

УДК 621.433

В.А. САФОНОВ, П.Н. КУЗНЕЦОВ*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности***О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РАБОТЫ
ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ И ТЕРМООБРАТИМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

В данной статье рассмотрены возможности термоакустических и термообратимых двигателей, проведён анализ экспериментальных исследований в области увеличения эффективности работы этих двигателей, а так же их практическое применение. Рассмотрены некоторые особенности работы двигателей с различными материалами в камере нагрева (нержавеющая сталь с различными сплавами, медь, керамические бусинки). Показана работоспособности термоакустического и термообратимого двигателя при исключении теплоотвода от рабочего цилиндра двигателя в окружающую среду.

Ключевые слова: термоакустический двигатель, термообратимый двигатель, внешний подвод тепла, двигатель внешнего сгорания.

Введение

К.П.Д. современных двигателей внутреннего сгорания не превышает, в основном 40%, а АЭС 30%. Почти 70% тепловой энергии отводится через воду в атмосферу. Обращают на себя внимание с точки зрения повышения К.П.Д. двигатели Стирлинга [1 – 4], возвращающие энергию в камеру нагрева через регенератор. Двигатели Стирлинга имеют К.П.Д. до 50% и мощность до 1250 кВт [1], однако они достаточно громоздки, сложные и дорогие.. Термоакустические двигатели также возвращают остаточную энергию (после расширения газа в рабочем цилиндре) в камеру нагрева за исключением убыли энергии за счёт теплопроводности и теплоотдачи в окружающую среду. Оба вида имеют внешний подвод тепла. Если двигатели Стирлинга достаточно известны, то термоакустические двигатели менее исследованы. Из-за внешнего подвода тепла их в ряде случаев относят к двигателям Стирлинга.

Результаты исследований

Общий вид термоакустического двигателя показан на рис. 1:

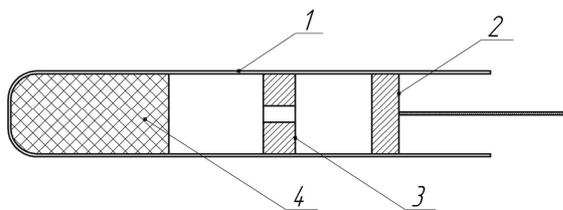


Рис. 1. Общий вид термоакустического двигателя
1 – цилиндр стеклянный, 2 – поршень, 3 – дроссель,
4 – пористый металлический наполнитель

Он представляет собой цилиндр запаянный с одной стороны и открытый с другой. С открытой стороны расположен подвижный поршень, а с запаянной, примерно на 1/3 колбы, - пористый металлический наполнитель. Посередине двигателя находится диафрагма с отверстием (дроссель). Тепло подводится от внешней спиртовки к границе между газом и металлическим наполнителем, выполненным зачастую из тонкой металлической проволоки [6].

При описании работы двигателя авторы ссылаются на термоакустический эффект, который можно наблюдать на так называемой «трубке Рийке» [4]. Суть этого эффекта заключается в том, что при нагреве сетки и наличии тяги возникают сильные звуковые колебания.

Нами были проведены эксперименты, в которых была проверена работоспособность термоакустического двигателя с различными материалами в камере нагрева (нержавеющая сталь с различными сплавами, медь, керамические бусинки). Они показали следующие результаты. При использовании, в качестве наполнителя тонкой проволоки (0,08мм) двигатель начинает работать устойчиво. С увеличении толщины проволоки (от 0,15 до 0,5мм), для запуска двигателя, требуется значительно больше энергии и времени на прогрев. При использовании в качестве наполнителя медной проволоки для запуска двигателя требуется ещё больше тепловой энергии и времени. При использовании керамических бусинок двигатель необходимо долго нагревать для запуска, но работает он устойчиво и при небольшом подводе тепла. На диаграмме 1 показана зависимость мощности двигателя от материала, используемого в двигателе при одинаковом подводе тепла к камере нагрева от одной горелки:

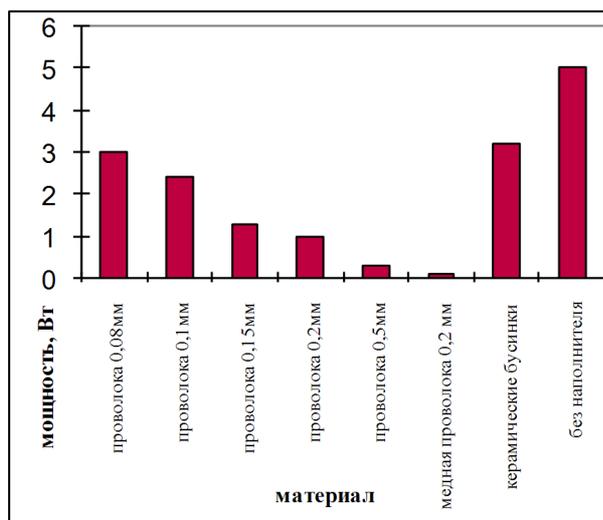


Диаграмма 1. Мощность двигателя при различных материалах

Причину различной мощности двигателя можно объяснить различной теплопроводностью материалов внутри двигателя. Чем больше теплопроводность, тем больше тепла отводится из двигателя во внешнюю среду и это уменьшает его эффективность, вплоть до того, что двигатель перестаёт работать и для его работы необходим ещё больший подвод тепла.

В результате этих экспериментов было обнаружено, что лучше всего двигатель работает вообще без наполнителей в камере нагрева и в основе его работы лежат флуктуации в газовой среде [5]. Такой двигатель мы назвали – термообратимым. Проведенные эксперименты показывает, что продольные колебания возникают и без пористого металлического наполнителя (сетки), при этом эффективность двигателя повышается.

Также были проведены эксперименты по снятию мощности термоакустического и термообратимого двигателя одинакового объема (5 см³) и она составила 3 и 5 Вт соответственно. Температура, газа внутри цилиндра составила около 400⁰С.

В этом двигателе поршень вталкивает газ с остатком энергии в камеру подвода тепла, что позволяет повторно использовать энергию в последующем цикле. Опыты показали, что термообратимый двигатель может быть полностью теплоизолирован, т.е. работать без внешнего «холодного» источника тепла, и более того, тепло может подводиться к газу не только в камере нагрева, но и в рабочем цилиндре в процессе возврата (сжатия) газа в камеру нагрева, что может повысить эффективность использования термообратимого двигателя с точки зрения её энергонапряженности.

Для этого проведены эксперименты целью которых являлась проверка работоспособности термоакустического двигателя при исключении теплоот-

вода от рабочего цилиндра двигателя в окружающую среду. Для исключения теплоотвода в окружающую среду цилиндр с подвижным поршнем был хорошо теплоизолирован пенополистиролом, а к камере нагрева подводилось тепло от одного или нескольких тепловых источников, равномерно прогревающих камеру нагрева (рис. 2). В результате этих экспериментов обнаружилось, что двигатель с теплоизоляцией не только сохранил свою работоспособность, но и стал работать лучше – увеличилась его выходная мощность, так как увеличился возврат энергии. На рис. 2 показана работа двигателя с теплоизоляцией:

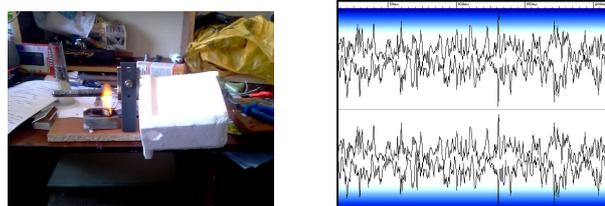


Рис. 2. Работа термоакустического двигателя с теплоизоляцией

Так как опыты носили, в большинстве случаев, качественный характер, то для убежденности в работе двигателя с теплоизоляцией были проведены опыты не только с теплоизоляцией цилиндра, но и при некотором подводе энергии от дополнительной горелки к цилиндру, предотвращающей теплоотвод от цилиндра, к «холодному источнику тепла». Более того, были проведены опыты с металлическим цилиндром, имеющим теплопроводность, примерно, в 80 раз больше, чем у камеры нагрева, сделанной из стекла. Это позволило подвести ещё больше тепла к газу внутри металлического цилиндра и даже больше, чем к камере нагрева. После прогрева установки она эффективно работала некоторое время, а затем мощность убывала и она останавливалась. Это происходило из-за того, что количество возвращаемого тепла превышало предельно допустимое балансом энергии, подводимой к камере нагрева, и суммой возвращаемого тепла и работы на поршне. Особенностью работы такого двигателя является то, что все потери энергии на трение возвращаются, при теплоизоляции, в камеру нагрева.

На рис. 3 показана работа двигателя от двух горелок (одна подводит тепло к камере нагрева, а другая греет цилиндр) для абсолютного исключения теплоотвода в окружающую среду:

Привлекательным является нагрев термообратимого двигателя ядерным топливом. Учитывая многослойную изоляцию реактора, различные защиты от излучения и соответственно возможность теплоизоляции при невысоком общем термическом К.П.Д. термообратимого двигателя, использующим

внешний нагрев от горелки, эффективность АЭС может быть повышена за счёт возврата не использованной энергии в зону нагрева и хорошей теплоизоляции. Такая же ситуация возможна и на тепловых станциях. Недостатком такого цикла будет малая мощность установки.



Рис. 3. Работа двигателя от двух горелок.
а – металлический цилиндр,
б – стеклянный цилиндр.

Однако меньшая мощность АЭС, преобразующей тепловую энергию в механическую обеспечит и большую безопасность. Такие преобразователи энергии будут полезны на малых АЭС.

Т.е. если говорить о К.П.Д. внутреннего цикла без учёта энергии горелки, то оно определяется:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 – подведенное к газу тепло, Q_2 – отведенное тепло.

Это означает, что Q_2 - это относительно малая величина, определяется теплопроводностью и теплопередачей во внешнюю среду и тогда, если камера нагрева достаточно теплоизолирована, - это может иметь место в АЭС, где достаточно много радиационных защит, биологических экранов и т.д. Таким образом, если тепло к газу будет подводиться от реактора, то К.П.Д. термоакустического и термообратимого двигателя может приближаться в пределе к единице (за минусом тепловых потерь) и будет определяться степенью совершенства нагревателя (котла, реактора и т.д.). Если учитывать потери тепла при нагреве камеры сгорания от горелки, то К.П.Д. будет значительно ниже. Однако мощность такого двигателя будет невелика.

К достоинствам этого двигателя, кроме высокого внутреннего коэффициента полезного действия относится его экологичность, так как он не имеет выхлопа, и его «всеядность», так как этот двигатель работает от любого источника тепла, подводимого к его рабочему телу. Для превращения тепловой энергии в механическую, к двигателю можно подвести тепло с тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), или концентрированную солнечную энергию. Таким образом, этот двигатель можно внедрить как на

атомных станциях, так и на солнечных станциях, делая их более безопасными (за счёт исключения воды, являющейся источником взрывоопасного водорода) и энергетически более эффективными.

Представляется полезным использовать термообратимый двигатель на атомной станции как показано на рис. 4:

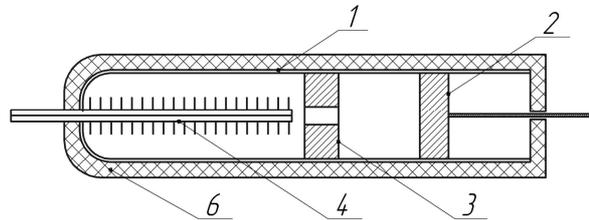


Рис. 4. Термообратимый двигатель с тепловыделяющим элементом:
1 – цилиндр, 2 – поршень, 3 – дроссель,
4 – тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ),
5 – теплоизоляция

Суть установки заключается том, чтобы подать тепловую энергию тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) рабочему телу в термообратимом двигателе. Это позволит увеличить коэффициент преобразования тепловой энергии, которая отводится от тепловыделяющих элементов, в результате ядерной реакции распада радиоактивных веществ, а также позволит увеличить безопасность атомной станции так как будет исключена вода из термодинамического цикла атомной установки. В качестве замедлителя может быть использован графит (вместо позиции 5 на рисунке 3). Механическая энергия может быть использована для привода различных устройств: электрического генератора, насоса и т.д.

Выводы

1. В термоакустическом двигателе работоспособность уменьшается с ростом толщины проволоки, используемой в качестве пористого металлического наполнителя в камере нагрева двигателя в связи с ростом теплопроводности и, как следствие - большим теплоотводе от камеры нагрева в окружающую среду.

2. Возможна работа двигателя, названного термообратимым, без наполнителя в камере нагрева.

3. Не использованная энергия в рабочем цилиндре возвращается в камеру нагрева, повышая эффективность преобразования тепловой энергии.

4. Термоакустические и термообратимые двигатели работают при теплоизоляции рабочего цилиндра. Такой двигатель целесообразно использовать в качестве привода на атомных установках имеющих значительное количество защит, а следовательно и хорошую теплоизоляцию.

5. При теплоизоляции рабочего цилиндра эффективность возрастает за счёт возврата большей доли не использованной энергии при расширении в цилиндре, а так же некоторое время при дополнительном подводе тепла к рабочему цилиндру двигателя.

6. Термоакустические и термообратимые двигатели могут работать без внешнего «холодного» источника тепла.

Литература

1. Двигатели Стирлинга [Текст]: моногр. / М.Г. Круглов, В.Н. Даниличев, С.И. Ефимов, В.А. Звонов. – М.: Машиностроение, 1977. – 150 с.

2. Ридер, Г.Т. Двигатели Стирлинга [Текст]: моногр. / Г.Т. Ридер, Ч.К. Хупер.; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.

3. Уокер, Г. Двигатели Стирлинга [Текст]: моногр. / Г. Уокер; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с.

4. Раушенбах, Б.В. Вибрационное горение [Текст]: моногр. / Б.В. Раушенбах. – М.: Машиностроение, 1961. – 500 с.

5. Сафонов, В.А. О возможностях использования флуктуаций в энергетических процессах / В.А. Сафонов // Сб. науч. трудов СКУАЭИП. – Севастополь: СКУАЭИП, 2012. – Вып. 2. – С. 50 – 58.

6. Ефимов, А.В. Термоакустический двигатель / А.В. Ефимов, В. Кузнецов, В. Квитко // Двигатель: научно-технический журнал. – М., 2009. – №3 (63). – С. 123 – 128.

Поступила в редакцию 12.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

ПРО ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ТА ТЕРМООБОРОТНИХ ДВИГУНІВ

В.О. Сафонов, П.М. Кузнецов

В даній статті розглянуті можливості термоакустичних і термооборотних двигунів, проведено аналіз експериментальних досліджень в області збільшення ефективності роботи цих двигунів, а так само їх практичне застосування. Розглянуто деякі особливості роботи двигунів з різними матеріалами у камері нагріву (нержавіюча сталь з різними сплавами, мідь, керамічні намистини). Показана працездатності термоакустичного та термооборотного двигуна при виключенні тепловідведення від робочого цилиндра двигуна в навколишнє середовище.

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

ABOUT SOME FEATURES OF WORK OF THERMOSONIC AND THERMOREVERSIBLE ENGINES

V.A. Safonov, P.N. Kuznetsov

Possibilities of thermosonic and thermoreversible engines are considered in this article, the analysis of experimental researches is conducted in area of increase of efficiency of work of these engines, and similarly their practical application. Some features of work of engines are considered with different materials in the chamber of heating (stainless steel with different alloys, copper, ceramic beads). Rotined the capacity of thermosonic and thermoreversible engine at the exception of heatsink from the working cylinder of engine in an environment.

Keywords: thermosonic engine, thermoreversible engine, external admission of heat, engine of external combustion.

Сафонов Владимир Александрович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергосбережения и нетрадиционных источников энергии» Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности, Севастополь, Украина.

Кузнецов Павел Николаевич – аспирант кафедры «Энергосбережения и нетрадиционных источников энергии» Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности, Севастополь, Украина, e-mail: pasha_2@ukr.net.