



ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА КАК ФАКТОР, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

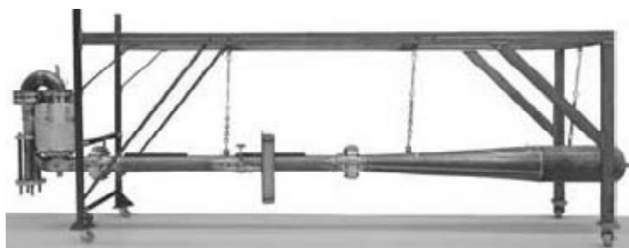
Коробко В.В., Московко А.А.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова (г. Николаев)

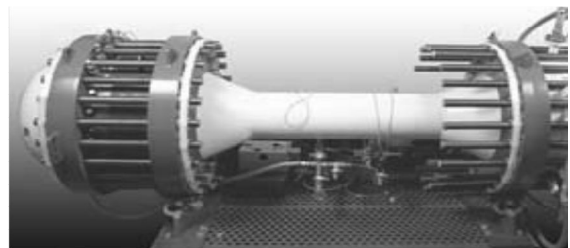
В статье рассмотрены возможные пути использования термоакустических тепловых машин (ТАТМ). Показана перспективность их применения для использования низкотемпературных тепловых ресурсов, дан обзор существующих теоретических моделей. Теплообмен в ТАТМ является единственным механизмом, обеспечивающим подвод теплоты к рабочему телу, так и преобразование тепловой энергии в механическую работу. Показано, что эти модели не рассматривают процессы подвода тепловой энергии к рабочему телу и не учитывают существующие механизмы теплообмена между элементами ТАТМ. Методы оптимизационной термодинамики (ОТ) позволяют устранить эти недостатки и учесть особенности теплообмена в пульсирующих потоках. С помощью этих подходов проведён анализ факторов, определяющих эффективность термоакустического двигателя (ТАД). Это дало возможность в явном виде получить зависимости, связывающие основные характеристики ТАД от параметров теплообменников. Показано непосредственное влияние интенсивности теплообмена на внешние характеристики ТАТМ. В статье проведён анализ результатов экспериментальных исследований опытного ТАД. Использование подходов ОТ, позволило определить направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: термоакустика, оптимизационная термодинамика, теплообмен, тепловая машина, двигатель.

Вступление. Термоакустические аппараты (ТАА) – это сравнительно новый вид тепловых машин (ТМ). Термоакустические тепловые машины имеют ряд положительных качеств: отсутствие механических подвижных элементов, возможность работы от внешних источников тепловой энергии, экологичность. В ТАТМ происходит прямое преобразование тепловой энергии в механическую энергию акустических волн. В ТАТМ реализованы прямой и обратный цикл Стирлинга. Важно отметить, что ТАТМ способны работать от низкотемпературных источников тепловой энергии, что позволяет создавать эффективные системы утилизации тепловых выбросов. Распространению ТАТМ препятствуют их низкая энергонасыщенность, сложность непосредственного получения механической энергии.



а



б

Рисунок 1 – Примеры термоакустических тепловых машин: а) ТАР системы охлаждения электроники фрегата ВМФ США; б) термоакустический двигатель с циклом Стирлинга

Цель работы. В ТАТМ преобразование тепловой энергии в механическую происходит непосредственно при взаимодействии поверхностей теплообменников (рекуператоров и матриц) с рабочим телом в условиях, которые определяют мощные акустические колебания. Очевидно, что процессы теплообмена в пульсирующих потоках существенно отличаются от теплообмена при традиционных условиях. Таким образом, очевидна необходимость детального исследования процессов теплообмена в элементах ТАТМ с учётом всех факторов. Данная работа посвящена исследованию особенностей теплообмена в элементах ТАТМ.



Постановка задачі. В резонаторах ТАТМ имеет место осциллирующее движение рабочего тела, которое связано с наличием мощных акустических волн. В результате этого колебательные движения среды являются доминирующим механизмом, формирующим гидродинамическую ситуацию, как в резонаторе, так и в теплообменниках ТАТМ. Амплитудные значения этих осцилляций достигают значительных величин, при этом их частота не превышает 150–250 Гц. Эти обстоятельства ставят под сомнение возможность использования моделей, полученных для случая ультразвуковых колебаний среды. Процессы тепломассообмена и гидродинамики в условиях ТАТМ недостаточно изучены, что усложняет разработку таких аппаратов. Теплообменные аппараты ТАТМ играют важную роль в их работе, так именно эти элементы обеспечивают процессы подвода теплоты для осуществления термодинамического цикла.

Анализ предыдущих исследований. В [1, 2] разработаны основные положения теории термоакустических ТМ. Эта модель рассматривает матрицу ТАТМ как основной элемент, в котором происходят взаимные преобразования тепловой энергии в акустические пульсации. Продольный градиент температуры в матрице и колебательное движение среды, вызванные акустической волной, создают условия для работы ТАТМ. Суммарное количество теплоты, вовлечённое в термоакустические преобразования, можно определить с помощью выражения:

$$\dot{Q}_{TAD} = \frac{1}{4} \Pi \delta_k \frac{T_m \beta p_s u_s}{(1 + Pr)(1 + \varepsilon_s) \Lambda} \left[\Gamma \frac{1 + Pr^{1/2} + Pr(1 + \varepsilon_s)}{1 + Pr^{1/2}} - \left(1 + Pr^{1/2} - \frac{\delta_v}{y_0} \right) \right] - \Pi (y_0 k + L k_s) \frac{dT_m}{dx}. \quad (1)$$

При этом термоакустический двигатель (ТАД) генерирует акустическую энергию:

$$\dot{W}_{TAD} = \frac{1}{4} \Pi \delta_k L_s \frac{(\gamma - 1) \varpi (p_s)^2}{\rho_m c^2 (1 + \varepsilon_s)} \left(\frac{\Gamma}{(1 + Pr^{1/2}) \Lambda} - 1 \right) - \frac{1}{4} \Pi \delta_v L_s \frac{\omega \rho_m u_s^2}{\Lambda}. \quad (2)$$

Потери акустической энергии в резонаторе ТАТМ, радиус которого R и длина L_{res} , можно оценить, как:

$$\dot{E}_{diss} = \frac{1}{4} \frac{(p_s)^2}{\rho_m c^2} \omega \pi R L_{res} \left[\delta_k \frac{(\gamma - 1)}{(1 + \varepsilon_s)} \left(1 + \frac{2R}{L_{res}} \right) + \delta_v \right], \quad (3)$$

где Π, L – периметр и длина стека; R – радиус резонатора, T_m, p_m, ρ_m, c_p – теплофизические параметры, соответственно – средняя температура, давление, плотность, теплоёмкость; $\delta_s = \sqrt{2\lambda_s / \rho_s c_s \omega}$ – толщина пограничного слоя в материале стека; $\delta_k = \sqrt{2\lambda_k / \rho_m c_p \omega}$ – толщина теплового пограничного слоя в газе; $\delta_v = \sqrt{2\nu / \omega}$ – толщина вязкостного пограничного слоя; $\Lambda = 1 - \delta_v / y_0 + \delta_v^2 / 2y_0^2$ – масштабный фактор; $T_{crit} = T_m \omega \beta p_s / \rho_m c_p \langle u_1^s \rangle$ – критический температурный градиент; $\varepsilon_s = \rho_m c_p \delta_k / \rho_s c_s \delta_s$ – отношение параметров; $\Gamma = \nabla T_m / T_{crit}$ – приведенный градиент температуры.

Еще раз обратим внимание, что зависимости для \dot{Q}_{TAD} и \dot{W}_{TAD} изначально были получены для стека, так как именно в этом элементе происходят термоакустические процессы преобразования энергии. Однако такой подход имеет ряд существенных недостатков, а именно:

– не учитываются температуры первичных теплоносителей и рабочих поверхностей теплообменников;



- продольный температурный градиент в матрице ∇T_m считается заданным и не связан с характеристиками теплообменников;
- соответственно не рассматриваются процессы, определяющие интенсивность подвода теплоты к рабочему телу ТАТМ;
- не учитываются потери эффективности ТАТМ, связанные с конструкцией теплообменников.

В этой связи перспективным представляется подход, предложенный в [3, 4], в котором с помощью аппарата оптимизационной термодинамики построена обобщенная феноменологическая модель ТАТМ. В соответствии с [3], для теплообменников ТАТМ (рис. 2) применим обобщенный закон теплообмена $Q \propto \Delta(T)^n$. Для данного случая количество теплоты, подведенное к рабочему телу ТАТМ, пропорционально разности температур источника тепловой энергии и окружающей среды:

$$Q \propto \Delta(T_H - T_L)^n. \quad (4)$$

Показатель степени в этом выражении может принимать различные значения в зависимости от существующих механизмов теплопередачи. Так, для случая теплового потока с теплопроводностью будем иметь $n=1$, в других условиях (преобладание лучистого теплообмена или сложный теплообмен) этот показатель будет иным.

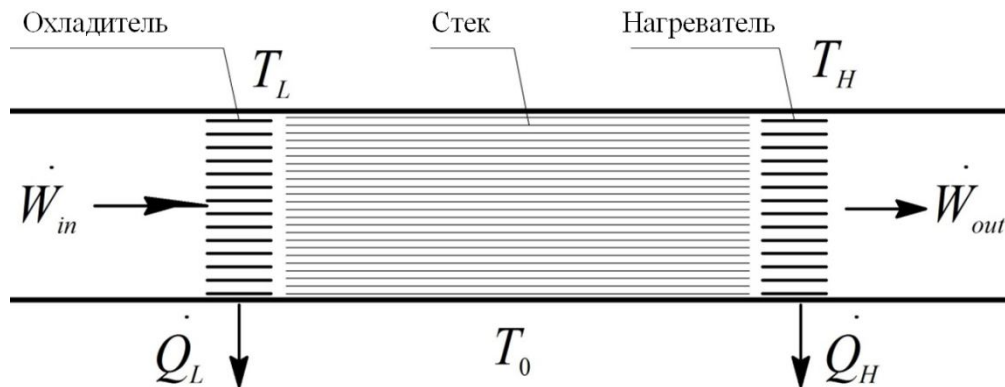


Рисунок 2 – Принципиальная схема термоакустического двигателя

Поскольку работа ТАТМ связана с колебательными процессами с угловой частотой ω , можно считать, что теплообмен между рабочим телом и источниками тепловой энергии (теплообменниками) в условиях ТАТМ подчиняется обобщенному закону теплообмена в комплексной форме [3, 4], поэтому показатель степени n можно представить в виде:

$$n = n_1 + n_2 i. \quad (5)$$

где n_2 – мнимая часть показателя $n = n_1 + n_2 i$ связана с интенсивностью терморелаксационных процессов.

Осреднённые по времени значения температуры рабочего газа в резонаторе T_{H0} и T_{L0} отличаются от температур тепловых резервуаров T_H и T_L и, согласно второму закону термодинамики, выполняется условие $T_H > T_{H0} > T_{L0} > T_L$.

Мгновенные значения температуры рабочего тела, связанные с пульсациями давления в акустической волне, могут быть выражены в комплексном виде, как:

$$T_{HC} = T_{H0} + T_1 e^{i\omega t}, \quad (6)$$

$$T_{LC} = T_{L0} + T_2 e^{i\omega t}, \quad (7)$$



где T_1 и T_2 первые члены ряда разложения.

Для осреднённых по времени значений \dot{Q}_{HC} и \dot{Q}_{LC} можем записать:

$$\dot{Q}_{HC} = k_1 F_{HEX}^H (T_H^n - T_{H0}^n) \text{ и } \dot{Q}_{LC} = k_2 F_{HEX}^C (T_{L0}^n - T_L^n) \quad (8)$$

где k_1 и k_2 – усреднённые коэффициенты теплопередачи нагревателя и охладителя; F_{HEX}^H – суммарная площадь теплообменной поверхности нагревателя; F_{HEX}^C – суммарная площадь теплообменной поверхности охладителя.

Допустив, что существующий уровень теплоперетоков непосредственно между источниками теплоты q есть величина постоянная, можем записать, что:

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_{HC} + q \text{ и } \dot{Q}_L = \dot{Q}_{LC} + q. \quad (9)$$

В ТАТМ также имеют место потери энергии, связанные с внутренней необратимостью, которые обусловлены гидравлическими потерями и другими процессами.

Очевидно, что поток тепловой энергии во внешнюю среду от необратимой ТАТМ – \dot{Q}_{LC} будет большим, чем поток от обратимой – \dot{Q}_{LCID} . Для оценки этого фактора введём коэффициент необратимости:

$$\phi = \dot{Q}_{LC} / \dot{Q}_{LCID} \geq 1. \quad (10)$$

Вводя отношение температур рабочей жидкости в виде:

$$x = T_{L0} / T_{H0}, \quad (11)$$

можем записать, что $\dot{Q}_{LC} = \phi \times x \times \dot{Q}_{HC}$. Теперь для модели внутренне необратимого ТАД с комплексным представлением процессов преобразования энергии можно получить следующие выражения:

$$T_{H0}^n = \frac{k_1 F_{HEX}^H \int \phi x T_H^n + k_2 T_L^n}{k_2 x^n + k_1 x F_{HEX}^H / F_{HEX}^C \phi}, \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{HC} = \frac{k_1 F_{HEX}^H (x^n T_H^n - T_L^n)}{x^n + \phi x F_{HEX}^H / F_{HEX}^C k_1 / k_2}, \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{LC} = \phi x \frac{k_1 F_{HEX}^H (x^n T_H^n - T_L^n)}{x^n + \phi x F_{HEX}^H / F_{HEX}^C k_1 / k_2}. \quad (14)$$

Согласно первому закону термодинамики, мощность ТАД определяется, как:

$$\dot{W} = \dot{W}_{out} - \dot{W}_{in} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \dot{Q}_{HC} - \dot{Q}_{LC}. \quad (15)$$

Или с использованием (13) и (14) и вводя соотношение $\delta = k_1 / k_2$, получим:

$$\dot{W} = \dot{Q}_{HC} - \dot{Q}_{LC} = \frac{k_1 (F_{HEX}^H + F_{HEX}^C) F_{HEX}^H / F_{HEX}^C (1 - \phi x) [T_H^n - (T_L / x)^n]}{(1 + \phi) k_1 F_{HEX}^H / k_2 F_{HEX}^C x^{1-n}}. \quad (16)$$



Выражение (16), в отличии от (2), в явном виде включает в себя параметры, характеризующие интенсивность процессов теплообмена между рабочим телом и теплообменниками, а также температуры источников тепловой энергии.

В случае, когда стоит задача создания низкотемпературных ТАТМ, факторы, определяющие интенсивность процессов теплообмена, приобретают решающее значение. В связи с этим, рассмотрим полученные экспериментально температурные тренды для ключевых элементов ТАД (рис. 3) [5, 6, 7].

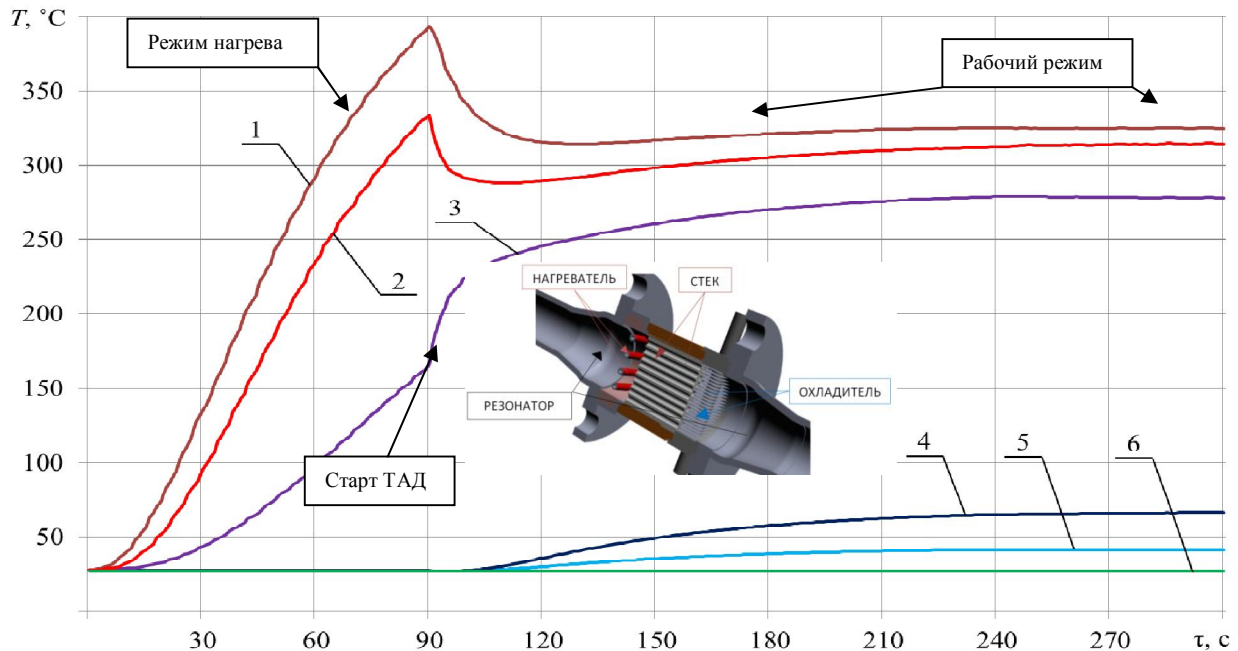


Рисунок 3 – Изменение температур теплообменников и стека при запуске ТАД:

1 – температура поверхности нагревателя; 2 – температура оребрения нагревателя; 3 – горячая сторона стека; 4 – холодная сторона стека; 5 – температура охладителя; 6 – температура окружающей среды

Можно видеть, что до 90-й секунды растут температуры нагревателя, матрицы, и формируется градиент температуры в стеке. С момента запуска ТАД на (90 сек.) резко растёт температура стека – 3, при этом значительно снижается температура поверхности нагревателя – 1, 2. В исследованиях были использованы электрические нагреватели с закрытой спиралью. Эти процессы свидетельствуют, что из-за высокого внутреннего термического сопротивления нагревателя в опытном ТАД не удалось в полной мере реализовать имеющийся температурный потенциал источника тепла. В данной ситуации оказалось, что стек в процессе генерации акустических колебаний был способен преобразовать тепла больше, чем мог подвести теплообменник.

Принимая во внимание характер температурных трендов, можно утверждать, что этот фактор значительно снизил термодинамическую эффективность исследуемого ТАД, так как верхняя температура рабочего цикла тепловой машины была существенно ниже максимальной температуры нагревателя. Для данного ТАД процессов совокупность происходящих в узле – «нагреватель – рабочее тело – стек» вызывает столь значительную разницу температур между источником и рабочим телом, формируя основную эксергетическую потерю. Этот факт следует обязательно учитывать при разработке ТАТМ систем утилизации вторичных энергоресурсов, и принять меры к уменьшению этой разницы температур.

Очевидно, что для низкотемпературных ТАД в качестве нагревателей целесообразно использовать рекуперативные трубчаторебристые теплообменники, в греющем контуре которых циркулирует термальное масло. В связи с эти рассмотрим выражение (8), в развёрнутом виде, применительно к реальным условиям работы ТАД:



$$\dot{Q}_{HC} = \left(1/\alpha_H + \delta_w/\lambda_w + F_H/\alpha_G \xi F_{HEX}^G \right)^{-1} F_{HEX}^H (T_H^n - T_{H^0}^n), \quad (17)$$

где α_H – коэффициент теплоотдачи от термальной жидкости к теплообменнику, α_G – коэффициент теплоотдачи от теплообменника к рабочему телу (газ), ξ – коэффициент, учитывающий неоднородность поля температуры по внешней поверхности нагревателя, F_H – внутренняя поверхность нагревателя, F_{HEX}^G – площадь внешней поверхности нагревателя, δ_w и λ_w – толщина стенки теплообменника и теплопроводность стенки.

Так как максимальная температура греющей среды ограничена температурой источника тепловой энергии, то тепловой поток нагревателя однозначно будет определяться расходом теплоносителя и характеристиками теплообменника.

Очевидно, что комплекс « $\alpha_G \xi F_{HEX}^G$ » – более всего зависит от температуры поверхности F_{HEX}^G и процессов, происходящих в резонаторе. Осциллирующее движение рабочего тела в звуковой волне приводит к возникновению ряда гидродинамических эффектов, которые могут существенно влиять на интенсивность теплообмена на наружной поверхности нагревателя.

В то же время, комплекс $[1/\alpha_H + \delta_w/\lambda_w]$ – учитывающий теплоотдачу от греющей жидкости к внутренней поверхности нагревателя и термическое сопротивление материала теплообменника практически не подвержен влиянию акустических воздействий. Таким образом, основное внимание должно быть уделено исследованию явлений возникающих на внешней поверхности нагревателя.

Следовательно, создание эффективных ТАТМ требует разработки специальных теплообменных поверхностей, способных обеспечить интенсивную теплоотдачу в осциллирующем газовом теплоносителе и оказывающих минимальное демпфирование акустическим колебаниям.

Выводы:

- использование элементов оптимизационной термодинамики позволяет в явном виде учитывать влияние характеристик теплообменников на работу ТАТМ;
- экспериментальные исследования работы ТАД показали, что возможны случаи, когда внутренние теплообменники не обеспечивают подведение требуемого теплового потока к рабочему телу и могут быть лимитирующим фактором, ограничивающим мощность и эффективность ТАД;
- в ТАТМ предназначенных для использования низкотемпературных источников теплоты необходимо использовать теплообменные поверхности, которые эффективно работают в осциллирующей среде;
- для создания специальных теплообменников ТАТМ требуется проведение комплекса экспериментальных и теоретических исследований факторов, влияющих на интенсивность теплообмена в условиях мощных акустических пульсаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Swift G. W. Thermoacoustic : A unifying perspective for some engines and refrigerators / G. W. Swift // American Institute of Physics. – 2002. – 300 p.
2. Swift G. W. Thermoacoustic Engines / G.W. Swift // Journal of the Acoustical Society of America. – Vol. 84, No. 4. – 1988. – P. 1145-1180.
3. Wu C. Effect of heat transfer law on finite time exergoeconomic performance of heat engines / C. Wu, L. Chen, F. Sun // Energy, The Int. J.. – vol. 21(12). – 1996. – P. 1127-1134.
4. F.Wu. Optimization of a Thermoacoustic Engine with a Complex Heat Transfer Exponent / F. Wu, C. Wu, F.Guo, Q. Li, L. Chen. // The Int. J. Entropy. – 2003. – P. 444-451.



5. Коробко В. В. Исследование процессов теплообмена и гидродинамики в элементах термоакустических двигателей / В. В. Коробко // Авиационно-космическая техника и технологии. – 2013. – № 8 (105). – С. 123-130.

6. Коробко В. В. Особливості запуску термоакустичних двигунів за умов використання низькопотенційних джерел теплової енергії / В. В. Коробко, О. О. Московко // Матеріали IV науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування». – Херсон : ХДМА, 2013. – С. 111-115.

7. Kondratenko Y. Distributed Computer System for Monitoring and Control of Thermoacoustic Processes [Text] / Y. Kondratenko, V. Korobko, O. Korobko // Proceedings of the 7th IEEE int. conf. IDAACS'2013. – Berlin, Germany, 12-14 September 2013. – Vol. 1. – P. 249-253.

Коробко В.В., Московко А.А. ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛООБМІНУ ЯК ФАКТОР, ЩО ВИЗНАЧАЄ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ТЕПЛОВИХ МАШИН

У статті розглянуто можливі шляхи використання термоакустичних теплових машин (ТАТМ). Показано перспективність їх застосування для використання низькотемпературних теплових ресурсів, надано огляд існуючих теоретичних моделей. Теплообмін в ТАТМ є єдиним механізмом, що забезпечує як підведення теплоти до робочого тіла, так і перетворення теплової енергії в механічну роботу. Показано, що ці моделі не розглядають процеси підведення теплової енергії до робочого тіла і не враховують існуючі механізми теплообміну між елементами ТАТМ. Методи оптимізаційної термодинаміки (ОТ) дозволяють усунути ці недоліки і врахувати особливості теплообміну в пульсуючих потоках. За допомогою цих підходів проведено аналіз факторів, що визначають ефективність термоакустичного двигуна (ТАД). Це дало можливість у явному вигляді отримати залежності, що зв'язують основні характеристики ТАД від параметрів теплообмінників. Показано безпосередній вплив інтенсивності теплообміну на зовнішні характеристики ТАТМ. У статті проведено аналіз результатів експериментальних досліджень дослідного ТАД. Використання підходів ОТ, дозволило визначити напрямки подальших досліджень.
Ключові слова: термоакустика, оптимізаційна термодинаміка, теплообмін, тепла машина, двигун.

Korobko V.V., Moskovko A.A. HEAT TRANSFER INTENSITY AS THE FACTOR DETERMINING CHARACTERISTICS OF THERMOACOUSTIC HEAT MACHINE

The article discusses the ways of thermoacoustic heat engines (TAHE) usage. The prospects of their application for low-temperature heat resources, provides an overview of the existing theoretical models. Heat transfer in TAHE is the only mechanism for supply of heat to the working fluid and the conversion of thermal energy into mechanical work. It is shown that these models do not consider the process of supplying thermal energy to the working fluid and do not consider the existing mechanisms of heat transfer between TAHE elements. Methods of optimization thermodynamics (OT) can eliminate these disadvantages and take into account the features of heat transfer in pulsating flows. With these approaches, the factors determining the effectiveness of a thermoacoustic engine (TAE) are analyzed. This approach made it possible to obtain an explicit dependence linking the main characteristics of the TAE with heat exchangers characteristics. Article shows a direct impact on the intensity of heat transfer characteristics on the external TAHE characteristics. The article analyzes the results of experimental TAE studies. Using the approaches of OT authors determine the ways of future research.
Keywords: thermoacoustic, finite time thermodynamics, heat transfer, heat machine, engine.

Статтю прийнято
до редакції 11.06.14.