

ВЫБОР СТЕКА–АППАРАТА ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ОХЛАДИТЕЛЯ

Бондаренко В.Л., д-р техн. наук, профессор
Одесская государственная академия холода, г.Одесса
Сурьянинова Н.Н., канд. техн. наук
ООО «Айсблик», г. Одесса

В статье даны рекомендации по выбору конструктивного исполнения стека-аппарата внутреннего теплообмена термоакустического устройства, работающего в цикле на стоячей волне. Дано описание стенда для исследования процессов, протекающих в газовых полостях термоакустического охладителя (ТАО). Приведены результаты исследовательских испытаний.

In the article are given the recommendations regarding the selection of the design concept of stack — the apparatus of the internal heat exchange of the thermo-acoustic device, which works in the cycle on the standing wave. Is given description of stand for investigating the processes, which take place in the gas cavities of thermo-acoustic cooler ([TAO]). The results of the research tests are given.

Ключевые слова: термоакустический охладитель (ТАО), стек, насадка стека.

Введение. На первом этапе работы авторами был проведен анализ современного состояния проблем создания термоакустических генераторов и охладителей [1] и представлены результаты пуско-наладочных испытаний экспериментального образца термоакустического устройства [2].

Учитывая отсутствие достаточного количества публикаций по термоакустике на русском языке, напомним основные понятия, используемые для описания процессов в термоакустических устройствах.

Итак, термоакустические устройства условно можно разбить на два основных типа, а именно устройства реализующие цикл на стоячей (первый тип) и бегущей (второй тип) волне. Особенностью устройств первого типа является наличие встроенного аппарата внутреннего теплообмена — так называемого стека. В отличии от встроенного аппарата внутреннего теплообмена в устройствах второго типа — регенератора, конструктивное исполнение стека должно обеспечивать свободное прохождение стоячей волны, без рассеивания. Поэтому геометрическое исполнение насадок стека значительно отличается от насадок регенераторов в классическом исполнении.

Периодические процессы сжатия и расширения газа в акустической волне, совмещенные с процессами обмена тепла с внешними источниками, определяют классические процессы, протекающие в термоакустическом цикле. Эти процессы используются как в тепловых двигателях, преобразующих тепло внешних источников в акустическую энергию, так и в тепловых насосах, преобразующих звуковую энергию в тепло. Предметом данной статьи является изучение процессов, происходящих в стеке термоакустического охладителя (ТАО) на стоячей волне.

В термоакустических устройствах, работающих на стоячей волне, преобразование энергии происходит внутри встроенного аппарата–стека, который и определяет эффективность устройства в целом. Одним из факторов, сдерживающих применение термоакустических устройств, является низкое значение удельных плотностей тепловых потоков, по сравнению с потоками, характерными для традиционных тепловых насосов и охладителей, работающих по обратному циклу Стирлинга. В данной работе описываются результаты исследований связанные с попыткой получить рекомендации для выбора геометрического исполнения насадки стека, обеспечивающие получение достаточных плотностей тепловых потоков. Кроме этого, исследуется влияние различных параметров термоакустического устройства на эффективность работы стека.

Качественный анализ процессов, протекающих в газовых полостях термоакустических устройств. Наиболее полный анализ процессов, происходящих в термоакустических устройствах, приведен в работе G. Swift [3]. В этой же работе приведены рекомендации по выбору геометрических размеров зазоров теплообменных устройств термоакустического устройства на стоячей волне. Как видим из рекомендаций, значения газовых зазоров в стеке соизмеримы с размерами пограничного теплового слоя, тогда как значения газовых зазоров в регенераторе намного меньше значений теплового пограничного слоя.

В этом же источнике [3] проведен анализ очень важного параметра для термоакустики — критического температурного градиента ∇T_{crit} . Именно соотношение критического температурного градиента и отнесенного к длине аппарата (стека или регенератора) градиента температур по краям аппарата ∇T_m и

определяет направление цикла. Если $\nabla T_m > \nabla T_{crit}$, то устройство работает по прямому циклу (двигателя), а если $\nabla T_m < \nabla T_{crit}$, то устройство работает по обратному циклу (теплого насоса или охладителя).

Начнем с анализа основных параметров, определяющих тип и размер индикаторной диаграммы газовой полости термоакустического устройства. Итак, рассмотрим степень сжатия в цикле, как отношение максимального и минимального давления. Например, для цикла Стирлинга с которым часто ассоциируют цикл второго типа на бегущей волне, это отношение составляет величину порядка — 1,30, а для термоакустических устройств — 1,05. Это обусловлено тем, что в акустическом устройстве даже для очень высоких значений рабочих частот, добавка акустического давления (к среднему давлению в устройстве) составляет величину порядка 5 %. Поэтому, чтобы получить хотя бы сколько-нибудь ощутимый эффект по наполнению индикаторной диаграммы газовой полости термоакустического устройства, необходимо поддерживать значительное (десятки атмосфер) среднее давление в цикле. Следующее условия обеспечения наполнения индикаторной диаграммы — это обеспечение фазового сдвига между давлением (максимальным) и объемом (минимальным), причем для цикла охладителя необходимо обеспечить опережение изменения давления по отношению к изменению объема, в противном случае газ в полости будет нагреваться. Значение угла фазового сдвига обеспечивает наполняемость индикаторной диаграммы и по результатам исследований машины Стирлинга составляет величину близкую к 90°. Проанализируем данные приведенные G. Swift [3] и другими исследователями и даже реализованные в виде компьютерной анимации которые показывают, что фазовый угол между давлением и скоростью (или объемом) составляет единицы градусов и индикаторная диаграмма представляет из себя тоненький «лепесток» несколько отличающийся от прямой линии.

Таким образом, для достижения достаточного эффекта (т.е. обеспечения необходимой мощности для ощутимого — т.е. хотя бы несколько градусов охлаждения или нагрева газа в термоакустическом устройстве) необходимо поддерживать значительную частоту рабочих процессов — сотни герц.

Итак, необходимо поддерживать колебания в газе с высокой частотой рабочих процессов и с высоким значением среднего давления. Можно оценить геометрические показатели характерных размеров (зазоров) термоакустических устройств, в которых происходит взаимодействие акустической волны с регулярной насадкой. Величина пристенного слоя в котором происходят все описанные выше (1)–(4) фазы процесса термоакустического устройства определяется известными соотношениями [3] и для основных типов инертных газов, используемых в термоакустике (гелия, неона) при частотах рабочих процессов в сотни герц, составляет доли миллиметра.

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu}{\omega \cdot \rho}}; \quad (1)$$

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\omega \cdot \rho \cdot c_p}}, \quad (2)$$

где δ_v — толщина пограничного вязкого слоя, м;

δ_k — толщина пограничного термического слоя, м;

μ — коэффициент вязкости, кг/(м·с);

ω — круговая частота, рад/с;

ρ — плотность, кг/м³;

κ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

c_p — коэффициент удельной теплоемкости, Дж/(кг·К).

Полученный качественный анализ наполняемости индикаторной диаграммы газовой полости термоакустического устройства показывает, что управлять «наполнением» диаграммы будет на порядок сложнее, чем в машине Стирлинга. Поэтому любой оптимистический прогноз относительно того, что все современные методы исследования машин Стирлинга можно механически перенести на исследование газовой полости термоакустического устройства — глубокое заблуждение.

3. Выбор конструктивного исполнения стека и результаты исследовательских испытаний.

На рис. 1 показан общий вид стенда, укомплектованного экспериментальным термоакустическим охладителем (ТАО) и блоками контроля и управления.

В качестве объекта исследования выбран ¼ волновой термоакустический охладитель первого типа по циклу на стоячей волне, в котором в качестве источника звуковых колебаний используется линейный привод оригинальной конструкции. Внутри ТАО находятся встроенные теплообменные аппараты: два теплообменника с выходом на внешний контур и стек, расположенный между ними.

Конструктивно стек представляет собой корпус, выполненный из материала с низкой теплопроводностью (винилпласт) заполненный насадкой. Насадка стека представляет собой регулярную структуру из

пакетов пластин. В качестве материала насадки используется медная фольга толщиной 20 мкм. Геометрическое исполнение каждой пластины позволяет обеспечить расстояние между двумя соседними слоями 0,5 мм, таким образом, выполняется условие по свободному (без рассеивания) прохождению звуковой волны через насадку стека. Каждый пакет насадки укладывается перпендикулярно соседним пакетам, таким образом, сводится к минимуму теплопроводность по насадке вдоль оси распространения звуковой волны. На рис. 2 приведен фронтальный вид матрицы насадки стека и даны основные геометрические размеры.



Рис. 1 – Общий вид экспериментального стенда ТАО

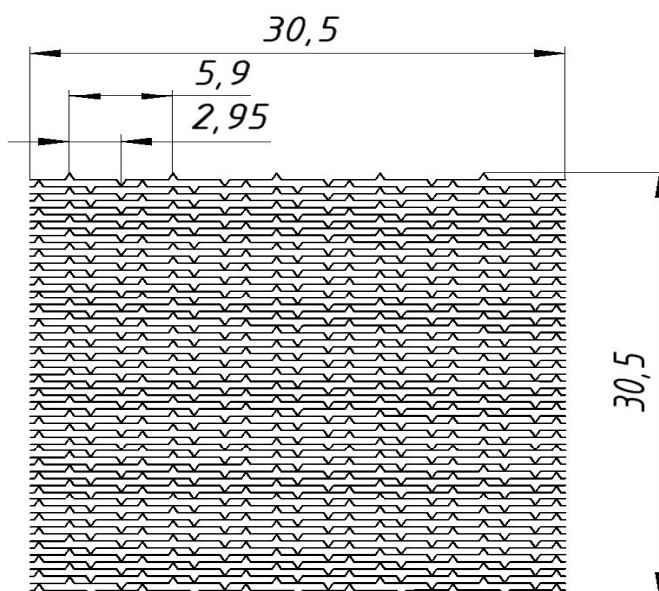
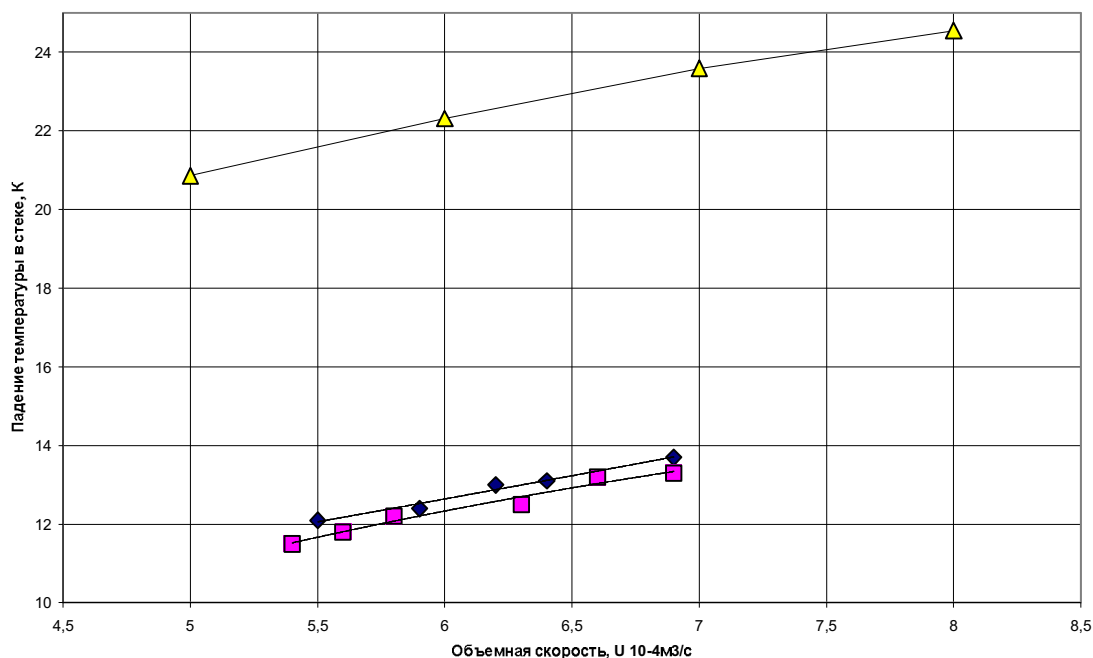


Рис. 2 – Фронтальный вид матрицы стека

В работе [2] приведены результаты исследовательских испытаний макета ТАО и для выбранных конструктивных размеров $\frac{1}{4}$ волнового макета, реализующего цикл на стоячей волне, определено значение оптимального значения рабочей частоты процессов — 101,7 Гц. При этой частоте, при прочих равных параметрах, снижение температуры в стеке имеет максимальное значение.

Нами были проведены исследовательские испытания двух конструктивных исполнений стека, отличающихся длиной аппарата (одинарная и двойная длина стека) вдоль направления распространения звуковой волны. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 3.



Δ — расчет; \square — эксперимент при двойной длине стека; \diamond — эксперимент при одинарной длине стека

Рис. 3 – Зависимость снижения температуры в стеке от объемной скорости гелия при частоте рабочих процессов 101,7 Гц

Качественный анализ расчетных зависимостей [3] определения мощности теплового потока в стеке показывает, что увеличение длины стека при прочих равных условиях, в два раза увеличивает площадь теплообмена, следовательно в два раза увеличивает холодопроизводительность. С другой стороны увеличение в два раза длины стека приводит к снижению наполовину критического температурного градиента. То есть в идеальном случае при отсутствии вязких потерь и теплопритоков по тепловым мостам, никакого различия быть не должно.

В реальных условиях есть различие, которое наблюдается на рис. 3 — снижение температуры в стеке, имеющим одинарную длину превышает аналогичный показатель для стека, имеющего двойную длину, при прочих равных условиях. Данный эффект можно объяснить превалированием вязких потерь по двойной длине стека по сравнению с одинарной длиной стека.

В целом, проведенные исследовательские испытания подтвердили правильность выбранных конструктивных решений стека для ТАО, работающего в цикле на стоячей волне, но поставили ряд задач, требующих продолжения дальнейшего изучения процессов, протекающих в термоакустических устройствах.

Література

1. Бондаренко В.Л. Состояние вопроса разработки термоакустических генераторов и охладителей / В.Л.Бондаренко, О.С.Обертун, Н.Н.Сурьянинова // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса : 2009. – Вип.35. – Т.1. – С.210-216.
2. Бондаренко В.Л. Результаты испытаний макетного образца термоакустического охладителя / В.Л. Бондаренко, Н.Н. Сурьянинова // Технические газы. – 2010. – № 1. – С.23-27.
3. 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.