

УДК 62–97/98

## Проблемы и перспективы систем охлаждения с термоакустическим приводом

Канд. техн. наук В. Н. БЕЛОЗЕРЦЕВ

vick.belozertzew@yandex.ru

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева

А. Ю. ПУЛЬКИНА

Pulkina93@yandex.ru

Научно-образовательный центр газодинамических исследований

*Рассмотрены конструктивные схемы теплоиспользующих систем охлаждения (ТСО) на основе термоакустических холодильников (ТАХ) с приводом от термоакустических двигателей (ТАД) на стоячей или бегущей волне. Для приведенной классификации ТСО выполнено численное моделирование теплоиспользующего привода на основе ТАД с внешним подводом тепла в программном пакете Delta EC. Основанная на теории линейной термоакустики Delta EC является в настоящий момент стандартом в разработке термоакустических устройств прямого и обратного цикла. На основе полученных для фиксированных значений конструктивных размеров зависимостей производительности ТАД сделаны выводы по способам форсирования показателей ТАД как привода с целью организации рабочего процесса в холодильном контуре. Произведенная на основе характеристик производительности ТАД и сведениям из публикаций сравнительная оценка доказывает перспективность использования теплоиспользующих систем с термоакустическим приводом.*

**Ключевые слова:** теплоиспользующие системы охлаждения, термоакустический привод, коэффициент полезного действия, Delta EC, холодопроизводительность.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 29.06.2017, принята к печати 28.07.2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-3-41-46

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Белозерцев В. Н., Пулькина А. Ю. Проблемы и перспективы систем охлаждения с термоакустическим приводом // Вестник Международной академии холода. 2017. № 3. С. 41–46.

## Heat-driven thermoacoustic refrigerators: issues and prospects

Ph.D W. N. BELOZERTZEW

vick.belozertzew@yandex.ru

Samara University

A. Yu. PULKINA

Pulkina93@yandex.ru

The Scientific and Educational Center for Gas Dynamic Research

*The article deals with different design schemes of thermoacoustic refrigerators (TAR) driven by a thermoacoustic engine (TAE) on a standing or traveling wave. Numerical models of such heat-driven engines based on TAE with an external heat supply were developed by Delta EC software, which, based on linear thermoacoustics theory, is now the standard in developing thermoacoustic engines of direct and reverse cycle. For the obtained TAE capacity dependencies based on the fixed design dimensions the ways of TAE boosting were investigated with respect to general workflow in refrigerating circle. Comparative evaluation based on TAE capacity parameters and available scientific data from literature review proves the prospects for the use of heat-driven systems with thermoacoustic engine.*

**Keywords:** thermoacoustic engine, heat-driven refrigerator, thermal efficiency, Delta EC cooling capacity.

### Article info:

Received 29/06/2017, accepted 28/07/2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-3-41-46

Article in Russian

### For citation:

Belozertzew W. N., Pulkina A. Yu. Heat-driven thermoacoustic refrigerators: issues and prospects. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 3. p. 41–46.

## Введение

Термоакустическое охлаждение представляет собой технологию получения низких температур на основе энергетического переноса тепла в волновом процессе. Первым практическим применением термоакустического эффекта были устройства прямого и обратного цикла, предложенные Свифтом и лабораторией LANL [1]. На основе теории линейной термоакустики [2] и опытных образцов в лаборатории института в Лос-Аламосе (США) были сделаны первые выводы и основные рекомендации по проектированию термоакустических двигателей (ТАД) и холодильников (ТАХ).

Интерес к теплоиспользующим системам охлаждения (ТСО) с приводом от ТАД объясняется тем, что они имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными холодильными машинами, в том числе с холодильными машинами, выполненными на основе цикла Стирлинга. К таким преимуществам относится использование экологически безопасных для человека рабочих тел, увеличенный ресурс и надежность за счет отсутствия специальных компрессоров. В качестве привода ТСО используются ТАД с внешним подводом тепла (солнечная энергия, вторичное тепло и др). Возможности комбинирования термоакустического холодильника (ТАХ) на стоячей или бегущей волне [1, 3, 4] или холодильника на пульсационной трубе [12, 13] с различными типами генераторов пульсаций [5–9] создает довольно широкий спектр ТСО в самом широком диапазоне температур охлаждения и конструктивных схем. Приводимый в публикациях [3–10, 12, 13] опыт проектирования ТСО с приводом от ТАД на стоячей или бегущей волне касается проработки исключительно конкретного схемного решения ТСО. При этом чаще всего не приводятся параметры производительности ТСО и привода на основе ТАД, способы их повышения с целью получения минимальной температуры охлаждения.

## Цели и задачи исследования

Целью данного исследования является сравнительная оценка преимуществ и недостатков различных схемных решений ТСО, формулировка рекомендаций по повышению производительности привода ТСО.

Задачи исследования предполагают:

- сравнение ТСО с приводом от ТАД с традиционными машинами Стирлинга по типу и мощности привода, уровню охлаждения;

- численное моделирование двух основных типов ТАД в целях повышения холодопроизводительности ТСО за счет увеличения мощности привода.

- на основе параметров рабочего процесса для заданных конструктивных размеров ТАД рассмотрение способов повышения эффективности привода на бегущей и стоячей волне.

- обоснование перспективности применения ТСО, как энергоресурсосберегающей технологии, методом получения большей холодопроизводительности ТСО за счет увеличения количества подводимого тепла (в т.ч. утилизируемого), используемого термоакустическим приводом для генерации пульсаций.

## Теплоиспользующий термоакустический охладитель на бегущей волне среднего уровня охлаждения с термоакустическим генератором пульсаций на стоячей волне

Для оценки производительности ТАХ и ТАД используем следующие параметры в обозначениях: акустический (внутренний) холодильный коэффициент  $COP_{ref} = Q_{cold} / W_{ac}$ ; коэффициент преобразования тепловой энергии в акустическую, генерируемую ТАД  $\eta_{ТАД} = W_{ac} / Q_h$ ; холодильный коэффициент относительно цикла Карно  $COPR = COP_{ref} / COP_{Carnot}$ , где  $COP_{Carnot} = T_{cold} / (T_{hot} - T_{cold})$ . Рассмотрим схему ТСО, показанную на рис. 1, где в качестве привода используется ТАД на стоячей волне, резонатор которого включает в себя коаксиальный контур термоакустического холодильника (ТАХ) на бегущей волне [2, 3]. Пульсации давления, генерируемые в ТАД, проходя через четвертьволновой резонатор, осуществляют обратный термодинамический цикл в контуре ТАХ.

Несмотря на достигнутый в ТАХ средний уровень температуры охлаждения около 230...240 К и холодопроизводительности  $Q_x = 133 \div 140$  Вт, уровни эффективности  $COP_{ref} = 0,56$ ,  $COPR = 0,23$ , достигнутые в данном схемном решении ТСО, сравнимы с традиционными пароконденсационными установками, что подтверждает перспективность использования данной схемы ТСО. Простота конструкции и возможность длительной бесперебойной работы обеспечивается приводом от ТАД. Отсутствие компрессорной установки устраняет необходимость выполнения требований к уплотнениям и смазке, а трение в цилиндропоршневой паре не снижает ресурса работы.

В программном пакете Delta ЕС определены размеры резонатора, теплообменников и регенератора ТАД и произведен расчет основных характеристик (рис. 1, а). Для цилиндрического резонатора с диаметром 60 мм резонансная частота составила 45÷50 Гц при давлении заправки воздухом  $p_m = 10^6$  Па и отношении амплитуды давления к давлению заправки в диапазоне 5÷6%. Анализ зависимости внутреннего КПД двигателя  $\eta_{ТАД}$  от количества подводимого тепла (рис. 2) показал, что при увеличении количества подводимого тепла возможен рост внутреннего КПД двигателя до предельных значений 0,19...0,2, амплитуда давления в резонаторе при этом увеличивается в два раза, что повышает уровень холодопроизводительности ТАХ до 180...187 Вт.

При достижении значения  $Q_r = 900$  Вт и выше, дальнейшего увеличения КПД не происходит. Это объясняется тем, что подводимое на горячем теплообменнике тепло не приводит к росту  $W_{ак}$  в регенераторе, а расходуется на возрастающие тепловые потери. Таким образом, при заданных габаритах резонатора форсирование привода ТСО возможно только в достаточно узком диапазоне и, в основном, только за счет изменения количества подводимой тепловой энергии.

Невысокий уровень холодопроизводительности  $Q_x$  и уровень температуры охлаждения, сравнимый с пароконденсационными машинами ( $t_x = -15...30$  °С) для данной схемы ТСО можно объяснить сравнительно невысоким значением КПД преобразования тепла в акустическую энергию  $\eta_{ак}$  и значительными потерями акустической

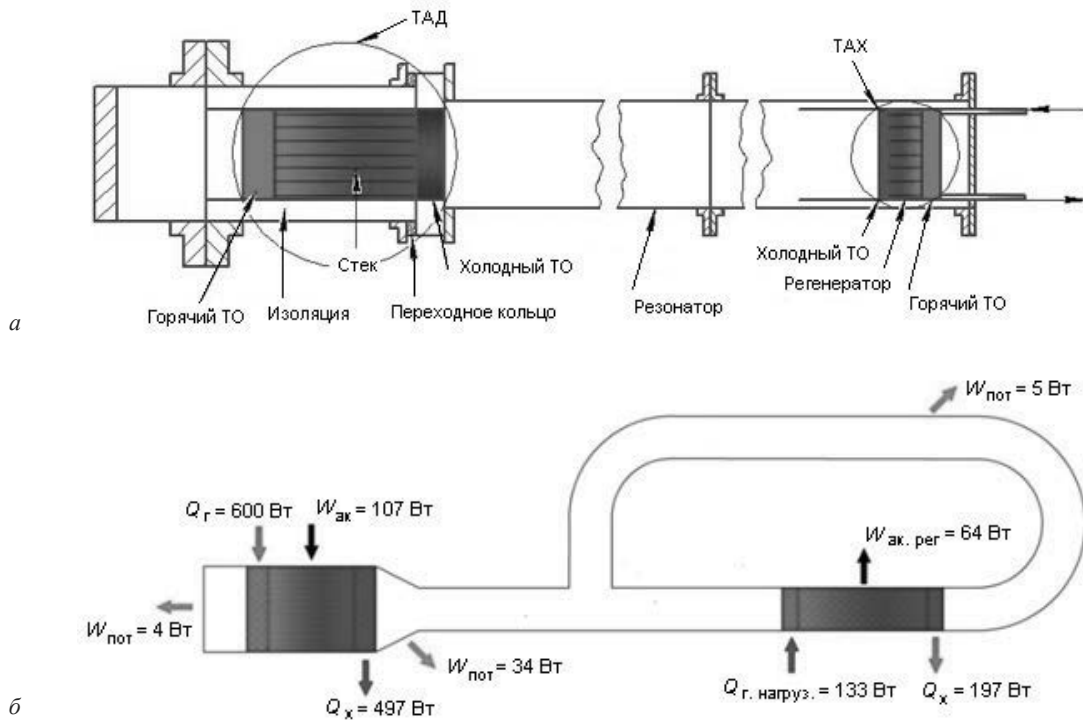


Рис. 1. Схема охладителя на бегущей волне с приводом от ТАД на стоячей волне (а); энергетические потоки в ТАХ на стоячей волне и ТАД на бегущей волне (б)  
 Fig. 1. Refrigerator on travelling wave driven by TAE on standing wave (a); energy flow in TAR on standing wave and TAE on traveling wave (b)

мощности по длине резонатора  $W_{потери}$  (см. рис. 1, б). Поскольку при использовании в качестве привода холодильника двигателя на стоячей волне требуемая длина резонатора рассчитывается исходя из длины волны  $\lambda = cf$ , где  $c$  — скорость звука,  $f$  — частота, то исходя из того, что рабочие частоты охладителей на основе бегущей волне лежат в диапазоне 50÷80 Гц, длины резонаторов для установок, заполненных воздухом (четвертьволновой резонатор) составят 1,82÷1,137 м, при заправке гелием — 8,152÷5,095 м. Вследствие больших габаритов и малых значений температуры охлаждения такие ТСО с приводом от термоакустического двигателя на стоячей волне будут иметь перспективы использования только в качестве крупногабаритных ТСО с утилизацией вто-

ричного тепла производственных циклов, например, в системах осушки воздуха промышленных предприятий.

### Теплоиспользующий ТАХ на бегущей волне среднего уровня охлаждения с термоакустическим генератором пульсаций на бегущей волне

Термоакустические холодильники на бегущей волне могут иметь различные конструктивные схемы, отличающиеся формой резонатора: коаксиальной [3], тороидальной [4] или аналогичной термоакустическому двигателю на бегущей волне [5]. В последние годы существует интерес к подобным комбинированным конструкциям на бегущей волне, где ТАД на бегущей волне используется в качестве холодильной установки [6, 7]. Использование в качестве привода ТАД на бегущей волне, несмотря на большие габариты установок, объясняется значениями  $\eta_{ТАД} = 23\div40\%$ , сравнимыми с уровнем эффективности традиционных двигателей Стирлинга.

Конструктивная схема таких термоакустических холодильников содержит инерционную трубу, акустическую податливость, горячий и холодный теплообменники, регенератор, тепловую буферную трубку (аналогично пульсационной трубе) и трубу обратной связи. ТАХ на основе цикла Стирлинга, рассчитанный Kang H. F. с соавторами в работе [8], имел следующие характеристики: резонансную частоту 85 Гц, холодильную мощность равную 30 Вт при уровне охлаждения  $-20$  °С и холодильную мощность 100 Вт при уровне охлаждения 0 °С. Позже, на основе этой конструкции, был создан

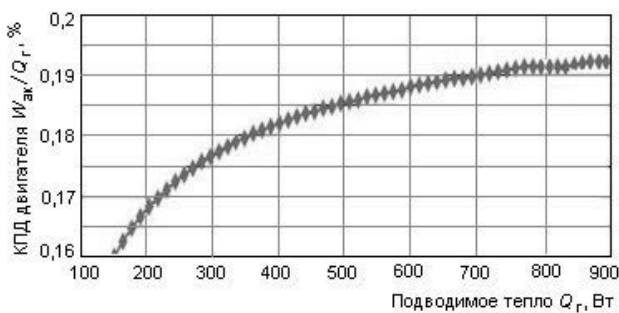


Рис. 2. Рассчитанная на основе модели Delta EC зависимость внутреннего КПД ТАД  
 Fig. 2. The dependence of internal efficiency for TAE calculated with the use of Delta EC

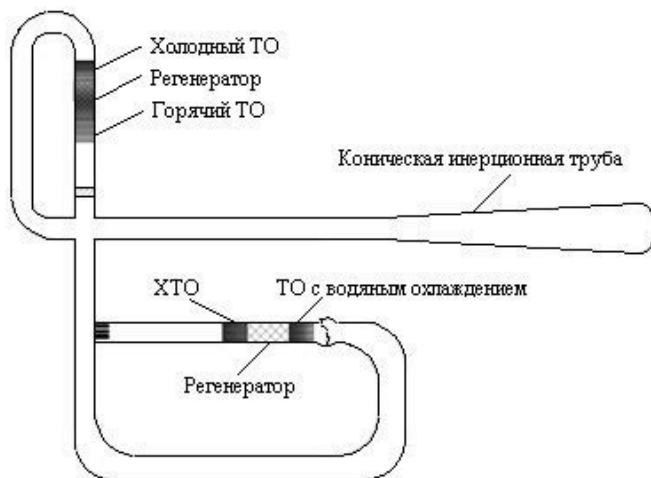


Рис. 3. ТАХ на бегущей волне с приводом от термоакустического двигателя на бегущей волне

Fig. 3. TAR on traveling wave driven by TAE on travelling wave

охладитель, схема которого показана на рис. 3, где в качестве генератора пульсаций давления использовался ТАД на бегущей волне.

При давлении заправки гелием  $p_m = 3$  МПа температура составила  $t_x = -65$  °С, а при режиме с уровнем холодильной мощности  $Q_x = 270$  Вт температура составила  $t_x = -20$  °С [9]. Термодинамический цикл ТСО на основе

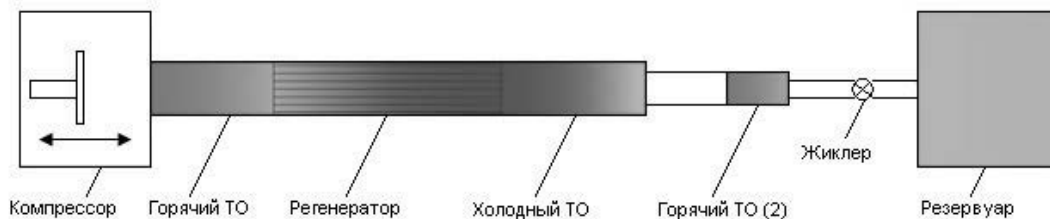


Рис. 4. Схема ХПТЖ

Fig. 4. pulse tube cryocooler (PTC) with jet

бегущей волны идентичен циклу холодильных машин Стирлинга и обладает, сравнимыми с машинами Стирлинга, уровнями холодильных коэффициентов. Однако ТСО таких конструктивных схем (см. рис. 3) громоздки и не могут быть использованы для условий с повышенными требованиями к массогабаритным характеристикам.

### Криогенные охладители на пульсационной трубе с приводом от ТАД на бегущей волне

Дальнейшее развитие технологий разработки микрокриогенных систем (МКС) на базе газовых холодильных машин Стирлинга обусловило появление конструкции криоохладителей на пульсационной трубе с жиклером (ХПТЖ) (рис. 4), что позволило отказаться от поршня в холодной зоне. Фазирование давления и скорости в ХПТЖ осуществляется за счет специально сконструированных резонаторов, что позволяет реализовать ХПТЖ с приводом от ТАД на бегущей волне.

Криогенный ХПТЖ с использованием ТАД в качестве привода не имеет в составе конструкции движущихся компонентов за исключением осциллирующего движения рабочего газа. Это исключает у таких систем наличие вибраций, ограничений по ресурсу и других недостатков, связанных с компрессорной частью. Кроме того, возможность использования солнечной энергии в качестве источника тепла в термоакустическом двигателе (ТАД) делает весьма привлекательной технологию применения его в качестве привода холодильной машины в условиях космоса. Комбинирование ХПТ и ТАД позволяет получить криогенный уровень охлаждения 88,6 К [12] и 80,9 К [13], исключая при этом нежелательные для длительного ресурса работы явления, снизить стоимость, повысить эффективность за счет снижения потерь на промежуточные преобразования энергии.

Рассмотрим в качестве привода ХПТЖ, рассчитанный в работе [14], ТАД на бегущей волне компактной схемы (рис. 5), который состоит из теплового узла (1-3), расположенного коаксиально относительно буферной трубки (5). Импеданс составляющих обратной акустической связи реализует фазирование параметров потока рабочего тела внутри регенератора, соответствующее бегущей волне.

Данный термоакустический двигатель был разработан в Penn State University (США) [10] как компактный электрогенератор с внешним подводом тепла и двумя

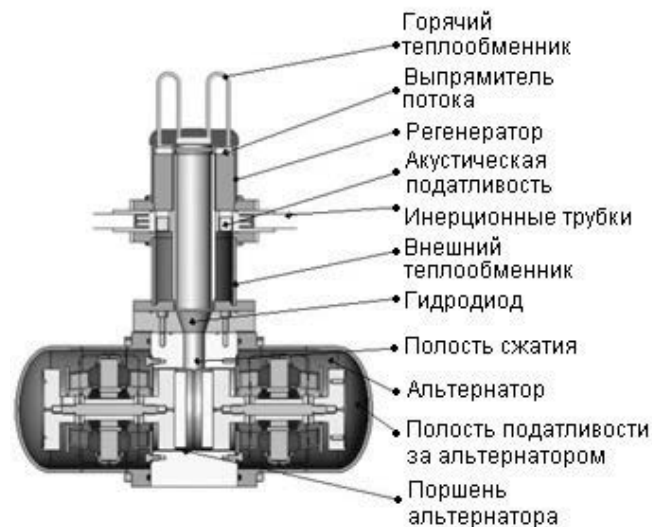


Рис. 5. Коаксиальный термоакустический двигатель на бегущей волне

Fig. 5. Coaxial thermoacoustic engine on travelling wave

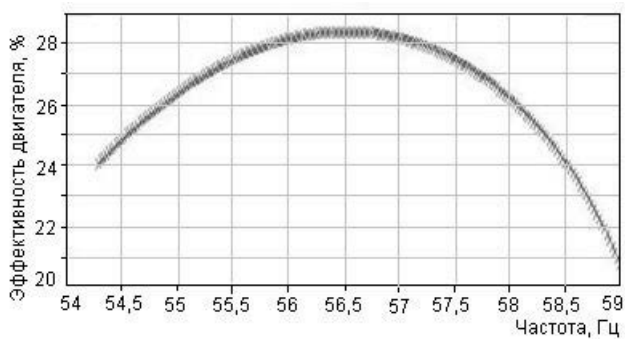


Рис. 6. Изменение внутреннего КПД  $\eta_{ТАД}$  в зависимости от частоты рабочего процесса  
 Fig. 6. The dependence of internal efficiency  $\eta_{ТАД}$  on workflow frequency

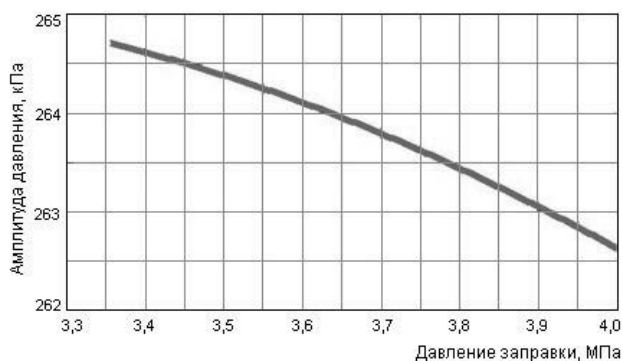


Рис. 7. Зависимость амплитуды давления от давления заправки  
 Fig. 7. The dependence of pressure amplitude on fill pressure

альтернаторами-генераторами тока, расположенными оппозитно для гашения вибраций. Рабочее тело гелий. Обратная акустическая связь двигателя состоит инерционной трубки диаметром 7,7 мм, длиной 0,4 м и податливостей на холодном конце регенератора. Для использования ТАД данной схемы в качестве привода ТАХ авторами данной статьи были изучены режимы «форсирования» рабочего процесса двигателя по акустической мощности и амплитуде давления. Delta ЕС модель ТАД на бегущей волне демонстрирует сравнительно узкий диапазон вариации параметров рабочего режима при заданных конструктивных размерах: давление заправки 3÷3,35 МПа, рабочая частота 50÷54 Гц, амплитуда давления около 10% от давления заправки, наибольшая полученная акустическая мощность 320 Вт при  $\eta_{ТАД} = 24\%$ . Максимальное значение внутреннего КПД двигателя составило порядка 28,5% при  $f = 56,5$  Гц и амплитуде давления 297 кПа (рис. 6).

Увеличение давления заправки существенно снижает амплитуду давления и уменьшает внутренний КПД двигателя до 22% (рис. 7).

В связи с этим, наиболее приемлемым вариантом повышения вырабатываемой акустической мощности и амплитуды давления является увеличение количества подводимого количества теплоты. Эффективность двигателя при подводе 950 Вт возрастает до 28%.

Рассмотрим сравнение уровней охлаждения ХПТЖ, МКС и ТАХ с компрессорным приводом, ТСО на стоячей

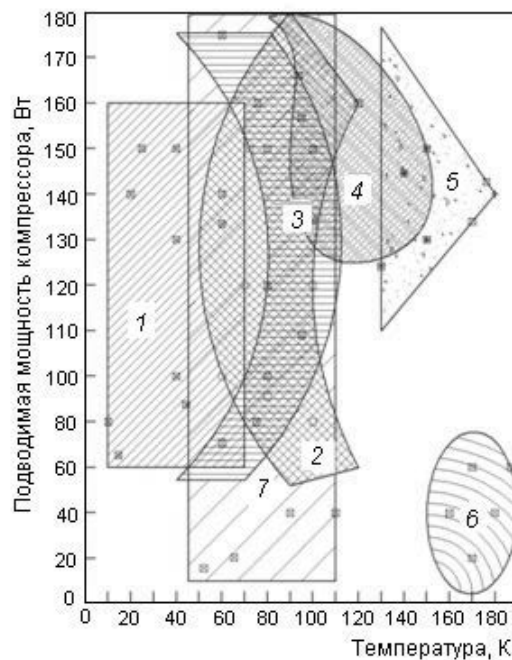


Рис. 8. Сравнение теплоиспользующих и с приводом от компрессора термоакустических холодильников с традиционными холодильными системами: 1 — ТАХ на стоячей волне с компрессором; 2 — МКС с пульсационной трубкой; 3 — свободнопоршневые МКС; 4 — ХПТЖ с компрессорным приводом; 5 — двухступенчатая схема МКС и ХПТЖ с компрессором; 6 — ТАХ на бегущей волне с приводом от ТАД на бегущей волне; 7 — ХПТЖ с приводом от термоакустического генератора на стоячей или бегущей волне

Fig. 8. The comparison between heat-driven and compressor-driven TAR with conventional refrigerating systems 1 — TAR on standing wave with compressor; 2 — pulse tube micro cryogenic system; 3 — free-piston micro cryogenic system; 4 — compressor driven PTC; 5 — two-stage type circuit of micro cryogenic system and PTC with compressor; 6 — TAR on travelling wave driven by TAE on travelling wave; 7 — thermoacoustic generator driven PTC on standing or travelling wave

и бегущей волне с приводом от компрессора или ТАД (рис. 8). Уровень подводимой мощности к ХПТЖ с приводом от ТАД (область 7) довольно высокий при уровне охлаждения, сравнимым с наиболее распространенными микрокриогенными системами на базе газовых холодильных машин Стирлинга (МКС). Это объясняется большими температурными градиентами в зонах пульсационной трубы, регенератора в ХПТЖ, что увеличивает притоки тепла за счет теплопроводности, а это снижает эффективность ТСО значительно сильнее, чем трение и термическая диссипация на холодном поршне в холодильнике Стирлинга. Кроме того, значительная часть мощности в ХПТЖ рассеивается в дросселе, уменьшая эффективность системы.

Наряду с преимуществами комбинирования ТАД как генератора пульсаций давления для ХПТЖ имеется ряд трудностей, связанных с особенностями рабочих процессов в этих двух системах.

Во-первых, ТАД имеют ограничения по максимальной амплитуде давления, приводя к необходимости введения в конструкцию дополнительных частей резонатора для увеличения амплитуды колебаний давления до требуемых для ТАХ значений. Еще одним фактором, затрудняющим комбинирование двух систем, является наличие разных диапазонов рабочих частот ТАД и ХПТЖ. Термоакустические двигатели на стоячей волне с эффективностью по Карно до 40% находятся в диапазоне 60–80 Гц, в то время как рабочая частота в ХПТЖ может достигать 300 Гц для уровня температуры охлаждения 60–80 К.

### Выводы

Произведен анализ перспектив использования термоакустических систем охлаждения с приводом от компрессора и от термоакустического двигателя с внешним подводом тепла. На основе разработанных в Delta ЕС моделей ТАД показано, что использование схем двигателей на стоячей и на бегущей волне в качестве генератора пульсаций для привода ТСО оправдано, поскольку данные устройства прямого цикла имеют уровень внутреннего КПД, сравнимый с эффективностью, например, двигателя Стирлинга. Произведенный сравнительный анализ показал, что ТСО с термоакустическим приводом имеют уровни охлаждения и мощности привода, сравнимые с традиционными холодильными установками, привод которых предполагает наличие подвижных частей, что сказывается на их способности поддерживать приемлемый уровень работоспособности в течение всего срока эксплуатации. Достигнутые показатели эффективности ТСО с приводом от ТАД и отсутствие привода компрессора обуславливают их высокую надежность при низком уровне стоимости, уменьшенные вибрационные нагрузки и увеличенный ресурс срока эксплуатации. Актуальность реализации этой перспективны обуславливает практическую значимость применения теплоиспользующих систем охлаждения с приводом на основе ТАД в холодильной промышленности.

### Сведения об авторах

#### Белозерцев Виктор Николаевич

к.т. н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. ак. С. П. Королева, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, vick.belozertzew@yandex.ru

#### Пулькина Анастасия Юрьевна

инженер Научно-образовательного центра газодинамических исследований, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, Pulkina93@yandex.ru

### Литература (References)

1. Swift G. W. Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators. *J. Acoustical Society of America*, New York, 2002.
2. Swift G. W. Thermoacoustic engines. *J. Acoustical Society of America*. 1998. 84 (4), p. 1145–1180.
3. Patcharin S. Thesis Application of thermoacoustic technologies for meeting the refrigeration needs of remote and rural communities in developing countries. University of Leicester. 2014.
4. Reid, R. S. Open cyclic thermoacoustics, PhD thesis, Georgia Institute of Technology. 1999.
5. Backhaus S., Swift G. W. A thermoacoustic Stirling heat engine: Detailed study, *J. Acoustical Society of America*, 2000, 107 (6), p. 3148–3166.
6. 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.
7. 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.
8. Kang HF, Zhou G, Li Q. Heat driven thermoacoustic cooler based on travelling-standing wave. *Energ. Convers Manage*, 2010, 51 (11), p. 2103–2108.
9. Hasegawa S, Yamaguchi T, Oshinoya Y. A thermoacoustic refrigerator driven by a low temperature-differential, high-efficiency multistage thermoacoustic engine. *Applied Thermal Engineering*. 2013, 58 (1-2), p. 394–399.
10. 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.
11. Wilcox A. Jr. Experimental investigation of a thermoacoustic-Stirling engine electric generator with Gideon streaming, PhD thesis, Penn State University, 2011.
12. 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.
13. Dai W., Luo E., Hu J., Chen Y. A novel coupling configuration for thermoacoustically driven pulse tube coolers: acoustic amplifier. *Chinese Science Bulletin*. 2005, 50, p. 2113–2115.
14. Nekrasova S. O., Zinoviyev E. A., Dovgyallo A. I. Numerical investigation on a 70 Hz Pulse Tube Micro-cryocooler. *Procedia Engineering*, 2016. Vol. 152. pp. 314–320.

### Information about authors

#### Belozertzev Victor Nikolaevich

Ph.D., associate professor of Department of heating engineers and heat engines of Samara University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia, vick.belozertzew@yandex.ru

#### Pulkina Anastasia Yurevna

Engineer, The Scientific and Educational Center for Gas Dynamic Research, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia, Pulkina93@yandex.ru