

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУ-  
ДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**Термоакустические генераторы электрической энергии  
(обзор)**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 2 курса 2225 группы  
направления «Физика» Института физики  
Филонова Егора Васильевича

Научный руководитель

д.ф.-м.н. профессор

Петров В.В.

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н. профессор

Аникин В.М.

Саратов 2022

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Термоакустические генераторы электрической энергии в наши дни переживают второе рождение во много благодаря их уникальным экологическим характеристикам. Концентрация вредных веществ в продуктах сгорания термоакустических генераторов электрической энергии на несколько порядков ниже, чем у поршневых и газотурбинных двигателей и, что не менее важно, минимальные шумы у них не превышают 60-65 дБ. Они незаменимы там, где необходимо преобразовывать тепловую энергию в механическую. Развитие современной техники и технологий тесно связано с поиском альтернативных источников энергии, в первую очередь электрической. Актуальным остается фактор увеличения объема её производства. Кроме того, приоритетной целью является уход от традиционного использования углеводородного сырья и выработка энергии экологически чистым путём. Это диктуется возможностью истощения традиционных энергетических ресурсов на Земле. В наши дни усилия прогрессивных исследователей направлены на развитие «зеленой» энергетики, в которой особенно остро нуждается вся планета.

Обозначенным целям удовлетворяет такой источник энергии как термоакустические генераторы электрической энергии. Термоакустические генераторы состоят из двух основных узлов: *термоакустического двигателя*, который преобразует тепловую энергию внешнего источника в энергию акустической волны, и *электрического преобразователя*, который эту самую акустическую энергию трансформирует уже в электрическую. Возможно использование практически любых источников теплового потока, даже при небольших перепадах температур, малоэффективных с других точек зрения их применимости. При этом попутно решается параллельная проблема утилизации излишнего теплового загрязнения окружающей среды. Последнее обстоятельство в последние годы является весьма актуальным в связи с ростом озабоченности мировой индустрии экологическими проблемами.

В качестве исходной тепловой энергии, которую следует преобразовать в электрическую, можно использовать широкий спектр ее источников. Здесь можно ограничиться стандартной энергией, получаемой в маломощной топке, но возможно применение и менее традиционных, даже экзотических источников. К ним можно отнести и тепловую энергию, получаемую при нагреве твердой поглощающей поверхностью Солнцем, и утилизацию тепловых потерь в трубопроводах, печных трубах, выхлопных трубах автомобилей и другие.

**Цель выпускной квалификационной работы (ВКР)** – провести научный обзор по теме «Термоакустические генераторы электрической энергии» с выявлением проблем в практическом использовании термоакустических генераторов и перспектив их использования.

**Структура ВКР.** Работа состоит из введения, 8 разделов, заключения, списка использованных источников. Общий объем – 45 с.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В работе рассмотрены следующие вопросы:

Физические принципы, лежащие в основе работы термоакустических двигателей (ТАД).

Коэффициент полезного действия ТАД.

Типы приборов (двигатели Стирлинга, одноступенчатые ТАД, многоступенчатые ТАД).

Варианты преобразователей акустической энергию в электрическую  
Конструкции теплообменников.

Области применения ТАД.

Мощные ТАД (до 50 Киловатт электроэнергии).

Перспективы использования ТАД.

**Физические принципы.** Термоакустические преобразователи (ТАП) относятся к новому классу энергетических систем, способных преобразовывать тепловую энергию в полезную механическую работу (термоакустические двигатели – ТАД) посредством использования акустических волн, либо использовать энергию акустической волны для генерации холода (термоакустические холодильники – ТАХ) В основе их работы лежит сложный комплекс физических процессов, основанный на взаимодействии явлений акустической, теплофизической и газодинамической природы.

Обычно используется методика, с помощью которой на уровне предпроектной проработки можно получить предварительные конструктивные параметры проектируемого термоакустического преобразователя – двигателя или холодильной машины на стоячей волне.

Основными элементами термоакустических преобразователей являются: теплообменник подвода тепла, теплообменник отвода тепла (возможен дополнительный теплообменник), регенератор, линейный электрогенератор – для преобразователей прямого цикла (альтернатор), пульсатор – для криогенераторов (рис. 1).

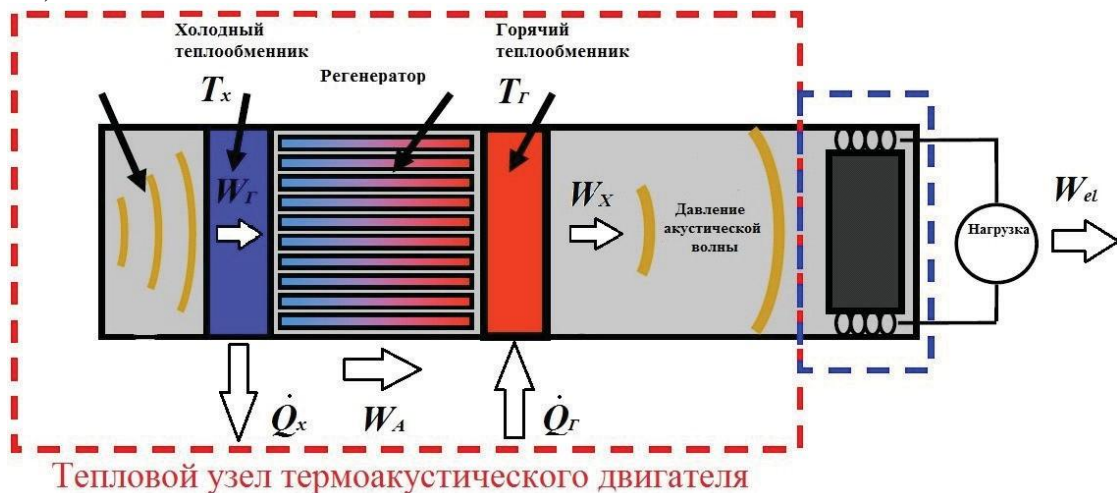


Рис. 1. Схема теплообменного узла ТАД

Основным элементом, генерирующим пульсации газа (например, для ТАД), является регенератор, представляющий собой пористую структуру (в идеале – капиллярная с продольными каналами, на практика чаще всего – пакет сеток).

Современное толкование рабочего процесса основано на принципе Релея. Оно заключается в следующем. Так как в регенераторе в направлении перемещения волны сформирован градиент температуры, то при осциллирующем движении газа около некоторого среднего положения (рис. 2) он в крайних своих положениях испытывает попеременное сжатие с нагревом и отдачей тепла и расширение с охлаждением и подводом тепла от поверхности регенератора.

Осуществляемый элементарным объемом газа термодинамический цикл, результатом которого является работа деформации, обеспечивает подпитку энергией бегущей волны (для ТАД), либо использование энергии волны для реализации обратного цикла (для ТАХ).

Существующая модель цикла, совершаемого элементарным объемом осциллирующего газа, интерпретирован как цикл Стирлинга. Однако следует отметить, что с таким же результатом можно представить его как цикл Брайтона или Карно, и это не повлияет на результаты сравнения.

Механизм передачи энергии цикла к газу до конца не уточнен, а экспериментально его изучение весьма затруднительно.

Если рассмотреть двигатель (ТАД), то расположенные по обеим сторонам регенератора теплообменники подвода тепла  $Q_{\Gamma}$  и отвода тепла  $Q_{\chi}$ , служит для усиления акустической мощности. Благодаря этому входная мощность волны  $W_{\chi}$  на холодном конце регенератора возрастает до значения  $W_{\Gamma}$  на горячем конце. Разность между  $W_{\Gamma}$  и  $W_{\chi}$  представляет собой акустическую мощность  $W_A$ , вырабатываемую регенератором.

Эффективность преобразования тепла в энергию, снимаемую с электрогенератора (как правило, это линейный электрогенератор), можно выразить следующей формулой:

$$n_e = n_i \times n_{mp} \times n_{эл} = \frac{W_A}{W_{\Gamma}} \frac{W_M}{W_A} \frac{W_{el}}{W_M},$$

где  $\eta_e$  – электроакустическая эффективность преобразователя,  $W_A$  – акустическая мощность,  $W_M$  – диссипативные потери мощности,  $W_{el}$  – выходная электрическая мощность. Очевидно, что отношение  $W_A$  к подведенному в установку теплу  $Q_{\Gamma}$  будет характеристикой совершенства преобразования тепла в энергию волны.

$$n = \frac{W_A}{Q_{\Gamma}}.$$

В некоторых источниках эта величина обозначается как КПД регенератора. На самом деле этот критерий относится ко всему тепловому узлу преобразователя и является аналогом индикаторного КПД, теплового двигателя. Под  $n_{mp}$  понимается отношение поглощенной в механической части электрогенератора волновой мощности  $W_M$  (с учетом возврата части этой энергии обратно в рабочий контур) к генерируемой акустической мощности  $W_A$ . Индекс «*mp*» здесь предла-

гаются интерпретировать еще и как учет всех видов потерь генерируемой волновой энергии во внутреннем контуре ТАП. Электрический КПД генератора  $\varepsilon_{эл}$  относится непосредственно к электрической части преобразователя.

Для холодильной машины (ТАХ) эффективность преобразования тепла можно выразить следующей формулой холодильного коэффициента:

$$\varepsilon_e = \varepsilon_i \times \varepsilon_A \times \varepsilon_{\Gamma} = \frac{Q_X W_A W_{\Gamma}}{W_A W_{\Gamma} W_M}$$

Здесь первый коэффициент  $\varepsilon_i$  является внутренним (термоакустическим) холодильным коэффициентом, показывающим отношение количества генерируемого холода к акустической мощности  $W_A$ , поглощаемой в регенераторе для реализации обратного термодинамического цикла. Второй коэффициент  $\varepsilon_A$  - степень преобразования входной (в регенератор) мощности волны  $W_2$  в акустическую мощность  $W_A$ . Третий коэффициент  $\varepsilon_{\Gamma}$  характеризует отношение мощности волны  $W_{\Gamma}$  к подводимой извне механической энергии, например, от пульсатора. Приведенные формулы для эффективности ТАП прямого и обратного циклов могут иметь более подробную структуру.

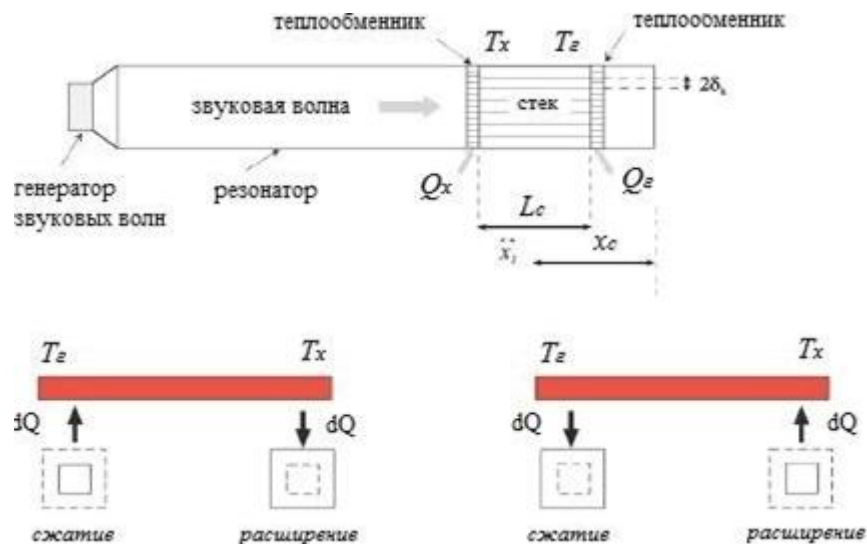


Рис. 2. Схема термоакустического преобразователя

**Типы приборов. Двигатели Стирлинга.** Двигатель Стирлинга содержит внутри себя рабочее тело (газ), который периодически то нагревается, то охлаждается. Нагрев – внешний. Конструкций двигателя известно очень много, но общий принцип заключается в том, что есть большой цилиндр, где находится неплотный поршень – вытеснитель. Одна часть цилиндра холодная, другая – горячая. Если вытеснитель находится в горячей части, то основная часть рабочего тела вытеснена в холодную – и остывает. Если вытеснитель в холодной части – рабочее тело нагревается. Рабочее тело, нагреваясь, двигает силовой поршень, который приводит в движение маховик. Маховик связан с помощью рычагов с вытеснителем, вращаясь, он периодически смещает вытеснитель то в горячую, то в холодную часть. Часто исполь-

зуют тепловой аккумулятор - регенератор (металлическую стружку, например, или шарики), который свободно пропускает газ, отбирая у него тепло – или наоборот, возвращая тепло. Это повышает качество работы двигателя, уменьшая потери. У него нет карбюратора, форсунок с высоким давлением, системы зажигания, клапанов, свечей. Давление в цилиндре, хотя и повышается почти до 200 атм, но не взрывом, как в двигателе внутреннего сгорания, а плавно. На двигателе не нужны глушители. Может использовать любое топливо. По стоимости и по весу пока уступают ДВС. В ДВС с помощью радиатора отводится 20-25% тепла, в двигателе Стирлинга – до 50%, то есть нужен радиатор в 2-2.5 раза мощнее обычного.

Рабочий цикл протекает в 4 этапа:

*Первый этап.* Происходит нагрев воздуха (или другого газа) в основании цилиндра. Разогретый внутри его воздух создает давление, которое заставляет рабочий поршень двигаться вверх. Вытеснительный поршень имеет одну важную особенность – неплотное прилегание к стенкам цилиндра.

*Второй этап.* Приведенный в действие маховик (благодаря ему работа обоих поршней строго синхронизирована) с помощью толкающей штанги «отправляет» вытеснительный поршень вниз, который в свою очередь выдавливает разогретый воздух вверх в охлаждающую камеру.

*Третий этап.* В камере воздух остывает и сжимается, давая возможность рабочему поршню опуститься вниз.

*Четвертый этап.* Вытеснительный поршень движется вверх, одновременно вытесняя охлажденный воздух в основание цилиндра, после чего цикл возобновляется.

Семейство двигателей Стирлинга представлено четырьмя видами – Альфа, Бета (принцип его работы описан выше), Гамма и роторным. У каждого из них свои конструктивные особенности. У Альфа два цилиндра, один из которых оснащен охлаждающим радиатором, а в нижней его части осуществляется нагрев. В рабочих камерах обоих цилиндров установлены поршни. Усилия от поршневой группы передаются на коленчатый вал, соединенный шарниром с поршнем и вытеснителем.

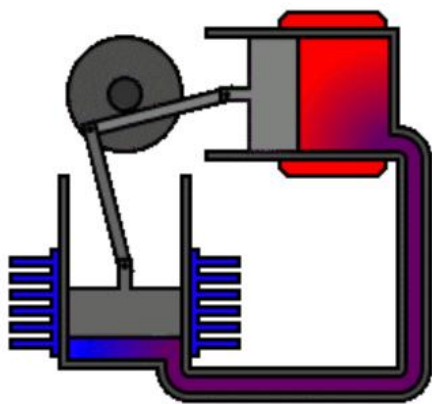


Рис. 3 Альфа-двигатель Стирлинга

**Варианты преобразователей акустической энергии в электрическую.** Акустические волны возбуждаются и принимаются путём преобразо-

вания колебаний некоторого физического поля в упругие колебания и, наоборот, с помощью устройств, которые называются преобразователями акустических колебаний или просто преобразователями (таблица 1).

**Таблица 1. Классификация преобразователей акустических колебаний**

Классификационные признаки	Классификационные группировки
Выполняемые функции	Излучатель; приёмник; совмещённый; раздельно-совмещённый
Физические явления, положенные в основу преобразования (принцип преобразования)	Электроакустический; электромагнитно-акустический; лазерный и другие
Акустический контакт	Контактный; иммерсионный; бесконтактный
Конструкция	Прямой; угловой (призматический). Плоский; фигурный

**Области и перспективы применения ТАД.** Использование двигателей Стирлинга (ДС) в когенерационных установках (рис. 4) позволяет одновременно обеспечивать электроэнергией и теплом небольшие районы. КПД некоторых современных стирлинг-генераторов доходит до 95 %. Тепловые насосы на базе ДС работают подобно кондиционерам. Правда, они используются не для охлаждения помещений или воды, а для нагрева. ДС могут работать, как холодильные установки.

ДС найдут свое применение и в солнечной энергетике, где его устанавливают в фокус параболического зеркала, обеспечивающего постоянную «подсветку» зоны нагрева (рис. 5).



Рис. 4. Когенерационная установка



Рис. 5. Солнечная электростанция с ДС

**Практическое применение термоэлектрических преобразователей** многообразно. Следует в этой связи отметить следующие области:

1. Автономные энергетические установки с термоакустическими генераторами электрической энергии незаменимы в нефтегазовой промышленности при освоении новых месторождений, особенно в условиях Крайнего Севера и шельфа арктических морей, где нужна серьезная энерговооруженность разведочных, буровых, сварочных и других работ.

В этих условиях в качестве топлива можно будет использовать неочищенный природный газ, попутный нефтяной газ, добываемый совместно с нефтью, и газовый конденсат. Столь широкий спектр топлив делает термоакустические генераторы электрической энергии универсальными источниками энергии. Таким образом, исчезает проблема с обеспечением энергией буровых скважин, вахтовых поселков, узлов связи и других автономных систем.

В настоящее время только в Российской Федерации ежегодно пропадает до 50 млрд. м<sup>3</sup> попутного газа, который выходит вместе с нефтью. Собрать его сложно и дорого, использовать в качестве моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания нельзя из-за постоянно меняющегося фракционного состава, и чтобы газ не загрязнял атмосферу, он попросту сжигается. Однако этот газ может быть приемлемым моторным топливом для энергетических установок с термоакустическими генераторами электрической энергии.

По предварительным расчетам, термоакустический генератор электрической энергии мощностью 100 кВт, работающий на природном или попутном нефтяном газе, сможет обеспечить электроэнергией и теплом вахтовый поселок газовиков, нефтяников или геологов численностью до 50 человек. Отпадает необходимость завозить топливо с материка и не наносить ущерб природе, поскольку минимизируются вредные выбросы.

2. Серийное производство электрогенераторов небольшой мощности с модификацией двигателя Стирлинга под местное биотопливо: торф, отходы сельского хозяйства и лесоперерабатывающей промышленности. Новая технология открывает широкие возможности для снабжения электроэнергией и теплом не газифицированных сельских районов, поселков, фермерских хозяйств, животноводческих ферм, птицефабрик и т.д. Она также поможет решить многие проблемы жилищно-коммунальных хозяйств городов;

3. Автономные источники питания электроэнергии для обеспечения работоспособности котельных агрегатов, установок по переработке отходов и др.;

использование в полезных целях отводимого от различных двигателей и силовых установок (автомобильных, корабельных и др.) тепла, которое бесполезно рассеивается;

4. Обеспечение питанием разнообразных устройств электроники, телеметрии и автоматики на объектах, удаленных от линий электропередачи, например, в геологических партиях;



5. Преобразование тепла природных источников, таких, например, как геотермальных вод, гейзеров, солнечной радиации, в электрическую энергию;

6. Источники питания для катодной защиты нефте- и газопроводов;

7. Измерение тепловых потоков (тепломеры).

*К серьезным преимуществам* использования такого вида преобразователей можно отнести следующие факторы:

длительная работа без трудоемкого технического обслуживания;

использование теплоты от любых источников тепловой энергии;

полная независимость от среды использования;

эксплуатация независимо от расположения в пространстве;

отсутствие механически движущихся частей;

использование одноступенчатой статической системы преобразования первого рода.

## ВЫВОДЫ

За последние годы термоакустика шагнула вперед, начав разработки во многих областях техники. Например, в энергетике – и использование тепловых источников для производства электроэнергии; в криогенике – создание высокоресурсных компрессоров и тепловых насосов без подвижных частей; в медицине – питание электронных протезов (слуховых аппаратов, сердца, почек и др.) за счет тепла организма.

Термоакустические генераторы электрической энергии можно использовать в качестве источника энергии для освещения.

Современная мировая энергетика развивается в направлении децентрализации энергоснабжения, которое оказывает содействие созданию автономных когенерационных установок и максимального использования возобновляемых источников энергии. Исключительное свойство термоакустических генераторов электрической энергии, как двигателя с внешним подводом теплоты, позволяет применять не только традиционные виды топлива, но также все без исключения виды альтернативных топлив, известных в настоящее время в мире, например, биогаз, уголь, отходы деревообрабатывающей промышленности и сельского хозяйства, солнечную, атомную, высокопотенциальную теплоту дымовых газов и любые другие виды энергии, делает их особенно привлекательными в связи с использованием энергии из возобновляемых источников. Термоакустические генераторы электрической энергии можно использовать во всех областях, где требуется преобразование тепловой энергии в механическую.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Swift G.W. Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators // *Acoust. Soc. Am.*, 2002.
2. Swift G.W. Thermoacoustic engines // *Acoust. Soc. Am.*, 84(4), 1145-1180, 1988.
3. Design environment for low amplitude thermoacoustic engines (DeltaE 6.3b11.12) / W.C. Ward, G.W. Swift URL: [www.lanl.gov/thermoacoustics](http://www.lanl.gov/thermoacoustics) - 2012 (дата обращения 14.10.2013).
4. General formulation of thermoacoustics for stacks having arbitrarily shaped pore cross sections / W. Pat Arnott, Henry E. Bass, R. Raspet // *Acoust. Soc. Am.*, 90(6), 3228-3237, 1991.
5. Wetzel M., Herman C. Experimental study of thermoacoustic effects on a single plate Part I: Heat transfer // *Heat and Mass Transfer*, 36 (2000), pp.7– 19, Springer-Verlag, 2000.
6. Wetzel M., Herman C. Design optimization of thermoacoustic refrigerators // *Int. J. Refrig.* 20(1), pp. 3-21, Elsevier Science Ltd, 1999.
7. Patcharin S. Thesis Application of thermoacoustic technologies for meeting the refrigeration needs of remote and rural communities in developing countries. University of Leicester
8. Reid, R. S. Open cyclic thermoacoustics, PhD thesis, Georgia Institute of Technology 1999.
9. Inoue M., Sakamoto SI., The effect of resonance mode control by expanding of cross-section area on cooling capacity in a loop-tube type thermoacoustic cooling system. *J. Acoustical Society of America*, 2013. 133 (5):3232.
10. Sahashi K., Sakamoto S. Fundamental study for a working mechanism of phase adjuster set on thermoacoustic cooling system. *Int. Congr. Ultrasonics*. 2012. 1433. P. 613–619.
11. Kang HF, Zhou G, Li Q. Heat driven thermoacoustic cooler based on travelling-standing wave. *Energ. Convers Manage*, 2010, 51 (11), p. 2103–2108.
12. Hasegawa S, Yamaguchi T, Oshinoya Y. A thermoacoustic refrigerator driven by a low temperature-differential, highefficiency multistage thermoacoustic engine. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 58 (1-2), p. 394–399.
13. Jin T., Zhang, B., Tang, K., Bao, R. and Chen, G. B., Experimental observation on a small-scale thermoacoustic prime mover. *Journal of Zhejiang University science*. 2007. A 8 (2), p. 205–209.
14. Wilcox A. Jr. Experimental investigation of a thermoacoustic Stirling engine electric generator with Gideon streaming, PhD thesis, Penn State University, 2011.
15. Luo E. C., Hu J. Y., Dai W., Wu Z. H., Yu G. Y., Li H. B. A double-acting single-stage travelling-wave thermoacoustic system. Chinese Invention Patent. No 201110101971. 2011.
16. Nekrasova S. O., Zinovyev E. A., Dovgyallo A. I. Numerical investigation on a 70 Hz Pulse Tube Micro-cryocooler. *Procedia Engineering*, 2016. Vol. 152. pp. 314–320.
17. Reader G., Hooper C. Stirling engines. London, E. & F. N. Spon, 1986. 462 p.
18. Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга. М. : Мир, 1986. 462 с.
19. Jingyuan X., Guoyao Y., Limin Z., Wei D., Ercang L. Theoretical analysis of two coupling modes of a 300-Hz three-stage thermoacoustically driven cryocooler system at liquid nitrogen temperature range // *Appl. Energ.* 2016. Vol. 185. P. 2134–2141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.055>.
20. Довгялло А. И., Шиманов А. А. Возможность использования импульсной двунаправленной турбины в термоакустическом двигателе // *Вестн. СГАУ*. 2015. Т. 14, № 1. С. 132–138. DOI: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-132-138.
21. Yang R., Wang Y., Jin T., Feng Y., Tang K. Development of a three-stage looped thermoacoustic electric generator capable of utilizing heat source below 120 °C // *Energ. Convers. Manage.* 2018. Vol. 155. P. 161–168. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.084>.

22. Yu Z., Jaworski A., Backhaus S. Travelling-wave thermoacoustic electricity generator using an ultra-compliant alternator for utilization of low-grade thermal energy // *Appl. Energ.* 2012. Vol. 99. P. 135–145. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.046>.

23. Ceperley P. H. A pistonless Stirling engine – the traveling wave heat engine // *J. Acoust. Soc. Am.* 1979. Vol. 66, № 5. P. 1508–1513. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.383505>.

24. Зиновьев, Е.А. Методика расчёта режима запуска термоакустического двигателя: диссертация на соискание степени кандидата технических наук: 05.07.05. – Самара, 2019. – 125 с.

25. Тронев О.С., Кульков В.Г. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ // *Международный студенческий научный вестник.* – 2018. – № 5.