

Авторефер.

П 15

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА
УКРАИНЫ

ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА

ДАЛАКОВ ПЕТР ИВАНОВИЧ

П. Далаков

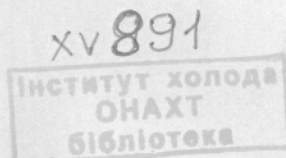
УДК 621.56/.59

Определение конструктивных особенностей и рабочих
характеристик термоакустического генератора холода.

Специальность 05.05.14 – холодильная, вакуумная и компрессорная техника,
системы кондиционирования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Одесса 2012 г.

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Одесской государственной академии холода (ОГАХ) Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, **Бондаренко Виталий Леонидович**, заведующий кафедрой криогенной техники Одесской государственной академии холода МОНМС Украины

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, **Мазур Виктор Александрович** зав. каф. Технической термодинамики Одесской государственной академии холода МОНМС Украины

кандидат технических наук, доцент, **Петухов Илья Иванович** старший научный сотрудник кафедры аэрокосмической теплотехники Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» МОНМС Украины

Защита диссертации состоится «14» мая 2012г. в 11⁰⁰ в ауд. 108 на заседании специализированного ученого совета Д.41.087.01 при Одесской государственной академии холода по адресу: ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082.

Работу можно ознакомиться в библиотеке ОГАХ по адресу: ул. Дворянская, 1/3, Одесса, Украина, 65082.

Рассчитываем динамический коэффициент замедления «19» апреля 2012г.

$$J_p = 3 \cdot J_{гр} :$$

$$M_{J_{Mex}} = \frac{J_{Mex}}{J_{гр}}$$

Где k_1

масса

В. И. Милованов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В криогенной технологии производства инертных газов - криптона, ксенона, неона и др. применяются различные методы и схемные решения переработки и очистки сырьевых газов от примесей (метана, водорода, различных углеводородов). Так как эти примеси горючи, то одним из способов их очистки является выжигание или каталитическое гидрирование (окисление). При сгорании горючих примесей на температурном уровне 500 – 600 °С образуется избыточное количество теплоты, что приводит к разогреву и постепенному разрушению входных коллекторов концевых теплообменников. На практике ресурс теплообменника составляет 1,5 – 2 месяца. Вместе с тем, образующееся тепло целесообразно использовать для привода холодильной машины, холодопроизводительность которой можно применить для различных целей в том числе и для снижения термического напряжения коллекторов концевых теплообменников.

Методы прямого преобразования теплоты в работу давно известны. Одним из перспективных направлений в развитии газодинамических методов прямого преобразования теплоты в работу с последующей выработкой холода является создание безмашинных термоакустических генераторов холода (ТАГХ).

Однако, в настоящее время конструктивные особенности и рабочие характеристики ТАГХ изучены недостаточно, что затрудняет определение их рациональной области применения и поэтому приведенные в диссертации исследования являются актуальными.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Исследования проводили в рамках приоритетного направления развития науки и техники «Новейшие ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и АПК», а также согласно закону Украины «О приоритетных направлениях развития науки и техники», от 11.07.2001, №2623-III. Выполнение работы входило в планы НИР ОГАХ и ООО «Айсблик».

Цель и задачи исследования

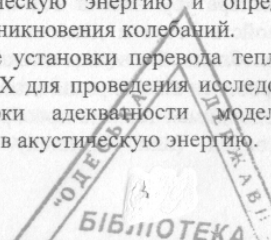
Целью исследования является разработка и создание действующего образца ТАГХ, методики его проектирования, определение рабочих характеристик ТАГХ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие типы ТАГХ и пути повышения эффективности установок очистки неонгелиевой смеси при использовании данных устройств.
2. Разработать физическую модель, описывающую процесс преобразования теплоты в акустическую энергию и определить параметры, влияющие на процесс возникновения колебаний.
3. Сконструировать экспериментальные установки перевода теплоты в акустическую энергию (ТАГ) и ТАГХ для проведения исследований физических процессов и проверки адекватности моделей в устройствах преобразования теплоты в акустическую энергию.

xv 891

ИНСТИТУТ ХОЛОДА



4. Определить факторы, влияющие на геометрические размеры и расположение аппаратов в резонаторе ТАГ, ТАГХ, и систематизировать влияние различных рабочих тел на прямые и обратные процессы преобразования энергии.
5. Установить связь между частотами звуковых колебаний и геометрическими размерами каналов ТАГХ. Определить рабочие характеристики ТАГХ, включая гидравлические, температурные и энергетические показатели.
6. Определить холодопроизводительность и оценить перспективность ТАГХ при использовании экспериментальной модели ТАГ в качестве источника акустической энергии.
7. Провести оценку энергетической эффективности и степени термодинамического совершенства ТАГХ. Определить рациональные области использования ТАГХ в ряду других охлаждающих устройств.

Объектом исследования являются опытные образцы ТАГХ.

Предметом исследования являются процессы, осуществляющие прямой переход теплоты в энергию акустических колебаний и обратный переход энергии акустических колебаний в низкотемпературный тепловой поток.

Методы исследования – теоретическое изучение процессов преобразования теплоты при ее прямом преобразовании в энергию акустических колебаний и обратном преобразовании акустических колебаний в низкотемпературный тепловой поток. Экспериментальное исследование рабочих характеристик ТАГХ на базе спроектированных образцов полуволнового и четвертьволнового термоакустических генераторов.

Научная новизна. В работе впервые получены новые научные результаты

- Разработана физическая модель и описан процесс преобразования теплоты в энергию акустических колебаний, на основе которых сконструированы экспериментальные установки полуволнового и четвертьволнового преобразователей тепловой энергии в энергию акустических колебаний;
- Экспериментальным путем установлено, что для давлений заправки ТАГ, ТАГХ в диапазоне 0,1 – 0,3 МПа, при установившемся режиме колебаний требуется меньший градиент температур (5,5 – 4,3 град/мм) по длине стека, чем в случае теоретического расчета (6,4 – 6,6 град/мм).
- Выявлена обратно пропорциональная зависимость толщины теплового пограничного, слоя δ_k от частоты колебаний f , показаны фазовые сдвиги и диаграммы термодинамических процессов, происходящих в выбранном элементарном участке газа на различных расстояниях от твердой стенки.
- Установлено, что в полуволновом или четвертьволновом резонаторах на температуру начала возникновения колебаний влияют термодинамические свойства газа и давление заправки резонатора, в то время, как характер колеблющейся волны не оказывает существенного влияния.
- Проведен анализ различных конструкций теплообменников-стеков, в которых подводимая теплота преобразуется в энергию акустических колебаний в виде стоячей (или бегущей) звуковой волны. Показано что полученные

экспериментальные гидродинамические характеристики ТАГ могут быть использованы в качестве привода акустического генератора холода.

- Показано, что рабочие характеристики опытного образца определяют место ТАГХ в ряду других охлаждающих устройств и указывают рациональные области их применения такие, как кондиционирование воздуха, а также криогенная техника, где имеются избыточные тепловые потоки и потоки газов повышенного давления (например, печи каталитического гидрирования).
- Предложена математическая модель процессов, происходящих в ТАГ и ТАГХ, которая дает возможность предсказать акустические характеристики и геометрические размеры аппаратов, входящих в эти устройства на начальных этапах проектирования.
- Подтверждено, что максимальный КПД преобразования теплоты в акустическую энергию для различных рабочих тел достигает 25 – 30%. При этом степень термодинамического совершенства этого процесса составляет 20 – 40%, а общий коэффициент преобразования тепла в холод в акустической установке составляет 1% – 3%.

Достоверность результатов исследования подтверждаются использованием современных методов термодинамического анализа процессов превращения теплоты в акустическую энергию, а также удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных характеристик опытных образцов ТАГ и ТАГХ.

Практическое значение полученных результатов – состоит в разработке рекомендаций по методам проектирования ТАГ и ТАГХ, а также оценке реальных областей их применения.

Личный вклад соискателя. Лично соискателем разработаны схемные решения, построены конструкции опытных образцов ТАГ и ТАГХ, проведены экспериментальные исследования этих образцов и анализ полученных результатов.

Апробация результатов исследования. Теоретические положения, конструктивные особенности опытных образцов и результат их исследований докладывался автором на международных семинарах «Повышение эффективности и безопасности производств продуктов разделения воздуха, УА-СИГМА» (Одесса, Украина, 2005 г.), на научно технических конференциях «Современные проблемы холодильной техники и технологии» (Одесса, ОГАХ); «CryoPraga 2006» (Прага, Чехия, 2006 г); «Cryogenics and Refrigeration – Proceedings of ICCR'2008 (Шанхай, Китай, 2008); «Современные проблемы холодильной и криогенной техники 2009» (Одесса, Украина, 2009 г., Одесская Национальная Академия Пищевых Технологий им. М. В. Ломоносова); на второй международной научной конференции «Промышленные газы», посвященной 300-летию М. В. Ломоносова (Москва 19 апреля 2011).

Публикации. Основные научные и прикладные результаты диссертации представлены в 11 публикациях, из которых 4 опубликованы в специальных научно технических журналах и 7 изложены в докладах и тезисах докладов на международных и Украинских научно-практических конференциях.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 130 страницах машинописного текста, включая 112 страниц основного текста, 55 рисунков, и 8 таблиц. Диссертация включает введение, обзор патентной и научно-технической литературы, четыре раздела исследований с выводами и список литературы, состоящей из 116 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований; определены научная новизна и практическая ценность научных результатов, полученных в работе.

В **первом разделе** проведен обзор патентной и научно-исследовательской литературы. Описаны основные этапы развития исследований в области термоакустики. Рассмотрены основанные на теориях Хитгинса, Рийке, Зондхаусса, Рэля, Босша, Рисса и др. примеры возникновения акустических колебаний, возбуждаемых высокопотенциальным теплом.

Рассмотрено использование данных устройств при осуществлении процессов каталитической очистки неонгелиевой смеси от водорода (рис. 1).

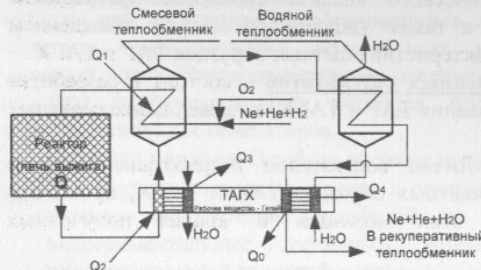


Рис. 1. Технологическая схема установки каталитической очистки сырой неонгелиевой смеси с использованием ТАГХ.

В установке (рис. 1), поступающая на очистку в контактный аппарат неонгелиевая смесь имеет следующий состав: $N_2 = 8\%$, $H_2 = 6\%$, $He = 21,5\%$, $Ne = 64,5\%$. Описаны необходимые условия возникновения термоакустических колебаний. Рассмотрены и проанализированы существующие физические и математические модели термоакустических устройств, и их достоинства и недостатки. Также рассмотрены типы акустических генераторов холода, использующие термоакустические и акустотермические явления при взаимодействии продольных упругих волн со структурно организованной, но термически неоднородной поверхностью и связанный с этим переход акустических колебаний в теплоту и далее в холод. Проанализированы схемы: усилителя термоакустических колебаний и кольцевого волновода с ответвлением (Р. Гартлей); термического усилителя интенсивности акустической волны (В. Маррисон); акустического генератора холода, приводимого в действие термоакустическим генератором с бегущей волной (П. Сеперлей); акустического криогенератора со стоячей волной.

Второй раздел диссертации посвящен анализу теплофизических колебательных процессов, происходящих в ТАГ и ТАГХ. (схема термоакустического генератора показана на рис. 2).

Описан механизм превращения высокопотенциального тепла в акустическую энергию, происходящий в элементарном участке dx , и рассмотрено поведение заключенного на этом участке колеблющегося элементарного объема газа dv . На основании описанного механизма превращения тепла записаны классические уравнения теплового потока по стенке, имеющей переменную температуру (рис. 3).

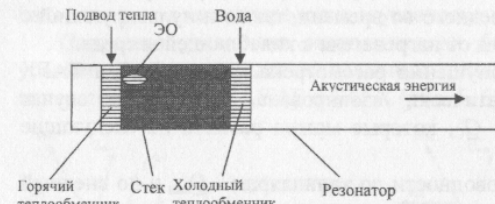


Рис. 2. Схема термоакустического генератора. (ЭО — элементарный объем).

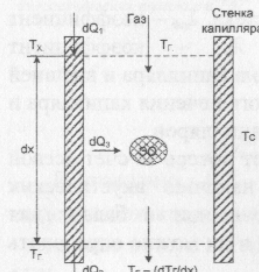


Рис. 3. Распределение тепловых потоков по стенке капилляра.

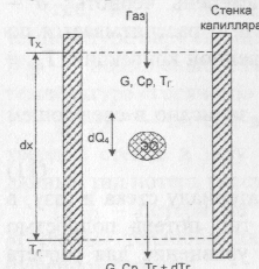


Рис. 4. Поведение газа в капилляре на участке dx .

$$dQ_1 - dQ_2 \pm dQ_3 = 0, \quad (1)$$

$$dQ_1 = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT_c}{dx}, \quad (2)$$

$$dQ_2 = -\lambda \cdot S \cdot \frac{d(T_c - \frac{dT_c}{dx} dx)}{dx}, \quad (3)$$

и баланс от стенки к газу:

$$dQ_3 = \alpha \cdot dF(T_c - T_r), \quad (4)$$

где $dF = \pi \cdot D \cdot dx$

Из уравнений (1 – 4) следует дифференциальное уравнение теплового потока по стенке:

$$-\lambda \cdot \frac{d^2 T_c}{dx^2} \pm \alpha \cdot \frac{\pi \cdot D}{S} (T_c - T_r) = 0, \quad (5)$$

Полученное дифференциальное уравнение можно использовать для расчета теплопередачи в классических моделях. Однако в нашем случае, при наличии циклических колебаний, связанных с акустикой слагаемое dQ_3 в уравнении (1) будет постоянно менять свой знак. Также весьма затруднительно определить величину коэффициента теплоотдачи α , т.к. при наличии акустических колебаний нельзя использовать классические критериальные уравнения.

Кроме теплового потока по стенке рассмотрена классическая модель для теплового потока по газу, заключенному в участке капилляра dx , выведено уравнение для теплового потока при условии постоянства массы газа на участке dx (рис. 4).

$$-G \cdot Cp \cdot \frac{dT_r}{dx} + \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot (T_c - T_r) dx = 0. \quad (6)$$

Для определения газового теплового потока, при наличии в нем пульсаций давления и температуры, использование классических уравнений теплопередачи весьма сложно. Для определения величины теплового

потока в таких условиях, следует знать гидродинамическую характеристику газа при наличии термических автоколебаний. В этих условиях между нагретым телом и средой осуществляется, помимо среднего во времени, также и пульсирующий с частотой автоколебаний перенос тепла от нагревателя к колеблющейся среде.

Для уменьшения количества допущений рассмотрена модель ТАГ и ТАГХ для случая, когда стенка адиабатически изолирована. И в этом случае рассмотрены типы потерь в стеке - Q_C , которые можно разбить на следующие типы:

а) потери за счет осевой теплопроводности по капиллярам - $Q_{кап}$ и по внешней обечайке - $Q_{об}$. Эти потери можно рассчитать с помощью классических уравнений теплопроводности для вертикального цилиндра:

$$Q_{кап} = \frac{(T_r - T_x) \cdot \lambda_k \cdot S_k \cdot N}{l_k}, \quad (7)$$

$$Q_{об} = \frac{(T_r - T_x) \cdot \lambda_{об} \cdot S_{об}}{l_{об}}, \quad (8)$$

где, T_r, T_x - температура горячего и холодного конца стека, $\lambda_{об}$ - коэффициент теплопроводности материала внешней обечайки, λ_k - коэффициент теплопроводности материала капилляров стека, $l_k, l_{об}$ - длина капилляра и внешней обечайки стека соответственно, $S_k, S_{об}$ - площадь поперечного сечения капилляра и внешней обечайки стека соответственно, N - количество цилиндров.

б) потери за счет теплопроводности по газу - Q_g . Расчет потерь за счет осевой теплопроводности по газу весьма сложен благодаря наличию акустических колебаний. Потери за счет теплопроводности по газу входят в баланс для определения тепловой нагрузки водяного теплообменника и их можно определить из этого баланса.

в) потери за счет конвективного - Q_k и лучистого - Q_l теплообмена от наружной поверхности обечайки стека в окружающую среду $Q_{нар}$. Уравнения для определения величин данного типа потерь записаны в следующем виде:

$$Q_k = \alpha \cdot (T_{cm} - T_{oc}) \cdot F, \quad (9)$$

$$Q_l = 2\pi R_{вн} l_{об} \varepsilon \sigma T^4, \quad (10)$$

где; $R_{вн}$ - внутренний радиус обечайки стека; ε - степень черноты; σ - постоянная Стефана-Больцмана. Коэффициент теплоотдачи α рассчитывается по критериальным уравнениям теплообмена при естественной конвекции; T_{cm} - средняя температура стека.

Уравнение, учитывающее полные потери в стеке - Q_C , записано в следующем виде:

$$Q_C = Q_{кап} + Q_{об} + Q_g + Q_k + Q_l \quad (11)$$

Потери, учитывающие осевую теплопроводность по материалу стека и газу, в общем уравнении баланса входят не будут, т.к. этот тип потерь полностью снимается «холодным» - водяным теплообменником. В уравнение для расчета тепловой нагрузки водяного теплообменника эти потери уже включены.

В данной работе для более точного определения потерь, стек условно разбивался на десять равных частей. Расчет величины потерь проводился для каждого участка. Полную величину тепловых потерь составляла сумма величин найденных потерь на каждом из участков.

Проведен анализ сгенерированной стоячей волны в резонаторе ТАГ и рассмотрено поведение молекул в выбранном элементарном объеме (ЭО) газа, находящегося в капилляре стека акустического генератора холода (АГХ).

Записаны уравнения энергетических балансов ТАГ и ТАГХ. Выведены уравнения для нахождения величины тепловых потерь и тепловых нагрузок аппаратов, входящих в ТАГ и ТАГХ (рис. 5, 6).

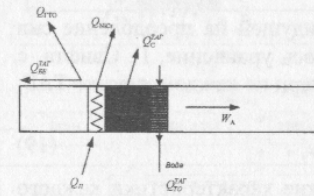


Рис. 5. Схема распределения энергетических потоков в ТАГ.

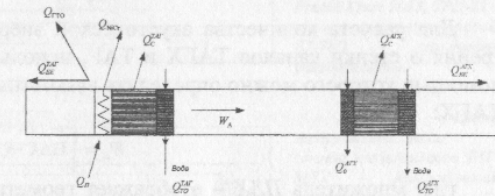


Рис. 6. Схема распределения энергетических потоков в ТАГХ.

$$Q_p = W_A + Q_{гто}^{ТАГ} + Q_{п}^{ТАГ}, \quad (12)$$

$$Q_{п}^{ТАГ} = Q_{NiCr} + Q_C^{ТАГ} + Q_{BE}^{ТАГ} + Q_{гто} \quad (13)$$

$$Q_p = W_A + Q_{п}^{ТАГ} + Q_{п}^{ТАГХ} + Q_{п}^{ТАГХ}, \quad (14)$$

$$\sum Q_{п}^{ТАГХ} = Q_{п}^{ТАГ} + Q_{п}^{ТАГХ} = Q_{BE}^{ТАГ} + Q_{NiCr} + Q_{гто} + Q_{гто}^{ТАГ} + Q_C^{ТАГ} + Q_{BE}^{ТАГХ} + Q_{гто}^{ТАГХ} + Q_{п}^{ТАГ} + Q_{п}^{ТАГХ} \quad (15)$$

В уравнениях (12 - 15): W_A - генерируемая акустическая энергия; $Q_{гто}^{ТАГ}, Q_{п}^{ТАГХ}$ - тепловой поток в водяном теплообменнике ТАГ и ТАГХ соответственно; $Q_{п}^{ТАГ}, Q_{п}^{ТАГХ}$ - тепловые потери в ТАГ и ТАГХ соответственно; Q_0 - холодопроизводительность АГХ.

Тепловые потери в ТАГ и ТАГХ делятся на:

$Q_{BE}^{ТАГ}, Q_{BE}^{ТАГХ}$ - потери в буферных емкостях ТАГ и АГХ;

Q_{NiCr} - действительно подводимая мощность к $NiCr$ нагревателю, рассчитанная по уравнению:

$$Q_{NiCr} = W_{o.c.} - W_{(l)}, \quad (16)$$

где, $W_{o.c.}$ - подводенная электрическая мощность к $NiCr$ спирали при температуре окружающей среды, т.е. полная электрическая мощность нагревателя, $W_{(l)}$ - подводенная электрическая мощность к $NiCr$ спирали при рабочей температуре «горячего» теплообменника.

$Q_C^{ТАГ}, Q_C^{ТАГХ}$ - потери в стеке ТАГ и АГХ, за счет осевой теплопроводности по твердой стенке и газу и за счет теплоотдачи от наружной поверхности стека, данный тип потерь рассматривался во второй главе;

$Q_{гто}$ - потери на излучение и за счет теплопроводности через стенку в «горячем» теплообменнике, а также потери за счет осевой теплопроводности в буферной емкости.

Выведено уравнение для оценки величины мощности колебаний - звуковой энергии для идеального случая:

$$W = f \int_{x_1}^{x_2} p S dx = f p S (x_2 - x_1) = f p (V_2 - V_1), \quad (17)$$

где, f – частота колебаний; p – акустическое давление газа; S – площадь поперечного сечения; x_1, x_2 – координаты по длине; V_1, V_2 – объем газа.

Записано уравнение мощности для плоской волны без учета вязкостных акустических потерь и потерь на трение, а также акустических потерь для ТАГ с открытым концом:

$$W_A = \frac{\rho_0 u_0^2}{2} \cdot C \cdot S. \quad (18)$$

Для расчета количества акустической энергии, идущей на преодоление сил трения о стенки каналов ТАГХ и ТАГ, использовалось уравнение, Г. Свифта, с помощью которого можно определить вязкостные потери на каждом участке ТАГ, ТАГХ:

$$W_B = \frac{1}{4} \Pi \Delta X \cdot \delta_v \cdot \omega \rho_m \cdot u_0^2, \quad (19)$$

где, множитель $\Pi \Delta X$ – отображает геометрические характеристики каждого участка в отдельности; $\delta_v = \sqrt{\frac{2\mu}{\omega \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}$ – толщина вязкостного пограничного слоя (μ, ν – динамическая и кинематическая вязкости); u_0 – амплитуда колебательной скорости; ρ_0 – плотность газа; C – скорость распространения звука в газе; S – площадь поперечного сечения ТАГХ, ТАГ; ω – угловая частота.

Проанализированы потери акустической энергии с открытого конца за счет излучения. В полуволновых ТАГ, ТАГХ, данный тип потерь отсутствует, так, как полуволновая схема закрыта с обеих сторон. Однако если труба открыта с одного конца (в случае четвертьволновых устройств), то такие потери имеют место.

Поток энергии, выходящий из трубы, определялся выражением В. М. Ларионова, Р. Г. Зарипова:

$$W_H = \frac{\rho \cdot S \cdot (u_0)^2}{4} \cdot \left[\frac{\omega^2 \cdot d^2}{8 \cdot c} + u_0 \right]. \quad (20)$$

После составления энергетических балансов установки, проведено численное вычисление тепловых потерь, нагрузок теплообменника и уровня генерируемой акустической энергии.

В третьем разделе рассмотрены схемные решения, принятые для дальнейшего проектирования экспериментальной установки ТАГ. Выбраны направления исследования процесса генерации акустических колебаний в термоакустическом генераторе (ТАГ), составлена программа экспериментов.

Главной целью данного этапа работы являлось определение рабочих характеристик ТАГХ, включающих температурные, тепловые, гидравлические характеристики, а также определение энергетической эффективности ТАГ, степени термодинамического совершенства и рациональной области применения ТАГХ.

Для исследований физических процессов, происходящих в ТАГ, были спроектированы стенды с экспериментальными моделями четвертьволнового и полуволнового термоакустических генераторов (рис. 7) и (рис. 8). Входящая в состав экспериментального стенда модель четвертьволнового ТАГ состоит из аппаратов, приведенных в таблице 1. Общая длина четвертьволнового ТАГ составляет – 1090мм.

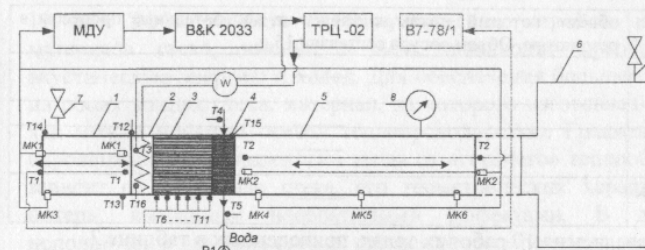


Рис. 7. Схема экспериментального стенда четвертьволнового ТАГ. МДУ – Микрофонный усилитель с дифференциальным входом, B&K 2033 – анализатор звукового спектра Vriel&Kjaer 2033, ТРЦ-02 – терморегулятор цифровой, В7-78/1 – вольтметр универсальный.

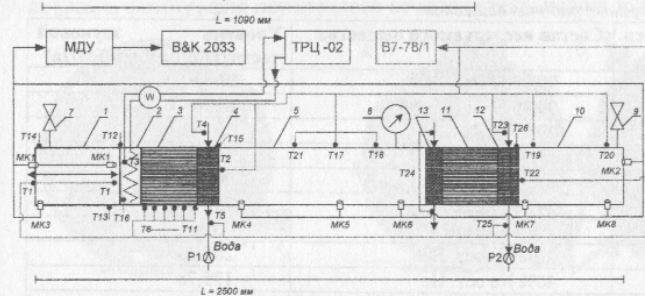


Рис. 8. Схема экспериментального стенда полуволнового ТАГ. МДУ – Микрофонный усилитель с дифференциальным входом, B&K 2033 – анализатор звукового спектра Vriel&Kjaer 2033, ТРЦ-02 – терморегулятор цифровой, В7-78/1 – вольтметр универсальный.

Общая длина полуволнового ТАГ составляет – 2500 мм.

Входящая в состав экспериментального стенда модель полуволнового ТАГ состоит из аппаратов, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Аппараты, входящие в состав экспериментального стенда полуволнового и четвертьволнового ТАГ.

№ апп. (рис. 7, 8).	Название аппарата	Описание аппарата, (материал, конструктивные особенности).
1, 10	Буферная емкость	Труба 12X18Н10Т. (51 X 1,5). Длина буферной емкости – 290 мм.
2	«Горячий» теплообменник нагреватель	NiCr – лента. В качестве «горячего» теплообменника (далее нагревателя), использовались различные конструкции нагревательных элементов.
3, 11	Стек	Пакет капилляров, уложенных в обечайку. Количество капилляров в сечении – 1400 шт. Материал капилляров и каркаса – 12X18Н10Т. Наружный диаметр капилляра – 1мм. Внутренний диаметр капилляра – 0,8мм. Длина стекла – 100 мм.
4, 12	Водяной теплообменник	В ходе эксперимента использовались два типа теплообменников: первый тип теплообменника выполнен из трубок 12X18Н10Т прямоугольного сечения 16 X 1,2 мм, второй тип теплообменника выполнен из медных пластин 5 X 0,2 мм.
5	Резонатор	Труба 12X18Н10Т. (51 X 1,5). Длина резонатора – четвертьволнового ТАГ – 664 мм Длина резонатора – полуволнового ТАГ – 2040 мм.
6	Сосуд	Устанавливался во время проведения экспериментов, с различными газами, на открытом конце четвертьволнового резонатора. Установленный сосуд можно было представить как «бесконечный».

		объем», который, никак не влияет на колебательные процессы в резонаторе. Объем сосуда составлял 15 л.
7	Вентиль заправочный	—
8	Манометр	—
9	Вентиль продувочный	—
13	Теплообменник нагрузки	—

Работа ТАГ исследовалась на 10 рабочих телах, приведенных в таблице 2.

Таблица 2. Типы исследуемых рабочих веществ.

№ п/п	Тип исследуемого вещества	Состав исследуемого вещества	Уровень звуковой частоты, Гц. (P = 0,1 МПа)
1	Гелий	99,9999 He	266,6
2	Аргон	99,9999 Ar	82,03
3	Ксенон	99,9999 Xe	38,09
4	Криптон	99,9999 Kr	46,88
5	Азот	99,99 N ₂	90,82
6	Смесь	24,3% Xe ост. N ₂	73,24
7	Смесь	2% Ne ост. He	70,31
8	Смесь	20% Ne ост. He	205,08
9	Смесь	40% Ne ост. He	175,78
10	Смесь	80% Ne ост. He	134,77
11	Воздух	20,93%O ₂ + 78,03%N ₂ + 1,04%Ar	90,82

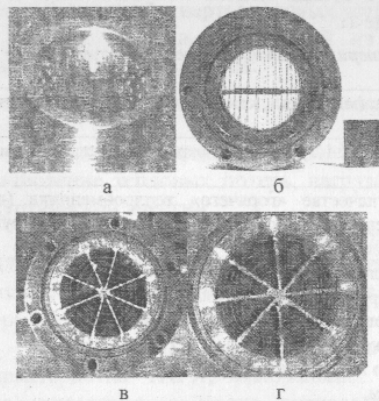


Рис. 9. Типы нагревательных элементов. а) «горячий» теплообменник типа трубная решетка; б) теплообменник из NiCr проволоки; в) теплообменник типа - «Архимедова спираль» из NiCr проволоки; г) теплообменник типа - «Архимедова спираль» из NiCr ленты.

Конструктивные особенности, схемы и фотографии аппаратов, входящих в экспериментальный стенд ТАГ представлены в разделе 3.3 диссертационной работы. В ходе исследований ТАГ и ТАГХ были проведены эксперименты на различных конструкциях аппаратов, входящих в установки такого типа (рис. 9, 10,

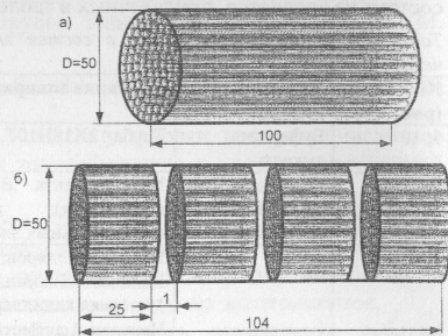


Рис. 10. Схема используемых типов стеков. (а) – стек из цельных капилляров, б) – стек, набранный из четырех пакетов с капиллярами.

11, 12). Эффективность термоакустических устройств критически зависит от материала стека, именно в нем происходит преобразование теплоты в акустическую энергию и холод. Для обеспечения большего градиента температур на обоих концах стека, материал, из которого изготовлен стек, должен обладать как можно меньшей осевой теплопроводностью. Градиент температур в стеке, спровоцированный переносом тепла от «горячего» теплообменника, существенно зависит от материала стека, его геометрических характеристик и некоторых потерь, вызванных необратимыми эффектами. В данной работе были использованы два типа стеков, схемы которых показаны на (рис. 10). На (рис. 11), показана фотография поперечного сечения стека, использовавшегося в ТАГ.

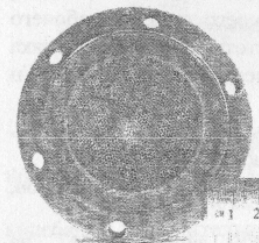


Рис. 11. Фотография поперечного сечения стека.

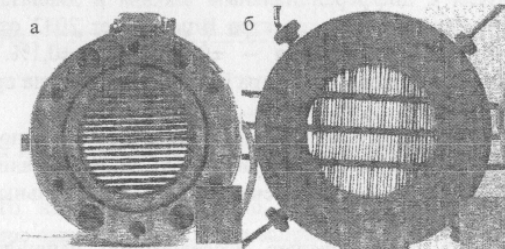


Рис. 12. Фотографии водяных теплообменников. а) – из нержавеющей трубок прямоугольного сечения. б) – из медных пластин.

Регулирование температуры нагрева NiCr ленты производилось с помощью регулятора температуры - «Промпрылад ТРЦ-02», Погрешность измерения температуры ТРЦ – 02 в пределах 250 – 600 град. составляла ± 1%.

Мощность, подводимая к электронагревателю электрической энергии, измерялась двумя способами. С помощью ваттметра (W) типа K505, на пределе 30В, 10А. Предел допускаемой основной погрешности приборов комплекта в нормальной области частот равен ± 1%. Проверка подводимой электрической энергии проводилась с помощью универсального вольтметра В7-78/1 + UNI-T Model UT70A. Погрешности приборов: В7-78/1 на пределе измерения 100В с разрешением 1В составляла ± 1%; UNI-T Model UT70A на пределе измерения 10А с разрешением 10А составляла ± 2,5%.

Постоянный расход воды через водяной теплообменник поддерживался с помощью водяной помпы Atmap AT 202, Производительность водяной помпы составляет 1200 л/ч. Расход воды через теплообменник составлял 10,17 г/с. Расход воды измерялся наполнением мерного сосуда за определенный промежуток времени. Объем мерного сосуда составлял 1л ± 5мл.

Для измерения нагрузки водяного теплообменника на входе и выходе и для измерения распределения температуры по длине ТАГ были установлены термопары «ХК» Погрешность термопар в диапазоне температур -40 до +300 °С составляет ± 2°С, в диапазоне температур +300 до +800 °С составляет ± 2,5°С.

Вторичным прибором являлся вольтметр универсальный В7-78/1. Погрешность прибора на пределе измерения 1В с разрешением 1 мкВ составляла ± 1%.

Уровень акустического давления измерялся с помощью электретных микрофонов типа XF. Снятый с микрофона сигнал поступал на спроектированный однокаскадный микрофонный усилитель – ОМУ, который представляет собой электрическую схему питания и калибровки электретного микрофона. Далее после ОМУ, сигнал поступает на микрофонный усилитель с дифференциальным входом – МДУ, и на анализатор звукового спектра Bruel&Kjaer 2033.

Погрешность приборов для проведения акустических измерений: электретных микрофонов после калибровки в диапазоне 120 – 174дВ – ± 1%; однокаскадного микрофонного усилителя в диапазоне 120 – 174дВ – ± 0.5%; микрофонного усилителя с дифференциальным входом в диапазоне 120 – 174дВ – ± 0.5%; анализатора звукового спектра Bruel&Kjaer 2033 от верхнего предела рабочего динамического диапазона – ±0,1дВ или ±0,1%. Частотная характеристика анализатора звукового спектра Bruel&Kjaer 2033 на пределе измерений 2Гц – 1кГц – ±0,1%.

Калибровка датчиков давления проводилась с помощью пистонфона (модель 4220) производства Bruel&Kjaer с погрешностью калибровки ±0,15дВ.

Четвертый раздел посвящен экспериментальным исследованиям процессов, происходящих в ТАГ.

Раздел 4.1. посвящен исследованию влияния массы заправки ТАГ на температуру начала колебаний и распределение температур по длине ТАГ при его работе на различных чистых газах и смесях. Для поддержания акустических колебаний следует соблюдать необходимый перепад температур на горячем и холодном концах стека, который может быть найден по уравнению Г. Свифта:

$$\nabla T = \frac{\gamma - 1}{T_{cp}\beta} \frac{T_{cp} \cdot 2\pi f}{a} \cdot \tan\left(\frac{x \cdot 2\pi f}{a}\right), \quad (21)$$

где, γ – отношение изобарной теплоемкости к изохорной, T_{cp} – средняя температура между горячим и холодным концом стека, β – коэффициент теплового расширения. f – частота колебаний, a – скорость звука в газе, находящегося в стеке, x – длина стека. Для газов, множитель $\frac{\gamma - 1}{T_{cp}\beta} \approx 1$.

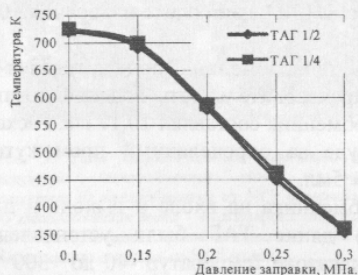


Рис. 13. Зависимость температуры начала колебаний 1/2 и 1/4 волнового ТАГ от давления заправки (Рабочее тело гелий).

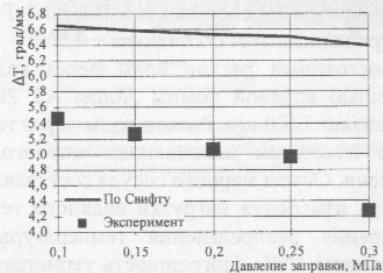


Рис. 14. Зависимость необходимого перепада температур на миллиметр длины стека для установившегося режима колебаний в полуволновом ТАГ, по уравнению 26, и по результатам эксперимента от давления заправки. (Рабочее вещество – гелий).

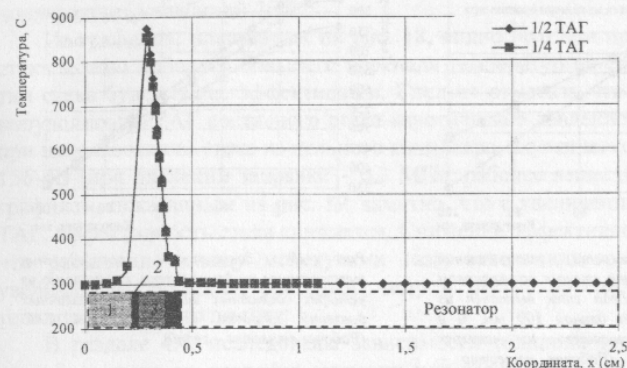


Рис. 15. Зависимость распределения температуры по длине ТАГ в случае 1/2λ и в случае 1/4λ (давление заправки 0,1 МПа, рабочее тело гелий). (1 – буферная емкость, 2 – горячий теплообменник – нагреватель, 3 – стек, 4 – водяной теплообменник).

На основании проведенных исследований построены графические зависимости, показанные на рис. 13, 14, 15.

Из графика, показанного на (рис. 13), видно, что температура начала колебаний в значительной мере зависит от давления заправки. Так при давлении заправки 0,1МПа, эта температура равна 725К, а при давлении заправки 0,3МПа, она снижается до 360К. Максимальное давление 0,3МПа для данной конструкции связано с тем, что при больших давлениях работа ТАГ резко ухудшается. Режим, при котором начинается генерация акустических колебаний можно назвать неустановившемся.

Для установившегося режима требуется несколько большая температура. На рис. 14, показана зависимость требуемого перепада температур на миллиметр длины стека, для установившегося режима колебаний, рассчитанного по уравнению 26, и перепада температуры на концах стека по результатам эксперимента.

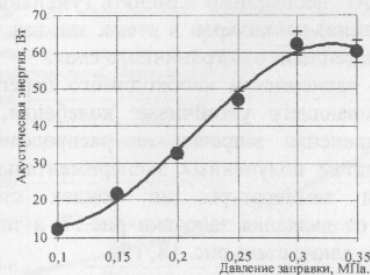


Рис. 16. Зависимость генерируемой акустической энергии от давления заправки полуволнового ТАГ. (Рабочее тело – гелий).

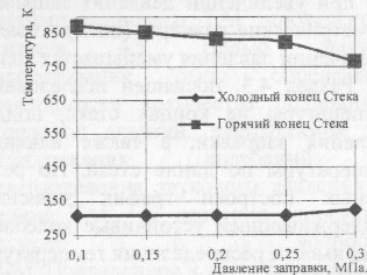


Рис. 17. Зависимость температур на концах стека, поддерживающих устойчивые колебания, от давления заправки в полуволновом ТАГ. (Рабочее вещество – гелий, экспериментальные данные).

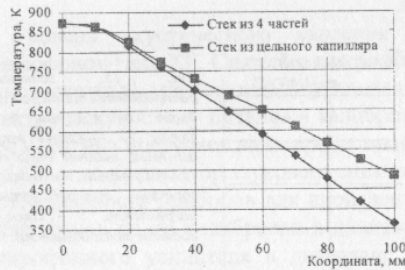


Рис. 18. Зависимость распределения температуры по длине стека в полуволновом ТАГ, для случая, когда стек выполнен из сплошного капилляра длиной 100 мм, и в случае стека, состоящего из четырех составных частей. (Рабочее вещество – гелий, давление заправки 0,3 МПа).

Из графика, показанного на рис. 15, видно, что распределение температуры по длине ТАГ в случае полуволновой и четвертьволновой модели практически одинаковы. Значит, аппараты, входящие в состав экспериментальных моделей, находятся при одинаковых температурных условиях, и данный эксперимент дает нам возможность производить оценку и сравнение эффективности полуволновой и четвертьволновой конструкции ТАГ.

Раздел 4.2. посвящен расчету количества генерируемой акустической энергии. По результатам расчета, проведенного по уравнениям (18 – 20) построен график зависимости количества генерируемой акустической энергии, показанный на рис. 16. Из этого графика, видно, что при давлениях заправки в интервале 0,1 – 0,3 МПа величина генерируемой акустической энергии растет от 11 до 62 Вт. Дальнейшее увеличение давления до величины 0,35 МПа приводит к снижению уровня генерируемой акустической энергии. Такое поведение обусловлено тем, что при увеличении давления заправки ТАГ необходимо изменять (уменьшать) геометрические размеры (поперечные сечения) капилляров в стеке, так как при увеличении давления уменьшается толщина теплового пограничного слоя.

Раздел 4.3. посвящен исследованиям зависимости необходимого перепада температуры на концах стека, поддерживающего устойчивые колебания, от давления заправки, а также влияния давления заправки на распределение температуры по длине стека. По результатам полученных экспериментальных данных построен график зависимости температуры на концах стека, поддерживающей устойчивые колебания, от давления заправки рис.17, а также зависимости распределения температуры по длине стека рис. 18, 19.

Из графика, показанного на рис. 17, видно, что зависимость этой температуры от давления слабая. Сравнение рис. 13 и рис. 17 показывает, что для устойчивого поддержания колебаний при больших давлениях заправки требуется гораздо более высокая температура, чем для начала колебаний. Например: при 0,1 МПа для начала колебаний требуется 725К, а для поддержания колебаний необходимо

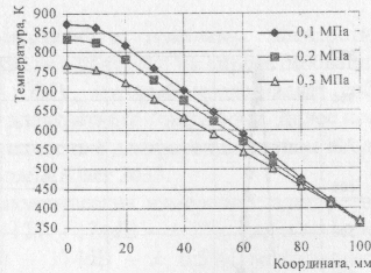


Рис. 19. Зависимость распределения температуры по длине стека, состоящего из четырех составных частей, для различных давлений заправки в полуволновом ТАГ. (Рабочее вещество – гелий).

860К. При давлении 0,3 МПа для начала колебаний требуется 360К, а для поддержания колебаний 760К.

Из графиков, показанных на рис. 18, видно, что при применении составного стека можно добиться большего перепада температур на его концах, т.е. данный тип стека будет более эффективным. Следует отметить что при использовании в полуволновом ТАГ составного стека акустическое давление составляло 162 dB, а при использовании стека из цельного капилляра, акустическое давление составило 156 dB (при давлении заправки – 0,3 МПа, рабочее вещество - гелий). Также по графикам, показанным на рис. 19, заметно, что с увеличением давления заправки ТАГ, эффективность стека снижается. Снижение эффективности обусловлено тем, что расстояние между молекулами газа, заполняющего стек, сокращается с увеличением давления, благодаря чему и растут потери, связанные с осевой теплопроводностью по газу.

В разделе 4.4. исследованы зависимости толщины теплового пограничного слоя δ_k в стеке от давления заправки для разных веществ. Толщина теплового пограничного слоя определена по уравнению:

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2k}{\omega \rho C_p}}, \quad (22)$$

где, k – коэффициент теплопроводности газа; ω – угловая частота колебаний; ρ – плотность газа; C_p – изобарная теплоемкость газа.

На основании проведенных исследований построен график зависимости, показанный на рис. 20.

Исследование зависимости подводимой тепловой энергии, необходимой для поддержания колебаний и распределения звукового давления по длине ТАГ, от давления заправки в случае полуволнового и четвертьволнового ТАГ проведено в разделе 4.5. Целью данного исследования было определение зависимости количества подводимой тепловой энергии, необходимой для поддержания колебаний и распределения звукового давления по длине ТАГ, от давления заправки в случае $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{4}$ волнового ТАГ. Подведенное к нагревателю тепло можно условно распределить на две части – подведенное тепло и тепло, усвоенное газом и направленное на генерацию звуковых колебаний. Эти две величины отличаются на величину

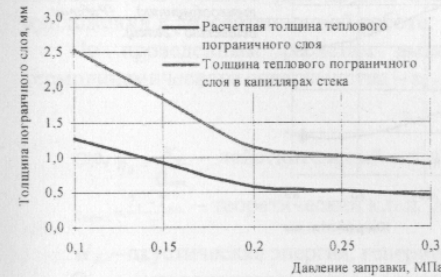


Рис. 20. Зависимость расчетной толщины пограничного слоя δ_k и требуемого внутреннего диаметра капилляра d в стеке ТАГ. (Рабочее вещество гелий. Полуволновой ТАГ).



Рис. 21. Зависимость подводимой теплоты, необходимой для поддержания устойчивых колебаний, от давления заправки в случае $\frac{1}{2}$ (полуволнового) и $\frac{1}{4}$ (четвертьволнового) ТАГ. (Рабочее вещество – гелий).

тепловых потерь в ТАГ. Подробное описание процессов в нагревателе было приведено в разделе 2.3 работы. Подведенное к теплообменнику-нагревателю тепло привело к генерированию акустической энергии в ТАГ. Зависимость этой энергии от давления заправки показана на рис. 21. Из графика, приведенного на рис. 21., следует, что при увеличении давления заправки растет величина Q_0 .

На рис. 22 и рис. 23, показана полученная в результате эксперимента связь этой энергии с заправочным давлением по длине ТАГ.

Из графиков, приведенных на рис. 22 и рис. 23, видно, что в резонаторе ТАГ устанавливается стоячая звуковая волна, и при длине ТАГ равной $1/4$ длине волны у закрытого конца резонатора наблюдается пучность (максимум звукового давления), а у открытого – узел (минимум звукового давления). В случае, когда общая длина ТАГ составляет $1/2$ длины волны (резонатор закрыт с двух сторон), пучность можно наблюдать на обоих концах ТАГ, а узел в центре резонатора.

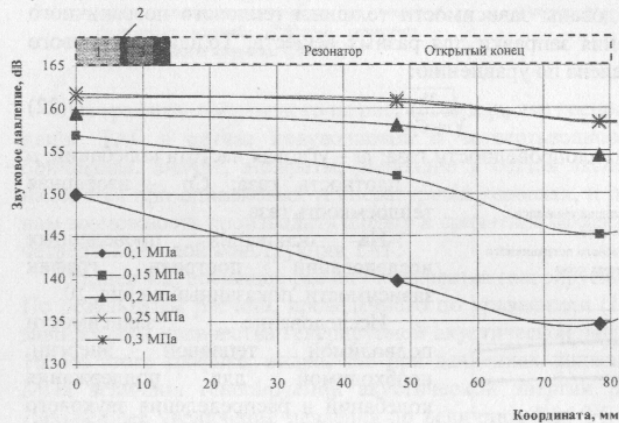


Рис. 22. Распределение звукового давления по длине четвертьволнового ТАГ. (1 – буферная емкость, 2 – «горячий» теплообменник – нагреватель, 3 – составной стек, 4 – водяной теплообменник). (Рабочее вещество – гелий).

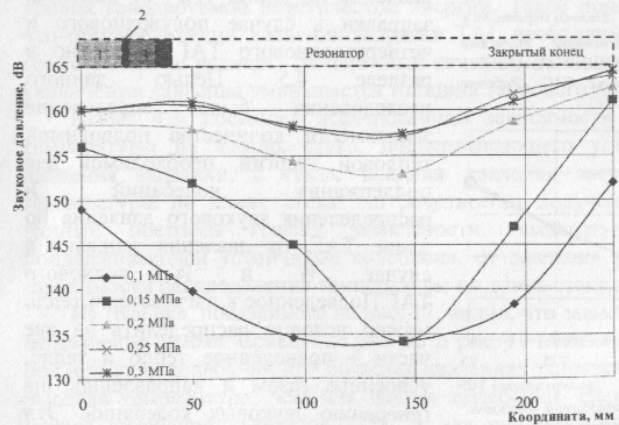


Рис. 23. Распределение звукового давления по длине полуволнового ТАГ. (1 – буферная емкость, 2 – «горячий» теплообменник – нагреватель, 3 – составной стек, 4 – водяной теплообменник). (Рабочее вещество – гелий).

Следует заметить, что частота колебаний при использовании разных веществ в качестве рабочего тела различна. Однако, при различных давлениях заправки генератора одним и тем же веществом, наблюдается незначительное изменение частоты, в пределах 10 Гц. Уровень звуковой частоты от типа рабочего тела, при давлении заправки ($P = 0,1 \text{ МПа}$), показан в таблице 2.

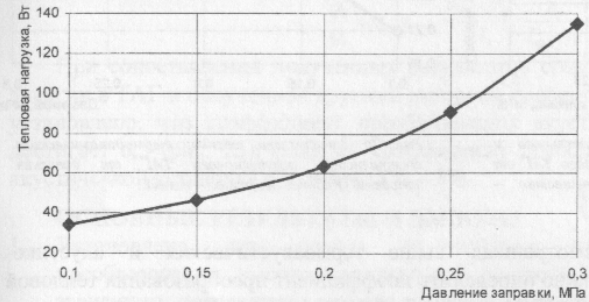


Рис. 24. График зависимости тепловой нагрузки водяного теплообменника от давления заправки ТАГ гелием (полуволновой ТАГ).

С использованием экспериментальных данных определены тепловые нагрузки водяного («холодного») теплообменника при разных давлениях заправки. На рис. 24, показан график зависимости тепловой нагрузки водяного теплообменника от разных давлений

заправки ТАГ гелием. Для других веществ аналогичные графики приведены в приложении к диссертационной работе.

По проведенным расчетам выполнена оценка к.п.д. ТАГ и степени термодинамического совершенства – $\varepsilon_{ТАГ}$.

$$\varepsilon_{ТАГ} = \frac{\eta_d}{\eta_{Карно}}, \quad (23)$$

где, $\eta_d = \frac{W_A}{Q_{подв}}$ – действительный к.п.д. ТАГ,

$\eta_{Карно} = \frac{T_1 - T_{о.с.}}{T_1}$ – теоретический к.п.д. (к.п.д. цикла Карно).

W_A – акустическая энергия, генерируемая ТАГ.

$Q_{подв}$ – подведенная энергия к «горячему» теплообменнику-нагревателю.

T_1 – температура газа в «горячем» теплообменнике нагревателе.

$T_{о.с.}$ – температура воздуха окружающей среды.

По уравнению 23, построены графики зависимости действительного и теоретического к.п.д. ТАГ, (рис. 25), а также график зависимости степени термодинамического совершенства от давления заправки, (рис. 26). В разделе 4.7. проведена оценка возможной холодопроизводительности термоакустического генератора холода (ТАГХ) при использовании экспериментальной модели ТАГ в качестве источника акустической энергии и сравнение ТАГХ с уже имеющимися моделями других исследователей.

В сконструированных моделях Г. Свифта, Т. Хара звуковые показатели ТАГХ, близки к звуковым характеристикам термоакустических генераторов, исследуемых в данной работе.

xv 891
ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
бібліотека

ОДЕСЬКИЙ НАУКОВИЙ
БІБЛІОТЕК
АКАД. П. П. РАДЧИКА

подведенная тепловая энергия, $Q_2 = T_{cp} \cdot (S_2 - S_1)$ – отведенная тепловая энергия в водяном теплообменнике ТАГ, $W_A = Q_1 - Q_2$ – полученная акустическая энергия в ТАГ в результате преобразования тепловой энергии в акустическую.

Для нахождения коэффициента превращения тепла в холод воспользуемся уравнением:

$$\frac{Q_0}{Q_1} = \eta_k \cdot \varepsilon_{АГХ} = \frac{T_1 - T_{cp}}{T_1} \cdot \frac{T_0}{T_{cp} - T_0}, \quad (24)$$

При сопоставлении полученных результатов сгенерированной акустической энергии в ТАГ и полученной другими авторами холодопроизводительности в АГХ установлено, что коэффициент преобразования акустической энергии в холод достигает 0,3 (рис. 25), а общий коэффициент преобразования тепла в холод в акустической установке составляет 1% – 3%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что начало акустических колебаний при прямом преобразовании высокопотенциальной теплоты в акустическую энергию, зависит от температуры нагрева рабочего тела и массы заправки ТАГ и для различных рабочих тел определяет связь между подведенной теплотой и мощностью возникающих акустических колебаний.
2. Доказано что между подведенной теплотой Q и полученной акустической энергией W существует практически линейная взаимосвязь в диапазоне давлений заправки от 0,1 до 0,3 МПа, на основе которой установлены оптимальные проектные параметры ТАГ и проведен отбор наиболее перспективного рабочего тела – гелия.
3. Предложенная физическая модель, описывающая процессы преобразования высокопотенциальной теплоты в акустическую энергию, имитирует термодинамическое и гидродинамическое поведение рабочего тела в резонаторе, для диапазона давлений заправки 0,1 – 0,3 МПа и предсказывает оптимальное место установки аппаратов, входящих в состав ТАГ и ТАГХ.
4. Распределение температур по длине резонатора полуволновой и четвертьволновой моделей ТАГ обладает подобием, что дает возможность производить сопоставление эффективности полуволновой и четвертьволновой конструкций ТАГ для аппаратов, входящих в состав реальных установок по разделению неон-гелиевой смеси.
5. Повышение давления заправки рабочего тела генератора изменяет уровень получаемой акустической энергии в зависимости от типа рабочего вещества. Для гелия и неонгелиевых смесей с содержанием Ne до 40% наблюдается повышение уровня мощности акустической энергии при повышении давления заправки, и, наоборот, для рабочих тел, Ar, Xe, Kr, N₂, воздуха, неонгелиевых смесей с содержанием Ne более 40%, происходит снижение уровня акустической мощности при тех же условиях.
6. Показано что максимальный КПД преобразования теплоты в акустическую энергию, для различных рабочих тел достигает 25 – 30%. Степень термодинамического совершенства этого процесса составляет 20 – 40%.

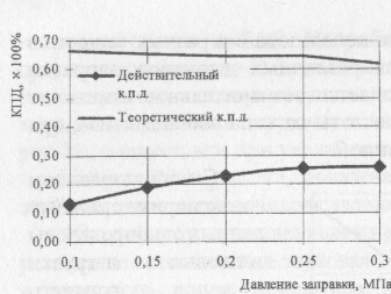


Рис. 25. Зависимость действительного и теоретического к.п.д. полуволнового ТАГ от давления заправки. (Рабочее вещество – гелий).

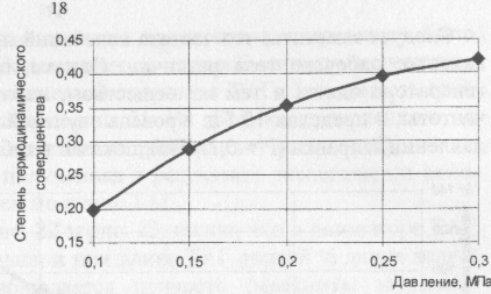


Рис. 26. Зависимость степени термодинамического совершенства полуволнового ТАГ от давления заправки. (Рабочее вещество – гелий).

На основании рассмотренных выше термоакустических и акустико-механических моделей, можно определить коэффициент преобразования тепловой энергии в холод (т.е. КПД ТАГХ).

Преобразование тепловой энергии в холод проходит в два этапа:

- преобразование тепловой энергии в энергию акустических колебаний;
- преобразование энергии акустических колебаний в тепло на более низком потенциальном уровне – холод.

Эти два этапа преобразования энергии показаны в виде двух термодинамических процессов в $T-s$ диаграмме на (рис. 27).

Из процессов, показанных на рис.27 видно, что преобразование тепловой энергии в холод происходит на трех температурных уровнях: T_1 – температура «горячего» теплообменника в ТАГ; T_{cp} – температура окружающей среды; T_0 – температура теплообменника нагрузки АГХ.

Для определения степени термодинамического совершенства ТАГХ можно воспользоваться уравнением (23).

где, $\eta_{карно} = \eta_T = \frac{T_1 - T_{cp}}{T_{cp} - T_0} \cdot \frac{T_0}{T_1}$ – теоретический КПД двух процессов, показанных на

рис. 27;

$\eta_{дл} = \eta_{дл}^{ТАГ} \cdot \eta_{дл}^{АГХ} = \frac{W_A}{Q_1} \cdot \frac{Q_0}{W_A} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot \frac{Q_0}{Q_1 - Q_2}$ – действительный КПД процессов, показанных на (рис. 27); где, Q_0 – холодопроизводительность АГХ, $Q_1 = T_1 \cdot (S_2 - S_1)$ –

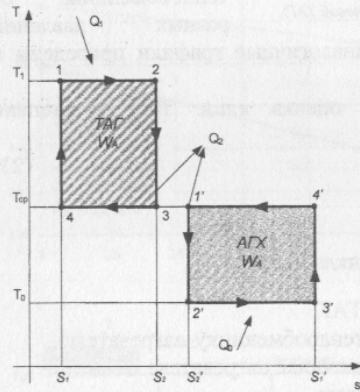


Рис. 27. Термодинамические процессы в ТАГ и АГХ (АГХ – акустический генератор холода).

7. Для экспериментально исследованных термоакустических генераторов холода коэффициент преобразования акустической энергии в холод не превышает 30%, а общий коэффициент преобразования теплоты в холод составляет 1% – 3%.
8. Полученные экспериментальным путем рабочие характеристики позволили определить рациональные области применения ТАГХ, к которым, в первую очередь, можно отнести кондиционирование и установки получения редких газов из воздуха, а также системы, использующие безмашинные способы получения холода.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Далаков П. И., Использование термоакустического генератора холода для снижения энергозатрат в установках получения инертных газов / Бондаренко В. Л., Лосяков Н. П., Далаков П. И. // Сборник научных трудов ОГАХ 2005г. Доклад на конференции в ОГАХ «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології». 21-23 сентября 2005 г., стр. 127 – 128.
Личный вклад: аналитическое исследование, выполнение расчетов.
2. Далаков П. И., Использование нерекуперированной теплоты для производства холода и снижения энергозатрат в установках получения инертных газов // Бондаренко В. Л., Лосяков Н. П., Далаков П. И. / Журнал «Технические газы» № 1, стр. 16-19. 2006 г.
Личный вклад: аналитическое исследование, выполнение расчетов. Обзор литературы.
3. Dalakov P. I., Use of thermoacoustic refrigerator for reducing power inputs in installations for producing inert gasses / Bondarenko V. L., Losyakov N. P., Dalakov P. I. // CryoPrague – 2006 book of abstracts, July 17 – 21, 2006. pp. 342.
Личный вклад: аналитическое исследование, выполнение расчетов.
4. Dalakov P. I., Use of thermoacoustic refrigerator for reducing power inputs in installations for producing inert gasses / Bondarenko V. L., Losyakov N. P., Dalakov P. I. // CryoPrague – 2006 Proceedings, July 17 – 21, 2006. pp. 255-258.
Личный вклад: предложение идей, разработка схем внедрения ТАГХ в печь каталитического гидрирования, разработка экспериментальной установки.
5. Dalakov P. I., Experimental research of the thermoacoustic generator / Bondarenko V. L., Losyakov N. P., Dalakov P. I., // Cryogenics and Refrigeration – Proceedings of ICCR'2008/ April 5 – 9, 2008. Shanghai Jiao Tong University. Shanghai, P. R. China. Editors in Chief: Wang Ruzhu Zhang Peng. p. 275 – 279.
Личный вклад: постановка задачи, аналитическое исследование, выполнение расчетов.
6. Далаков П. И., Создание криогенного комплекса для реализации безотходной технологии получения неона и гелия / Бондаренко В. Л., Лосяков Н. П., Графов А. П., Далаков П. И. // Журнал «Технические газы» № 6, стр. 24-27. 2008 г.
Личный вклад: аналитическое исследование, выполнение расчетов.
7. Далаков П. И., Безмашинный генератор акустических колебаний / Далаков П. И. // Одеська Національна Академія Харчових Технологій. Наукові праці., Випуск 35, Т 1.стор. 216 – 220. 2009 р.

Личный вклад: постановка задачи, аналитическое исследование, выполнение расчетов.

8. Далаков П. И., Разработка и исследование термоакустического генератора холода / Бондаренко В. Л., Лосяков Н. П., Далаков П. И. // Вторая международная научная конференция «Промышленные газы» посвященная 300-летию М. В. Ломоносова. Москва 19 апреля 2011. МГТУ им Н. Э. Баумана. Сборник трудов с. 16 – 24.

Личный вклад: постановка задачи, аналитическое исследование, выполнение расчетов.

9. Далаков П. И., Анализ эффективности действующей установки разделения гелиенеоновой смеси / Графов А. П., Ионов М. И., Лосяков Н. П. Далаков П. И. // 7я международная научно-техническая конференция «Современные проблемы холодильной техники и технологии» Сборник тезисов докладов., Часть 2. ОГАХ. 2011г. стр. 91-92.

Личный вклад: предложение идей.

10. Далаков П. И., Механизм возбуждения колебательных процессов в термоакустических генераторах / Бондаренко В. Л., Лосяков Н. П., Далаков П. И. // 7я международная научно-техническая конференция «Современные проблемы холодильной техники и технологии» Сборник тезисов докладов., Часть 2. ОГАХ. 2011г. стр. 96-97.

Личный вклад: предложение идей.

11. Далаков П. И., Нетрадиционный метод утилизации бросовых источников тепла. / Бондаренко В. Л., Лосяков Н. П., Графов А. П. Далаков П. И. // Журнал «Технические газы» № 1, стр. 41-47. 2012 г..

Личный вклад: постановка задачи, аналитическое исследование, выполнение расчетов.

АННОТАЦИЯ

Далаков П. И. «Определение конструктивных особенностей и рабочих характеристик термоакустического генератора холода (ТАГХ)». – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. Одесская государственная академия холода. Одесса 2012г.

В криогенной технологии производства инертных газов - криптона, ксенона, неона и др. применяются различные методы и схемные решения переработки и очистки сырьевых газов от примесей (метана, водорода, различных углеводородов). Так как эти примеси горючи, то одним из способов их очистки является выжигание или каталитическое гидрирование (окисление). При сгорании горючих примесей на температурном уровне 500 – 600 °С образуется избыточное количество теплоты, что приводит к разогреву и постепенному разрушению входных коллекторов концевых теплообменников. На практике ресурс теплообменника составляет 1,5 – 2 месяца. Вместе с тем, образующееся тепло целесообразно использовать для привода холодильной машины, холодопроизводительность которой можно применить для различных целей, в

том числе и для снижения термического напряжения коллекторов концевых теплообменников.

Методы прямого преобразования теплоты в работу давно известны. Одним из перспективных направлений в развитии газодинамических методов прямого преобразования теплоты в работу с последующей выработкой холода является создание безмашинных термоакустических генераторов холода (ТАГХ).

Однако, в настоящее время конструктивные особенности и рабочие характеристики ТАГХ изучены недостаточно, что затрудняет определение их рациональной области применения и поэтому приведенные в диссертации исследования являются актуальными.

Диссертация посвящена исследованию температурных, тепловых, гидравлических характеристик, а также определению энергетической эффективности, степени термодинамического совершенства и рациональной области применения термоакустических генераторов холода – ТАГХ. В работе проведен анализ существующих на данный момент устройств такого типа. Обоснована необходимость детального изучения данного класса устройств и аппаратов входящих в них.

Описан механизм превращения высокопотенциального тепла в акустическую энергию в виде стоячей звуковой волны, и механизм превращения энергии сгенерированной звуковой волны в холод.

Разработаны конструкции полуволнового и четвертьволнового преобразователей тепловой энергии в энергию акустических колебаний. Составлены уравнения энергетических балансов, определены численные значения величин потерь, нагрузок теплообменных аппаратов и уровней генерируемой акустической энергии спроектированных моделей при использовании различных рабочих веществ.

Проведены экспериментальные исследования физических процессов ТАГ. По предложенной математической модели проведен расчет процессов, происходящих в ТАГ и ТАГХ. Определены условия, влияющие на эффективность преобразования тепловой энергии в акустическую. Установлено, что начало акустических колебаний при прямом преобразовании высокопотенциальной теплоты в акустическую энергию, зависит от температуры нагрева рабочего тела и массы заправки ТАГ и для различных рабочих тел определяет связь между подведенной теплотой и мощностью возникающих акустических колебаний.

Показана связь между частотами звуковых колебаний и геометрическими размерами каналов ТАГХ при использовании различных рабочих веществ.

В работе доказано что между подведенной теплотой Q и полученной акустической энергией W существует практически линейная взаимосвязь в диапазоне давлений заправки от 0,1 до 0,3 МПа, на основе которой установлены оптимальные проектные параметры ТАГ и проведен отбор наиболее перспективного рабочего тела – гелия.

Распределение температур по длине резонатора полуволновой и четвертьволновой моделей ТАГ обладает подобием, что дает возможность производить сопоставление эффективности полуволновой и четвертьволновой

конструкций ТАГ для аппаратов, входящих в состав реальных установок по разделению неона-гелиевой смеси.

Повышение давления заправки рабочего тела генератора изменяет уровень получаемой акустической энергии в зависимости от типа рабочего вещества. Для гелия и неонгелиевых смесей с содержанием Ne до 40% наблюдается повышение уровня мощности акустической энергии при повышении давления заправки, и, наоборот, для рабочих тел, Ar, Xe, Kr, N₂, воздуха, неонгелиевых смесей с содержанием Ne более 40%, происходит снижение уровня акустической мощности при тех же условиях

Проведена оценка возможной холодопроизводительности термоакустического генератора холода (ТАГХ) при использовании экспериментальной модели ТАГ в качестве источника акустической энергии и сравнение ТАГХ с уже имеющимися моделями других исследователей.

В настоящей работе коэффициент преобразования акустической энергии в холод достигает 0,3, а общий коэффициент преобразования тепла в холод в акустической установке составляет 1% – 3%.

Ключевые слова: термоакустический генератор, акустическая энергия, полуволновой резонатор, четвертьволновой резонатор высокопотенциальная теплота, звуковая волна.

АНОТАЦІЯ

Далаков П. І. «Визначення конструктивних особливостей і робочих характеристик термоакустичного генератора холоду (ТАГХ)». - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. Одеська державна академія холоду. Одеса 2012 р.

Дисертація присвячена дослідженню температурних, теплових, гидравлических характеристик, а також визначенню енергетичної ефективності, ступеня термодинамічної досконалості та раціональної області застосування термоакустичних генераторів холоду – ТАГХ. У роботі проведений аналіз існуючих на даний момент пристроїв такого типу. Обґрунтована необхідність детального вивчення даного класу пристроїв і апаратів, які входять у них.

Описаний механізм перетворення високопотенціального тепла в акустичну енергію у вигляді стоячої звукової хвилі і механізм перетворення енергії згенерованої звукової хвилі у холод.

Розроблені конструкції напівхвильового та чвертьхвильового перетворювачів теплової енергії в енергію акустичних коливань. Складено рівняння енергетичних балансів, визначено чисельні значення величин втрат, навантажень теплообмінних апаратів і рівнів генерованої акустичної енергії спроекттованих моделей при використанні різних робочих речовин.

Проведено експериментальні дослідження фізичних процесів ТАГ. По запропонованій математичній моделі проведено розрахунки процесів, які відбуваються в ТАГ і ТАГХ. Визначено умови, що впливають на ефективність перетворення теплової енергії в акустичну. Встановлений зв'язок між частотами звукових коливань і геометричними розмірами каналів ТАГХ при використанні різних робочих речовин.

Проведена оцінка можливої холодопродуктивності термоакустичного генератора холоду (ТАГХ) при використанні експериментальної моделі ТАГ у якості джерела акустичної енергії та порівняння ТАГХ із уже наявними моделями інших дослідників.

В даній роботі коефіцієнт перетворення акустичної енергії у холод досягає 0,3, а загальний коефіцієнт перетворення тепла у холод в акустичній установці становить 1% – 3%.

Ключові слова: *термоакустичний генератор, високопотенціальна теплота, напівхвильовий резонатор, чвертьхвильовий резонатор, акустична енергія, звукова хвиля, перетворення енергії.*

ANNOTATION

Dalakov P. I. "Identification of design features and operating characteristics of the thermoacoustic cooling generator (TACG)." - Manuscript.

Dissertation for degree of technical sciences Ph. D. in specialty 05.05.14 - Refrigeration, vacuum and compressor equipment, air-conditioning system. Odessa State Academy of Refrigeration. Odessa 2012.

The dissertation is devoted to the study of temperature, thermal, hydraulic characteristics, as well as the definition of energy efficiency, the thermodynamic perfection degree and a rational application of use the thermoacoustic cooling generators. In this paper we analyze the currently existing devices of this type. Proved the necessity a detailed study of this devices class and apparatus belonging to them.

The mechanism of high-grade heat conversion into acoustic energy in the form of a standing sound wave and the mechanism of transformation generated energy by sound waves in the cold is described.

Have been designed half-wave and quarter-wave transducers of thermal energy into acoustic waves. The energy balance equation is composed. Determined the numerical values of losses, thermal load of heat exchangers and levels of acoustic energy generated in the constructed models by using different working substances.

Experimental investigations of physical processes TACG is conduct. In the proposed mathematical model was carry out the calculation of processes occurring in the TAG and TACG. Determined the conditions that affect the efficiency of converting thermal energy into acoustic. Established a connection between the frequencies of sound waves and the geometrical dimensions of channels TACG using different working substances. The estimation of the possible cooling of the thermoacoustic cooling generator (TACG) using an experimental model of TAG as a source of acoustic energy is conducted. A comparison TAGH with existing models of other researchers is carried out.

In this paper, conversion of acoustic energy into the cold reaches 0.3, while the total conversion of heat into the cold in an acoustic installation reached 1% - 3%.

Key words: *thermoacoustic cooling generator, high-grade heat conversion, acoustic energy, half-wave, quarter-wave, transducer, energy converting.*