

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Владимир Коробко, Алексей Московко*

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова*

*54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9*

*Volodymyr Korobko, Oleksiy Moskovko*

*National University of Shipbuilding named after admiral Makarov*

*54025, Nikolaev, ave. Heroes of Stalingrad, 9*

**Аннотация.** В работе приведен анализ особенностей процессов теплообмена между элементами термоакустических тепловых машин (ТАТМ), показаны возможные механизмы влияния этих факторов на производительность ТАТМ. Приведены результаты CFD моделирования и физических экспериментов, приведена схема исследовательского стенда.

**Ключевые слова:** термоакустика, тепловой двигатель, энергосбережение, тепловой насос, теплообмен, акустическая волна, CFD моделирование.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Термоакустические аппараты (ТАА) – двигатели (ТАД) и рефрижераторы (ТАР) – являются относительно новым типом тепловых машин (ТМ), которые дают возможность создавать принципиально новые и эффективные решения [1-7]. Анализируя современные энергогенерирующие технологии можно сделать вывод, что существует потребность в ТМ «малой» мощности, которые способны эффективно работать на низкопотенциальных вторичных и возобновляемых тепловых ресурсах. При определенных условиях традиционные решения, в энергетике, являются нецелесообразными, поэтому постоянно идет поиск новых путей утилизации тепловых выбросов [8,9]. Поэтому поиск возможных путей усовершенствования ТАТМ является актуальной задачей.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В работах иностранных ученых N. Rott [1], G.W. Swift [3], A. Tomoinaga [6], J.C. Wheatley [2,5], A. Migliori [5], K. De Blok [10], M. M. Basseem, Y. Ueda [11], V. Gusev [12] раскрыты основные теоретические положения термоакустики и важные результаты экспериментальных исследований.

Существующие теоретические модели были построены с определенными упрощениями, что довольно целесообразно учитывая сложность процессов. Большинство авторов подчеркивает, что существует потребность в новых результатах экспериментальных исследований, которые освещают различные стороны термоакустических процессов. Поэтому можно полагать, что работы экспериментальной направленности являются актуальными и целесообразными.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Теплофизические процессы в термоакустических аппаратах носят сложный характер и относительно малоисследованные. Для их изучения должны быть использованы разные методики исследований, а именно теоретические, экспериментальные и CFD моделирование. Целью работы является анализ факторов, которые определяют условия теплообмена в элементах ТАТМ.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Термоакустические ТМ существенно отличаются от традиционных отсутствием каких-либо подвижных механических элементов.

Именно газовая среда в резонаторе ТАА выполняет функции механизма, который переносит механическую энергию, и рабочего тела, которое обеспечивает теплообмен в термоакустических процессах.

Анализ конструкций существующих ТАА позволяет сделать предположение, что интенсивность процессов теплообмена [13] может быть ограничивающим фактором, который лимитирует возможную энергонасыщенность ТАА.

Важный элемент ТАА – это блок теплообменников в совокупности с матрицей (регенератором или стеком). Матрица расположена между нагревателем и охладителем, за

счет чего в матрице формируется необходимый продольный температурный градиент (рис. 1) [1,2].

Регенератор (стек) – это компактная матрица с развитой поверхностью. Именно в регенераторе происходят процессы термоакустических преобразований, которые влияют на эффективность ТАА.

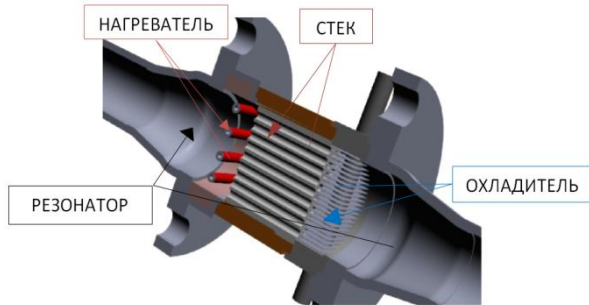


Рис. 1. Термоакустический аппарат, общая схема исследовательского образца  
Fig. 1. The general schematic of thermoacoustic device

В стекле часть тепловой энергии расходуется на «раскачку» термоакустической ТМ, часть энергии теряется с продольной теплопроводностью, вязкостными эффектами, и т.п. Эти процессы являются сложными и нуждаются в отдельных исследованиях, поэтому сейчас не рассматриваются.

На рис. 2 [14] показано продольное распределение температуры в регенераторе ТАД. С момента подачи энергии  $t=0$  к нагревателю в стекле формируется температурный градиент. В момент времени  $t=100$  температурный градиент превышает критический уровень, в ТАА возникают акустические колебания, а температурное распределение в регенераторе приобретает стационарный характер.

Температура горячей стороны регенератора достигает максимума в момент старта ТАД, а со временем снижается, приблизительно на  $40\text{ }^{\circ}\text{C} - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в сравнении с моментом старта. Эта картина типична для ТАД, что подтверждено многими исследователями. Такие изменения температуры в регенераторе можно объяснить действием различных факторов, а именно – малой мощностью (теплоемкостью) нагревателя для этого регенератора и низкой интенсивностью теплообмена между нагревателем и регенератором.

Характер изменения температуры холодной стороны регенератора свидетельствует, что и там присутствует указанная проблема, но разность температур, относительно охладителя, меньше.

Следовательно, недостаток тепловых потоков между теплообменниками ТАД и регенератором является существенным фактором, который может определять возможную мощность ТАД.

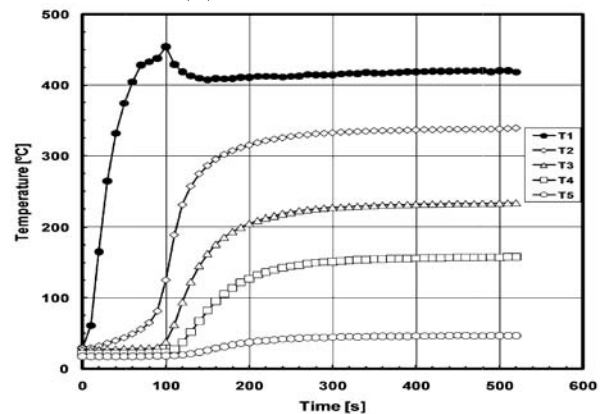


Рис. 2 Распределение температуры вдоль керамического стека  
Fig. 2 Temperature distribution lengthwise the ceramic stack

В [1-4,15] показано, что тепловая энергия подведенная к стеклу составляет

$$Q_{TAD}^{HEX} = \frac{1}{4} \Pi \delta_k \frac{\beta T_m p_1 u_s}{(1 + Pr)(1 + \varepsilon_s) \Lambda} \times \left[ \Gamma \frac{1 + Pr^{1/2} + Pr(1 + \varepsilon_s)}{1 + Pr^{1/2}} - \left( 1 + Pr^{1/2} - \frac{\delta_v}{y_0} \right) \right] - \Pi (y_0 k + L k_s) \frac{dT_m}{dx} \quad (1)$$

и обеспечивает получение акустической мощности от ТАД

$$W_{TAD} = \left( \frac{\frac{1}{4} \Pi \delta_k L_s (\gamma - 1) \overline{\omega} (p_{s1})^2}{\rho_m a^2 (1 + \varepsilon_s)} \right) \times \left( \frac{\Gamma}{(1 + Pr^{1/2}) \Lambda} - 1 \right) - \frac{1}{4} \frac{\Pi \delta_v L_s \omega \rho_m u_{s1}^2}{\Lambda} \quad (2)$$

где  $\Pi, L$  – периметр и длина стека;  $T_m, p_m, \rho_m, c_p$  – теплофизические параметры, соответственно – средняя температура, давление, плотность, теплоемкость;  $\delta_s = \sqrt{2\lambda_s / \rho_s c_s \omega}$  – толщина термического

пограничного слоя в материале стека;  $\delta_k = \sqrt{2\lambda_k/\rho_m c_p \omega}$  – толщина термического пограничного слоя в газе, который контактирует со стенкой;  $\delta_v = \sqrt{2\nu/\omega}$  – величина вязкостного пограничного слоя;  $\Lambda = 1 - \delta_v/y_0 + \delta_v^2/2y_0^2$  – масштабный фактор;  $\nabla T_{crit} = p_1\omega/\rho_m c_p u_s$  – критический температурный градиент,  $\Gamma = \nabla T_m/T_{crit}$  – нормализованный градиент температуры. В этих выражениях, в явном виде отсутствуют параметры что характеризуют имеющиеся механизмы теплообмена, и реальное различие температур нагревателя и охладителя.

В элементах ТАД имеет место процесс сложного теплообмена [16] с разными механизмами переноса теплоты (рис. 3, [16]). Имея это в виду, можем записать, что

$$Q_{TAD}^{HEX} = Q_{conv} + Q_{cond} + Q_{rad} \quad (3)$$

Радиационная составляющая (4) имеет значение во время разогрева стека, когда

есть существенное различие между температурами поверхностей, поэтому на стационарных режимах ее влиянием можно пренебрегать.

$$Q_{rad} = \varepsilon_{np} C_{np} F \left[ (T_{HEX}^{hot}/100)^4 - (T_{REG}^{hot}/100)^4 \right] \quad (4)$$

Закон Фурье зависимости теплового потока от теплопроводности выглядит как

$$Q_{cond} = \lambda F (T_{HEX}^{surf} - T_{reg})/\delta \quad (5)$$

В ТАА отсутствует плотный контакт между теплообменниками и регенератором. Поэтому считать этот механизм как решающий, для разогрева стека, нецелесообразно.

Существенное влияние на работу ТАД имеет конвекционная часть теплового потока

$$Q_{conv} = \alpha_{np} F_{HEX} (T_{surf} - T_m) \approx Q_{nat} + Q_{fors} \quad (6)$$

В свою очередь, конвекционный теплообмен делится на две составные – свободную и вынужденную.

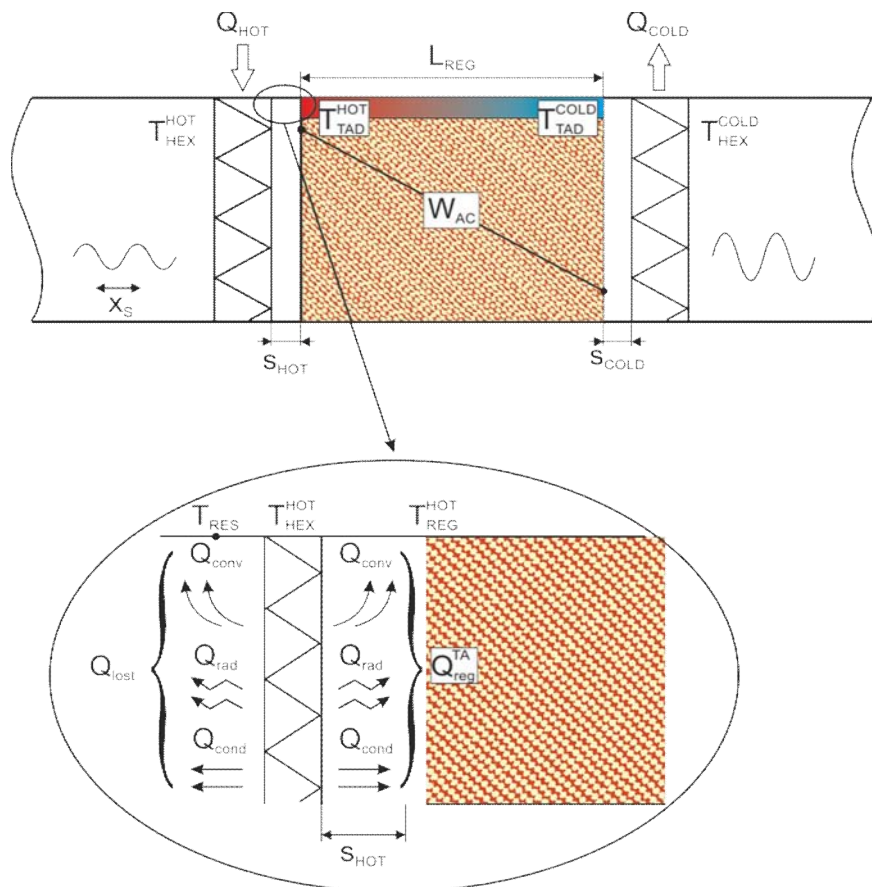


Рис. 3. Условная схема процессов теплообмена в ТАА

Fig. 3. Schematic diagram of the heat transfer processes in the TAA

Взаимодействие этих механизмов очень сложное, и зависит от многих факторов – температурных напоров, величины зазоров,

их формы и пространственной ориентации ТАА.

В CFD комплексе Flow vision 2.3 были промоделированы термоконвективные процессы, которые развиваются в ТАД во время его запуска. Показано, что даже при условиях низких температур нагревателя ( $150^{\circ}\text{C}$  –  $200^{\circ}\text{C}$ ), термоконвективные течения на этапе пуска двигателя приобретают значительную интенсивность (рис. 4, [16]).

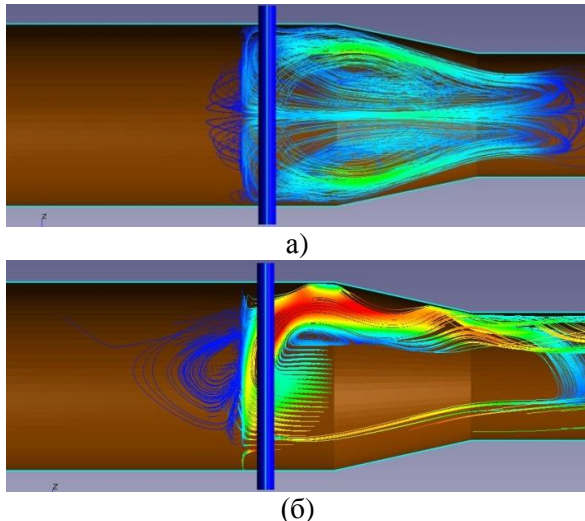


Рис. 4 Термоконвективные течения в резонаторе при вертикальной (а) и горизонтальной (б) ориентациях  
Fig. 4. Thermal convection flow in a cavity in the vertical (a) and horizontal (b) orientations

Существенной особенностью ТАА есть гидродинамическая структура рабочей среды, а именно – наличие лишь пульсирующего движения газа с частотой 100 – 200 Гц.

Следовательно, это колебательное движение представляет собой единый действенный гидродинамический механизм, который содействует развитию вынужденного конвекционного теплообмена.

Амплитудные значения колебательных смещений частиц рабочей жидкости и скорости движения этих частиц в акустической волне определяют как [18]

$$\xi_S = P_s / \omega \rho C, \quad u_s = P_s / \rho C \quad (7)$$

Процессы теплообмена и гидромеханические явления в условиях мощных акустических пульсаций ( $P_s = 150 - 170$  dB) с рабочей частотой 100 – 200 Гц мало изучены.

На рис. 5 показаны результаты моделирования теплообмена в щелевых каналах. На рис. 5 можно увидеть, что колебательное движение теплоносителя, относительно положения равновесия, существенно усложня-

ет условия для теплообмена. Непосредственно в объеме теплообменной поверхности формируется условная застойная зона. теплообменника при наличии мощной акустической волны.

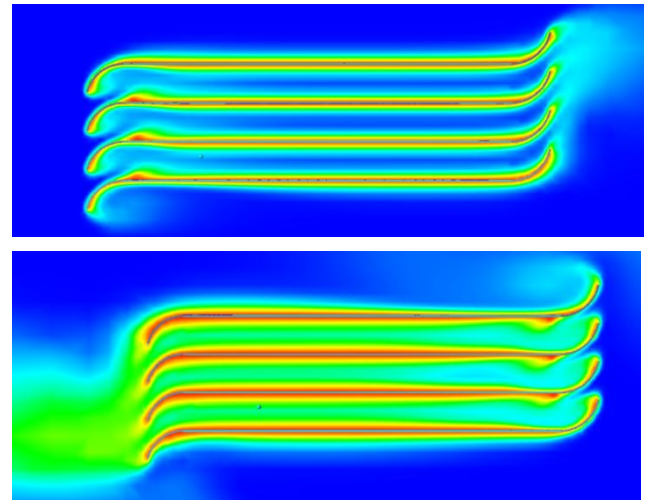


Рис. 5. Температурные поля в щелевых каналах при условии акустических пульсаций  
Fig. 5. The temperature field in the slotted channels under conditions of acoustic pulses

Наличие регенератора, который имеет значительное гидравлическое сопротивление, содействует выносу разогретого теплоносителя в противоположную от него сторону – в пустоту резонатора, что является нежелательным явлением, ведь оно способствует росту тепловых потерь и снижению общей эффективности ТАА. Следует заметить, что в пустотах резонаторов могут возникать вторичные акустические течения, интенсивность которых превышает ожидаемый, по теории, уровень. Вполне вероятно, что именно с этими эффектами связаны процессы, которые приведены на рис 2. Понятно, что реальные процессы в термоакустических аппаратах, а именно: гидродинамические, акустические, теплообменные – есть взаимно зависимыми, и очень сложными.

Для их детального изучения авторами спроектированы и изготовлены исследовательские образцы термоакустических аппаратов – двигателей и рефрижераторов, а также построен исследовательский стенд (рис.5) оснащенный соответствующим измерительным оборудованием и специализированной быстродействующей компьютерной системой [19].

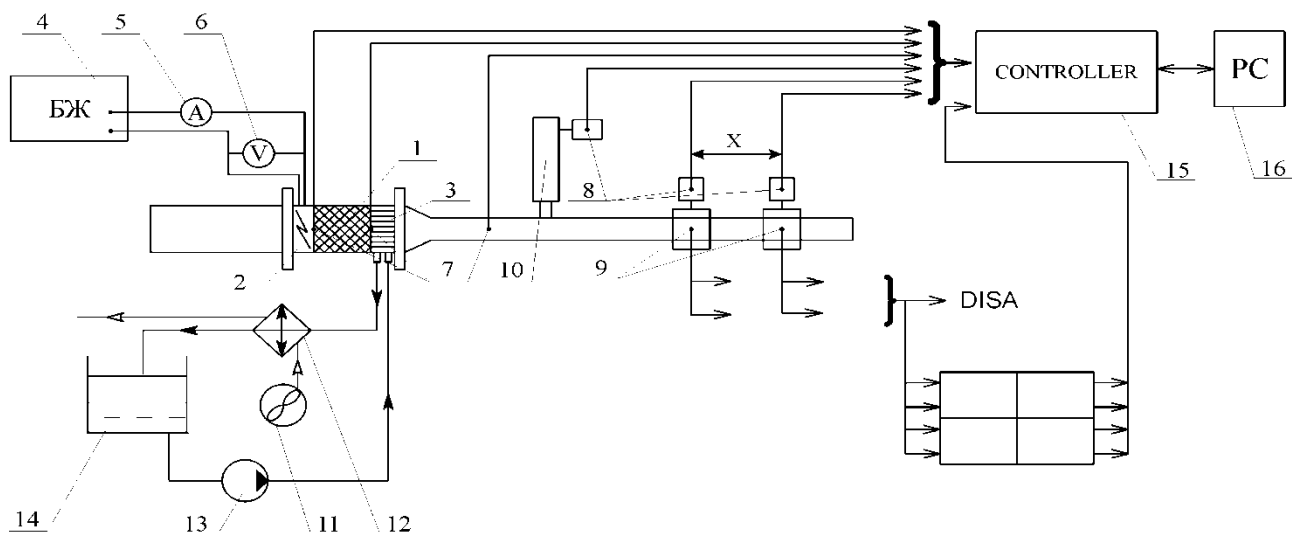


Рис. 5. Схема экспериментальной установки. 1 – стек, 2 – нагреватель, 3 – охладитель, 4 – блок питания, 5,6 – амперметр и вольтметр, 7 – термопары ХК, 8 – датчики давления, 9 – зонды термоанемометра, 10 – акустическая нагрузка, 11 – вентилятор, 12 – вспомогательный охладитель, 13 – насос, 14 – бак, 15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

Fig. 5. The schematic of the experimental setup. 1 – stack, 2 – heater, 3 – cooler, 4 – power supply, 5, 6 – ammeter and voltmeter, 7 – thermocouples, 8 – pressure sensors, 9 – hot-wire anemometer probes, 10 – acoustic load, 11 – fan, 12 – auxiliary cooler, 13 – pump, 14 – tank, 15 – controllers, 16 – PC

На рис. 6 приведены результаты предыдущих испытаний исследовательского стенда и контрольно-измерительной системы.

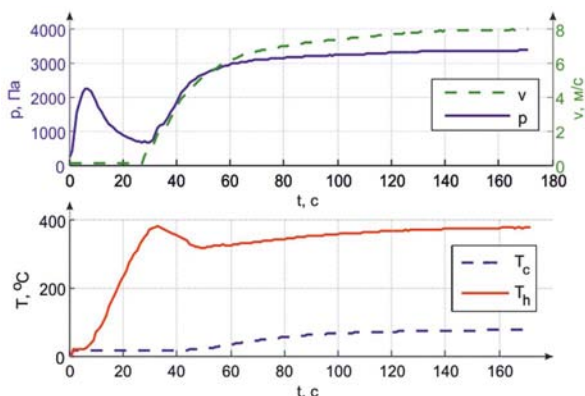


Рис. 6. Изменение температур стека, акустической давления и колебательной скорости в процессе набора мощности ТАД

Fig. 6. Change stack temperature, acoustic pressure, and oscillation speed during the TAD starting process

Из приведенных графиков можно сделать вывод о том, что имеющееся оборудование дает возможность получать информацию относительно акустических, теплофизических процессов и гидродинамических параметров среды в пустоте резонатора ТАД.

## ВЫВОДЫ

Интенсивность теплообмена между стекком (регенератором) и теплообменниками, количественно, определяет потенциальный уровень производительности термоакустических превращений в элементах ТАТМ.

В резонаторах ТАА существуют условия для возникновения мощных вторичных термоконвективных течений, которые содействуют росту нежелательных потерь тепловой энергии.

Результаты CFD моделирования теплообмена в гармонично пульсирующей среде свидетельствуют, что колебательное движение, обусловленное мощной акустической волной, может создавать застойные зоны в каналах теплообменников ТАА, что может обусловить нежелательные последствия.

Следовательно, целесообразным можно считать проведение углубленных экспериментальных исследований особенностей гидродинамики и теплообмена в условиях, присущих ТАА.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rott N. 1980. Thermoacoustics / N. Rott // Adv. Appl. Mech. - №20 (135).

2. Wheatley J. 1986. The natural heat engines / J.C. Wheatley, G.W. Swift, A. Migliori // *Los Alamos Science*. - №2 (14).
3. Swift G. 2002. Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators / G.W. Swift // *American Institute of Physics*. - - 300.
4. Swift G. 1988. Thermoacoustic Engines / G.W. Swift // *Journal of the Acoustical Society of America*. - Vol. 84, No. 4,- 1145–1180.
5. Wheatley J. 1983. An Intrinsically Irreversible Thermoacoustic Heat Engine / J. Wheatley, T. Hofler., G.W. Swift., A. Migliori // *J. Acoust. Soc. Am.* - Vol. 74 (1), - 153-170.
6. Tomonaga T. 1998. *Fundamental Thermoacoustics* / T. Tomonaga // Tokyo, Uchida Rokakuno Publishing.
7. Buznik V. 2001. Teploperedacha v sudovyh jenergeticheskikh ustanovkakh / V. Buznik. - L.: «Sudostroenie». - 376.
8. Cherednichenko A. 2011. Mobil'nye gazoturbinnye ustanovki s promezhutochnym teplonositelem / A. Cherednichenko, M. Tkach // *Motrol motoryzacija i energetyka rolnictwa*. - Tom 13A, № 2,- 25- 30.
9. Cherednichenko A. Tkach M. 2012. Jeksperimental'naja baza dlja issledovanija konversii biojetanola regeneraciej sbrosnogo tepla gazoturbinnogo dvigatelja / A. Cherednichenko, M. Tkach // *Motrol motoryzacija i energetyka rolnictwa*. - Tom 14, № 2,- 21-25.
10. De Blok K. 2008. Low operating temperature integral thermo acoustic devices for solar cooling and waste heat recovery / K. De Blok // *Acoustic-2008, International conference, Paris*.
11. Bassem M. 2011. Thermoacoustic Stirling Heat Pump Working as a Heater/ M. M. Bassem, Y. Ueda, A. Akisawa // *Applied Physics Express*. - Vol. 4, - 107301 / DOI: 10.1143/APEX.4.107301.
12. Gusev V. 2000. Bruneau Asymptotic theory of nonlinear acoustic waves in a thermoacoustic prime-mover / V. Gusev, H. Baillet, P. Lotton, M. Bruneau // *Acustica*. - Vol. 86, - 25-38.
13. Galiullin R. 1978. Techenie vjazkoj zhidkosti i teploobmen tel v zvukovom pole / R. Galiullin, V. Repin, N. Halitov // *Kazan': Izdvo Kazan. univ.*- 128.
14. Abduljalil Abdulrahman S. 2011. Experimental testing of the flow resistance and thermal conductivity of porous materials for regenerators / Abdulrahman S. Abduljalil, Zhibin Yu, Artur J. Jaworski // *Proceedings of 23rd IIR International Congress of Refrigeration*, vol. 32, - 217-228.
15. Korobko V. 2011. Osobennosti teplofizicheskikh processov v termoakusticheskikh teplovyh mashinah [Elektronnij resurs] / V. Korobko // *Vestnik NUK*. - № 1,- Rezhim dostupu: <http://goo.gl/WxFjc>.
16. Korobko V. Analiz mehanizmv perenosu teploty v elementah termoakustychnyh aparativ [Elektronnyj resurs] / V.V. Korobko, Je.I. Trushljakov // *Materialy III mizhnarodnoi' konferencii' Innovacii' v sudno-buduvanni ta okeanotehnici*. - NUK, Ukrai'na. - Rezhym dostupu: <http://goo.gl/R9rIV>.
17. Korobko V. 2010. Osobennosti chislennogo modelirovanija termoakusticheskikh processov / V.V. Korobko // *Mater. III-i' mizhnar. Nauk. Konf. «Prykladni problemy aerogidromehaniky ta teplomasoperenosu»*. - DNU. Dnipropetrovs'k,- 59-61.
18. Strett D. 1958. *Teorija zvuka*. Tom. 2 / D. Strett // Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehniko-teoreticheskoy literatury. - M.,- 475.
19. Kondratenko Y. 2011. Multisensor data acquisition system for thermoacoustic processes analysis / Y. Kondratenko, V. Korobko, O. Korobko // *Proceedings of the 6th IEEE international conference Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS'2011*. - Vol. 1. - Prague, - 54-58.

#### **EXPERIMENTAL STUDIES OF HEAT EXCHANGES IN THE ELEMENTS OF THERMOACOUSTIC DEVICES**

**Summary.** This paper presents an analysis of the heat transfer processes characteristics between the elements of thermoacoustic heat machines (TAHM). The possible mechanisms these factors influence on the performance of TAHM is shown. The results of CFD simulation, physical experiments, and experimental plant schematic are shown.

**Key words:** thermoacoustic, heat engine, energy, heat pump, heat transfer, acoustic wave, CFD modeling.