

УДК 621.468

## Экспериментальное исследование низкотемпературного термоакустического преобразователя

Канд. техн. наук С. О. НЕКРАСОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук Д. В. САРМИН, Д. В. СИВУХА,  
В. И. ШИХАЛЕВ

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

<sup>1</sup> E-mail: nekrasova.so@ssau.ru

*Термоакустический преобразователь (ТАП) является перспективным устройством генерации электроэнергии для использования в энергетических циклах на основе низкопотенциальной теплоты, т. к. ТАП имеет надежную конструкцию, простую настройку по рабочим температурам, внешний подвод теплоты. В статье разработана конструкция низкотемпературного атмосферного термоакустического преобразователя, работающего на основе самоподдерживающегося процесса осциллирующего движения газа в замкнутом контуре. Проведены экспериментальные измерения параметров низкотемпературного термоакустического преобразователя в режиме подачи криогенной жидкости для создания градиента температуры на регенераторе. Сравнение параметров низкотемпературного режима работы преобразователя с характеристиками в режиме градиента температуры «нагреватель-холодный теплообменник» производилось по рабочей частоте, температурной разнице режима запуска и производимой работе цикла. Экспериментальные результаты доказывают работоспособность низкотемпературного термоакустического преобразователя, температурная разница, соответствующая режиму запуска, составила 100...120 °С, что на 40% ниже, чем в высокотемпературном режиме работы. Увеличение термического КПД на режимах с подводом криогенной жидкости составило 8...10%. Полученные экспериментальные результаты согласуются с численным моделированием на основе уравнений линейной термоакустики.*

**Ключевые слова:** термоакустический преобразователь, математическая модель, температурный режим, термоакустический эффект, криопродукт.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 10.04.2023, одобрена после рецензирования 09.06.2023, принята к печати 16.06.2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-4-12

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Некрасова С. О., Сармин Д. В., Сивуха Д. В., Шихалев В. И. Экспериментальное исследование низкотемпературного термоакустического преобразователя. // Вестник Международной академии холода. 2023. № 3. С. 4-12  
DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-4-12

## Experimental study of low temperature thermoacoustic converter

Ph. D. S. O. NEKRASOVA<sup>1</sup>, Ph. D. D. V. SARMIN, D. V. SIVUKHA, V. I. SHIKHALEV

Samara University

<sup>1</sup> E-mail: nekrasova.so@ssau.ru

*Thermoacoustic converter (TAC) is a promising device for power generation for use in energy cycles based on low-potential heat, because TAC has a reliable design, simple adjustment for operating temperatures, and external heat supply. The paper analyses the design of a low-temperature atmospheric thermoacoustic transducer based on a self-supported process of oscillating gas motion in a closed loop. Experimental measurements for parameters of the low-temperature thermoacoustic converter in cryogenic liquid supply mode to create a temperature gradient on the regenerator are carried out. Comparison of the parameters for the low-temperature converter operation mode with the characteristics in the «heater — cold heat exchanger» temperature gradient mode was carried out according to the operating frequency, the temperature difference of the starting mode, and the cycle work produced. Experimental results prove efficient performance of the low-temperature thermo-acoustic transducer; the temperature difference corresponding to the starting mode was 100...120 oC, which is 40% lower than in the high-temperature operation mode. The increase in thermal efficiency in the modes with cryogenic liquid supply was 8...10%. The experimental results are in agreement with the numerical simulation based on the equations of linear thermoacoustics.*

**Keywords:** thermoacoustic converter, mathematical model, temperature mode, thermoacoustic effect, cryoproduct

**Article info:**

Received 10/04/2023, approved after reviewing 09/06/2023, accepted 16/06/2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-4-12

Article in Russian

**For citation:**Nekrasova S. O., Sarmin D. V., Sivukha D. V., Shikhalev V. I. Experimental study of low temperature thermoacoustic converter. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No 3. p. 4-12. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-4-12**Введение**

Доля потребляемого природного газа во всем мире увеличивается, и в некоторых странах СПГ является основным видом импортируемого энергоносителя. В связи с этим все большее внимание уделяется вопросу эффективного использования низкопотенциальной теплоты СПГ [1]–[3], а именно — исследованиям по разработке энергетических циклов или «каскадов» циклов, которые используются, в основном, для преобразования «холодной» энергии в электрическую. Большинство каскадных энергетических циклов специализированы для регазификации СПГ на крупных терминалах, сосредоточенных на морском побережье [4]–[7]. Как правило, данные каскадные энергетические циклы имеют диапазон температур между температурой окружающей среды и температурой процесса газификации СПГ и, в связи с этим, включают в себя комбинации циклов прямого расширения [8], низкотемпературного органического цикла Ренкина [9], цикл Брайтона [10]. Температура окружающей среды обеспечивается морской водой, воздухом, отработанным теплом или солнечной энергией. Для повышения эффективности энергетического «каскада» в него часто дополнительно включают: разделение воздуха, легких углеводородов, производство этилена, сухого льда и жидкого диоксида углерода, опреснение, кондиционирование воздуха и т. д. [11]–[13]. Тем не менее, из-за наличия большого количества основного и вспомогательного оборудования такие длинные каскадные циклы уязвимы с точки зрения эффективности, транспорта рабочих тел, эксплуатационных затрат и других факторов.

Если речь идет о меньшей энергоемкости или, так называемой, распределенной энергетике, то для получения малых мощностей эти циклы сложны и малоэффективны. Тем не менее, применение «холодной энергии» СПГ даже при давлении газификации менее 0,6 МПа считается рациональным из-за высокого значения эксергетического КПД процесса рекуперации низкопотенциальной теплоты.

Поскольку реализация процесса газификации за счет температуры окружающей среды происходит при постоянных температурах фазового перехода и температуре окружающей среды, удобной «настройкой» для такого процесса будет энергетический цикл на основе двух изотермических процессов, например, цикл Стирлинга.

Известно, что двигатели Стирлинга (ДС) имеют высокий эффективный КПД, в связи с этим имеется ряд исследований, посвященных использованию «холодной» энергии в цикле Стирлинга. В электрогенераторах выгодно сочетается рекуперация низкопотенциальной теплоты в процессе охлаждения теплообменника холодной полости сжиженным газом, а нагрев — с помощью теплоты конденсации отборов турбины электростанции

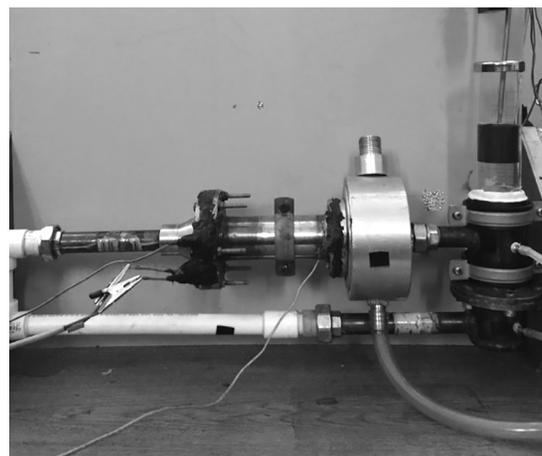
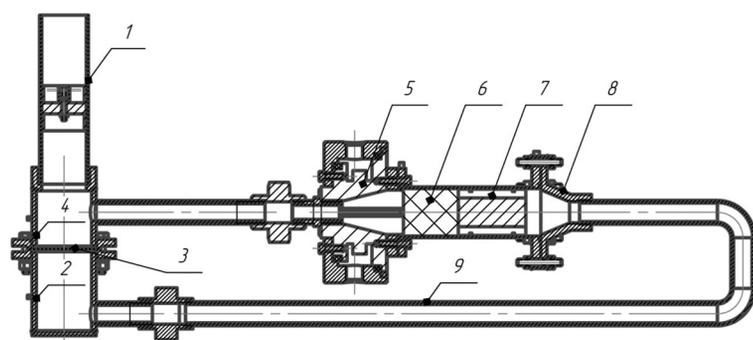
[14]. В целом, большинство соответствующих исследований сосредоточено на традиционных двигателях Стирлинга, однако недостаточный ресурс, повышенные требования к уплотнениям, зазорам в этих двигателях делают их сложными для применения в циклах с рекуперацией энергии СПГ [14, 15].

Термоакустический электрогенератор (ТАЭГ) является тепловой машиной на основе термодинамического цикла, аналогичного циклу Стирлинга. В отличие от традиционных двигателей Стирлинга, в ТАЭГ нет движущихся частей, работающих в условиях повышенной или пониженной температуры, что делает его более надежным и упрощает изготовление и эксплуатацию. В связи с данными преимуществами теоретические и экспериментальные исследования по термоакустическим высокотемпературным двигателям проводятся уже около 15 лет. При различных способах подвода тепловой энергии диапазон производимой электрической мощности термоакустических преобразователей лежит в диапазоне от 70 Вт до 1,57 кВт, эффективный КПД — 15...18% [16]–[19].

В связи с вышесказанным, в данной работе исследуется термоакустический низкотемпературный двигатель с градиентом температуры за счет подвода криогенной жидкости. Работа посвящена экспериментальному исследованию условий запуска и поддержания работоспособности за счет поддержания уровня температуры теплообменника охладителя на уровне 120...150 К.

**Конструкция термоакустического преобразователя**

Экспериментальный образец низкотемпературного термоакустического преобразователя (ТАП) представляет собой акустический кольцевой волновод, в котором последовательно размещаются следующие элементы: 1 — цилиндр с открытым концом, 2 — буферная полость, 3 — мембрана, 4 — тройник соединения, 5 — основной теплообменник-охладитель, 6 — регенератор, 7 — теплообменник-нагреватель, 8 — конический переходник, 9 — инерционная трубка (рис. 1). Нагрузкой для ТАП может служить пульсационная турбина, пьезомембрана или поршень. В качестве рабочего тела в испытуемом двигателе используется атмосферный воздух. Кольцевая конфигурация волновода ТАП способствует снижению габаритов ТАП, поршень в полости цилиндра выполняет роль нагрузки и регулировки фазового сдвига между давлением и объемной скоростью рабочего тела. Блочный принцип исполнения экспериментального образца позволяет без больших затрат времени и средств осуществлять замену узлов. Такая конструкция экспериментального образца двигателя предусматривает возможность оценки на запуск и рабочие параметры ТАП хода поршня, размеров рабочих цилиндров, массы поршня, длины



а

б

Рис. 1. Схема экспериментального образца термоакустического двигателя (а); общий вид образца термоакустического преобразователя (б): 1 — цилиндр с поршнем; 2 — буферная полость; 3 — мембрана; 4 — тройник соединения; 5 — основной теплообменник-охладитель.

Fig. 1. Experimental thermoacoustic engine (a); thermoacoustic converter (б): 1 — cylinder with piston; 2 — cushioning pocket; 3 — membrane; 4 — T-socket; 5 — main heat exchanger-cooler; 6 — regenerator; 7 — heat exchanger-heater; 8 — Morse taper; 9 — inertia tube (resonator)

резонатора, параметров блоков теплообменников и регенератора.

Конструктивные размеры ТАП получены с помощью математической модели установившегося режима низкоамплитудного процесса преобразования энергии в ТАП в программе DELTA EC [20] (табл. 1).

Таблица 1

### Конструктивные параметры термоакустического преобразователя

Table 1

#### Design parameters of thermoacoustic converter

Параметр	Значение
<i>Соединительная трубка</i>	
Внутренний диаметр, мм	15
Длина, мм	195
Материал	сталь 20
<i>Теплообменник-охладитель</i>	
Внутренний диаметр, мм	32
Относительное проходное сечение	0,74
Зазор между пластинами, мм	1,5
Длина, мм	20
Материал	медь ГКРН МЗ
<i>Регенератор</i>	
Внутренний диаметр, мм	39
Гидравлический радиус пор, мкм	20
Длина, мм	43
Материал насадки	07X16N6-Ш
<i>Теплообменник-нагреватель</i>	
Внутренний диаметр, мм	32
Зазор между пластинами, мм	0,75
Длина, мм	30
Материал	медь ДКРНТ МЗ
<i>Термическая буферная труба</i>	
Внутренний диаметр, мм	15
Длина, мм	80
Материал	07X16N6-Ш
<i>Резонатор</i>	
Внутренний диаметр, мм	15
Длина, мм	200
Материал	ПВХ

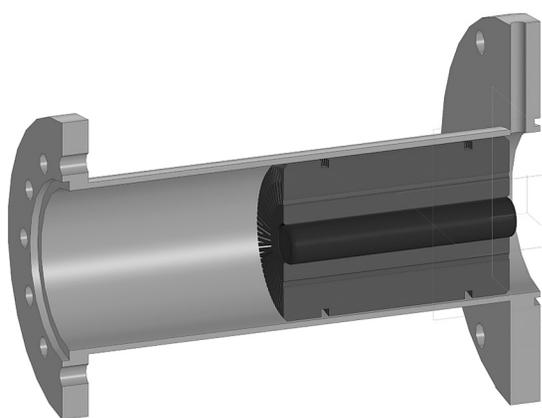
Постоянную температуру на горячем конце регенератора  $T_r=300$  К обеспечивал щелевой теплообменник подвода теплоты с нагревателем, запрессованным в корпус (рис. 2) с номинальной мощностью 500 Вт и рабочей температурой поверхности не более 973 К (700 °С). Нагреватель позволяет изменять режимы и сравнивать рабочие параметры образца двигателя в высокотемпературном режиме при  $T_r=400...650$  °С.

При сформированном градиенте температуры на основном теплообменнике-охладителе 5 и теплообменником-нагревателем 4 (см. рис. 1), в регенераторе за счет термоакустического эффекта происходит генерация и увеличение мощности акустических колебаний. Отвод теплоты от рабочего тела обеспечивается теплообменником-охладителем щелевого типа (рис. 3). При работе ТАП в высокотемпературном режиме при температуре на теплообменнике нагревателе до  $T_r=400...650$  °С через холодный теплообменник прокачивался внешний теплоноситель (вода) для отвода теплоты в окружающую среду.

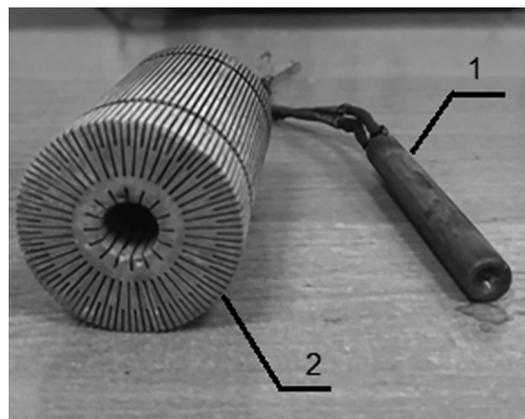
При работе двигателя в низкотемпературном режиме на холодный теплообменник подавался испарившийся газообразный азот. Подвод теплоты осуществлялся от нагревателя при имитации теплоподвода на уровне 300...350 К.

Инерционная труба служит не только для соединения с корпусом горячего теплообменника и регенератора, а также обеспечивает оптимальный сдвиг между колебаниями давления и скорости газа в регенераторе благодаря инерционным свойствам газа. Регенератор представляет собой набор стальных сеток, установленных в тонкостенный цилиндрический корпус с кольцевыми выступами для предотвращения контакта регенератора со стенками двигателя и тепловых перетечек на наружный корпус термоакустического двигателя.

Конструкторская и расчетная проработка низкотемпературного ТАП показала достижимость практической реализации режима запуска и получения полезной рабо-



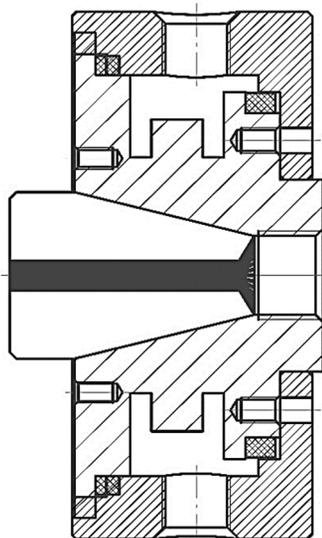
а



б

Рис. 2. Корпус ТАП с теплообменником-нагревателем (а), внешний вид теплообменника (б): 1 — электронагреватель; 2 — теплообменник-нагреватель

Fig. 2. TAC with heat exchanger-heater (a), general appearance of the heat exchanger (б): 1 — electric heater; 2 — heat exchanger-heater



а



б

Рис. 3. Разрез (а) и общий вид (б) теплообменника-охладителя со свободным объемом для прокачки криогенного продукта

Fig. 3. Cross-section (a) and general appearance (б) of heat exchanger-cooler with voidage for circulation of cryoproduct

ты за счет использования низкопотенциальной теплоты криопродукта [21].

### Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд для проведения испытаний ТАП включает в себя экспериментальный образец термоакустического преобразователя, систему подачи криогенного продукта (азота) для создания криогенного уровня температуры на теплообменнике охладителя, а также систему сбора и обработки параметров рабочего процесса ТАП (рис. 4). Стенд позволяет исследовать следующие рабочие характеристики криогенного ТАП: температуры рабочего тела, изменение амплитуды давления по времени в индицируемых полостях, перемещение поршня.

Цилиндр с поршнем имеет открытый конец, таким образом, все тестовые испытания ТАП не требовали заправки контура рабочим телом под давлением, двигатель

сохранял работоспособность при атмосферном давлении. Опора маховика с кривошипным механизмом 1 предусматривает возможность изменения хода поршня для изменения режимов работы двигателя. Для работы двигателя со свободным поршнем цилиндр 3 двигателя изготовлен из стекла для визуализации и замера хода поршня лазерным датчиком перемещения 4.

При испытании ТАП для регистрации параметров измерительных систем и их обработки используется соединение компьютера с модулями аналогового ввода — вывода типа ОВЕН МВ110-8А, МВ110-8АС по протоколу связи RS-485.

Для сбора информации от термодпар типа ХК и датчиков давления Овен ПД-100 используется цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), позволяющие фиксировать до 16 сигналов с унифицированным сигналом постоянного тока 4...20 мА, и частотой опроса до 330 Гц, погрешность преобразования 0,1%. Управление ЦАП (выбор

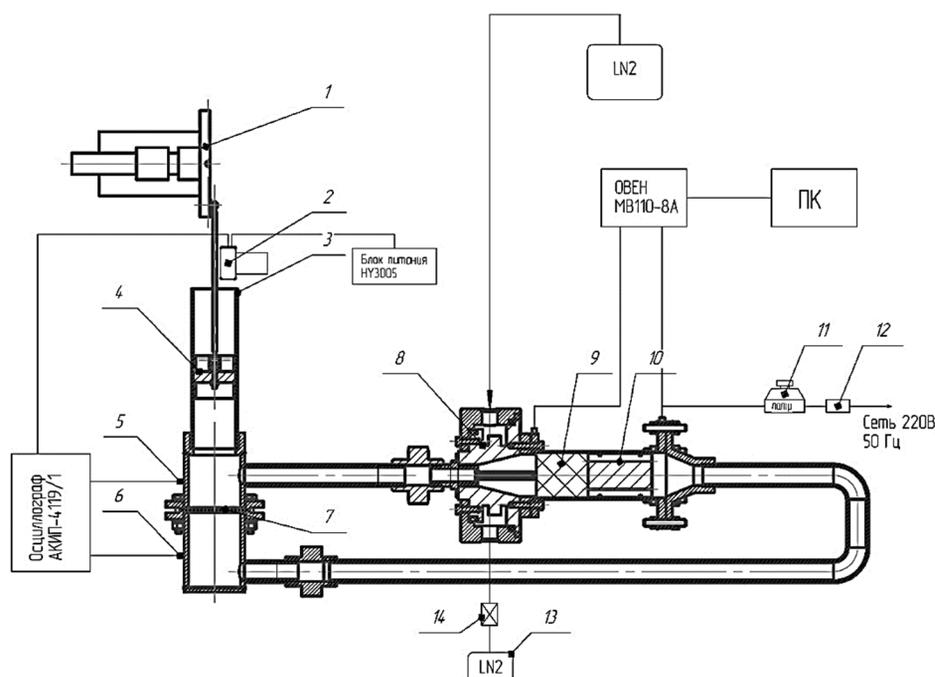


Рис. 4. Схема экспериментального стенда для исследования параметров низкотемпературного преобразователя: 1 — маховик; 2 — лазерный датчик перемещения; 3 — индицируемая полость цилиндра двигателя; 4 — свободный поршень; 5, 6 — датчики давления ДАД (0,1 МПа); 7 — мембрана; 8 — основной проточный холодный теплообменник; 9 — регенератор; 10 — горячий теплообменник — нагреватель; 11 — автотрансформатор; 12 — ваттметр; 13 — сосуд Дьюара; 14 — кран; T1-T3 — датчики температуры

Fig. 4. Experimental unit for analyzing parameters of low temperature converter: 1 — flywheel; 2 — laser movement sensor; 3 — indicated chamber of engine cylinder; 4 — free piston; 5, 6 — pressure sensors (0.1 MPa); 7 — membrane; 8 — main down-flow cold heat exchanger; 9 — regenerator; 10 — hot heat exchanger-heater; 11 — autotransformer; 12 — wattmeter; 13 — Dewar vessel; 14 — кран; T1-T3 — temperature sensors

каналов, задание диапазона измерений, выбор частоты опроса) производился программным путем от компьютера. Для замера температуры использовались термопары T1-T2 с модулями ОВЕН. Диапазон измеряемых температур термопар находится в интервале  $-100...650$  °С. Использование модулей ОВЕН обусловлено их классом точности, а также тем обстоятельством, что замеры температуры проводились с промежутком времени одна и более секунды, что обеспечивает точность при замерах колебаний в диапазоне рабочих частот  $5...30$  Гц. Показатель тепловой инерции для указанных термопар не превышал 0,3 секунды, погрешность измерения температуры (максимальная для холодного контура) составила 0,5%.

Для бесконтактного измерения величины перемещения поршня был применен оптический датчик расстояния Balluff BOD 26K с настраиваемым диапазоном измерений в пределах  $30...100$  мм, частот до  $1000$  Гц.

Для измерения давления в полости цилиндра использованы датчики давления МРХН6300А, предназначенные для непрерывного преобразования давления в унифицированный сигнал постоянного тока  $4...20$  мА (ГОСТ 26.011–80). Питание датчиков осуществляется с помощью блока питания НУ3005; точность: напряжение  $\pm 1\% + 2$  един. ток  $\pm 1,5\%$ . Сигналы от датчиков давления и перемещения с помощью осциллографа обрабатываются и сохраняются. Программа для сбора и обработки информации результатов измерений выполнена в системе MasterScada.

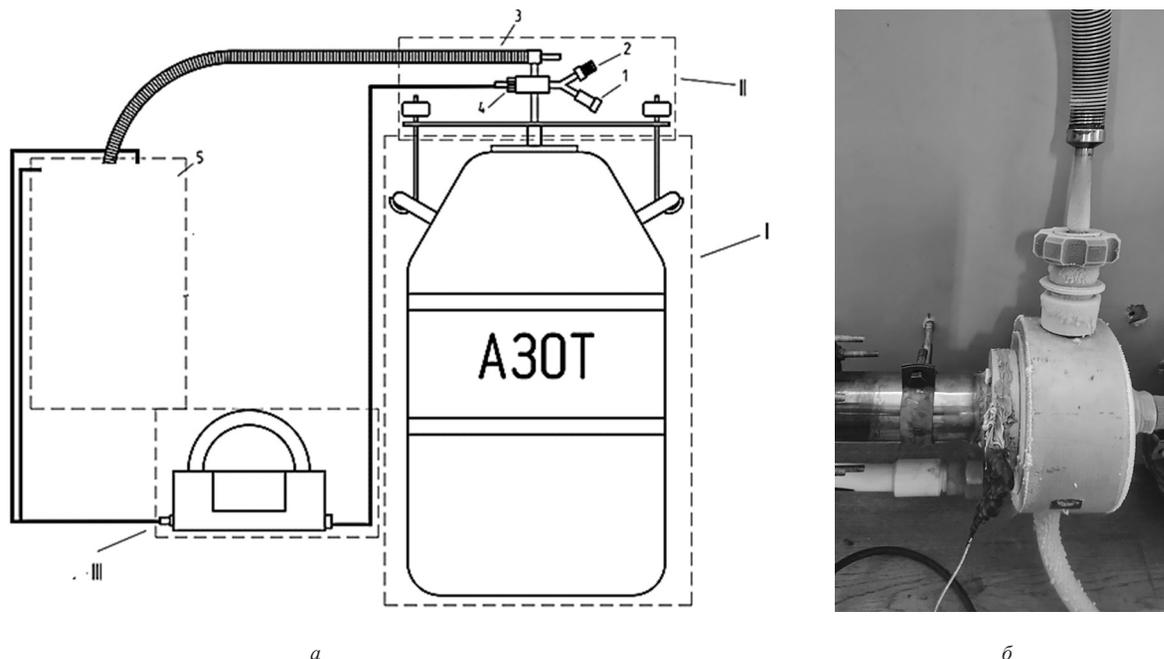
На рис. 5 изображена схема системы подачи криогенной жидкости в холодный теплообменник.

## Результаты и обсуждение

Задачи испытаний заключались в том, чтобы выявить режимно-параметрические условия запуска и устойчивой работы, получить значения производимой мощности цикла. Для исследования условий запуска ТАП тестировался в высокотемпературном режиме для выявления необходимой температурной разницы на регенераторе, обеспечивающей запуск и стабильную работу. Далее ТАП переводился в низкотемпературный режим, регистрировались текущие давление и перемещение поршня (рис. 6), рабочая частота колебаний и рабочие температуры, при которых осуществлялась работа ТАП.

Видно, что кривые представляют собой гармонические функции, полученные с помощью пакета Matlab, аппроксимирующие зависимости имеют вид  $p = p_{amp} \sin(\omega t + \varphi_1)$  и  $x = x_{amp} \sin(\omega t + \varphi_2)$ . Угол фазового сдвига между давлением и перемещением поршня для низкотемпературных режимов составил  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 25...30^\circ$ .

Работа образца ТАП в высокотемпературном режиме осуществлялась при подводимой мощности  $68-80$  Вт. При снижении мощности соответственно уменьшалась температура рабочего тела на горячем теплообменнике с целью проверки работоспособности ТАП и определения предельной разности температур на регенераторе, ниже которой происходит остановка двигателя (табл. 2).



а

б

Рис. 5. Система подачи криогенной жидкости в теплообменник охлаждения ТАП (а), общий вид теплообменника в процессе работы ТАП (б): I — сосуд Дьюара; II — испарительная установка (1 — датчик давления, 2 — клапан регулировки и сброса давления, 3 — гибкий вакуумный трубопровод, 4 — разъем подключения к блоку управления); 5 — ТАП; III — блок управления системы подачи криогенной жидкости на базе микроконтроллера ESP 8266

Fig. 5. System of cryogenic liquid supply into cooling heat exchanger of TAC (a), heat exchanger during TAC operation (b): I — Dewar vessel; II — evaporating unit (1 — pressure sensor, 2 — pressure regulating and dropping valve, 3 — flexible vacuum pipe, 4 — control panel connector); 5 — TAC; III — control panel for the system of cryogenic liquid supply based on ESP 8266 microcontroller

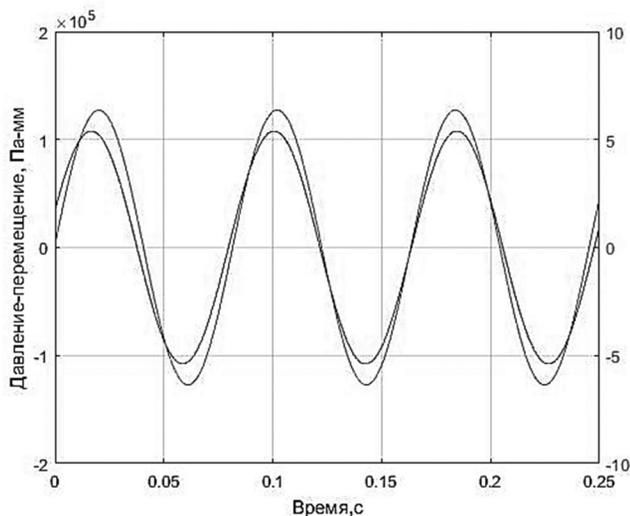


Рис. 6. Изменение давления и перемещения поршня ТАП в высокотемпературном режиме работы

Fig. 6. Changes of pressure and piston movement of TAC at high temperature mode

На основе данных индицирования полостей ТАП производилась запись на осциллограф и обработка MATLAB текущего давления и перемещения поршня (рис. 6), на основании которых строились  $pV$ -диаграммы (рис. 7) для определения работы и эффективной мощности цикла двигателя.

Планиметрирование циклограмм осуществлялось и сравнивалось в программных продуктах MS Excel и MATLAB. Точность определения положения поршня лазерным датчиком оценивается в 100 мкм, что от минимального положения поршня в 30 мм составляет погрешность 0,33%. Таким образом, после планиметрирования  $pV$ -диаграммы точность определения ее площади (работы цикла) составляет величину не более 3%.

Результаты испытаний ТАП в низкотемпературном режиме работы при подаче газифицированной криогенной жидкости представлены в табл. 3. Теоретическое моделирование процесса запуска низкотемпературного ТАП производилось с помощью математической модели на основе сосредоточенных параметров [21]. Установлено, что для

Результаты экспериментальных измерений двигателя в высокотемпературном режиме

Таблица 2

Results of the experimental tests of the engine at high temperature mode

Table 2

№	Мощность $W$ , Вт	$T_1$ , К	$T_2$ , К	Средний перепад температуры на регенераторе в эксперименте $\Delta$	D	$f$ , Гц
1	133	633–758 (695,5)	29,2–30,4 (29,8)	665,7	7007,4	28
2	208	799–840 (695,5)	30,2–31,5 (30,3)	789,7	8312,7	30

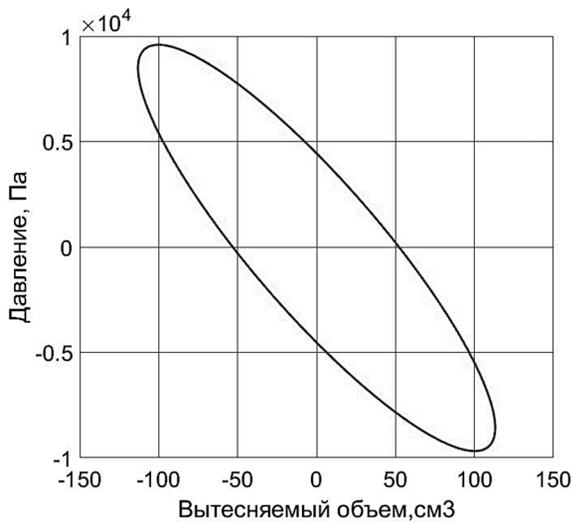


Рис. 7. Циклограмма индикаторной работы цикла низкотемпературного ТАП

Fig. 7. Cyclogram for indicator work of low temperature TAC

низкотемпературного режима запуск термоакустического двигателя осуществляется при  $T_r = 300$  К и  $T_x = 110$  К.

При этом в теоретическом моделировании получено значение рабочей частоты  $f = 72$  Гц без учета нагрузки при подводимой к рабочему телу тепловой мощности  $Q_h = 200$  Вт и среднем давлении заправки контура двигателя  $p_m = 0,1$  МПа (воздух). Данный уровень частоты подтверждается теоретическим моделированием установки в программе DeltaEC, отклонение значения составило менее 3% (74 Гц). Приведенные результаты показывают диапазон изменения частоты работы термоакустического преобразователя без нагрузки.

На рис. 8 показана термограмма низкотемпературного ТАП на установившемся режиме в течение 15 мин.

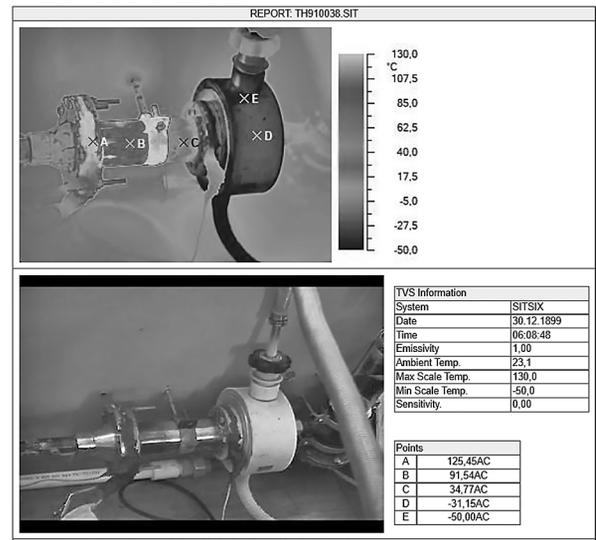


Рис. 8. Термограмма низкотемпературного ТАП после работы на установившемся режиме в течение 15 мин

Fig. 8. Thermogram of low-temperature TAC after working on steady-state mode for 15 min

При длительной работе ТАП с охлаждением криогенной жидкостью, вследствие перетечек холода, наблюдалось захлаживание горячего теплообменника (рис. 9).

В режиме с нулевым подводом мощности на нагреватель наблюдалось снижение температуры на горячем теплообменнике (в точке C) с 123 до  $-31$  °C. При этом частота рабочего процесса ТАП снижалась до 20...24 Гц, но с сохранением работы и без останова. Данный факт говорит о необходимости соблюдения специальных температурных условий работы на теплообменниках ТАП для поддержания продольного градиента температур на регенераторе на определенной величине с целью получения максимума вырабатываемой мощности, но работа ТАП не прекратится с нарушением этих условий.

Таблица 3

**Результаты экспериментальных испытаний работы термоакустического преобразователя в низкотемпературном режиме**

Table 3

**Results of the experimental tests of thermoacoustic converter at low temperature mode**

№	$T_r$ , °C	$T_x$ , °C	Разница температур на регенераторе D	$P_{max}$ , кПа	$P_{min}$ , кПа	$f$ , Гц	$W$ , Вт	Режимные условия
1	330	50	280	—	—	16,7	200	Устойчивая работа в высокотемпературном режиме
2	330	10	320	—	—	16,7	200	
3	321	-40	361	—	—	19,2	200	
4	318	-60	378	—	—	20	200	
5	313	-135	448	8,1	1,0	20	200	Устойчивый режим с подводом теплоты, запуск подачи жидкого азота в ТО
6	235	-142	377	8,2	0,5	16	140	Снижение мощности нагревателя
7	220	-143	363	8,5	0,9	15,3	130	Подача азота
8	205	-143	348	8,2	0,6	15	120	Отключение нагрева, подача азота
9	190	-143	333	8,9	0,8	14,33	—	Подача азота
10	175	-120	295	7,5	2,5	24,5	—	Подача азота
11	155	-92	247	7,7	2,0	24	—	Подача азота

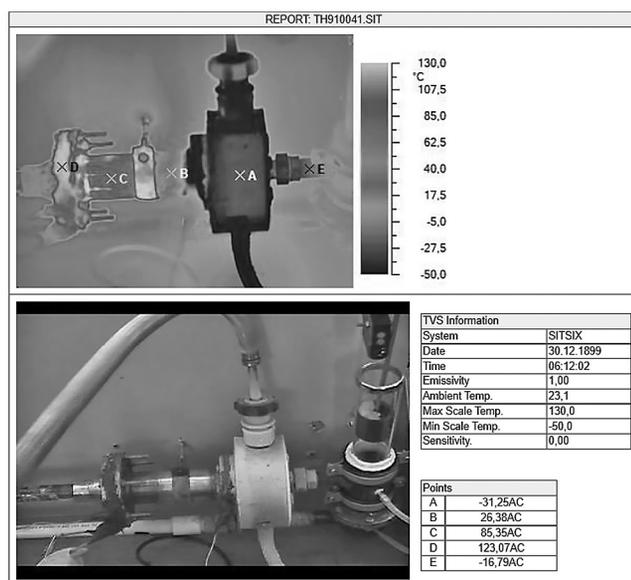


Рис. 9. Термограмма низкотемпературного ТАП после работы на установившемся режиме в течение 25 мин

Fig. 9. Thermogram of low-temperature TAC after working on steady-state mode for 25 min

Проведенные испытания ДПТ с кривошипно-шатунным механизмом демонстрируют, что при отсутствии подводимого количества теплоты  $Q_h = 0$  Вт диапазон рабочих не превышает  $f = 18$  Гц, при этом количество индикаторной работы цикла практически неизменно и составляет порядка  $1,2 \dots 1,4$  Дж, мощность цикла составит порядка 30 Вт.

### Литература/References

- Zhao L., Dong H., Tang J., Cai J. Cold energy utilization of liquefied natural gas for capturing carbon dioxide in the flue gas from the magnesite processing industry. *Energy*. 2016. Vol. 105. P. 45–56.
- Xiong Y., Luo P., Hua B. A novel CO<sub>2</sub>-capturing natural gas combined cycle with LNG cold energy utilization. *Energy Proc.* 2014. Vol. 61. P. 899–903.
- Dovgyallo A. I., Uglanov D. A., Blagin E. V. etc. Technique for using the indicative library of characteristic fields in the design of low-temperature power plants with low-grade heat utilization. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2022. Vol. 57. Issue 11–12. P. 930–939.
- Zhang G., Zheng J., Yang Y. A novel LNG cryogenic energy utilization method for inlet air cooling to improve the performance of combined cycle. *Applied Energy*. 2016. Vol. 179 (1). P. 638–649.
- Aspelund A., Gundersen T. A liquefied energy chain for transport and utilization of natural gas for power production with CO capture and storage — Part 4: sensitivity analysis of transport pressures and benchmarking with conventional technology for gas transport. *Applied Energy*. 2009. Vol. 86 (6). P. 815–825.
- Kaneko K., Ohtani K., Tsujikawa Y. Utilization of the cryogenic exergy of LNG by a mirror gas-turbine. *Applied Energy*. 2004. Vol. 79 (4): P. 355–369.
- Hisazumi Y., Yamasaki Y., Sugiyama S. Proposal for a high efficiency LNG powergeneration system utilizing waste heat from the combined cycle. *Applied Energy*. 1998. Vol. 60 (3). P. 169–182.
- Gómez M., Garcia R., Gómez J., Carril J. Review of thermal cycles exploiting the exergy of liquefied natural gas in the regasification process. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014. Vol. 38. P. 781–795.
- Wang J., Yan Z., Wang M., Dai Y. Thermodynamic analysis and optimization of an ammonia-water power system with LNG (liquefied natural gas) as its heat sink. *Energy*. 2013. Vol. 50. P. 513–522.
- Pu L., Qu Z., Bai Y., Qi D., Song K., Yi P. Thermal performance analysis of intermediate fluid vaporizer for liquefied natural gas. *Applied Therm. Eng.* 2014. Vol. 65 (1–2). P. 564–574.
- Angleino G., Invernizzi C. M. The role of real gas Brayton cycles for the use of liquid natural gas physical exergy. *Appl. Therm. Eng.* 2011. Vol. 31 (5). P. 827–833.
- Li Y., Luo H. Integration of light hydrocarbons cryogenic separation process in refinery based on LNG cold energy utilization. *Chem. Eng. Res. Des.* 2015; Vol. 93. P. 632–9.
- Cao W., Beggs C., Mujtaba I. Theoretical approach of freeze seawater desalination on flake ice maker utilizing LNG cold energy. *Desalination*. 2015. Vol. 355. P. 22–32.
- Dong H., Zhao L., Zhang S., Wang A., Cai J. Using cryogenic exergy of liquefied natural gas for electricity production with the Stirling cycle. *Energy*. 2013. Vol. 63 (1). P. 10–18.
- Szczygieł I., Stanek W., Szargut J. Application of the Stirling engine driven with cryogenic exergy of LNG (liquefied natural

### Закключение

В статье приведены результаты экспериментальным испытаний термоакустического преобразователя в низкотемпературном режиме, в котором тепловой источник имеет температуру окружающей среды, а холодный теплообменник охлаждается до криогенного уровня температуры газифицируемым азотом.

Экспериментально показано, что в низкотемпературном режиме ТАП, так же, как и в высокотемпературном ТАП способен длительно работать на заданном температурном градиенте. При этом на низкотемпературном режиме запуск ТАП осуществляется при меньшем градиенте температуры. Например, критическая разность температур в низкотемпературном режиме запуска ( $T_h - T_c$ ) составила всего  $63 \dots 128$  К, что на  $35 \dots 40\%$  ниже критической разности температур для высокотемпературного режима ( $T_h = 670$  К).

Очевидно, что при снижении критической разности температуры для низкотемпературного ТАП КПД возрастает в связи со снижением температуры низшего источника тепла. По сравнению с высокотемпературным ТАП, который при подводимой тепловой мощности к воздуху  $Q_h = 130 \dots 180$  Вт имел среднее значение эффективности  $18,8\%$ , увеличение термического КПД на режимах с подводом криогенной жидкости составило  $8 \dots 10\%$ .

Таким образом, результатом экспериментальных исследований низкотемпературного термоакустического преобразователя является подтверждение работоспособности и перспективности использования ТАП в системах регазификации криопродуктов с целью получения дополнительной энергии, которая может быть использована в криогенных комплексах различного назначения.

- gas) for the production of electricity. *Energy*. 2015. Vol. 105. P. 25–31.
16. Backhaus S., Tward E., Petach M. Traveling-wave thermoacoustic electric generator. *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85 (6). P. 1085–7.
17. Wu Z., Luo E., Dai W. Experimental investigation of a 500 W traveling-wave thermoacoustic electricity generator. *Sci. Bull.* 2011. Vol. 56 (19). P. 1975–7.
18. Wu Z., Dai W., Man M., Luo E. A solar-powered traveling-wave thermoacoustic electricity generator. *Sol. Energy*. 2012. Vol. 86 (9). P. 2376–82.
19. Wu Z., Yu G., Zhang L., Dai W., Luo E. Development of a 3 kW double-acting thermoacoustic Stirling electric generator. *Appl. Energy*. 2014. Vol. 136. P. 866–872.
20. Ward W. C., Swift G. W. Design environment for low-amplitude thermoacoustic engines. *Journal of Acoustical Society of America*. 1994. Vol. 95 (6). P. 3671–3672.
21. Зиновьев Е. А., Воротников Г. В., Довгялло А. И., Некрасова С. О. Границы термоакустической неустойчивости в термоакустическом двигателе с криогенным охлаждением // Вестник Международной академии холода. 2020. № 4. С. 20–26. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-20-26. [Zinoviev E. A., Vorotnikov G. V., Dovgyallo A. I., Nekrasova S. O. Boundaries of thermoacoustic instability in the thermoacoustic engine with cryogenic cooling. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2020. No 4. p. 20–26. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-20-26. (in Russian)]

### Сведения об авторах

#### Некрасова Светлана Олеговна

К. т. н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, nekrasova.so@ssau.ru

#### Сармин Дмитрий Викторович

К. т. н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, sarmin.dv@ssau.ru

#### Сивуха Дмитрий Витальевич

Инженер-конструктор НОЦ ГДИ — 209 Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, sivukha.dv@ssau.ru

#### Шихалев Владислав Иванович

Инженер-конструктор НОЦ ГДИ — 209 Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, shikhalev.vi@ssau.ru

### Information about authors

#### Nekrasova Svetlana O.

Ph. D., Associate Professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Koroleva, 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34, nekrasova.so@ssau.ru

#### Sarmin Dmitriy V.

Ph. D., Associate Professor, Department of Thermal Engineering and Thermal Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34, sarmin.dv@ssau.ru

#### Sivukha Dmitry V.

Design Engineer of REC GDI — 209, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34, sivukha.dv@ssau.ru

#### Shikhalev Vladislav I.

Design Engineer of REC GDI — 209, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34, shikhalev.vi@ssau.ru



Статья доступна по лицензии  
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

## О Перечне рецензируемых научных изданий

В связи с вступлением в силу новой редакции номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118, издано распоряжение Минобрнауки России от 1 февраля 2022 г. № 33-р о Перечне рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

**Вестник Международной академии холода** включен в Перечень рецензируемых научных изданий (по состоянию на 17.07.2023 г.) под № 502.

Подробная информация на сайте ВАК РФ в разделе "Документы" – "Рецензируемые издания"

[https://vak.minobrnauki.gov.ru/documents#tab=\\_tab:editions~](https://vak.minobrnauki.gov.ru/documents#tab=_tab:editions~)