зависимости мощности двигателя от диаметра отверстия в диафрагме. Для проведения этого эксперимента была изготовлена диафрагма с диаметром отверстия 1 мм, затем отверстие растачивалось до 2, 3, 4 и 5 мм

при этом каждый раз измерялась мощность термообратимого двигателя при постоянной температуре рабочего тела в камере нагрева  $630^{\circ}\text{C}$ .

На рисунке 6 показаны результаты этого исследования. По оси абсцисс откладывался относительный диаметр  $d/D$ , по оси ординат измеренная мощность двигателя.

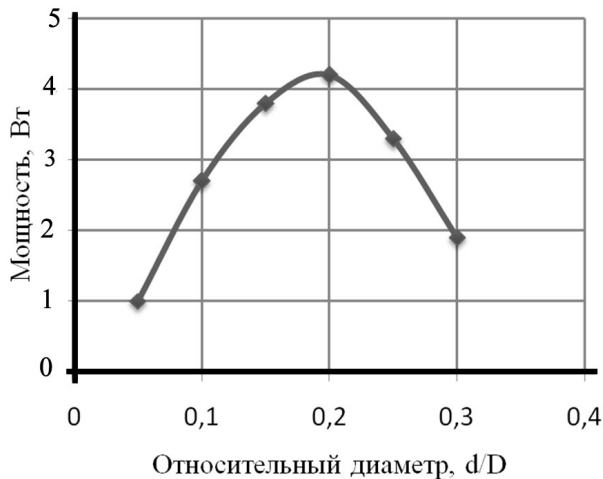


Рис. 6. График зависимости мощности от относительного диаметра отверстия диафрагмы

Из графика видно, что максимальная мощность двигателя достигается при относительном диаметре  $D/d=5$ , что соответствует 4 мм в исследуемом двигателе с диаметром 20 мм.

На рис. 7 показана зависимость давления от температуры в камере нагрева (в неподвижном режиме двигателя).

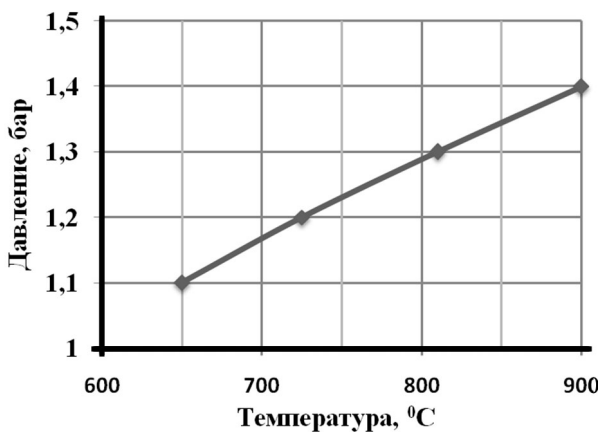


Рис. 7. Зависимость давления от температуры в камере нагрева в неподвижном режиме двигателя

Давление в цилиндре двигателя измерялось при помощи тензометрического датчика давления ЛХ-415, подключенного на вход осциллографа через усилительно-преобразующую аппаратуру типа ЛХ-

5515. Датчик работает в диапазоне от 0 до 500 Гц, диапазоны измерения давления:  $0 \dots 4$  МПа. Датчик был протарирован при помощи образцовых манометров от 1 до 3 атм по 5 точкам. Основная погрешность в пределах  $+0,8\%$ . При помощи этого же датчика давления авторами была построена индикаторная диаграмма двигателя, показанная на рис. 8.

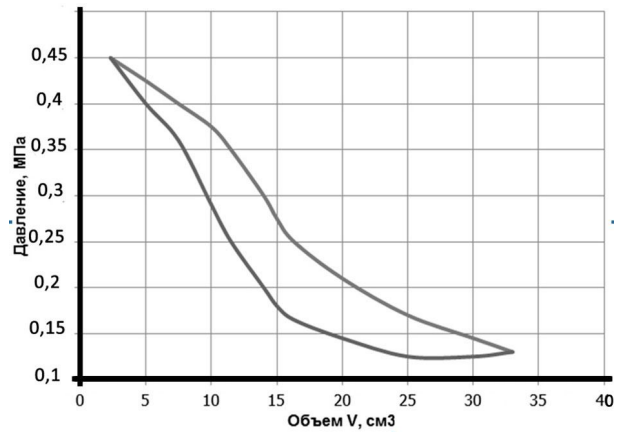


Рис. 8. Индикаторная диаграмма термообратимого двигателя

Индикаторная диаграмма измерялась при температуре рабочего тела в камере нагрева  $800^{\circ}\text{C}$ . Мощность за цикл по индикаторной диаграмме составила около 1,1Вт, что при частоте работы двигателя 8 Гц составляет около 9 Вт.

Для измерения температуры в цилиндре двигателя, через отверстие в поршне, размещён электронный датчик температуры 700-102ВАА-ВОО фирмы Honeywell, чувствительным элементом в котором является платина (RTC), точность датчика 0.12 %. График изменения температуры по ходу поршня (в прямом и обратном режиме) изображён на рис. 9.

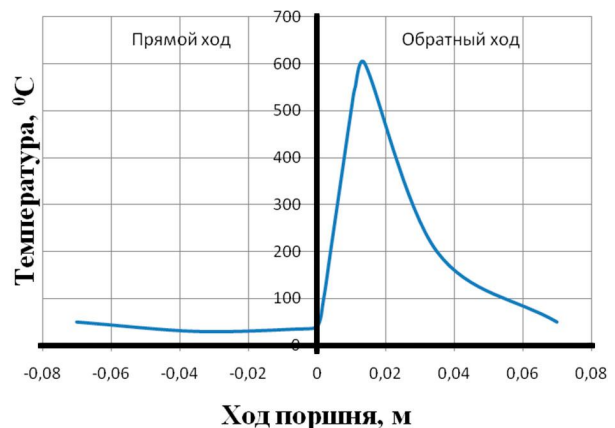


Рис. 9. График изменения температуры по ходу поршня

Из графиков видно, что при прямом ходе поршня (к диафрагме) происходит резкое увеличе-

ние давления и температуры рабочего тела, вследствие резкого нагрева холодного газа в камере нагрева. Это создаёт импульс на поршне, заставляя его перемещаться в обратном направлении (обратный ход).

Авторами были проведены исследования по изучению работы двигателя от концентрированного солнечного излучения (рис. 10).

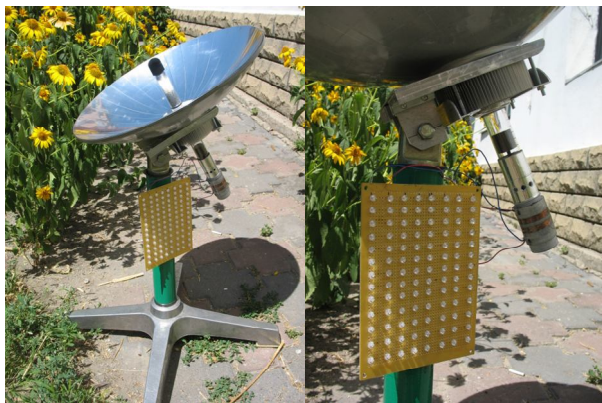


Рис. 10. Термообратимый двигатель в фокусе зеркального параболического концентратора с линейным генератором

Для исследования работы двигателя от солнечного излучения, в термообратимый двигатель был размещен фокус зеркального параболического концентратора с диаметром  $D=450$  мм. Для измерения активности солнечного излучения использовался лабораторный люксметр типа Ю-117. Механическая мощность измерялась, как и в двух предыдущих экспериментах, путём нахождения работы подъёма груза на высоту и делённую на время, а также по электрической мощности на выходе линейного генератора, умноженного на его КПД.

На рис. 11 изображен график зависимости мощности термообратимого двигателя от интенсивности солнечного излучения.

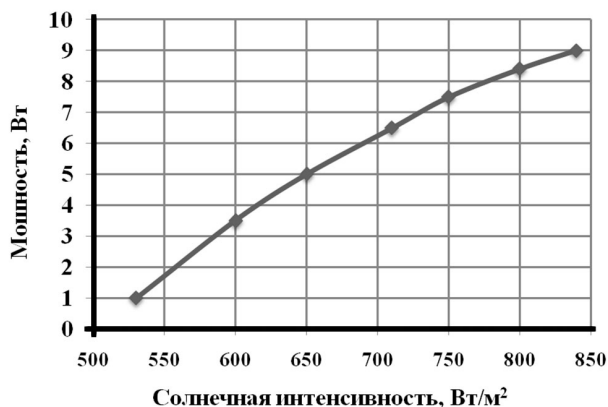


Рис. 11. Мощности термообратимого двигателя от интенсивности солнечного излучения

Как видно из графика, мощность двигателя с увеличением температуры увеличивается пропорционально увеличению солнечной интенсивности. Максимальная мощность составила, как и в предыдущих опытах, 9 Вт.

На рис. 12 изображен график зависимости КПД от интенсивности солнечного излучения.

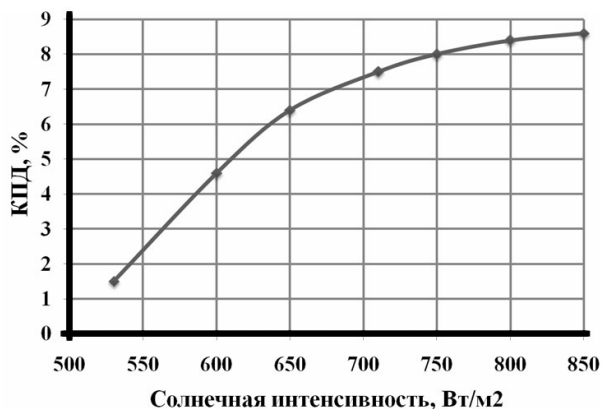


Рис. 11. Зависимость КПД термообратимого двигателя от интенсивности солнечного излучения

Из графика видно, что с изменением солнечной интенсивности меняется и КПД термообратимого двигателя. Это связано с тем, что КПД двигателя, как и любой тепловой машины, зависит от температуры «нагревателя» и температуры «холодильника». С изменением интенсивности солнечного излучения, изменяется температура солнечного пятна в фокусе двигателя и, следовательно, КПД двигателя.

Считается, что свободнопоршневой двигатель, также как и все, должен отдавать часть тепла холодному источнику – атмосфере [5]. Исследования, проведенные авторами, показали, что замена охлаждения цилиндра наоборот на теплоизоляцию позволяет обеспечить его работоспособность и повысить его эффективность. Такой двигатель имеет также как бы «холодный источник тепла», но он образуется в камере нагрева из-за флуктуаций энергии в нем, приводящим к периодической неравновесности параметров в камере нагрева.

Это приводит к выводу, что возможна работа двигателя без внешнего «холодного источника», а для сохранения энергии отработанного газа, необходимо цилиндр, ранее охлаждаемый атмосферой, наоборот теплоизолировать. Это приводит к тому, что энергия газа, оставшаяся после расширения и совершения работы на поршне, обратным ходом поршня возвращается в камеру нагрева. Кроме того в камеру возвращаются и потери на трение в виде тепловой энергии [7].

Для исследования работы двигателя с тепловой изоляцией авторами была изготовлена установка,

показанная на рис. 12.

Установка состоит из камеры нагрева, изготовленной из жаропрочного стекла (1), стеклянного цилиндра (2), подвижного графитового поршня (3) и металлической диафрагмы с отверстием диаметром 4 мм (4).

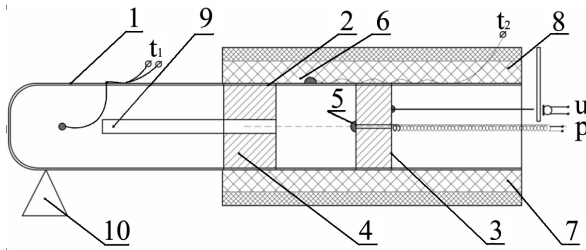


Рис. 12. Схема установки теплоизолированного термообратимого двигателя с датчиками:

- 1 – камера нагрева, 2 – цилиндр, 3 – поршень,
- 4 – диафрагма, 5 – датчик температуры, 6 – термопара (а), 7 – теплоизоляция, 8 – электрическая спираль, 9 – термопара (б), 10 – нагреватель

Снаружи цилиндр покрыт теплоизоляционным материалом (минеральной ватой), поверх которой намотана электрическая спираль. Температура спирали устанавливается такой же, как и температура цилиндра двигателя. Контроль температур цилиндра и спирали контролируется хромель-алюмелевыми термопарами типа К (ТХА) с диапазоном измеряемых температур от -200 до 1300<sup>0</sup>С. В камеру нагрева также помещена хромель-алюмелевая термопара для измерения температуры рабочего тела. На рис. 13 показан график зависимости мощности двигателя от температуры в цилиндре.

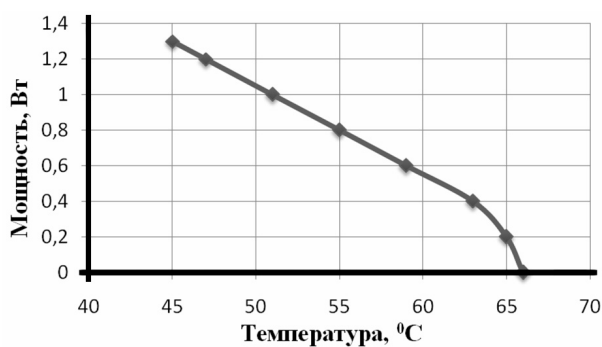


Рис. 13. График зависимости мощности двигателя от температуры в цилиндре

Из графика видно, что с увеличением температуры в цилиндре мощность двигателя падает - это вызвано увеличением работы сжатия газа в цилиндре термообратимого двигателя. При достижении температуры в цилиндре 65<sup>0</sup>С двигатель останавливается.

Температура в цилиндре теплоизолированного термообратимого двигателя зависит от нагрузки и от температуры в камере нагрева.

На рисунке 14 показан график зависимости мощности двигателя от температуры в камере нагрева.

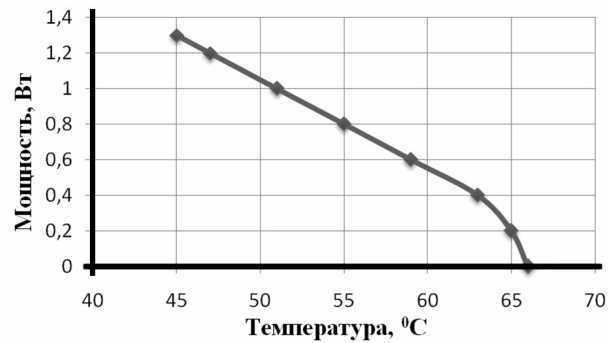


Рис. 14. График зависимости мощности двигателя от температуры в камере нагрева

Из графика видно, что мощность с увеличением температуры в камере нагрева возрастает, но до некоторого критического значения температуры. В исследуемом двигателе она составила 600<sup>0</sup>С.

На рисунке 15 изображен график зависимости температуры в цилиндре двигателя от температуры в камере нагрева.

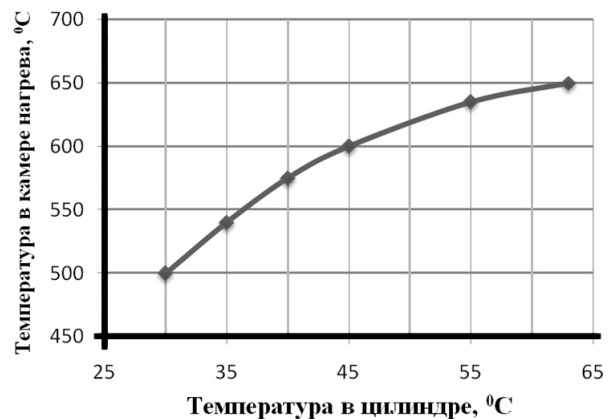


Рис. 15. График зависимости температуры в цилиндре теплоизолированного двигателя от температуры в камере нагрева

Для измерения количества тепла, вводимого в камеру нагрева термообратимого двигателя, в качестве нагревателя использовалась электрическая спираль, мощность которой контролировалась по напряжению и току. Температура спирали измерялась хромель-алюмелевой термопарой, как и в опыте в охлаждаемом двигателе. Для измерения температуры газа внутри камеры нагрева в неё была помещена вторая термопара такого же типа. Выходная мощ-

ность измерялась, также как и в охлаждаемом двигателе, – подъемом груза на высоту. На рисунке 16 показаны два графика зависимости КПД от мощности двигателя теплоизолированного и охлаждаемого двигателей.

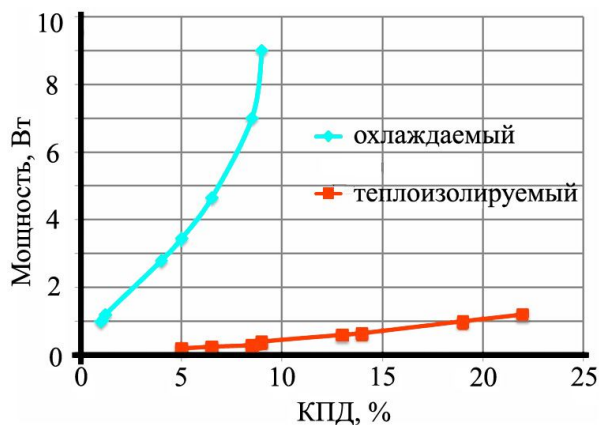


Рис. 16. График зависимости КПД от мощности теплоизолированного и охлаждаемого двигателей

Исследования показывают, что теплоизолированный двигатель имеет меньшую мощность, чем двигатель с охлаждением, однако его эффективность почти в три раза выше.

На рисунке 17 изображён график зависимости КПД термообратимого двигателя от температуры рабочего тела в его камере нагрева двигателя.

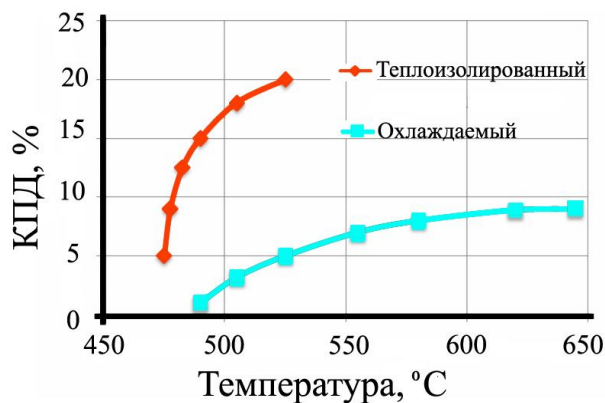


Рис. 17. Зависимости КПД термообратимого двигателя от температуры в камере нагрева

По результатам исследования термообратимого двигателя можно сделать следующие выводы:

1. Работа свободнопоршневого двигателя с внешним подводом тепла возможна без вытеснительного поршня, что делает конструкцию двигателя проще, дешевле и надёжнее.

2. Мощность и частота двигателя возрастают пропорционально увеличению температуры в каме-

ре нагрева.

3. Мощность термообратимого двигателя зависит от диаметра отверстия диафрагмы. Наибольшую мощность двигатель развивает при относительном диаметре  $D/d=5$ .

4. Индикаторная диаграмма и график температуры в цилиндре термообратимого двигателя показывают резкое увеличение температуры и давления газа при его впрыске в камеру нагрева.

5. Возможна работа двигателя от концентрированного солнечного излучения, причем КПД двигателя не постоянен и зависит от интенсивности солнечного излучения.

6. Экспериментально доказана и теоретически обоснована работа двигателя с тепловой изоляцией. Показаны условия работы двигателя с тепловой изоляцией, измерены его характеристики и найдены пути увеличения его эффективности и мощности.

7. Сравнение характеристик теплоизолированного и охлаждаемого термообратимого двигателя показывает, что теплоизолированный двигатель имеет меньшую мощность, чем двигатель с охлаждением, однако его эффективность в три раза выше.

## Литература

1. Fujita, F. *Projected technoeconomic improvements for advanced solar thermal power plants [Text]* / F. Fujita, R. Manvi, E. R. Roshe. – Boston: IECEC, 1979. – P. 39-44.
2. Leibowitz, L. *Advanced solar thermal technology: potential and progress [Text]* / L. Leibowitz, E. Hanseth. – Boston: IECEC, 1979. – P. 66-71.
3. Soldwater, B. *Current free-piston Stirling engine technology and application [Text]* / B. Soldwater. – Boston: IECEC, 1979. – P. 1142-1151.
4. Williams, F. *Comparative economics of small solar thermal electric power systems [Text]* / F. Williams. – Seattle: IECEC 1980. – P. 2019-2025.
5. Ефимов, С. И. *Термодинамические основы цикла двигателя Стирлинга [Текст]: моногр.* / С. И. Ефимов. – Москва: МВТУ, 1979. – 70 с.
6. Уокер, Г. *Двигатели Стирлинга [Текст]: моногр.* / Г. Уокер. – пер. с англ. – Москва, 1985. – 408 с.
7. Сафонов, В. А. *О возможностях использования флуктуаций в энергетических процессах [Текст]* / В. А. Сафонов // Сб. науч. трудов Севастопольского нац. ун-та ядерной энергии и промышленности. – С.: СНУЭиП, 2012. – № 2. – С. 50-58.
8. *Анализ цикла свободнопоршневых машин типа Стирлинга с учетом динамики подвижных частей [Текст]* / А. В. Синев, М. Я. Израйлович, В. Ф. Щербаков, Р. В. Кангун // *Машиностроение и инженерное образование.* – 2005. – № 2. – С. 19-36.

Поступила в редакцию 11.02.2014, рассмотрена на редколлегии 20.05.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф., руководитель севастопольского отделения научно-технического центра В. А. Герлига, НАЭК «Энергоатом» (СНУЯЭиП), Севастополь.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІЛЬНОПОРШНЕВОГО ТЕРМООБОРОТНОГО ДВИГУНА

*В. О. Сафонов, П. М. Кузнецов, І. Л. Белецький*

У даній статті проведено аналіз розробок вільнопоршневих двигунів, працюючих від зовнішнього джерела тепла. Показано переваги використання вільнопоршневих двигунів у порівнянні з іншими силовими енергоустановками. Розглянуто експериментальні дослідження в області роботи вільнопоршневих термозворотних двигунів. Наведено їх експериментальні характеристики: потужність і частота холостого ходу у залежності від температури в камері нагріву, потужність в залежності від діаметра діафрагми та індикаторна діаграма. Досліджено роботу двигуна у залежності від концентрованого сонячного випромінювання. Розглянуто експериментальні дослідження в області роботи теплоізованого термозворотного двигуна. Показано працездатність термозворотного двигуна при наявності теплоізоляції робочого циліндра. Наведено експериментальні характеристики теплоізованого термозворотного двигуна: потужність від температури в циліндрі, потужність від температури в камері нагріву. Описано схему виміральної установки з датчиками. Проведено порівняння роботи теплоізованого і охолоджуваного двигуна.

**Ключові слова:** термоакустичний двигун, термозворотний двигун, зовнішній підвід тепла, двигун зовнішнього згорання.

## EXPERIMENTAL RESEARCH FREE-PISTON THERMOREVERSIBLE ENGINE

*V. A. Safonov, P. M. Kuznetsov, I. L. Beletsky*

This article analyzes the development of free piston engines, working from the outside heat. The advantages of the free piston engines in comparison with other power plants. The experimental research in the field of thermo-Free- engine. The experimental features: power and the idle speed of the temperature in the heating chamber, the power of the relative diameter of the diaphragm, the indicator diagram. Shows the operation of the engine from the concentrated solar radiation. The experimental research in the field of thermo- heat-insulated motor. Efficiency of the motor thermoreversible exclusion heat from the working cylinder of the engine environment. The experimental characteristics of thermally insulated thermo Engine power from the in-cylinder temperature, the power of the temperature in the heating chamber. The illustrated diagram of the measuring system with sensors. A comparison of thermally insulated and cooled engine.

**Keywords:** thermo-reversible engine, external heat input, external combustion engine, the pilot studies.

**Сафонов Владимир Александрович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергосбережения и нетрадиционных источников энергии», Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, Севастополь, Украина.

**Кузнецов Павел Николаевич** – аспирант кафедры «Энергосбережения и нетрадиционных источников энергии», Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, Севастополь, Украина, e-mail: pasha\_2@ukr.net.

**Белецкий Игорь Леонидович** – аспирант кафедры «Энергосбережения и нетрадиционных источников энергии», Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, Севастополь, Украина, e-mail: Physicstoys@yandex.ru.