

18. *Sharangovich S.N.* Osobennosti anomal'noy shirokopolosnoy difraktsii sveta na fokusirovannom akusticheskom luche [Features of anomalous broadband light diffraction on a focused acoustic beam], *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy], 1985, Vol. 59, No. 4, pp. 835-840.
19. *Vakhtin Yu.V., Volik D.P., Malyshev V.A.* Shirokopolosnye soglasovateli bol'shikh chastotnozavisimyykh perepadov aktivnykh soprotivleniy v mikrovolnovykh traktakh na sosredotochennykh parametrakh [Broadband coordinators of large frequency-dependent active resistance drops in microwave paths on concentrated parameters], *Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln – 2009», Taganrog-Divnomorskoye, 2009 g.* [Proceedings of the International scientific conference "radiation and scattering of electromagnetic waves – 2009", Taganrog-Divnomorskoye, 2009], p. 296-299.
20. *Erokhin G.A., Chernyshev O.V., Kozyrev N.D., Kocherzhevskiy V.G.* Antenno-fidernyye ustroystva i rasprostraneniye radiovoln: uchebnik dlya VUZov [Antenna-feeder devices and distribution of radio waves: textbook for Universities]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004, 491 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Е. Лысенко.

Волик Денис Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: DVolik@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.:+78634361573; кафедра радиотехнической электроники; ассистент.

Volik Denis Petrovich – Southern Federal University; e-mail: DVolik@sfedu.ru; 2, Shevchenko, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634361573; the department of radioengineering electronics; assistant.

УДК 658.51.011

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-184-193

А.В. Палий, Н.Н. Чернов

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОТВОДА С ТЕПЛОАГРУЖЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ВОЗДУХА

Приведено численное исследование эффективности поверхности тепловода, в основу которого заложены уравнения Навье-Стокса и переноса энергии, включенные в математический аппарат решателя системы автоматического проектирования Ansys Fluent. Проведено исследование неэффективности неравномерной прогрева площади поверхности штыревого тепловода, взятого в качестве примера типичной классической конструкции радиатора. Необходимость оптимизации теплоотводящей поверхности радиатора обоснована: во-первых, отсутствием общего подхода к проблеме неэффективности использования материалов; а во-вторых, повышенная температура эксплуатации изделий электронной техники является не только причиной отказов, но и значительно ухудшает их основные параметры, что приводит к необходимости поиска и применения различных способов и методов охлаждения, обеспечивающих сохранение параметров в заданных нормах. По мере усложнения аппаратуры, увеличения количества применяемых элементов и степени их интеграции, вопросы отвода тепла, а также методы расчетов тепловых режимов приобретают особое значение. Исходными данными проведенного вычислительного эксперимента являются следующие. На вход канала с заданной скоростью и температурой подается воздушный поток, обтекающий штыревой тепловод с внутренним точечным источником тепла. Скорость потока соответствует числу Маха $M \ll 1$. Внешняя температура (в том числе начальная температура радиатора) 22°C . Коэффициент теплопередачи медь/воздух $11,3 \text{ W/m}^2\text{C}$. Мощность источника 5 W . Требуется определить распределение температурного поля на поверхности радиатора с целью выявления неэффективных участков площади тепловода. Внешняя среда в рабочем пространстве – воздух, считается несжимаемой невесомой вязкой теплопроводной жидкостью. Обтекание сим-

метричное (Ox – ось симметрии), режим течения – ламинарный. В работе содержится введение в проблему нормализации теплового режима аппаратуры, приводится актуальность применения современных методов теплоотвода и оптимизации существующих конструкций радиаторов, производится численный эксперимент исследования эффективности штыревого теплоотвода с целью дальнейшей его оптимизации. Делается вывод о нецелесообразности использования штырей на поверхности радиатора. В данном случае большую часть тепла отводит малая часть поверхности радиатора. Дополнительным отрицательным эффектом присутствия штырей является возникновение местных дипольных и квадрупольных составляющих поля, которые вызывают лишь циркуляцию тепла.

Тепловой режим аппаратуры; численное решение дифференциальных уравнений; теплоотвод; эффективная площадь поверхности радиатора; теплонагруженный источник; теплоперенос.

A.V. Paliy, N.N. Chernov

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF HEATING ELEMENT SURFACE WITH THERMAL SOURCE IN THE CONDITIONS OF HEAT AND MASS TRANSFER

Given is the numerical study of the efficiency of heating element surface which is based on the Navier-Stokes and energy transfer equations included in the mathematical part of the automated design system Ansys Fluent solver. The inefficiency of the irregular heating of the pin heating element surface area is investigated. This pin heating element is taken as an example of a typical classical radiator design. The requirement to optimize the radiator heat sink surface is explained. First of all it can be justified by absence of common approach to the problem of materials use inefficiency. Secondly, the increased temperature of electronic products operation is not only the cause of failures, but also significantly worsens their basic parameters. So it is necessary to search and apply various cooling methods and methods that ensure the preservation of parameters in specified norms. As the equipment becomes more complicated, the quantity of used elements and the degree of their integration increase, the heat removal, as well as methods for calculating thermal regimes acquire special significance. The initial data of the computational experiment is presented. At the channel input with a given speed and temperature, an air flow is flowing around the whip heat sink with an internal point source of heat. The velocity of the stream corresponds to the Mach number $M \ll 1$. External temperature (including the initial temperature of the radiator) is 22°C . The heat transfer coefficient is copper / air $11.3\text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$. The power of the source is 5 W. It is required to determine the distribution of the temperature field on the radiator surface in order to identify inefficient areas of the heat sink area. The external environment in the working space is air, considered to be an incompressible weightless viscous heat-conducting fluid. The flow around is symmetric (Ox is the axis of symmetry), the flow regime is laminar. The article contains an introduction to the problem of the equipment thermal regime normalizing, the relevance of the use of modern methods of heat sink and existing radiator designs optimization. The numerical experiment of the pin heating element efficiency is conducted for its further optimization. We can conclude that it is not advisable to use pins on the radiator surface. In this case, most of the heat is taken away by a small part of the radiator surface. An additional negative effect of the pins presence is the occurrence of local dipole and quadrupole components of the field, which cause only the plasma circulation.

Thermal mode of equipment; numerical solution of differential equations; heat sink; effective surface area of the radiator; heat-loaded source; heat and mass transfer.

Введение. Необходимость обеспечения оптимального теплового режима изделий электронной техники является одной из важнейших проблем конструирования электронной аппаратуры. Повышение температуры теплонагруженного источника электронной техники значительно снижает надежность его работы и аппаратуры в целом. Так, например, если уменьшить рабочую температуру полупроводникового прибора всего на 20 %, то интенсивность отказов снизится в 3 раза [1–4].

Повышенная температура эксплуатации изделий электронной техники является не только причиной отказов, но и значительно ухудшает их основные параметры, что приводит к необходимости поиска и применения различных способов и методов охлаждения, обеспечивающих сохранение параметров в заданных нормах [5].

Основные исследования закономерностей теплообмена и разработка методов теплового расчета аппаратуры изложены в немногочисленных книгах и монографиях [6–11]. К тому же обобщенные материалы по способам и системам охлаждения электронных устройств в литературе практически отсутствуют.

Применение теплоотводов (радиаторов) для нормализации теплового режима объясняется высокой скоростью отвода тепла за счет большого коэффициента теплопроводности материала (металла).

В литературных источниках [12–14] описание и расчеты всех известных конструкций радиаторов сводятся к повышению эффективности теплоотвода за счет увеличения площади их поверхности. Так известны игольчатые, штыревые, петлевые, пластинчатые, ребристые и др. виды радиаторов. Однако отсутствует общий подход к описанию оптимальной формы выступов.

В данной работе приводится описание численного эксперимента проводимого в среде Ansys Fluent подтверждающего теоретические исследования по оптимизации поверхности радиатора с целью минимизации температуры теплонагруженного источника, проводимые авторами ранее [15–17].

Постановка задачи. Необходимость оптимизации теплоотводящей поверхности радиатора обоснована: во-первых, отсутствием общего подхода к проблеме неэффективности использования материалов; а во-вторых, повышенная температура эксплуатации изделий электронной техники является не только причиной отказов, но и значительно ухудшает их основные параметры, что приводит к необходимости поиска и применения различных способов и методов охлаждения, обеспечивающих сохранение параметров в заданных нормах. По мере усложнения аппаратуры, увеличения количества применяемых элементов и степени их интеграции, вопросы отвода тепла, а также методы расчетов тепловых режимов приобретают особенное значение.

Целью проведенного вычислительного эксперимента является подтверждение теоретических выводов об неэффективности реализации теплоотводящей поверхности радиатора в виде штырьковой структуры. В эксперименте показано, что температура штырей стремится к температуре потока у своих окончаний, а зоны между штырями неэффективно отводят тепло из-за малости температурного градиента. В подобных структурах теплоотвода пренебрегают понятием эффективности теплоотводящей поверхности и стремятся увеличить ее за счет увеличения и теплового сопротивления, что приводит к повышению температуры источника, что в свою очередь может означать ухудшение теплового режима электронной аппаратуры в целом. Опишем исходные данные проведенного эксперимента. На вход канала с заданной скоростью и температурой подается воздушный поток, обтекающий штыревой теплоотвод с внутренним точечным источником тепла. Скорость потока соответствует числу Маха $M \ll 1$. Внешняя температура (в том числе начальная температура радиатора) $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплопередачи медь/воздух $11,3\text{ W/m}^2\cdot\text{C}$. Мощность источника 5 W . Требуется определить распределение температурного поля на поверхности радиатора с целью выявления неэффективных участков площади теплоотвода. Внешняя среда в рабочем пространстве – воздух, считается несжимаемой невесомой вязкой теплопроводной жидкостью. Обтекание симметричное (Ox – ось симметрии), режим течения – ламинарный.

При сделанных допущениях движение жидкости описывается следующей системой уравнений в частных производных [18]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} &= 0, \\
 \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_x V_y) &= -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y}\right), \\
 \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x V_y) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y V_y) &= -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y}\right), \\
 \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x c_p T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y c_p T) &= \frac{\partial}{\partial x}\left(k_e \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_e \frac{\partial T}{\partial y}\right), \\
 \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y k) &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_1 \frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_1 \frac{\partial k}{\partial y}\right) + \mu_1 \Phi - \rho \varepsilon, \\
 \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_1}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_1}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right) + C_{1\varepsilon} \mu_1 \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \\
 \frac{P_{abc}}{\rho} &= (c_p - c_v) T, \\
 \mu_e &= \mu + \mu_t, \quad \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \\
 k_e &= k + \mu k_t, \quad k_t = \frac{\mu_t c_p}{Pr_t}, \\
 C_\mu &= \frac{A_{s1}}{A_{s2} + \eta + A_{s3} \zeta}, \\
 \eta &= \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2 \left(\frac{\partial V_x}{\partial x}\right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_y}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x}\right)^2}, \quad \zeta = \frac{k}{\varepsilon} \left| \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial x} \right|, \\
 \Phi &= 2 \left(\left(\frac{\partial V_x}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y}\right)^2 \right).
 \end{aligned}$$

где ρ – плотность жидкости; V_x, V_y – проекции вектора скорости жидкости; P_{abc} – абсолютное давление в жидкости; P – избыточное давление, T – температура, c_p, c_v – удельные теплоемкости жидкости соответственно при постоянном давлении и объеме; μ – заданная физическая (ламинарная) вязкость, μ_t – турбулентная (вихревая) вязкость; μ_e – эффективная вязкость; k – коэффициент теплопроводности; k_t – турбулентная теплопроводность; k_e – эффективная теплопроводность; κ – кинетическая энергия турбулентности; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; $A_{s1}, A_{s2}, A_{s3}, C_{1\varepsilon}, C_2, \sigma_\varepsilon$ – эмпирические коэффициенты модели ламинарности потока.

Тепловые граничные условия формируются следующим образом – на входе задается температура воздушного потока $T = 295$ К, боковые границы рабочей области считаются адиабатическими стенками и на них должно выполняться естественное условие Неймана $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$, где n – нормаль к соответствующей границе.

На границе обтекаемого тела выставляется граничное условие, выражающее закон теплообмена между телом и обтекающим его потоком.

Теория. В основе работы любого радиатора лежит то, что у металла, например, относительно воздуха, коэффициент теплопроводности в тысячи раз выше. Теплонагруженный элемент отводит тепло в материал радиатора, который, в свою очередь, отводит тепло существенно лучше воздуха и одновременно увеличивает площадь контакта с окружающим воздухом. В случае, если процесс проходит без конвекции, то

общепринято, что большая площадь отдаст больше тепла, и естественно лучше охладит источник. В случае с конвекцией с большей площади «сдуется» и больше тепла, естественно температура источника дополнительно снизится.

Однако, выяснилось [15], что не вся поверхность радиатора в данном случае в равной степени эффективна. При равном объеме или равной массе двух радиаторов, форма радиатора должна повторять эквitemпературные (изотермические) поверхности.

Рассмотрим более детально влияние взаиморасположения «выступа» (тела) на поверхности радиатора на распределение температурного поля от источника.

Пусть имеется точечный источник. На некотором расстоянии от него тело высокой теплопроводности (металл). При этом картина распределения температурного поля под влиянием тела изменится. Изменение произойдет из-за неоднородности среды, т.к. коэффициенты теплопроводности различны, а распространение тепла происходит по градиенту температуры или, как и во всех случаях в соответствии с принципом наименьшего времени или самого короткого пути.

Если форма этого тела будет близка к форме эквitemпературных поверхностей, то распределение поля от источника изменится слабо (рис. 1).

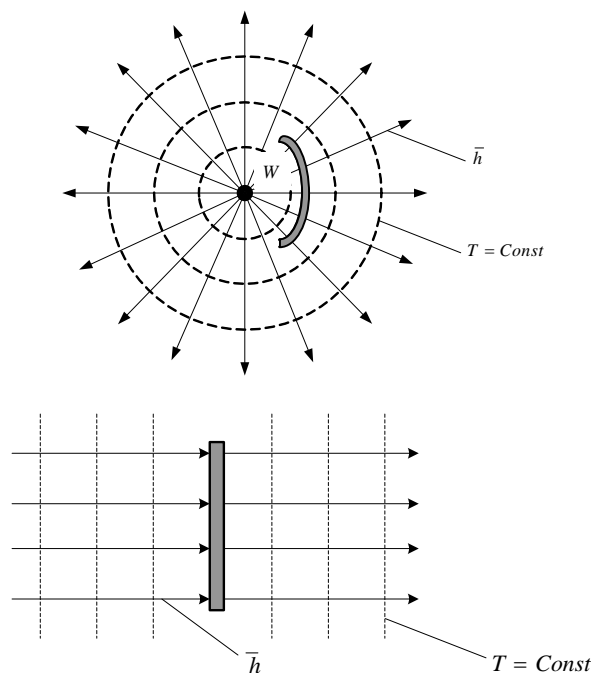


Рис. 1. Поле от источника с телом формой, совпадающим с эквипотенциальными поверхностями

Если же форма тела сильно не совпадает с эквипотенциальной поверхностью, то происходит значительное изменение распределения поля, за счет дипольных, квадрупольных и пр. составляющих поля (рис. 2).

Именно наличие дипольных и квадрупольных составляющих поля создают завихрения потоков, при этом тепло уже не отводится от источника, а циркулирует. Тепло по телу с большим коэффициентом теплопроводности пройдет быстрее, но в дальнейшем будет распространяться в произвольных направлениях (в том числе и обратно), создавая циркуляцию.

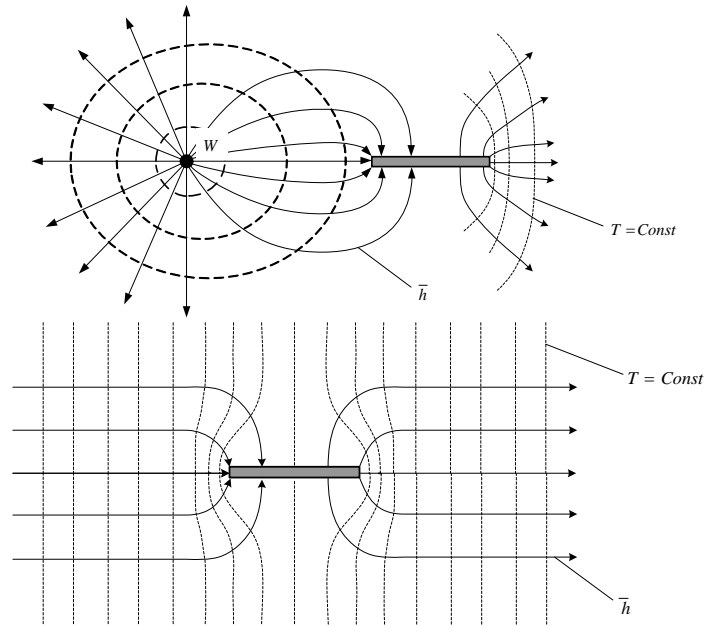


Рис. 2. Поле от источника с телом формой, сильно не совпадающим с эквипотенциальными поверхностями

Рассмотрим процесс распространения тепла на следующем примере. Нагретое тело в форме листа имеет однородный поток тепла h с поверхности исключая краевой эффект.

Если теперь этот лист изогнуть в форме уголка, то внутренняя поверхность уголка излучит тепла меньше, а внешняя больше.

Система эквипотенциальных поверхностей от данного листа изогнутого в уголок полностью аналогична, например, системе эквипотенциальных поверхностей внутри прямого угла, образованного двумя проводящими плоскостями (рис. 3) [15].

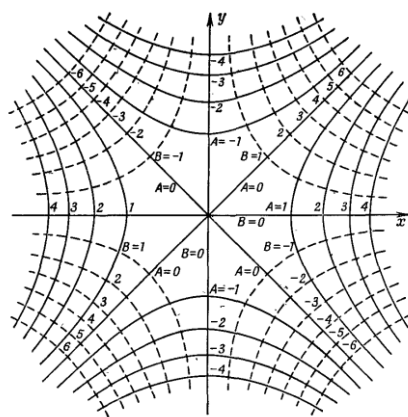


Рис. 3. Система эквипотенциальных поверхностей внутри прямого угла, образованного двумя проводящими плоскостями

Продолжив изменять форму излучающей поверхности (изогнув лист еще раз до формы «подковы»), то его внутренняя поверхность станет излучать тепла еще меньше, т.к. внутри полости не будет градиента температуры

Поэтому при выполнении на поверхности, штырей внутренние полости между ними не будут излучать тепло, а будут создавать вблизи боковых поверхностей лишь быстроубывающие дипольные, квадрупольные и пр. составляющие поля, которые не отводят тепло от источника, а лишь создают циркулирующие потоки.

Обращаясь к электростатике, как аналогу теплового поля [15] такое распространение температурного поля от штыря радиатора полностью аналогично, например, электрическому полю у острого края проводника в котором заряды стремятся как можно шире растечься по поверхности проводника, а кончик острия всегда отстоит дальше всего от остальной поверхности.

Моделирование. В программном комплексе SolidWorks была разработана трехмерная модель исследуемых источника тепла и штыревого теплоотвода.

В программном комплексе Ansys Workbench были созданы файлы проектов, объединяющие в себе все необходимые комплексы, для исследования распространения температурного поля на поверхности теплоотвода.

Посредством DesignModeller полученные геометрии были импортированы в Workbench, там же были разработаны рабочие области, на два порядка превышающие размер созданных объектов. Размер расчетной области 2000*2000*2000 мм. Такой объем рабочей области позволяет более наглядно оценить распределение тепловых потоков в окрестностях рассматриваемого объекта.

Полученная геометрия рабочей области в дальнейшем была преобразована в сеточную структуру, где при помощи программного компонента Ansys Meshing была создана расчетная сетка.

Созданная модель показана на рис. 4.

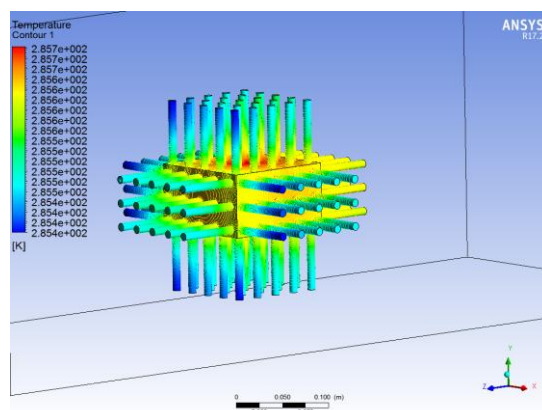


Рис. 4. Модель штыревого теплоотвода с внутренним источником тепла в воздушном потоке

Из рисунка видно, что температура поверхности радиатора не равномерна. На краях штырей она приближается к температуре окружающей среды, а тепло эффективно отводится лишь с малой части поверхности.

Основные выводы. В работе был произведен численный эксперимент по исследованию эффективности поверхности штыревого теплоотвода с внутренним источником тепла. Эксперимент подтвердил теоретические исследования, проведенные авторами ранее и показал неравномерность прогретости поверхности теплоотвода и неэффективность большей части поверхности. По результатам данного

вычислительного эксперимента и предложенной авторами методики оптимизации конструкции теплоотвода, лишенной описанных недостатков штыревого и подобных в литературе [16, 19, 20], специалисты в области обеспечения нормального теплового режима электронной аппаратуры смогут применить данные знания для снижения температуры теплонагруженных элементов и аппаратуры в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чернышев А.А., Иванов В.И.* Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники. – М.: Энергия, 1980. – 212 с.
2. *Лутченков Л.С., Лайне В.А.* Моделирование и анализ тепловых режимов аппаратуры. – СПб.: ГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. 1995. – 355 с.
3. *Шелест В.И., Кондрашев А.С.* Концептуальный алгоритм теплофизического проектирования радиоэлектронных средств // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* – 2003. – № 5. – С. 26-27.
4. *Охрем В.Г.* Некоторые модели стационарных термоэлектрических холодильников // *ИФЖ.* – 2001. – Т. 74, № 5. – С. 127-130.
5. *Леонтьев Л.П.* Введение в теорию надежности радиоэлектронной аппаратуры. – Рига: Изд-во. АН ЛССР, 1963. – 373 с.
6. *Чернышев А.А.* Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Радио и связь. 1988. – 560 с.
7. *Криогенные системы* / под ред. А.М. Архарова. Т. 1. – М.: Машиностроение, 1996. – 414 с.
8. *Бердичевский Б.Е.* Вопросы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры при разработке. – М.: Сов. радио. 1976. – 277 с.
9. *Моисеев В.Ф., Зайков В.П.* Влияние режима работы термоэлектрического устройства на его надежность // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* – 2001. – № 4-5. – С. 30-33.
10. *Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е.* Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио. 1976. – 230 с.
11. *Дульнев Г.Н., Семьякин Э.М.* Теплообмен в радиоэлектронной аппаратуре. Ленинградское отд., «Энергия» 1968. – 359 с.
12. *Письменный Е.Н., Бурлей В.Д.* Влияние разрезки, поворотов и отгибки ребер на теплоаэродинамические характеристики поверхностей теплообмена // *Промышленная теплотехника.* – 2003. – Т. 25, № 1. – С. 10-16.
13. *Письменный Е.Н., Баранюк А.В.* Теплоотводящая поверхность с пластинчато-просечным оребрением при низкоскоростном обдуве // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* – 2005. – № 4. – С. 43-45.
14. *Перепека В.И.* Некоторые вопросы контактного теплообмена элементов в РЭА // *Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО.* – 1968. – № 2. – С. 43-47.
15. *Палий А.В., Панатов Г.С.* Температура и теплоперенос. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 132 с.
16. *Палий А.В.* Оптимизация формы теплоотвода для теплонагруженного элемента в условиях тепломассопереноса воздуха // *Тепловые процессы в технике.* – 2015. – № 7. – С. 333-336.
17. *Палий А.В., Замков Е.Т., Серба П.В.* Определение толщины пограничного слоя при обтекании тела аэродинамическим потоком методом электростатической аналогии // *Известия ЮФУ. Технические науки* – 2012. – № 1 (126). – С. 192-197.
18. *Шабаров В.В.* Применение системы ANSYS к решению гидрогазодинамических задач. – Нижний Новгород, 2006. – 108 с.
19. *Палий А.В., Замков Е.Т.* Механизм возникновения трения и сопротивления тела в газовом потоке // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2012. – № 1 (126). – С. 186-191.
20. *Палий А.В., Замков Е.Т., Булейко В.Г.* Механизм создания сопротивления плоской поверхности в газовом потоке тангенциальной составляющей скорости молекулы газа // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2013. – № 1 (138). – С. 197-202.

REFERENCES

1. *Chernyshev A.A., Ivanov V.I.* Obespechenie teplovykh rezhimov izdeliy elektronnoy tekhniki [The provision of thermal modes of products of electronic engineering]. Moscow: Energiya, 1980, 212 p.
2. *Lutchenkov L.S., Layne V.A.* Modelirovanie i analiz teplovykh rezhimov apparatury [Modeling and analysis of thermal modes of equipment]. SPb.: GUT im. prof. M.A. Bonch-Bruevicha, 1995, 355 p.
3. *Shelest V.I., Kondrashev A.S.* Kontseptual'nyy algoritm teplofizicheskogo proektirovaniya radioelektronnykh sredstv [A conceptual algorithm for thermal design of electronic equipment], *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and designing in electronic equipment], 2003, No. 5, pp. 26-27.
4. *Okhrem V.G.* Nekotorye modeli statsionarnykh termoelektricheskikh kholodil'nikov [Some models of stationary thermoelectric refrigerators], *IFZh* [Journal of Engineering Physics], 2001, Vol. 74, No. 5, pp. 127-130.
5. *Leont'ev L.P.* Vvedenie v teoriyu nadezhnosti radioelektronnoy apparatury [Introduction to the theory of reliability of electronic equipment]. Riga: Izd-vo. AN LSSR, 1963, 373 p.
6. *Chernyshev A.A.* Osnovy nadezhnosti poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem [Fundamentals of reliability of semiconductor devices and integrated circuits]. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 560 p.
7. *Kriogennyye sistemy* [Cryogenic system], ed. by A.M. Arkharova. Vol. 1. Moscow: Mashinostroeniye, 1996, 414 p.
8. *Berdichevskiy B.E.* Voprosy obespecheniya nadezhnosti radioelektronnoy apparatury pri razrabotke [Issues of ensuring the reliability of electronic equipment in the development of]. Moscow: Sov. Radio, 1976, 277 p.
9. *Moiseev V.F., Zaykov V.P.* Vliyaniye rezhima raboty termoelektricheskogo ustroystva na ego nadezhnost' [Effect of the operation mode of a thermoelectric device on its reliability], *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and design in electronic equipment], 2001, No. 4-5, pp. 30-33.
10. *Rotkop L.L., Spokoyyny Yu.E.* Obespechenie teplovykh rezhimov pri konstruirovanii radioelektronnoy apparatury [Provision of thermal conditions in the design of electronic equipment]. Moscow: Sov. radio, 1976, 230 p.
11. *Dul'nev G.N., Semyashkin E.M.* Teploobmen v radioelektronnoy apparature [Heat transfer in electronic equipment]. Leningradskoe otd., «Energiya» 1968, 359 p.
12. *Pis'mennyy E.N., Burley V.D.* Vliyaniye razrezki, povorotov i otgibki reber na teploaerodinamicheskie kharakteristiki poverkhnostey teploobmena [Influence of cutting, turns and edge bending on heat-and-hydrodynamic characteristics of heat exchange surfaces], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2003, Vol. 25, No. 1, pp. 10-16.
13. *Pis'mennyy E.N., Baranyuk A.V.* Teplootvodyashchaya poverkhnost' s plastinchato-prosechnym orebreniem pri nizkoskorostnom obduve [Heat-removing surface with plate-cutting fins at low-speed blowing], *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and design in electronic equipment], 2005, No. 4, pp. 43-45.
14. *Perepeka V.I.* Nekotorye voprosy kontaktnogo teploobmena elementov v REA [Some issues of contact heat exchange elements in the REA], *Voprosy radioelektroniki. Seriya TRTO* [Problems of electronics. Series TRTO], 1968, No. 2, pp. 43-47.
15. *Paliy A.V., Panatov G.S.* Temperatura i teploperenos [Temperature and heat transfer]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, 132 p.
16. *Paliy A.V.* Optimizatsiya formy teplootvoda dlya teplonagruzhennogo elementa v usloviyakh teplomassoperenosa vozdukha [Optimization of the shape of the heat sink for the heat-loaded element in the conditions of heat and mass transfer of air], *Teplovyye protsessy v tekhnike* [Thermal processes in engineering], 2015, No. 7, pp. 333-336.
17. *Paliy A.V., Zamkov E.T., Serba P.V.* Opredeleniye tolschiny pogranichnogo sloya pri obtekanii tela aerodinamicheskim potokom metodom elektrostatischey analogii [Determination of the thickness of the boundary layer in the flow of the body aerodynamic flow by electrostatic analogy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 1 (126), pp. 192-197.
18. *Shabarov V.V.* Primeneniye sistemy ANSYS k resheniyu gidrogazodinamicheskikh zadach [System application ANSYS to solving water and gas flows task]. Nizhnyy Novgorod, 2006, 108 p.

19. Paliy A.V., Zamkov E.T. Mekhanizm vzniknoveniya treniya i soprotivleniya tela v gazovom potoke [Mechanism of friction and resistance of the body in the gas flow], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 1 (126), pp. 186-191.
20. Paliy A.V., Zamkov E.T., Buleyko V.G. Mekhanizm sozdaniya soprotivleniya ploskoy poverkhnosti v gazovom potoke tangentsial'noy sostavlyayushchey skorosti molekuly gaza. [The mechanism of creating the resistance of a flat surface in the gas flow tangential component of the velocity of the gas molecule], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, № 1 (138), pp. 197-202.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Е. Лысенко.

Палий Александр Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: a.v._paliy@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

Чернов Николай Николаевич – e-mail: nik-chernov@yandex.ru; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Paliy Alexander Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: a.v._paliy@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; associate professor.

Chernov Nikolay Nikolaevich– e-mail: nik-chernov@yandex.ru; phone: +78634371795; the department of acoustics and medical technology; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 534.1

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-193-206

А.М. Гаврилов, Н.Д. Севастьянов

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОЙ АВТОГЕНЕРАЦИИ ЗВУКА НА ОСНОВЕ ТРУБЫ РИЙКЕ

Целью работы является создание действующего образца трубы Рийке и исследование на его основе тепловой автогенерации звуковых волн. Рассмотрены исторические аспекты, основные этапы открытия и изучения разных проявлений необычного физического явления, находящегося на стыке термодинамики и акустики, отмечена актуальность дальнейших исследований, обсуждаются особенности проявления и возможного практического использования термоакустической генерации. Рассмотрены теоретические аспекты возникновения и существования акустических колебаний в открытой вертикально расположенной трубе. Показано, что столб воздуха в трубе может совершать одно или несколько собственных колебаний, представляющих собой стоячие волны, ограниченные концами трубы, на длине которой укладывается целое число полуволн. Причиной возбуждения колебаний может послужить любой внешний звук или движение воздуха в трубе, наибольшей амплитудой обладает основное собственное колебание. На концах трубы расположены узлы приращений давления стоячей звуковой волны, пучности колебательного смещения и скорости частиц воздуха. Незатухающие колебания обусловлены непрерывным притоком энергии от нагревателя, расположенного внутри нижней части трубы. Роль нагревателя не сводится лишь к созданию тяги, – поступательного движения воздуха вверх по трубе. Благодаря нагревателю внутри трубы Рийке возникает положительная акустическая обратная связь. В состав автоколебательной системы входят источник энергии (нагреватель), колебательная система (столб воздуха в трубе), задающая частоту колебаний и звено положительной обратной связи, обеспечивающее периодическое в нужные моменты времени поступление энергии от нагревателя в колебательную систему для компенсации потерь энергии колебаний из-за трения, излучения и др. Экспериментально проверены известные теоретические модели. Исследованы зависимости тепловой мощности, приводящей к генерации звука, от расположения нагревателя и частоты звука от длины трубы.