

УДК 621.57

**В.Л. Бондаренко**

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082

e-mail: nadia@iceblick.com

**Н.Н. Сурьянинова**

ООО «Айсблик», ул. Пастера, 29, г. Одесса, Украина, 65026

e-mail: iso@iceblick.com

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ОХЛАДИТЕЛЯ

*В термоакустических устройствах, реализующих прямые и обратные термодинамические циклы, используются нестационарные процессы, происходящие в их теплообменных аппаратах, стеках и регенераторах. Для проведения исследований термоакустического охладителя (ТАО) необходим генератор акустических колебаний с гибким регулированием частоты и амплитуды рабочих процессов. Сообщается о создании генератора на основе магнетоэлектрического двигателя. Изготовленный макетный образец ТАО реализует классический цикл со стоячей волной. При испытаниях ТАО экспериментально была найдена оптимальная частота рабочих процессов (101,7 Гц), которой соответствует максимальное снижение температуры гелия в регенераторе, составляющее 14 °С. Изложено содержание дальнейших работ по совершенствованию ТАО.*

**Ключевые слова:** Термоакустический охладитель (ТАО). Стек. Регенератор. Теплообменные аппараты. Стоячая волна. Частота. Резонатор. Снижение температуры. Гелий.

V.L. Bondarenko, N.N. Surianinova

## PROTOTYPE PATTERN TEST RESULTS OF A THERMO-ACOUSTIC REFRIGERATOR

*In thermo-acoustic equipment carried out direct and reversible thermodynamic cycles are used non-stationary processes taking place in their heat-exchange devices, stacks and regenerators. An acoustic vibration generator with a flexible frequency and amplitude operation control is necessary for a thermo-acoustic refrigerator (TAR) research. It is informed about the creation of a generator on the base of a magneto-electric engine. A prototype pattern of TAR implements a classical cycle with a standing wave. At TAR testing the optimal operation frequency (101,7 Hz) to which corresponds the highest possible temperature reduction of helium in a regenerator (it is 14 °C) was experimentally found. The basic tasks of further studies on TAR improving were stated.*

**Keywords:** Thermo-acoustic refrigerator (TAR). Stack. Regenerator. Heat-exchange devices. Standing wave. Frequency. Resonator. Temperature reduction. Helium.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ряде лабораторий занимаются исследованиями и улучшением характеристик термоакустических охладителей (ТАО).

Нами проведён анализ современного состояния проблемы создания термоакустических генераторов и охладителей [1]. На его основе были сформулированы задачи исследований, которые, в свою очередь, могут успешно решаться только при следующих обязательных условиях.

Первым из них является наличие специалистов, способных решать задачи в таких областях, как акустика, холодильная, криогенная и компрессорная тех-

ника, газодинамика, теплотехника, современное приборостроение, метрология и мн. др. Отсутствие подготовленных специалистов более 20-ти лет сдерживало темпы термоакустических исследований, которые проводились в США [2,3]. Именно тогда была организована Лос-Аламосская национальная лаборатория, где начались интенсивные научно-исследовательские работы по термоакустике, и была создана научная школа для подготовки высококвалифицированных инженерно-технических кадров.

Второе условие для проведения исследований — наличие специализированных лабораторий, укомплектованных необходимым оборудованием и измерительными приборами. Так как термоакустика являет-

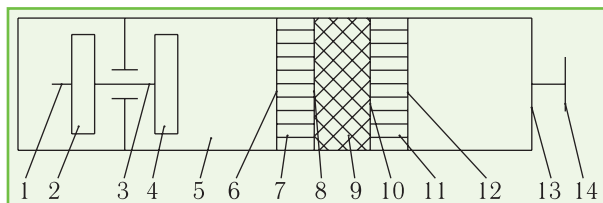
ся достаточно молодой отраслью теплохладотехники, то ещё отсутствуют изготовители и разработчики как отдельных элементов термоакустических систем (высокомощных и эффективных генераторов акустических колебаний, теплообменных аппаратов, стеков и регенераторов), так и средств измерения основных параметров пульсирующего газа (датчиков давления, температуры, скорости).

Третье условие — наличие методик расчёта основных параметров термоакустических устройств, опираясь на которые можно заниматься разработкой и проектированием как элементов, так и устройств в целом. В течение последних двух десятилетий исследования в области разработки термоакустических устройств достаточно заметно активизировались [4], однако до настоящего времени не существует как законченной общей теоретической (идеальной) модели, так и практических рекомендаций.

Понимая актуальность развития термоакустики, на кафедре криогенной техники Одесской государственной академии холода создана группа, которая приступила к разработке и экспериментальному исследованию системы, реализующей термоакустический цикл охлаждения. В настоящее время изготовлен макетный образец ТАО со стоячей волной и начаты его экспериментальные исследования.

## 2. ОСОБЕННОСТИ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ТАО

Принципиальная схема ТАО приведена на рис. 1. В ней в качестве генератора акустических колебаний используется разработанный нами обращённый линейный магнитоэлектрический двигатель оригинальной конструкции. Статор двигателя конструктивно выполнен в виде магнитопровода с обмоткой возбуждения переменного тока, а ротор состоит из двух противоположно намагниченных в осевом направлении постоянных магнитов. Магниты помещены в зазор, образованный полюсными выступами замкнутого магнитопровода. При питании обмотки возбуждения от источника переменного тока рабочий поршень 4 двигателя совершает возвратно-поступательные движения с частотой сети и амплитудой, зависящей не только от частоты питания, но и массы якоря, жёсткости газовой пружины 2 и нагрузки.



**Рис. 1.** Принципиальная схема термоакустического охладителя: 1 — датчик скорости; 2 — поршень газовой пружины; 3 — датчик хода; 4 — рабочий поршень; 5 — резонатор; 6, 8, 9, 12 — хромель-копелевые термопары; 7, 11 — теплообменные аппараты; 9 — регенератор; 13 — датчик температуры; 14 — подвижный элемент дна резонатора

Для обеспечения соосности рабочего поршня с цилиндром применена оригинальная конструкция газового подвеса. Основу её составляет корпус, в котором с двух сторон установлены по четыре вывода с каждой стороны для гибких элементов — струн. Внешний вид конструкции газового подвеса макета ТАО виден на фото 2.



**Фото 2.** Общий вид макетного образца термоакустического охладителя

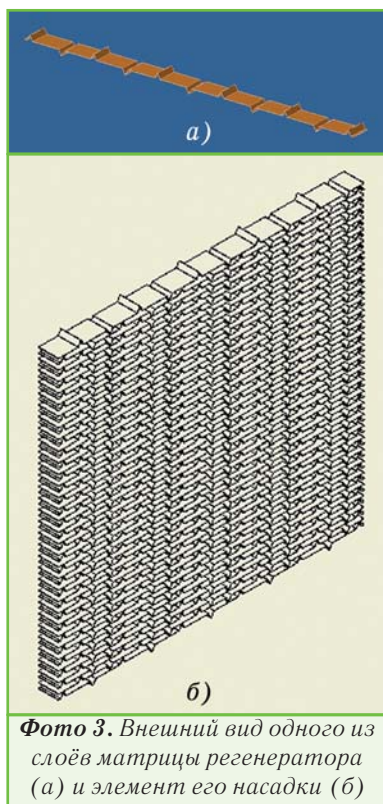
Частота питающего напряжения двигателя подбирается равной резонансной частоте подвижной системы двигателя — генератора акустических колебаний, что обеспечивает минимальное потребление мощности.

Непосредственно справа за рабочим поршнем (см. рис. 1) расположен рабочий участок резонатора 5, который представляет собой комбинацию диффузоров и прямых труб круглого сечения. Общая длина резонатора от поршня 4 до дна 14 должна составлять  $\frac{1}{4}$  длины звуковой волны. Внутри рабочей полости резонатора примерно на расстоянии четверти общей длины резонатора от дна расположена группа теплообменных аппаратов 7, 11 и регенератор 9. Габаритные присоединительные размеры у всех элементов конструкции ТАО подобраны таким образом, чтобы избежать резких переходов между ними и, значит, исключить потери давления на преодоление местных сопротивлений при колебательных рабочих процессах.

Теплообменник 7 (и конструктивно аналогичный ему теплообменник 11) представляет собой поперечноточный воздушно-жидкостный аппарат. Рабочий газ свободно проходит между слоями тонких медных трубок, через которые прокачивается внешний теплоноситель — вода. В теплообменнике 7 от воды отбирается тепло, эквивалентное холодопроизводительности системы, т.е. теплообменник исполняет роль рефрижератора. В теплообменнике 11 тепло от рабочего газа передается воде, и в этом случае теплообменник является концевым холодильником.

Между двумя указанными теплообменными аппаратами расположен регенератор 9. Его корпус, вы-

полненный из материала с низкой теплопроводностью (винипласт), заполнен насадкой. Она имеет регулярную структуру, сформированную пакетом пластин. Материал насадки — медная фольга толщиной 20 мкм. Каждая пластина насадки (фото 3) изготовлена так, что обеспечивает расстояние между двумя соседними слоями 0,5 мм. Таким образом создаётся свободный проход для звуковой волны. Каждый пакет насадки укладывается перпендикулярно соседним пакетам, чтобы свести к минимуму теплопроводность по насадке вдоль оси распространения звуковой волны.



**Фото 3.** Внешний вид одного из слоёв матрицы регенератора (а) и элемент его насадки (б)

Для прокачки внешнего теплоносителя нами разработан дозатор оригинальной конструкции. Необходимость его создания вызвана следующими обстоятельствами. Во-первых, невозможно было найти готовый насос, который имел бы требуемые рабочие характеристики. А именно, необходимо было создать расход внешнего теплоносителя через теплообменные аппараты 7, 11 под давлением, равным давлению заправки ТАО, достигающего десятков атмосфер. При этом чётко должен контролироваться расход теплоносителя и его температуры на входе и выходе из теплообменного аппарата. Кроме этого, следовало обеспечить практически мгновенное (безынерционное) изменение расхода теплоносителя при изменении рабочих параметров внутри ТАО.

В правой части конструкции ТАО после теплообменника 11 расположен небольшой отрезок резонатора, который аналогично первому участку резонатора представляет собой трубу круглого сечения. Труба ограничена дном 14 с подвижным элементом, который позволяет регулировать длину резонатора (в не-

больших пределах, по ходу испытаний) для создания стоячей волны при изменении частоты рабочих процессов. Как было отмечено выше, давление заправки ТАО составляет десятки атмосфер, и этот факт накладывает требования к прочности корпусных деталей элементов ТАО. Поэтому все внутренние участки резонатора, в которых устанавливаются теплообменные аппараты, и регенератор расположены внутри газонаполненного контура. Такое конструктивное решение позволяет оперативно корректировать конструкцию теплообменных аппаратов и регенератора, не подвергая переделке наружный корпус ТАО. На внешнем корпусе расположены выходы всех необходимых коммуникаций: подвод и отвод внешнего теплоносителя и выходы от датчиков контроля таких параметров ТАО, как давления, скорости и температуры.

В качестве датчиков температуры среды на границах теплообменных аппаратов установлены хромель-копелевые термопары 6, 8, 10, 12. На дне резонатора размещён датчик измерения быстроменяющейся температуры 13 оригинальной разработки. В качестве чувствительного элемента датчика используется вольфрамовый микропровод диаметром 5 мкм. Оценка величины диаметра микропровода показала, что для измерения амплитуды температуры с частотой рабочих процессов (от 50 до 150 Гц) диаметр микропровода как раз не должен превышать 5 мкм. В дальнейшем планируется использовать аналогичные датчики по всей длине ТАО.

Слева от поршня газовой пружины 2 на штоке двигателя расположен индуктивный датчик скорости 1, а слева от рабочего поршня двигателя 4 — оптоэлектрический датчик хода.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ТАО

При пусконаладочных работах были получены первые обнадеживающие результаты, т.е. при включении генератора акустических колебаний наблюдалось устойчивое падение температуры газа в регенераторе ТАО.

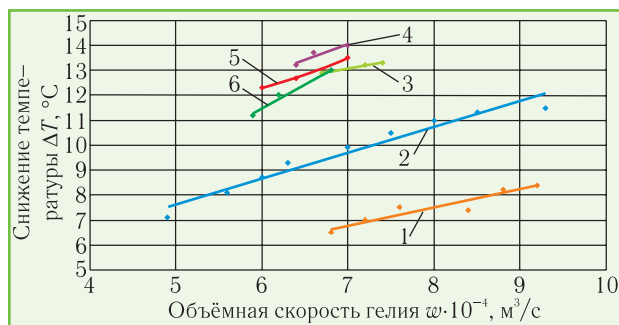
На следующем этапе нами исследовалось влияние режимных параметров цикла (давления заправки, частоты рабочих процессов, хода рабочего поршня) на рабочие процессы, протекающие в газовых полостях охладителя. Кроме этого, были отработаны методики измерений основных параметров цикла и проведена оценка погрешности измерений. Характерной особенностью исследования термоакустических устройств является необходимость измерения быстроменяющихся параметров: звукового давления, температуры и скорости при изменении рабочей частоты процессов в диапазоне от 50 до 150 Гц. При этом время изменения параметра от среднего до максимального значения составляет 3...10 мс. Необходимо также учитывать, что основные теплообменные процессы термоакустического цикла происходят на глубине, соизмеримой с толщиной пограничного теплового слоя, который в зависимости от частоты рабочих процессов

составляет доли миллиметра. Приведённые выше аргументы показывают, насколько усложняются методики измерения быстроменяющихся параметров в термоакустических охладителях по сравнению с методиками, используемыми, например, при исследованиях охладителей Стирлинга.

В ходе исследований варьировалась частота рабочих процессов и ход рабочего поршня генератора акустических колебаний, а также давление заправки макета. Рабочим телом являлся гелий. В каждом режиме определялись следующие характеристики:

- 1) температуры газа на границах теплообменных аппаратов термодарами 6, 8, 10, 12;
- 2) температура газа на дне резонатора с помощью датчика 13 с выводом сигнала на осциллограф;
- 3) скорость поршня с использованием датчика 1 с выводом сигнала на осциллограф одновременно с сигналом от датчика температуры 13;
- 4) ток, напряжение и мощность генератора акустических колебаний.

На рис. 4 приведены изменения снижения температуры  $\Delta T$  в регенераторе в зависимости от объёмной скорости газа в среднем сечении регенератора при различной частоте рабочих процессов. Измерения проведены с использованием термодар 8 и 10, которые показывают средние значения температур газа на границах регенератора. Частота рабочих процессов изменялась от 67,9 до 111,3 Гц. Анализ данных, приведённых на рис. 4, показывает, что вначале при росте частоты последовательно увеличивается падение температуры  $\Delta T$  в регенераторе. При частоте 101,7 Гц значение  $\Delta T$  достигает максимума. Дальнейшее увеличение частоты рабочих процессов не приводит к росту снижения температуры в регенераторе, а наоборот при частотах 107,2 и 111,3 Гц значения  $\Delta T$  становятся ниже, чем при частоте 101,7 Гц. Таким образом, нами экспериментально установлено значение оптимальной частоты рабочих процессов в ТАО при данном конструктивном исполнении регенератора.



**Рис. 4.** Зависимость снижения температуры в регенераторе от объёмной скорости гелия при значениях частоты рабочих процессов, Гц: 1 — 67,9; 2 — 77; 3 — 96,4; 4 — 101,7; 5 — 107,2; 6 — 111,3

Экспериментально определены также значения колебания температуры газа на дне резонатора. Сигнал от датчика температуры 13 на экране осциллографа имел вид гармонической функции с частотой рабо-

чих процессов. Реакцию датчика температуры на гармоническое воздействие внешнего фактора — звукового давления, в фазе с которым изменяется температура газа, определяли по методике, изложенной в [5], с помощью амплитудно-фазовой зависимости характеристик приемника термометра. Амплитудно-частотная характеристика приёмника

$$A_t(\Omega) = a_p / a_t, \tag{1}$$

где  $a_p$  и  $a_t$  — амплитуды колебаний температуры термометра и окружающей среды.

С другой стороны, амплитудно-частотную характеристику приемника можно представить как

$$A_t(\Omega) = 1 / (1 + \Omega^2)^{1/2}, \tag{2}$$

где  $\Omega = \omega \epsilon$  — обобщённая частота;  $\omega$  — угловая частота, Гц;  $\epsilon = c \gamma S / \alpha_k p$  — показатель тепловой инерции (постоянная времени) термометра;  $c$  — удельная теплоёмкость материала термометра, Дж/кгК;  $\gamma$  — плотность материала термометра, кг/м³;  $S$  — поперечное сечение термометра, м²;  $\alpha_k$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К;  $p$  — периметр термометра, м.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что возможно определение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$  при известной постоянной времени термометра. Расчётная оценка коэффициента теплоотдачи выполнялась по данным для режима с максимальной частотой рабочих процессов 111,3 Гц. Амплитуда колебаний температуры среды  $a_t$  была найдена расчётным путём по уравнению Пуассона, а амплитуда колебаний звукового давления — по волновому уравнению для стоячей волны. Коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по приведённой выше методике, где амплитуда колебаний температуры термометра  $a_p$  определена экспериментально, а амплитуда колебаний температуры среды  $a_t$  — расчётным путём, имеет значение  $\alpha_k = 1500$  Вт/м²К.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённая работа по разработке и исследованию макета термоакустического охладителя позволяет сделать следующие выводы:

1. Создан действующий макет, работающий по термоакустическому циклу со стоячей волной.
2. Выполнены экспериментальные исследования, которые подтвердили наличие оптимального значения частоты рабочих процессов для выбранного конструктивного исполнения охладителя. Можно констатировать, что проведён качественный анализ влияния частоты рабочих процессов на основные параметры макета. С увеличением частоты возрастает холодопроизводительность цикла, что подтверждается экспериментальными результатами снижения температуры в регенераторе в режимах 1-4 согласно данным рис. 4. Однако дальнейшее увеличение частоты рабочих процессов не приводит к увеличению холодопроизводи-



тельности, а вызывает её снижение, что подтверждается режимами 5 и 6. Данный факт объясняется тем, что при увеличении рабочих частот происходит, с одной стороны, прямо пропорциональный рост холодопроизводительности, с другой — уменьшение пограничного теплового слоя и, как следствие, сокращение объёма, в котором протекают основные процессы собственно цикла охлаждения. Это, в целом, вызывает снижение холодопроизводительности. Причём, изменение пограничного слоя определяется более сложной зависимостью, которая пропорциональна обратной величине корня квадратного от частоты рабочих процессов.

3. Разработан и испытан датчик измерения быстроменяющейся температуры. Так как все рабочие процессы в полостях термоакустических устройств являются нестационарными, то очень сложно расчётным путём определять тепловые нагрузки аппаратов из-за отсутствия как расчётных, так и экспериментальных данных о коэффициентах теплоотдачи. Приведённая нами методика оценки коэффициента теплоотдачи через постоянную времени теплоприёмника позволяет найти значение этого параметра и даёт возможность рассчитывать тепловые потоки в теплообменных аппаратах при пульсирующих потоках рабочего тела.

Некоторые недостатки, которые обнаружили в ходе экспериментальных исследований, требуют дальнейшей доработки. Укажем основные из них:

- Разработанный линейный магнитоэлектрический двигатель генератора акустических колебаний в процессе экспериментальных исследований не обеспечивает требуемые расчётные значения частоты и амплитуды во всех режимах работы ТАО. Необходима доработка генератора также и с целью увеличения располагаемой мощности.

- Отсутствие датчиков быстроменяющегося звукового давления приводит к необходимости расчётным путём приближённо определять давления в узловых точках цикла, а значит, вносить из-за этого до-

полнительную погрешность в значения основных параметров цикла.

- Создание имитатора тепловой нагрузки, основным элементом которого должен быть насос с требуемыми параметрами, обуславливает необходимость его специальной разработки. В настоящее время он уже проходит этап доводки и настройки. После его подключения к макету ТАО будут проведены измерения холодопроизводительности и тепловой нагрузки.

В целом проведённые экспериментальные исследования подтвердили правильность выбранных конструктивных решений при создании основных элементов охладителя, работающего по циклу со стоячей волной. Они нуждаются в продолжении и расширении для более обстоятельного изучения работы ТАО с целью дальнейшего улучшения его характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Бондаренко В.Л., Обертун О.С., Сурьянинова Н.Н.** Состояние вопроса разработки термоакустических генераторов и охладителей// Наукові праці. — Одеса: ОНАХТ, 2009. — Вип. 35. — Т.1. — С. 210-216.

2. **Swift G.W.** Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators. — Published by the Acoustical Society of America through the American Institute of Physics — 2002. — 300 p.

3. **Garret S.L., Hofer T.J., Perkins D.K.** Thermoacoustic Refrigeration// Refrigeration and Air Conditioning Technology/ Workshop. — Breckenridge Hilton, CO, June 23-25, 1993. — P.1-8.

4. **Luo E.C., Dai W., Hu J.Y.** Thermally Driven Thermoacoustic Refrigeration and Its Recent Progress. Cryogenic and Refrigeration/ Proceeding of ICCR'2008. — Shanghai, April 5-9, 2008. — P. 71-79.

5. Температурные измерения: Справочник/ **О.А. Герасценко, А.Н. Гордов, В.И. Лах и др.** — Киев: Наукова думка, 1984. — 495 с.