

УДК 621.4:621.43.0161+ 534.2

В.В. КОРОБКО

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье рассмотрены особенности термоакустических тепловых машин (ТАТМ) и основные положения их базовых математических моделей. Проведен анализ механизмов теплообмена в элементах термоакустических двигателей (ТАД). Сделано предположение о целесообразности применения в ТАТМ специальных типов теплообменных поверхностей. Дано описание стенда для экспериментальных исследований комплекса теплофизических и гидродинамических процессов в ТАТМ. Приведены результаты CFD моделирования и экспериментальных исследований процессов в элементах термоакустических аппаратов.

Ключевые слова: термоакустика, двигатель, теплообмен, акустика, теплообменник, матрица, звуковая волна, численное моделирование, пульсации.

Введение

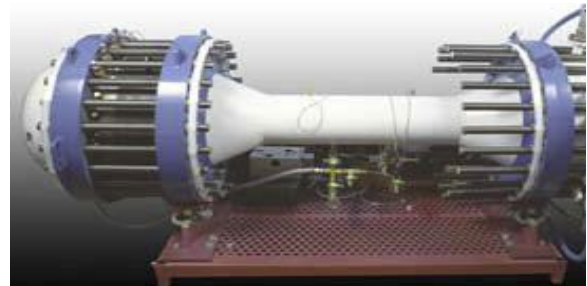
Термоакустические аппараты (ТАА) - двигатели (ТАД) и рефрижераторы (ТАР) являются новым и малораспространенным видом тепловых машин (ТМ). Эти аппараты коренным образом отличаются от традиционных решений отсутствием подвижных механических частей, простотой конструкции, высокой надежностью, экологической безопасностью.

В ТАД и ТАР можно реализовать прямой и обратный цикл Стирлинга, создать новые и эффективные решения в промышленности, энергетике и энергосбережении, аэрокосмической технике, криогенных и климатических системах, специальных системах охлаждения, электронике и медицине.

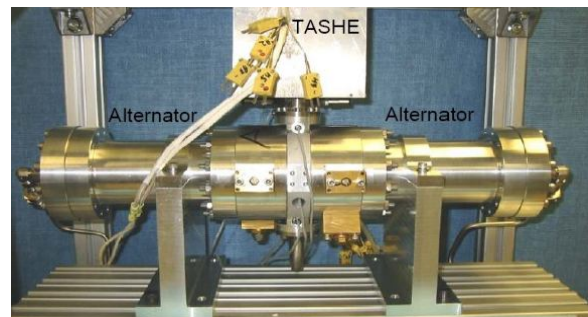
Работа ТА ТМ основана на термоакустическом эффекте – процессе взаимного преобразования тепловой энергии в механическую энергию акустических волн высокой интенсивности. В элементах ТА ТМ имеет место сложное взаимодействие явлений акустической, теплофизической и гидродинамической природы. ТАД способны использовать практически любые внешние источники тепловой энергии, в том числе возобновляемые.

Широкому распространению ТА аппаратов препятствует ряд факторов, а именно - низкая энергонасыщенность, сложность использования механической энергии в «привычной» форме.

Для своего развития термоакустические технологии требуют как совершенствования самих аппаратов, так и разработки эффективных методов использования волновой энергии, новых технологических схем, которые позволят в полной мере реализовать их преимущества.



а



б



в

Рис. 1. Примеры термоакустических тепловых машин: а – ТАР системы охлаждения фрегата ВМФ США; б – термоакустический электрогенератор проект - Space Shuttle; в – термоакустический двигатель Стирлинга [1]

1. Анализ исследований и публикаций

Термоакустический аппарат в общем случае представляет собой резонатор, в полости которого размещен блок термоакустического преобразователя (рис. 2). В свою очередь, этот блок состоит из пористой матрицы (регенератора или стека) и двух теплообменников - нагревателя и охладителя.

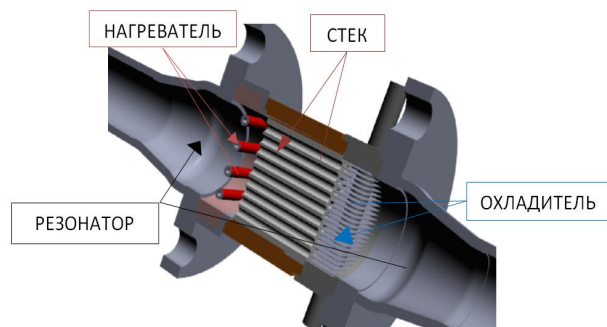


Рис. 2. Основные элементы ТАА

Основные положения теории ТАТМ разработаны Роттом и Кипперли [2, 3, 5] и в дальнейшем развиты Свифтом [1, 4, 6]. В основу их линейной модели положена фундаментальная система уравнений, а именно, уравнения Навье-Стокса, неразрывности, энергии и состояния.

Для простейшего случая, когда стек образован системой параллельных щелевых каналов, авторами получены три базовые уравнения термоакустики, которые выражают:

– суммарный термоакустический поток энергии,

$$\dot{N}_2 = \frac{1}{4} \Pi \delta_k \frac{T_m \beta p_{1s} \langle u_1 \rangle}{(1 + Pr)(1 + \epsilon_s) \Lambda} \times \left[\Gamma \frac{1 + Pr^{1/2} + Pr(1 + \epsilon_s)}{1 + Pr^{1/2}} - \left(1 + Pr^{1/2} - \frac{\delta_v}{y_0} \right) \right] - \Pi (y_0 k + Lk_s) \frac{dT_m}{dx}; \quad (1)$$

– акустическую мощность, которая генерируется (ТАД) или поглощается стеком (ТАР),

$$\dot{W}_{ТАД} = \left(\frac{1}{4} \Pi \delta_k L_s (\gamma - 1) \varpi(p_{s1})^2 \right) \times \left(\frac{\Gamma}{(1 + Pr^{1/2}) \Lambda} - 1 \right) - \frac{1}{4} \frac{\Pi \delta_v L_s \omega \rho_m \langle u_{sl}^2 \rangle}{\Lambda}; \quad (2)$$

и уравнение Ротга, которое является термоакустической формой классического волнового уравнения:

$$\left[1 + \frac{(\gamma - 1)}{(1 + \epsilon_s)} f_K \right] p_1 + \frac{a^2}{\omega^2} \rho_m \frac{d}{dx} \left[\frac{(1 - f_V)}{\rho_m} \times \frac{dp_1}{dx} \right] + \frac{a^2}{\omega^2} \frac{(f_K - f_V)}{(\sigma - 1)(1 + \epsilon_s)} \times \beta \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} = 0, \quad (3)$$

где Π, L – периметр и длина стека;

T_m, p_m, ρ_m, c_p – усредненные параметры газа:

температура, давление, плотность, теплоемкость;

$p_{1s} = p_{max} \times \cos(kx)$ – распределение акустического давления по длине резонатора;

$\delta_v = \sqrt{2\nu/\omega}$ – толщина вязкостного пограничного слоя;

$\delta_s = \sqrt{2\lambda_s/\rho_s c_s \omega}$ – толщина термоакустического теплового пограничного слоя в матрице;

$\delta_k = \sqrt{2\lambda_k/\rho_m c_p \omega}$ – толщина газового термоакустического пограничного слоя;

$\Lambda = 1 - \delta_v/y_0 + \delta_v^2/2y_0^2$ – масштабный фактор;

$\nabla T_{crit} = p_1 \omega / \rho_m c_p c_s$ – критический градиент температуры в стеке;

$\Gamma = \nabla T_m / T_{crit}$ – нормализованный температурный градиент;

$\epsilon_s = \rho_m c_p \delta_k / \rho_s c_{ps} \delta_{ks}$ – отношение теплофизических параметров газа и материала стека;

f_K, f_V – функции Ротга учитывающие геометрию теплообменной поверхности, форму каналов, свойства материалов [2, 5].

В дальнейшем, в работах [7 – 10] эти решения были уточнены и расширены для различных видов теплообменных поверхностей матриц, были учтены зависимости основных физических параметров рабочих тел от температуры, давления.

Следует обратить внимание на тот факт, что в уточненных моделях ТАА, как и в простейших, рассматриваются процессы, происходящие непосредственно в матрице. Во всех решениях присутствуют температуры стека в виде заданных краевых условий. Но эти температурные градиенты нужно создать и поддерживать с помощью теплообменников, обеспечивая поток тепловой энергии через ТАТМ.

Очевидно, что этот перепад температур, заданный или действительный, будет отличаться от фактической располагаемой разности температур теплоносителей и эта разница может быть весьма существенной.

В связи с этим рассмотрим экспериментальные данные о характере изменения распределения температур по длине регенератора (рис. 3а) на режиме запуска опытного ТАД [11].

При подаче питания к нагревателю (рис. 3, б) в стеке формируется температурный градиент. В мо-

мент времени $t = 100$ температурный градиент превышает критический уровень ∇T_{crit} и в ТАД возникают акустические колебания, а температурное поле в регенераторе стабилизируется.

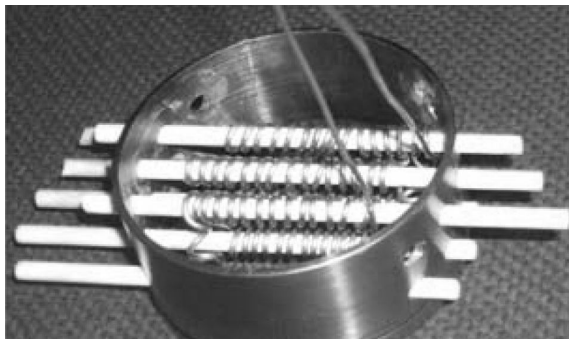
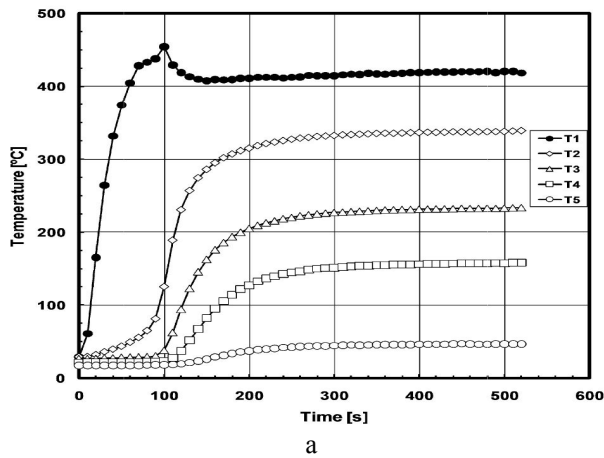


Рис. 3. Распределение температуры в регенераторе на режиме запуска ТАД (а) и электрический спиральный нагреватель ТАД (б) [11]

Температура горячей стороны регенератора, достигнув максимума (460°K) в момент старта ТАД затем снижается, примерно на $40 - 50^{\circ}\text{K}$, аналогичные данные получены и другими исследователями. Изменения температуры холодной стороны регенератора свидетельствует, что и там имеем ту же проблему, но температурная разница относительно охладителя меньше.

Наблюдаемое уменьшение температурного напора в регенераторе можно объяснить:

- недостаточной мощностью нагревателя, вследствие чего его собственная температура снизилась;
- низкой интенсивностью теплообмена между теплообменниками и регенератором;
- возросшим уровнем потерь различной природы.

В любом случае очевидно, что недостаток тепловых потоков между теплообменниками и регенератором является существенным фактором, определяющим мощность ТАД. Более того, интенсивность

теплообмена может быть лимитирующим фактором для эффективной мощности ТАД. Условия работы теплообменников в ТАД в корне отличаются от условий работы в обычных системах, так как в резонаторе ТАД отсутствует однонаправленное движение теплоносителя. Акустические волны задают только колебательное движение газового теплоносителя.

В большинстве существующих ТАД используются стандартные компактные трубчато-ребристые теплообменники воздушных систем охлаждения. Целесообразность их использования в ТАА сомнительна [1]. Учитывая эту информацию, можно конкретизировать задачи дальнейших исследований.

2. Постановка задачи исследований

Теплообменные аппараты, используемые в составе ТАД, являются важными структурными элементами, которые напрямую влияют на эффективность работы ТАД.

Во внутренних элементах ТАД имеют место весьма специфичные гидродинамические условия, которые обусловлены высоким уровнем акустических пульсаций в частотном диапазоне $60 - 250$ Гц.

Представляется целесообразным разработать специальные теплообменные поверхности, которые будут максимально эффективными именно для условий термоакустических систем.

Решение этой задачи требует изучения всего комплекса факторов, влияющих на работу теплообменников.

Для достижения этой цели необходимо выполнить следующий объем исследований, а именно:

- провести анализ факторов, влияющих на интенсивность механизмов теплообмена в элементах ТАД, и определить направления дальнейших поисков;
- разработать и изготовить опытные образцы ТАТМ и их элементов, а также экспериментальные установки для проведения исследований теплофизических и гидродинамических процессов в ТАТМ;
- экспериментально и теоретически исследовать процессы гидродинамики и теплообмена в элементах ТАТМ;
- разработать конструкции теплообменников предназначенных для использования в ТАА.

Цель работы — проведение теоретического анализа и экспериментальных исследований комплекса факторов, оказывающих влияние на процессы теплообмена между элементами ТАД, разработка, создание и тестирование экспериментальных установок, методик измерений и оборудования, предназначенных для детального исследования термоакустических процессов.

3. Анализ механизмов теплообмена в элементах ТАД

Рассмотрим процессы, происходящие в основных элементах ТАД (рис. 2). Регенератор (стек) – это компактная матрица с развитой теплообменной поверхностью. Именно в регенераторе происходят основные процессы термоакустических преобразований. В матрице регенератора, ввиду малого поперечного размера каналов, теплообмен между газом и материалом стека осуществляется за счет теплопроводности [1, 2, 3, 7]. В данной работе процессы, происходящие в регенераторе, не рассматриваются.

На рис. 4 показана схема движения тепловых потоков в ТАД. Очевидно, что в теплообменных узлах имеет место процесс сложного теплообмена, в котором присутствуют различные механизмы теплопередачи – конвекция, теплопроводность, лучистый теплообмен [12, 13].

Суммарное количество теплоты, подводимое к стеку нагревателем, представим как

$$Q_{\text{hex}}^{\text{hot}} = Q_{\text{conv}} + Q_{\text{cond}} + Q_{\text{rad}}. \quad (4)$$

3.1. Лучистый теплообмен

Лучистая составляющая теплового потока будет иметь существенное значение при запуске ТАД, когда температуры поверхностей различны

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_{\text{пр}} F \left[\left(T_{\text{hex}}^{\text{hot}} / 100 \right)^4 - \left(T_{\text{reg}} / 100 \right)^4 \right]. \quad (5)$$

Так как лучистая составляющая теплового потока зависит от разности температур поверхностей, то по мере прогрева стека до уровня $T_{\text{reg}}^{\text{hot}}$ вклад этой составляющей будет снижаться. И если температуры $T_{\text{reg}}^{\text{hot}}$ и $T_{\text{hex}}^{\text{hot}}$ будут близки, то этой составляющей можно будет пренебречь.

Однако важно отметить, что лучистый теплообмен будет формировать одну из составляющих тепловых потерь – $Q_{\text{lost}}^{\text{rad}}$, так как часть энергии будет излучаться в объем резонатора.

В экспериментах часто используют электрические нагреватели в виде спиралей (рис. 3, б). Если максимальная температура стека в эксперименте достигает 400 – 450 °K [11], то реальная температура теплообменника, особенно спирали нагревателя, будет выше, соответственно больше будет роль лучистого теплообмена непосредственно от поверхности спирали. Более того, если изменить конструкцию нагревателя и спираль расположить в кожухе, то может получиться так, что достигнуть нужного уровня температуры регенератора вообще не удастся.

3.2. Теплообмен теплопроводностью

Закон Фурье определяет тепловой поток с теплопроводностью, как

$$Q_{\text{cond}} = \lambda F (T_{\text{hex}}^{\text{surf}} - T_{\text{reg}}^{\text{surf}}) / \delta. \quad (6)$$

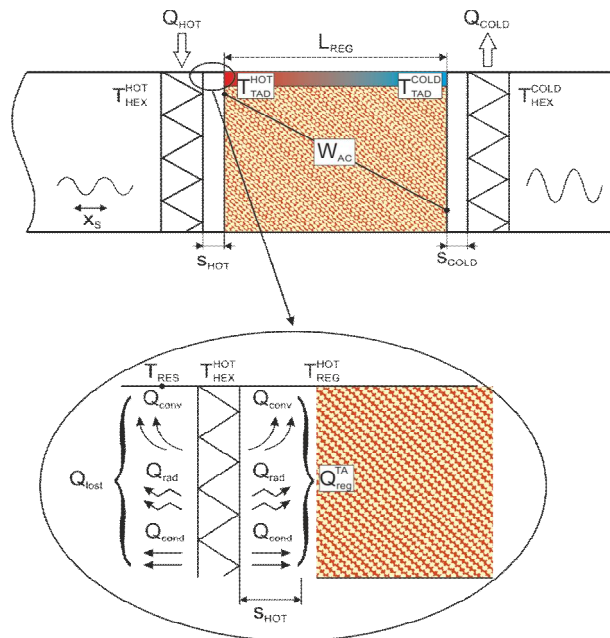


Рис. 4. Схема механизмов теплообмена в ТАД

В ТАА отсутствует плотный контакт между теплообменниками и регенератором, поэтому можно допустить, что этот механизм теплообмена не является определяющим. При этом продольный тепловой поток в материале матрицы и корпусе ТАД способствует росту суммарных потерь теплоты.

3.3. Конвективный теплообмен

Очевидно, что конвективный механизм теплообмена оказывает существенное влияние на работу ТАД.

В общем случае конвективный поток теплоты можно записать в форме закона Ньютона-Рихмана. Очевидно, что в условиях ТАД будем иметь две составляющие механизма конвективного теплообмена, одна из составляющих связана с естественной конвекцией – Q_{nat} , а вторая с вынужденной Q_{fors} .

$$Q_{\text{conv}} = \alpha_{\text{пр}} F_{\text{HEX}} (T_{\text{hex}}^{\text{surf}} - T_{\text{reg}}^{\text{surf}}) \approx Q_{\text{nat}} + Q_{\text{fors}}. \quad (7)$$

Оба эти слагаемые зависят от существующей гидродинамической ситуации, фактических температур теплообменных поверхностей, величины конструктивных зазоров, теплофизических свойств теплоносителя.

Кроме того, в случае мощных акустических волн, когда уровень звукового давления превышает 140 – 160 дБ, частотой 100 – 250 Гц, в резонаторах могут возникать различные гидродинамические эффекты второго порядка, существенно изменяющие структуру пульсирующего потока [14].

В связи с этим можно утверждать, что свободный конвективный теплообмен будет оказывать влияние только на этапе разогрева стека Q_{nat} , в дальнейшем вклад этой составляющей будет небольшим в сравнении с вынужденной конвекцией.

Вопрос теплоотдачи вынужденной конвекции Q_{fors} для случая пульсирующих потоков звуковой частоты мало изучен [14, 15]. А наличие мощных акустических пульсаций, эффектов связанных с сжимаемостью и т.п., делает количественную оценку этих механизмов очень сложной задачей.

Таким образом, очевидна необходимость проведения комплекса экспериментальных и теоретических исследований факторов, определяющих интенсивность процессов переноса теплоты, как на реальных физических моделях, так и расчетными методами.

4. Экспериментальные исследования процессов в элементах ТАД

На первом этапе исследований были проведены вычислительные эксперименты. CFD моделирование в данном случае рассматривается, как вспомогательный инструмент, который позволяет оптимизировать план дальнейших экспериментальных исследований, провести предварительную проверку новых конструктивных решений.

Вычисления проводились с помощью CFD пакета Flow Vision 2.3 с использованием расчетной модели полностью сжимаемой жидкости в 2D и 3D постановках. Предварительно этот пакет был протестирован путем моделирования процессов в резонаторах при наличии мощных акустических пульсаций. Расчеты показали, что этот CFD пакет достаточно корректно отображает гидродинамические и теплофизические процессы в акустической волне – колебательные движения среды, флуктуации давления, плотности, температуры и может быть использован для моделирования термоакустических устройств и их элементов [16].

На первом этапе, численно исследовались гидродинамические и теплофизические процессы в ТАД при его запуске. Расчеты показали, что даже при низких температурах нагревателя (150⁰К - 200⁰К), в резонаторе возникают мощные термоконвекционные течения, рис. 5 [13].

Колебательное движение среды в резонаторе представляет собой единственный механизм гидро-

динамической природы, обеспечивающий существование вынужденного конвективного теплообмена. Анализ результатов численного моделирования позволяет предположить, что путем изменения конфигурации резонатора можно локализовать эти течения в области нагревателя, снизив тем самым возможные потери тепла.

На рис. 6 показаны результаты моделирования температурных полей в щелевых каналах теплообменника при наличии акустической волны.

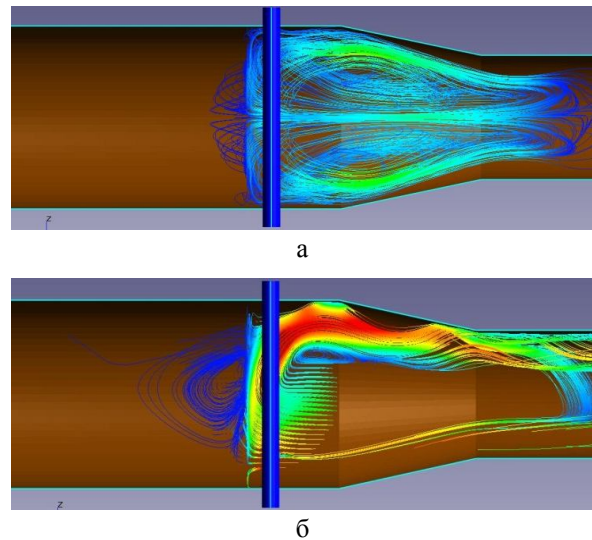


Рис. 5. Термоконвекционные течения в резонаторе ТАД при вертикальной (а) и горизонтальной (б) ориентациях

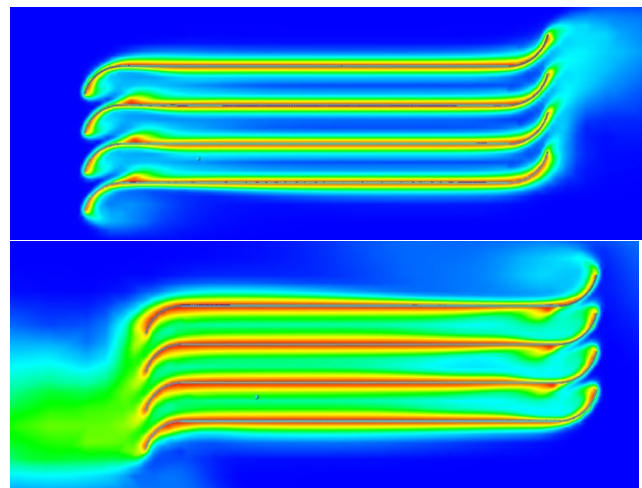


Рис. 6. Температурные поля в щелевых каналах в условиях акустических пульсаций

Очевидно, что колебательное движение теплоносителя, относительно положения равновесия, существенно усложняет условия для теплообмена. Непосредственно в объеме теплообменной поверхности формируется условно застойная зона.

Высокое гидравлическое сопротивление регенератора способствует выносу разогретого теплоносителя в противоположную от него сторону - в полость резонатора, что нежелательно, так как способствует росту тепловых потерь и снижению общей эффективности ТАД. Вполне вероятно, что именно с этими эффектами связаны процессы, которые показаны на рис 3.

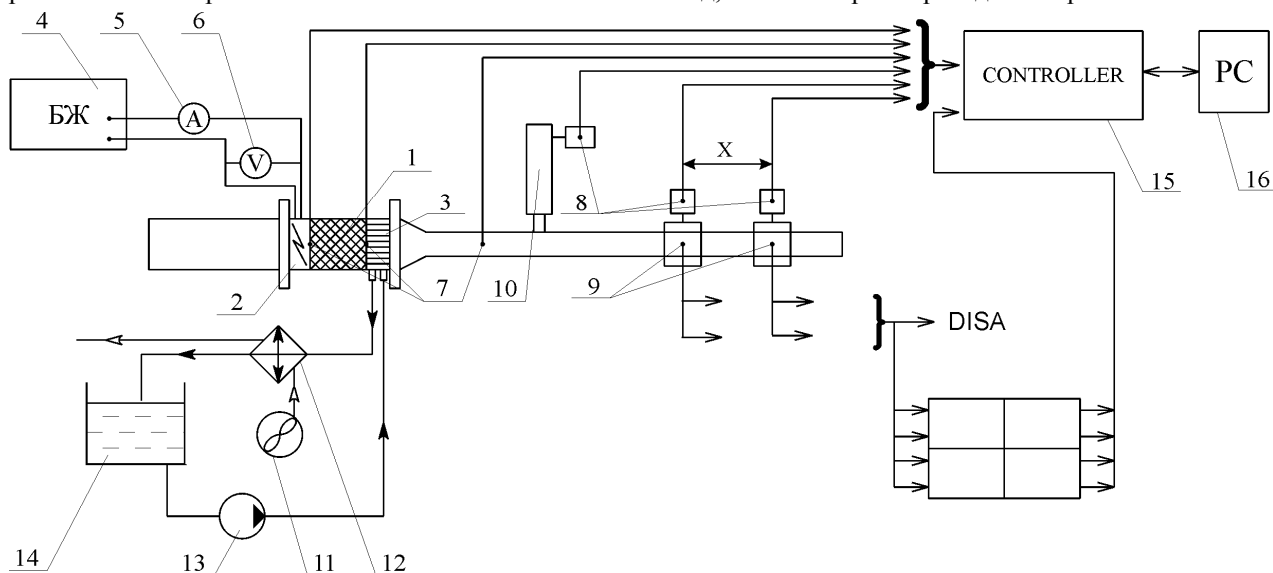


Рис. 7. Схема экспериментальной установки. 1 – стек, 2 – нагреватель, 3 – охладитель, 4 – блок питания, 5, 6 – амперметр и вольтметр, 7 – термопары ХК, 8 – датчики давления, 9 – зонды термоанемометра, 10 – акустическая нагрузка, 11 – вентилятор, 12 – охладитель, 13 – насос, 14 – бак, 15 – блок контроллеров, 16 – PC

Конструкция стенда, его приборное и программное оснащения позволяют исследовать широкий комплекс теплофизических и гидродинамических процессов в термоакустических двигателях и рефрижераторах.

Основой экспериментальной установки является микропроцессорная специализированная контрольно-измерительная система (СКС) [17].

Система позволяет в реальном масштабе времени регистрировать и анализировать теплофизические параметры ТАА. Кроме этого СКС оснащена быстродействующими датчиками давления и температуры, которые обеспечивают измерение как амплитудных значений акустического давления и температуры, так и форму фронта.

Для исследования гидродинамических характеристик среды в полости резонатора использован комплект термоанемометрического оборудования фирмы DISA D5500.

На рис. 8 – 10 приведены результаты тестовых экспериментов, которые проводились на действующем опытном ТАД с помощью разработанной СКС.

Приведенные данные показывают, что СКС и экспериментальный стенд позволяют получать большой объем экспериментальной информации о

численное моделирование, безусловно, является эффективным методом исследований, однако результаты расчетов нуждаются в экспериментальной проверке. Поэтому физический эксперимент является важной составной частью настоящей работы. Для проведения натурных исследований был разработан и изготовлен специальный экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис 7.

процессах в работающих термоакустических аппаратах.

На рис.8 показаны изменения основных теплофизических параметров в процессе пуска опытного ТАД.

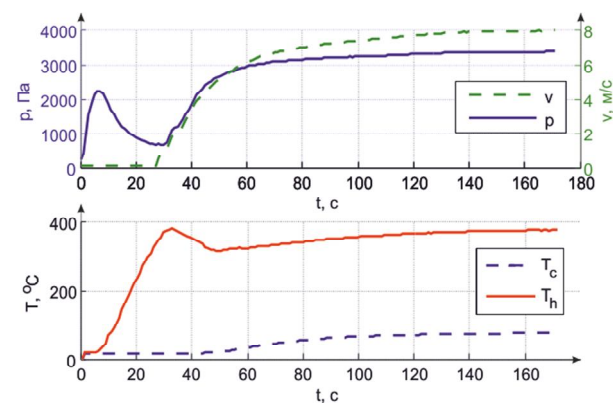


Рис. 8. Изменение температур стека, акустического давления и колебательной скорости в ТАД

Характер изменения температур на краях стека согласуется с данными, приведенными в [11]. При этом необходимо отметить, что конструкции нагревательных элементов одинаковы. Акустическое да-

ление в резонаторе достигает уровня 3500 Па, а максимальная амплитуда колебательной скорости 8 м/с.

На рис. 9 показан процесс развития акустических пульсаций в резонаторе ТАД. Хорошо видно, что пульсации имеют вид гармонической функции, а частота пульсаций стабилизируется в течение 2 секунд.

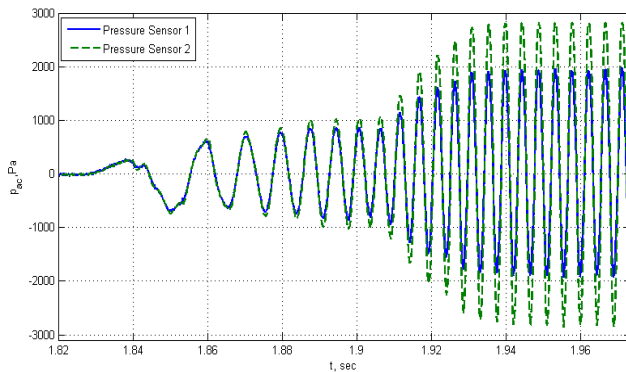


Рис. 9. Процесс запуска ТАД, пульсации акустического давления (эксперимент)

Результаты прямых измерений колебательной скорости термоанемометром и пульсаций акустического давления показаны на рис. 10.

Высокая частота опроса датчиков микропроцессорной СКС позволяет детально фиксировать форму фронта давления в акустической волне, исследовать ее связь с гидродинамическими параметрами среды в резонаторе.

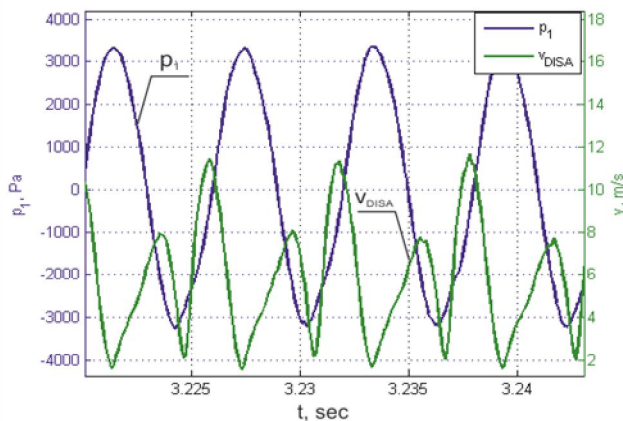


Рис. 10. Прямые измерения акустического давления и колебательной скорости (термоанемометр)

Приведенные результаты получены при тестировании экспериментального оборудования. Они показывают большие потенциальные возможности созданной компьютерной контрольно-измерительной системы, программного обеспечения и разработанных методик, одновременного измерения параметров различной физической природы.

Заключение

Проведен анализ механизмов теплообмена в элементах ТАТМ. Сделано предположение о возможном влиянии низкой интенсивности теплообмена между стеклом и теплообменниками на мощность ТАД.

Изготовлен экспериментальный стенд для исследования термоакустических аппаратов. Стенд оснащен СКС и необходимым программным обеспечением. Тестовые измерения показали работоспособность созданного оборудования.

В ходе CFD моделирования процессов в резонаторе ТАД, на режиме запуска, показано наличие мощных термоконвективных течений, которые могут влиять на суммарный уровень потерь.

Численное моделирование температурных полей в щелевых каналах теплообменника показало, что наличие пульсационного движения теплоносителя существенно изменяет условия для теплообмена из-за возникновения застойных зон.

Дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования процессов в элементах ТАД позволят улучшить его внешние характеристики.

Литература

1. Swift, G.W. *Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators* [Text] / G.W. Swift // *American Institute of Physics*. – 2002. – 300 p.
2. Rott, N. *Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes* [Text] / N. Rott // *Journal of Applied Mathematics and Physics*. – 1969. – № 20. – P. 230–243.
3. Ceperley, P.H. *A pistonless stirling engine - the traveling wave heat engine* [Text] / P.H. Ceperley // *Journal of Acoustical Society of America*. – 1979. – № 66. – P. 1508–1513.
4. Backhaus, S. *A thermoacoustic-Stirling heat engine: Detailed study* [Text] / S. Backhaus, G. Swift // *J. Acoustic. Soc. Am.* – 2000. – №107. – P. 3148-3166.
5. Rott, N. *Thermoacoustics* [Text] / N. Rott // *Adv. Appl. Mech.* – 1980. – №20 (135). – P. 250-272.
6. *An Intrinsically Irreversible Thermoacoustic Heat Engine* [Text] / J. Wheatley, T. Hofler, G.W. Swift., A. Migliori // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1983. – Vol. 74, № 1. – P. 153-170.
7. Hendrikus, Peter. *Mathematical aspects of thermoacoustics* [Электронный ресурс] / Peter Hendrikus, Maria Wilhelmus. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2009. – 190 p. – Режим доступа: <http://repository.tue.nl/642908>. – 31.05.2013.
8. *Weakly nonlinear thermo-acoustics for stacks with slowly varying pore cross-sections* [Text] / P.H.M.W. in 't Panhuis, S.W. Rienstra, J. Molenaar, J.J.M. Slot // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2009. – Vol. 618. – P. 41–70.

9. Tijani, M.E.H. *Loudspeaker-driven thermoacoustic refrigeration [Text]* / M.E.H. Tijani // Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2001. – 170 p.

10. Bruneau *Asymptotic theory of nonlinear acoustic waves in a thermoacoustic prime-mover [Text]* / V. Gusev, H. Bailliet, P. Lotton, M. Bruneau // *Acustica*. – 2000. – Vol. 86. – P. 25–38.

11. Abduljalil Abdulrahman, S. *Experimental testing of the flow resistance and thermal conductivity of porous materials for regenerators [Text]* / S. Abdulrahman Abduljalil, Yu. Zhibin, J. Artur Jaworski // *Proceedings of 23rd IIR International Congress of Refrigeration*. – 2011. – Vol. 32. – P. 217–228.

12. Коробко, В.В. *Аналіз механізмів переносу теплоти в елементах термоакустичних апаратів [Електронний ресурс]* / В.В. Коробко, Є.І. Трушляков // *Матеріали III Міжнар. конф. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*. – НУК, Україна. – Режим доступу: <http://goo.gl/R9rlV>. – 12.05.2013.

13. Коробко, В.В. *Исследование факторов, влияющих на эффективность термоакустических*

аппаратов [Текст] / В.В. Коробко // *Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу: матеріали IV Міжнар. наук. конф., Дніпропетровськ, 2012*. – С. 56–59.

14. Галиуллин, Р.Г. *Течение вязкой жидкости и теплообмен тел в звуковом поле [Текст]* / Р.Г. Галиуллин, В.Б. Репин, Н.Х. Халитов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1978. – 128 с.

15. Бузник, В.М. *Теплопередача в судовых энергетических установках [Текст]* / В.М. Бузник. – Л.: Судостроение. – 376 с.

16. Коробко, В.В. *Особенности численного моделирования термоакустических процессов* / В.В. Коробко // *Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу: матеріали III Міжнар. наук. конф., Дніпропетровськ, 2010*. – С. 59–61.

17. Kondratenko, Y. *Multisensor data acquisition system for thermoacoustic processes analysis [Text]* / Y. Kondratenko, V. Korobko, O. Korobko // *Proceedings of the 6th IEEE international conference Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS'2011, Prague, 2011*. – Vol. 1. – P. 54–58.

Поступила в редакцію 31.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. двигателей внутреннего сгорания Б.Г. Тимошевский, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ТА ГІДРОДИНАМІКИ В ЕЛЕМЕНТАХ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ДВИГУНІВ

В.В. Коробко

У статті розглянуто особливості термоакустичних теплових машин (ТАТМ) та основні положення їх базових математичних моделей. Проведено аналіз механізмів теплообміну в елементах термоакустичних двигунів (ТАД). Зроблено припущення про доцільність застосування в ТАТМ спеціальних типів теплообмінних поверхонь. Дано опис стенда для експериментальних досліджень комплексу теплофізичних і гідродинамічних процесів в ТАТМ. Наведено результати CFD моделювання та експериментальних досліджень процесів в елементах термоакустичних апаратів.

Ключові слова: термоакустика, двигун, теплообмін, акустика, теплообмінник, матриця, звукова хвиля, чисельне моделювання, пульсації/

STUDY OF HEAT TRANSFER AND HYDRODYNAMICS IN COMPONENTS THERMOACOUSTIC ENGINES

V.V. Korobko

The article discusses the features thermoacoustic heat engines (TMHE) and the main hypotheses of the basic mathematical models. Analysis of mechanisms of heat transfer in the elements thermoacoustic engines (TAE). Make assumptions about the appropriateness of specific types of TMHE heat transfer surfaces. Description stand for experimental studies of complex thermal and hydrodynamic processes in TMHE provided. The results of CFD simulation and experimental studies of processes in cell thermoacoustic devices are given.

Key words: thermoacoustic, engine, heat transfer, acoustics, heat exchanger matrix, sound wave, numerical modeling, pulsation.

Коробко Владимир Владиславович – канд. техн. наук, докторант, доцент кафедры стационарных и судовых энергетических установок Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина. e-mail: volodymyr.korobko@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com.