

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БАЛАНСОВ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

Аннотация: в данной статье производится анализ энергетических балансов термоакустических холодильников на бегущей и стоячей волне, так как существуют проблемы с проектированием надежных и экономичных термоакустических систем охлаждения, данный анализ поможет определить какой из типов холодильников является наиболее эффективным для применения на термоакустических двигателях.

А.Ю. Пулькина,

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва

Московское шоссе, 34,
г. Самара, Российская Федерация,
443086

Pulkina93@yandex.ru

Ключевые слова: термоакустический холодильник; бегущая волна; стоячая волна; эффективность

1 Введение

Термоакустическое охлаждение представляет собой технологию получения низких температур на основе энергетического переноса тепла звуковой волной. Периодические расширения и сжатия объемов газа, в сочетании с передачей тепла от газа к регенератору, организованы термоакустического холодильника. В настоящее время существует значительный интерес к термоакустическим системам охлаждения т.к. они имеют несколько преимуществ:

- использование в качестве рабочего тела экологически безопасных газов;
- простота конструкции, непрерывная мощность охлаждения;
- низкий уровень шума;
- возможность сочетания холодильной установки с устройством прямого цикла утилизирующего тепло от источника (солнечная энергия, биотопливо и др).

Однако, существуют технические проблемы, связанные с проектированием и разработкой эффективных, надежных и эконо-

мичных термоакустических систем охлаждения (ТСО).

Первым практическим применением термоакустического эффекта как принципа работы ТСО были устройства, предложенные Свифтом. На основе теории линейной термоакустики [1] и опытных образцов в лаборатории института в Лос-Аламосе (США) были сделаны первые выводы и основные рекомендации по проектированию ТСО.

Для оценки эффективности термоакустического холодильника используется холодильный коэффициент, который находится как:

$$COP_{ref} = COP_i \cdot COP_{effint},$$

где $COP = Q_{load} / Q_{input} = (Q_{input} - Q_{leak}) / Q_{input}$.

Акустический (или внутренний) холодильный коэффициент $COP_{ac} = Q_{input} / W_{ac_net}$;

Эффективность цикла Карно $COP_{carnot} = T_{cold} / (T_{hot} - T_{cold})$;

Холодильный коэффициент относительно Карно $COPR = COP_{ref} / COP_{carnot}$.

2 ТСО НА ОСНОВЕ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Рассмотрим энергетические характеристики термоакустического охладителя Triton (рис. 1), который представляет собой двойной резонатор Гельмгольца, в качестве регенератора использован керамический стек. Давление заправки составило 3МПА, рабочий газ – смесь гелия и аргона. В качестве привода использовалась специально-разработанный электромагнитный динамик мощностью 2 кВт. С помощью ПО Delta ES, были рассчитаны основные характеристики охладителя данного типа, результаты сведены в табл. 1 и изображены на графиках (рис. 2 и 3).



Рисунок 1 – Термоакустический охладитель Triton

Таблица 1 - Параметры охладителя Triton

Qc, Вт	COP	ϵ_{res}	ϵ_{alt}	COP_{carnot}	COPR
2161	62	60.1	91%	15.7	3.6

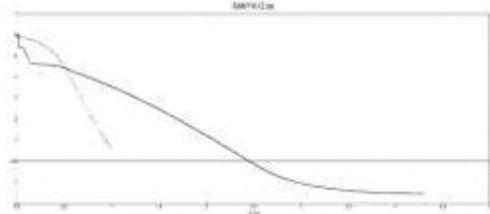


Рисунок 2 – Изменение амплитуды давления по длине

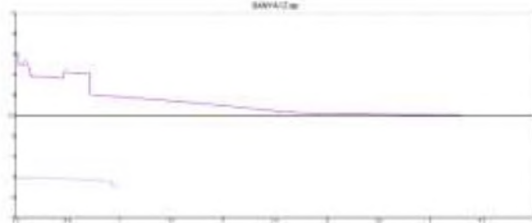


Рисунок 3 – Изменение потока мощности

Таким образом, ТСО на основе стоячей волны имеет большую плотность акустической энергии, однако сильно зависит от конструктивных параметров т.к. создание акустического фазирования параметров дав-

ления и скорости зависит от размеров и характеристик регенератора(стека), и резонатора. Холодильный коэффициент относительно Карно (COPR), имеет диапазон величин 10...20% для различных температур охлаждения. [2] Термоакустические охладители с относительно небольшой температурной разницей на регенераторе могут иметь COPR ниже 10%. Зависимость между относительным холодильным коэффициентом и разницей температур на регенераторе для термоакустических холодильников представлена на рис. 4.

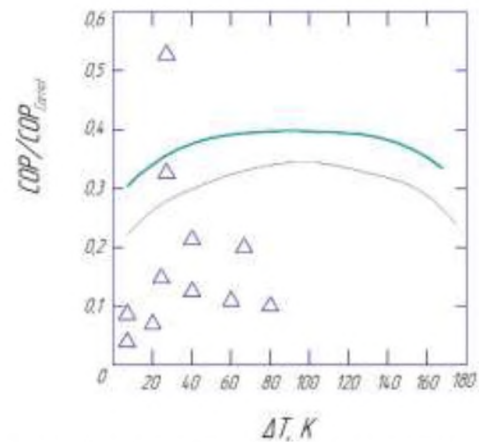


Рисунок 4 – Зависимость между относительным холодильным коэффициентом и разницей температур на регенераторе

Холодильники на стоячей волне характеризуются не высокими холодильными мощностями, кроме того производительность ТСО очень чувствительна к выбору конструктивных параметров и нуждаются в оптимизации конструкции для достижения приемлемой эффективности.

3 ТСО НА ОСНОВЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Термодинамический цикл ТСО на основе бегущей волны (рис. 5) идентичен циклу холодильных машин Стирлинга, в которой вытеснитель и поршень испытывают трение, ударные нагрузки и работают в областях низких температур.

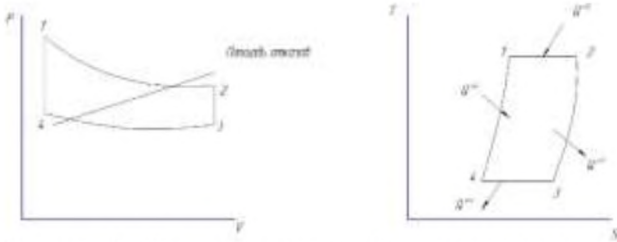


Рисунок 5 – Термодинамический цикл Стирлинга для ТСО на основе бегущей волны

Термоакустические холодильники ТСО лишены этих недостатков, и фазирование давления и скорости в них осуществляется за счет распространения бегущей волны в специально-сконструированных резонаторах. В холодильниках Стирлинга область сжатия прилегает к холодному поршню. Техническая проблема герметизации вокруг поршня при криогенных температурах была основной мотивацией для разработки ХПТЖ (холодильник на основе пульсационной трубы с жиклером), как альтернативы для криохолодильников Стирлинга.

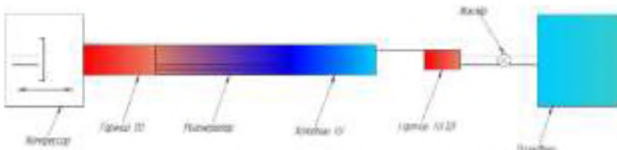


Рисунок 6 – Схема охладителя на пульсационной трубе

В строгом смысле, ХПТЖ не являются системами на основе стоячей или бегущей волн, по причине специфического фазирования между давлением и объемной скоростью, хотя имеют теоритический узел давления вблизи дросселя, подобно холодильнику на основе стоячей волны. В ХПТЖ часть энергии рассеивается на жиклере и выводится из системы через вспомогательный теплообменник, тогда как в холодильнике Стирлинга энергия передается в вытеснительную камеру, а затем возвращается поршню компрессора посредством механической связи.

Недостатки ХПТЖ:

- управление фазово-временной связью между объемной скоростью и давлением легко выполнено в холодильнике Стирлинга

за счёт кинематической связи, но ограничена в ХПТЖ;

- в ХПТЖ невозможно достичь таких вы-соких степеней сжатия, а значит и плотно-сти энергетического потока, как в холо-дильнике Стирлинга, из-за остающихся «паразитных» объёмов под газодинамиче-ские пружины;

- реальная теплопроводность в ХПТЖ из-за больших температурных градиентов сни-жает эффективность установки значительно сильнее, чем термическая диссипация вследствие трения и других потерь на холодном поршне в холодильнике Стирлинга.

Также недостатком ТА ХПТЖ является то, что энергия рассеивается в дросселе, уменьшая эффективность системы. Способы восстановления этой части мощности в ХПТЖ без уменьшения простоты и надежности представлены в [3].

При температуре 255 °С получена холо-допроизводительность холодильника 9 % от КПД Карно. С прямыми усовершенствова-ниями подобные холодильники должны до-стигнуть COPR, больше чем их предше-ствующие холодильники с пульсационной трубой и предшествующие термоакустиче-ские холодильники на основе стоячей вол-ны, подтверждая преимущество термоаку-стической технологии преимущества отсут-ствия подвижных частей.

ТСО на бегущей волне, обладают боль-шей эффективностью и так же легко соче-таются с термоакустическими двигателями, применяемыми в качестве привода.

Для оценки эффективности термоакусти-ческого холодильника используется холо-дильный коэффициент, который находится как:

$$COP_{ref} = \varepsilon_{refrigerator} = \varepsilon_i \cdot \varepsilon_{effint},$$

где $\varepsilon = \frac{Q_{load}}{Q_{input}} = \frac{Q_{input} - Q_{leak}}{Q_{input}}$;

$$\varepsilon_{ac} = \frac{Q_{input}}{W_{ac_net}} - \text{ акустический (или внутренний) холо-дильный коэффициент;}$$

$$\varepsilon_{int} = \frac{W_{ac_net}}{W_{ac_alt}} - \text{коэффициент преобразования}$$

энергии от альтернатора к акустической затрачиваемой регенератором холодильной машины на пе-рекачку тепла;

$$\varepsilon_{alt} = \frac{W_{ac_alt}}{W_{el}} - \text{коэффициент преобразования}$$

электриче-ской энергии, подводимой к альтернатору в акустическую энергию в контуре резонатора;

$$COP_{carnot} = \frac{T_{cold}}{T_{hot} - T_{cold}} - \text{эффективность по}$$

Карно;

$$COPR = \frac{COP_{ref}}{COP_{Carnot}} - \text{Холодильный}$$

коэффициент относительно Карно.

Результаты расчета ТА холодильника на бегущей волне сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты расчета ХТО на бегущей волне

Параметр	Значение	Размерность
Рабочее тело	гелий	
Давление заправки	$3,358 \cdot 10^6$	Па
Рабочая частота	54,3	Гц
Амплитуда колебания давления в резонаторе	$2,64 \cdot 10^5$	Па
Температура на холодном теплообменнике	300	К
Температура на горячем теплообменнике нагрузки	724	К
Генерируемая электрическая мощность (без учета БУ)	320	Вт
КПД преобразования тепловой энергии в акустическую	24	%
КПД компрессора (без учета КПД БУ)	87	%

3 Заключение

Конструкция всех традиционных систем предполагает наличие подвижных частей. С данной точки зрения можно предположить, что они являются менее надежными и более дорогими в изготовлении, чем термоакустические устройства. Тем не менее, инвестиции в их разработку вкладывались десятилетиями, что позволило добиться высокой надежности, а полученный за это время опыт производства позволил снизить их стоимость. Кажется, что термоакустические системы имеют громадный потенциал, что проявляется в их сравнительно высокой надежности и низком уровне стоимости из-за отсутствия подвижных частей, необходимости использования дорогих материалов и сплавов, и жестких допусков. Реализация этого потенциала – один из объектов исследования в термоакустике.

Как показали результаты исследования, ХТО на бегущей волне являются более производительными по сравнению с ХТО на стоячей волне. Их использование на установках поможет увеличить выработку мощности двигателя в целом.

Список использованных источников

- [1] Swift G.W. Acoustic recovery of energy losses in the refrigerator nicks on the basis of the pulse tube // National Laboratory of Los Ala-mos, New Mexico. 1998
- [2] Patcharin S. Thesis Application of thermoacoustic technologies for meeting the refriger-ation needs of remote and rural communities in developing countries // the University of Leicester. 2014
- [3] 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), 205-209

A.Yu. Pulkina

Samara National Research University

34, Moskovskoe shosse, Samara,
443086, Russian Federation

Pulkina93@yandex.ru

**COMPARISON OF ENERGY BALANCES
THERMOACOUSTIC REFRIGERATORS**

Abstract: this article analyzes the energy balances of thermoacoustic refrigerators on a running and standing wave, since there are problems with the design of reliable and economical thermoacoustic cooling systems, this analysis will show which type of refrigerator is the most effective.

Key words: *thermoacoustic refrigerator; traveling wave; standing wave; efficiency.*

References

- [1] Swift G.W. Acoustic recovery of energy losses in the refrigerator nicks on the basis of the pulse tube // National Laboratory of Los Alamos, New Mexico. 1998.
- [2] Patcharin S. Thesis Application of thermoacoustic technologies for meeting the refrigeration needs of remote and rural communities in developing countries // the University of Leicester. 2014
- [3] 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), 205-209