

УДК 697.35

DOI: 10.15372/PMTF202315282

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПЛАСТИНЧАТО-РЕБРИСТЫХ РАДИАТОРОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Х.-П. Сюй, П.-Т. У*, Х. Ай*

Технологический институт Военно-воздушных сил, Гаосюн, Тайвань

* Национальный Гаосюнский университет науки и технологий, Гаосюн, Тайвань

E-mails: iamnumberten@yahoo.com.tw, dg9592@gmail.com, herchang@gm.kuas.edu.tw

Экспериментально исследуются тепловые характеристики пьезоэлектрического вентилятора, расположенного на некотором расстоянии от однореберного и пластинчато-ребристого радиаторов. По термическому сопротивлению радиаторов оценивается эффективность работы пьезоэлектрического вентилятора. При исследовании поля скоростей потока, создаваемого пьезоэлектрическим вентилятором, используется PIV-метод.

Ключевые слова: инфракрасная термография, пьезоэлектрический вентилятор, пластинчато-ребристые радиаторы, термостойкость

Введение. В настоящее время существенно уменьшились размеры элементов таких электронных устройств, как устройства GPS, компьютеры и мобильные телефоны. Несмотря на малые размеры, электронные элементы потребляют достаточно большое количество энергии. В результате при работе устройства выделяется большое количество тепла. Для охлаждения электронных устройств используются пьезоэлектрические вентиляторы, потребляющие незначительное количество энергии.

По сравнению с обычными вентиляторами пьезоэлектрические вентиляторы имеют преимущества в весе, объеме, энергопотреблении, уровне шума и сроке службы. Размеры пьезоэлектрических вентиляторов позволяют использовать их для охлаждения деталей микроэлектроники.

В работе [1] с использованием методов инфракрасной термографии исследована возможность использования пьезоэлектрического вентилятора для охлаждения элементов электроники. В [2] установлена эффективность применения пьезоэлектрических вентиляторов при охлаждении электронного оборудования вследствие их небольшого размера, практически бесшумной работы и низкого энергопотребления.

Поля скоростей в потоке, создаваемом пьезоэлектрическим вентилятором, исследуются с помощью метода визуализации потока. В работе [3] изучено влияние резонансных частот пьезоэлектрических вентиляторов с тремя лопастями различной длины на поле скоростей потока и на энергию, потребляемую вентилятором. В результате проведенных исследований установлено, что при высокой резонансной частоте увеличивается интенсивность теплообмена, при этом создается сложное поле скоростей потока и увеличивается количество потребляемой энергии. Следовательно, пьезоэлектрические вентиляторы, используемые в электронике, должны иметь подходящую резонансную частоту. В работе [4]

с использованием численных и экспериментальных методов исследовано влияние расстояния между радиатором и пьезоэлектрическим вентилятором на эффективность теплообмена при охлаждении элементов электроники. Установлено, что, в случае если источник тепла имеет температуру 68,9 °С, пьезоэлектрический вентилятор, расположенный на большем расстоянии от источника тепла, обеспечивает лучший теплоперенос. В работе [5] с использованием метода инфракрасной термографии изучалось влияние амплитуды колебаний лопасти вентилятора и расстояния от него до радиатора на эффективность охлаждения. Установлено, что оптимальная амплитуда колебаний зависит от расстояния между пьезоэлектрическим вентилятором и радиатором. По мере увеличения амплитуды колебаний и уменьшения расстояния между вентилятором и радиатором количество передаваемого тепла увеличивается. Оптимальное расстояние увеличивается при уменьшении амплитуды колебаний пьезоэлектрического вентилятора.

В большинстве работ, посвященных анализу эффективности охлаждения элементов электроники пьезоэлектрическими вентиляторами, большое внимание уделялось исследованию процесса теплопереноса от радиатора при наличии вентилятора [1–5].

Для устранения недостатков традиционных методов измерения характеристик поля скоростей потока, таких как трубки Пито и анемометрия с горячей проволокой, при измерении полей скоростей потока вблизи пьезоэлектрических вентиляторов используются лазерная доплеровская велосиметрия (LDV-метод) и метод измерения скорости по изображениям частиц (PIV-метод). Для предотвращения искажения поля скоростей потока приборы, используемые при измерении значений параметров методами LDV и PIV, можно разместить вне поля потока [6]. В работе [7] при исследовании характеристик течения применялись LDV- и PIV-методы. Разработана методика наблюдения за твердыми частицами, взвешенными в потоке воздуха в вертикальной трубе. Для измерения поля скоростей потока с помощью PIV-метода использовались высокоскоростные камеры. В [8, 9] изучена возможность использования изображений с многократной экспозицией для уменьшения погрешности смещения и повышения точности определения векторов скорости. Данные о смещении частиц можно получить, используя синтетические изображения [8–10]. Для предотвращения захвата неплоских частиц на фотографиях анализируются полосы Юнга с использованием двумерного преобразования Фурье. Для повышения эффективности и точности определения тепловых полей может быть использована цифровая видеозапись. Цифровой видеорегистратор применялся для определения пространственных полей [2]. В работе [2] установлено, что при использовании пьезоэлектрических вентиляторов локальное охлаждение значительно эффективнее, чем при естественной конвекции, их использование приводит к увеличению коэффициента конвективной теплопередачи более чем на 100 %. В работе [11] экспериментально и с использованием численного моделирования изучено двумерное поле скоростей потока, создаваемого пьезоэлектрическим вентилятором, и определено оптимальное расположение различных устройств в системах охлаждения. В [12] исследовались режимы естественной конвекции и конвекции, создаваемой пьезоэлектрическими вентиляторами. Эффективность конвективной теплопередачи с использованием предлагаемого вентилятора более чем на 375 % превышает эффективность естественной конвекции. В работе [13] с помощью трехмерной вычислительной модели, используемой в программном обеспечении CFD-ACE, исследовано влияние амплитуды колебаний лопасти пьезоэлектрического вентилятора на тепловое сопротивление радиатора.

В работе [14] изучены характеристики теплопередачи пластинчато-ребристых радиаторов, охлаждаемых пьезоэлектрическими вентиляторами. Определено оптимальное расположение вентилятора и источника тепла. В экспериментах [14] колебания лопасти вентилятора происходили в горизонтальных или вертикальных плоскостях относительно источника тепла. В работе [15] проведено сравнение полей давления и скорости в потоках,

создаваемых пьезоэлектрическими и традиционными роторными вентиляторами. При сопоставимых давлениях и скоростях потока эффективность преобразования энергии пьезоэлектрического вентилятора была приблизительно в 10 раз больше, чем у ротационного вентилятора.

В работе [16] определялись оптимальные значения длины, ширины, толщины пьезоэлектрических вентиляторов, а также выбирались подходящий материал и форма таких вентиляторов. В [17] приведен обзор работ, в которых исследовалась эффективность работы пьезоэлектрических вентиляторов.

На эффективность работы пьезоэлектрического вентилятора оказывают влияние различные факторы. В данной работе для оценки тепловых характеристик пластинчато-ребристых радиаторов, охлаждаемых пьезоэлектрическими вентиляторами, используется метод инфракрасной термографии. С помощью PIV-метода в работе [18] исследованы поля скоростей потока, создаваемые пьезоэлектрическим вентилятором. Изучалось влияние размеров радиатора и положения пьезоэлектрического вентилятора на тепловое сопротивление радиатора.

1. Экспериментальная установка и методика эксперимента. В экспериментах использовалось следующее оборудование: термографическая система, пьезоэлектрический вентилятор, система нагрева, устройство измерения температуры, радиаторы. Для регистрации полей скоростей потока, создаваемых пьезоэлектрическим вентилятором, применялся PIV-метод. Вентилятор приводился в движение электрическим током с напряжением 110 В и частотой 60 Гц. Амплитуда колебаний лопасти пьезоэлектрического вентилятора позволяла проводить эксперименты на различном расстоянии от пластинчато-ребристого радиатора. В эксперименте менялось расстояние между вентилятором и радиатором. Теплоотвод оказывает влияние на эффективность работы охлаждаемого электронного элемента: при увеличении интенсивности охлаждения она увеличивается. Для описания процесса теплопередачи используется закон Фурье

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x},$$

где q — конвективный поток тепла, Вт/м²; k — теплопроводность, Вт/(м·°С).

В предположении установившегося процесса теплопередачи уравнение теплопроводности можно проинтегрировать по координате x :

$$q = k \frac{T_1 - T_2}{L}, \quad R = \frac{L}{k}.$$

Тепловое сопротивление определяется следующим образом:

$$R = \frac{T_w - T_\infty}{q}. \quad (1)$$

Здесь T_w — средняя температура радиатора; T_∞ — температура охлаждающей жидкости.

Температура внутри нагревательного элемента и охлаждающей жидкости измерялась с помощью устройства, состоящего из двух термочувствительных платиновых резисторов, термопары и системы сбора данных. Результаты измерений были использованы для определения средней температуры ребер радиатора. Температура радиатора измерялась в трех точках верхней поверхности его основания, среднее значение температуры в этих точках использовалось для расчета теплового сопротивления радиатора. В экспериментах применялась инфракрасная камера FLIR A325 с диапазоном длин волн 7,5 ÷ 13,0 мкм, состоящая из неохлаждаемого матричного детектора в фокальной плоскости с разрешением 320 ÷ 240 пикселей. В диапазоне температур 20 ÷ 350 °С измерения выполнялись с погрешностью 2 %. При температуре 30 °С тепловая чувствительность составляла 0,05 °С,

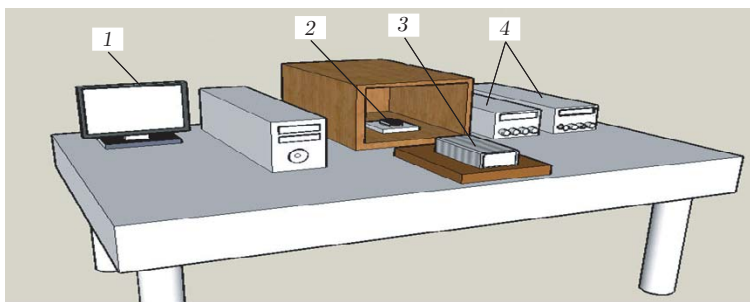


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 — компьютер, 2 — радиатор, 3 — инфракрасный термограф, 4 — источник питания

а поле наблюдения — $25^\circ \times 19^\circ / 0,4$ м. Для записи и анализа изображений используется программное обеспечение ThermoCAM Research Pro 2.9. Тепловая мощность системы определяется следующим образом:

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2}.$$

Температура одностороннего радиатора изменяется в диапазоне $T_w = 32,8 \div 34,7$ °C, температура пластинчато-ребристого радиатора — в диапазоне $T_w = 30,3 \div 33,9$ °C, температура окружающей среды — в диапазоне $T_\infty = 23 \div 26$ °C.

В рамках PIV-метода характеристики потока рассчитывались с использованием числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{fMw}{\nu}, \quad (2)$$

где $f = 60$ Гц — частота колебаний лопасти пьезоэлектрического вентилятора; $M = 20$ мм — амплитуда колебаний лопасти пьезоэлектрического вентилятора; $w = 12,7$ мм — ширина лопасти пьезоэлектрического вентилятора; $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ м²/с — вязкость воздуха. Уравнение (2) справедливо при температуре окружающей среды $T_\infty = 25$ °C.

Экспериментальное оборудование показано на рис. 1. В эксперименте для определения распределения температуры в ребре радиатора использовалась инфракрасная термография.

Экспериментальная установка состояла из радиатора, источника питания постоянного тока, источника питания переменного тока и компьютера, подключенного к измерительному устройству, используемому при проведении инфракрасной термографии. Нагревательный блок изготовлен из алюминиевого сплава марки 6061, размеры пластинчато-ребристого радиатора — $18 \times 40 \times 34$ мм, одностороннего радиатора — $3,729 \times 14,600 \times 34,000$ мм. Для точного расчета теплоемкости на нагревательном элементе размещалась проволока термодатчика типа К. Система нагрева состояла из источника питания постоянного тока и нагревательного элемента, который был полностью обернут изоляционным материалом, за исключением участков, где он соприкасался с основанием радиатора. Количество тепла, выделяемого нагревательным элементом, рассчитывалось с использованием максимального и минимального значений температуры, измеренной внутри элемента:

$$Q = \frac{K_{Al}A(T_l - T_u)}{d}. \quad (3)$$

Здесь $K_{Al} = 168$ Вт/(м·°C) — теплопроводность алюминиевого сплава 6061; A — площадь поперечного сечения нагревательного элемента; T_u , T_l — максимальное и минимальное значения температуры, измеренной внутри нагревательного элемента, соответственно.

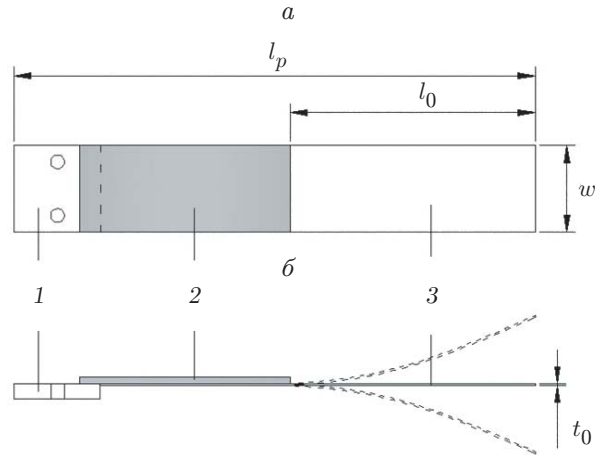


Рис. 2. Схема пьезоэлектрического вентилятора:
а — вид сверху, б — вид сбоку; 1 — печатная плата, 2 — пьезоэлектрический элемент, 3 — лопасть

Характеристики радиаторов

Радиатор	L , мм	W , мм	H , мм	l , мм	h_x , мм	D , мм	d , мм
Однореберный	34	3,7	9,3	34,0	26,1	—	—
Пластинчато-ребристый	34	18,9	8,7	32,2	26,7	1,7	1,5

Для пластинчато-ребристого радиатора площадь поперечного сечения составляла $0,000\,612\text{ м}^2$, $T_u = 54,3\text{ }^\circ\text{C}$, $T_l = 54\text{ }^\circ\text{C}$, $d = 20\text{ мм}$. Таким образом, в силу уравнения (3) $Q = 1,542\text{ Вт}$. Для однореберного радиатора площадь поперечного сечения составляла $0,000\,119\text{ м}^2$, $T_u = 57,6\text{ }^\circ\text{C}$, $T_l = 57\text{ }^\circ\text{C}$, $d = 12\text{ мм}$. Таким образом, в силу уравнения (3) для такого радиатора $Q = 0,983\text{ Вт}$.

Напряжение и сила тока источника питания в эксперименте составляли $30\text{ В} \pm 5\%$ и $550\text{ мА} \pm 5\%$. На эффективность работы пьезоэлектрического вентилятора влияют несколько факторов, в том числе пьезоэлектрический материал, материал, геометрия и размер лопасти, частота электрического тока источника питания. В проведенном эксперименте использовался коммерчески доступный пьезоэлектрический материал (American Piezo Systems). На рис. 2 приведена схема пьезоэлектрического вентилятора, имеющего следующие характеристики: длина $l_p = 76,7\text{ мм}$, ширина $w = 12,7\text{ мм}$, толщина $t_0 = 2,2\text{ мм}$, длина лопасти $l_0 = 36\text{ мм}$, масса — $2,8\text{ г}$, электрическая емкость — 15 нФ , материал пьезоэлектрического элемента — пьезокерамика, материал лопасти — майлар, диапазон температуры — $-20 \div 70\text{ }^\circ\text{C}$.

При резонансной частоте, равной 60 Гц , амплитуда колебаний лопасти вентилятора максимальна. Этой амплитудой можно управлять, изменяя подаваемое напряжение. Амплитуда колебаний влияет на напряженность поля скорости потока. При максимальной амплитуде была получена максимальная скорость воздуха, равная $1,7\text{ м/с}$.

Размер радиаторов, используемых в данной работе, был равен $1/8$ размера радиаторов, исследованных в [13]. Радиаторы были изготовлены из алюминиевого сплава 6061-Т651. Характеристики ребер радиаторов приведены в таблице. Также были исследованы характеристики однореберного радиатора. Схема радиатора, исследуемого в данной работе, показана на рис. 3. Однореберный радиатор имел ширину $3,7\text{ мм}$, длину 34 мм , высоту $26,1\text{ мм}$, толщина ребра равна $0,6\text{ мм}$, расстояние между ребрами — $1,5\text{ мм}$, толщина основания — $9,3\text{ мм}$. Пластинчато-ребристый радиатор имел ширину $18,9\text{ мм}$, длину

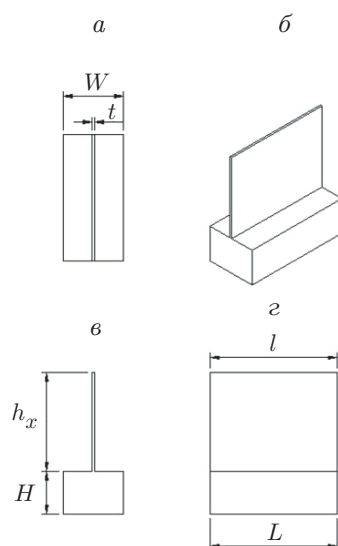
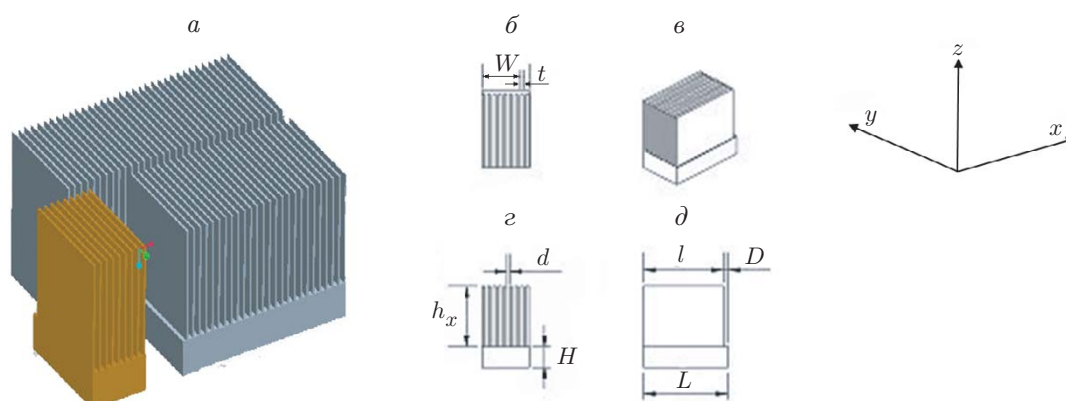


Рис. 3. Схема однореберного радиатора:

a — вид сверху, $б$ — вид при повороте на угол, равный 45° , $в$ — вид спереди, $г$ — вид сбоку

Рис. 4. Общий вид пластинчато-ребристого радиатора (a) и схема массива ребер 9×1 ($б-д$):

$б$ — вид сверху, $в$ — вид при повороте на угол, равный 45° , $г$ — вид спереди, $д$ — вид сбоку

34 мм (рис. 4). Этот радиатор состоял из массива ребер 9×1 высотой 26,7 мм и шириной 32,2 мм. Толщина ребра равна 0,6 мм, расстояние между ребрами — 1,5 мм, толщина основания — 8,7 мм (см. таблицу). Поле скорости потока, создаваемого пьезоэлектрическим вентилятором, определялось с помощью PIV-метода. Для получения изображений использовалась высокоскоростная CMOS-камера Phantom V7.3 (Vision Research) с объективом Nikon Nikkor с разрешением 800×600 пикселей при частоте 1000 кадр/с. В качестве индикаторных частиц использовались капли оливкового масла диаметром приблизительно 1 мм, помещенные в прозрачный акриловый контейнер. Испытывались горизонтальный пьезоэлектрический вентилятор и акриловый радиатор. Источником света являлся аргоновый лазер непрерывного излучения [19]. Лазерный луч преобразуется в световой лист толщиной 1 мм, который располагается в средней симметричной плоскости пьезоэлектрического вентилятора и радиатора перпендикулярно камере. Пьезоэлектрические вентиляторы приводились в движение напряжением 110 В при частоте 60 Гц, расстояние от края лопасти до радиатора составляло 0,5 мм.

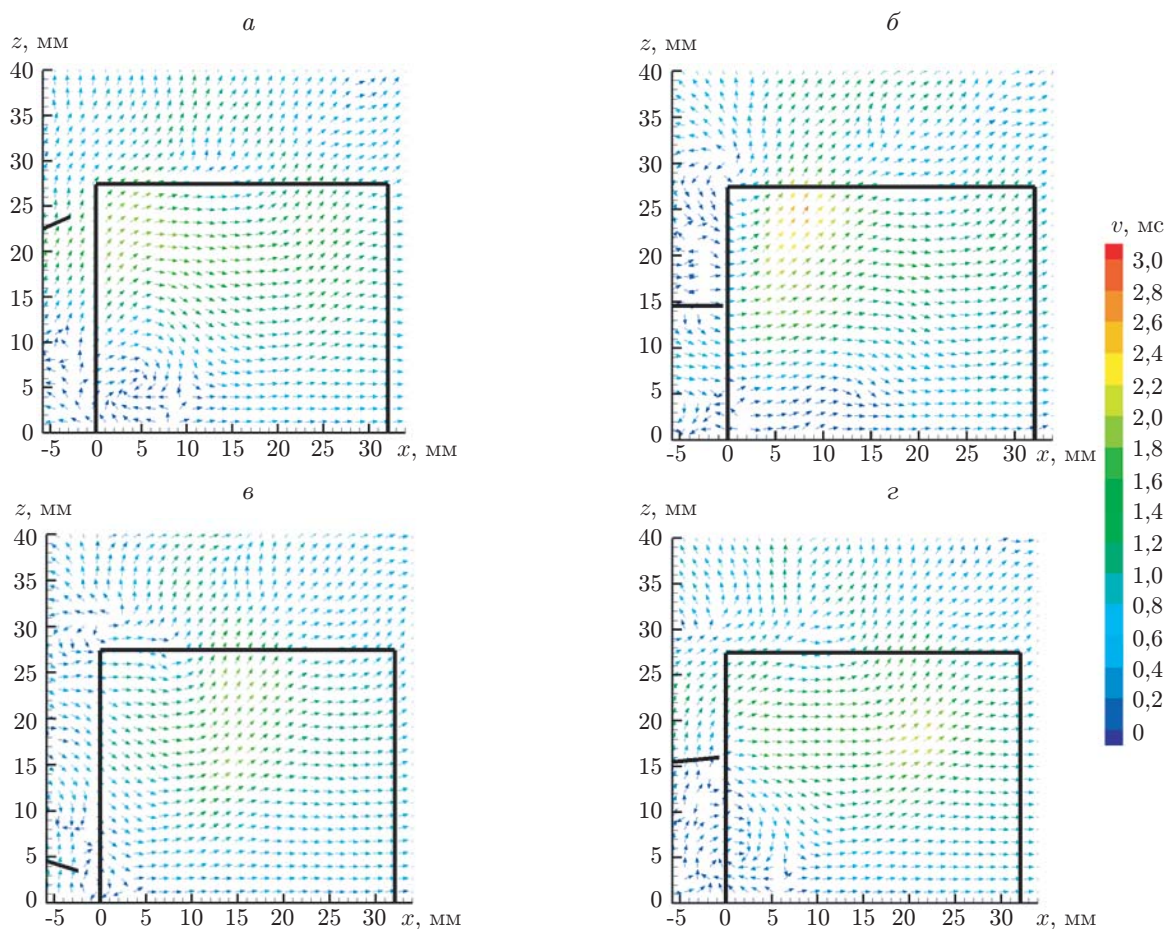


Рис. 5. Поля скоростей потока v , возникающие в случае быстрого вращения лопасти вентилятора при ее различном расположении относительно радиатора:
a — $z = 22,5$ мм, *б* — $z = 14,5$ мм, *в* — $z = 4,5$ мм, *г* — $z = 15,5$ мм

Пьезоэлектрический элемент размещался на различной высоте от ребер. Вентилятор был расположен горизонтально, что позволяло инициировать колебания лопасти в вертикальном направлении. Пьезоэлектрический вентилятор создавал воздушный поток со сложным трехмерным полем скоростей, которое исследовалось с использованием PIV-метода. Пластинчато-ребристые радиаторы были изготовлены из оптического стекла толщиной 0,7 мм с прозрачностью не менее 90 %. Для визуализации поля скоростей потока было выбрано оптическое стекло, поскольку это позволяло избежать помех, возникающих при использовании обычного стекла.

При максимальном отклонении вниз край лопасти пьезоэлектрического вентилятора находится вблизи края ребра. Изучалась эффективность работы вентилятора при амплитуде колебаний лопасти, большей высоты ребра ($z/h = 0,75$), равной его высоте ($z/h = 0,5$) и меньшей высоты ребра ($z/h = 0,25$). Пьезоэлектрический вентилятор периодически создает одинаковые поля скорости струи вблизи однореберного радиатора. Поля скоростей потока, создаваемых при быстром вращении лопасти пьезоэлектрического вентилятора в случае использования пластинчато-ребристого радиатора, показаны на рис. 5.

Были протестированы различные положения вентиляторов. Например, в случае если вентилятор был установлен вертикально, вихри распространялись вверх и вниз от края лопасти, если он был установлен горизонтально, то вихри создавались за краем лопасти

вентилятора и распространялись в горизонтальной плоскости. Аналогичные поля скорости струи создавались при циклических колебаниях лопасти вентилятора вблизи радиатора.

Пьезоэлектрический вентилятор размещался таким образом, чтобы край его лопасти находился на различных расстояниях от радиатора в направлении y ($y = 3, 6, 9$ мм) и в направлении x ($x = 1, 2, 3$ мм).

2. Результаты исследования и их обсуждение. Для измерения температуры окружающей среды использовалась цифровая система сбора данных, состоящая из термомпары и инфракрасного тепловизора. Изучена эффективность работы пьезоэлектрических вентиляторов различной геометрии, расположенных на различных расстояниях от радиатора:

- 1) однореберного и пластинчато-ребристого вентиляторов;
- 2) пьезоэлектрического вентилятора, расположенного вертикально или горизонтально;
- 3) вентиляторов, расположенных на различной высоте от ребер радиатора ($z/h = 0,250; 0,375; 0,500; 0,625; 0,750$);
- 4) вентиляторов, расположенных на различных расстояниях вдоль ребра радиатора ($x/L = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9$);
- 5) вентиляторов, расположенных на различных расстояниях от ребра радиатора ($d_x/L = 0,014; 0,029; 0,058; 0,088; 0,117; 0,147; 0,205$);
- 6) вентиляторов, расположенных на различной высоте от радиатора ($d_z/L = 0,014; 0,029; 0,058; 0,088; 0,117; 0,147$).

Сначала исследовалось поле скоростей в потоке, создаваемом пьезоэлектрическим вентилятором, расположенным вблизи однореберного радиатора. В случае если вентилятор располагался на расстояниях, равных $z/h = 0,250; 0,375; 0,500; 0,625; 0,750$, средняя температура ребер составляла 32,8; 32,5; 32,7; 33,0; 33,3 °С соответственно. Зависимость теплового сопротивления однореберного радиатора от параметра d_x/L приведена на рис. 6.

Также с использованием методов тепловидения и инфракрасной термографии исследовано сопротивление теплопередаче пластинчато-ребристого радиатора с двумя пьезоэлектрическими вентиляторами. Для расчета теплового сопротивления (см. (1)) использовалась средняя температура верхней поверхности основания радиатора.

Рассмотрены следующие варианты расположения вентилятора:

- 1) вертикальное и горизонтальное положения пары пьезоэлектрических вентиляторов;
- 2) положение вентиляторов на различных расстояниях от поверхности радиатора ($x = 1, 2, 3$ мм);
- 3) положение вентиляторов на различных расстояниях сбоку от радиатора ($y = 3, 6, 9$ мм).

Эксперименты проводились в соответствии с методикой, изложенной в работе [17]. Лазер располагался перпендикулярно вентилятору, а камера для записи изображений находилась в плоскости (x, y) . В течение периода колебаний пьезоэлектрического вентилятора его лопасть находится в четырех положениях: в верхнем положении, в промежуточном положении между верхним и нижним положениями, в нижнем положении и в промежуточном положении между нижним и верхним положениями. Мгновенные поля скоростей потока в этих четырех положениях приведены на рис. 7.

Колебания лопасти пьезоэлектрического вентилятора, расположенного вертикально, происходят в горизонтальной плоскости, а колебания лопасти пьезоэлектрического вентилятора, расположенного горизонтально, — в вертикальной плоскости. Вентиляторы, расположенные вертикально и горизонтально, создавали в потоке вращающиеся вихри. При этом значительная часть потока воздуха, создаваемого вентилятором, достигала радиатора.

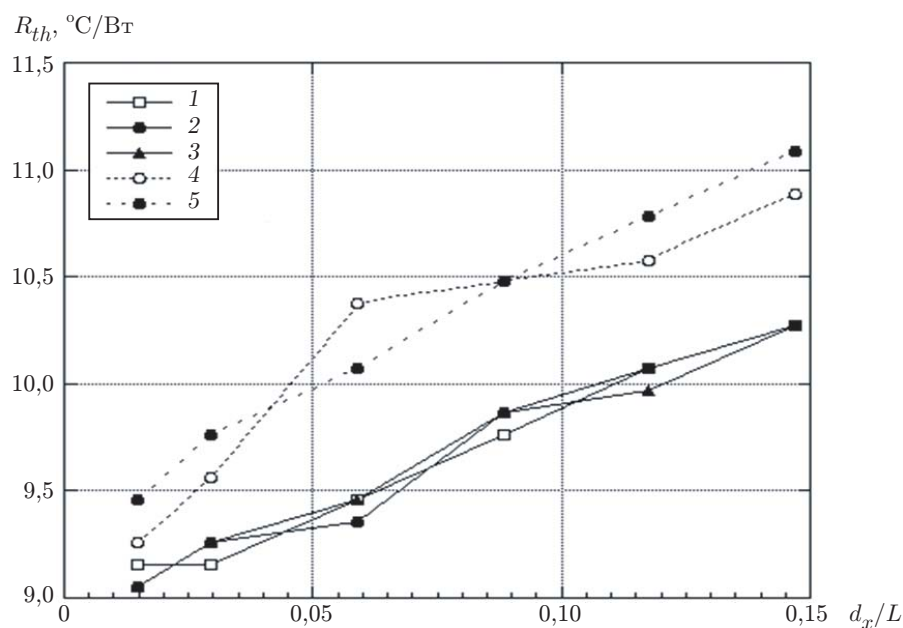


Рис. 6. Зависимость теплового сопротивления однореберного радиатора от параметра d_x/L при различных значениях z/h :

1 — $z/h = 0,250$, 2 — $z/h = 0,375$, 3 — $z/h = 0,500$, 4 — $z/h = 0,625$, 5 — $z/h = 0,750$

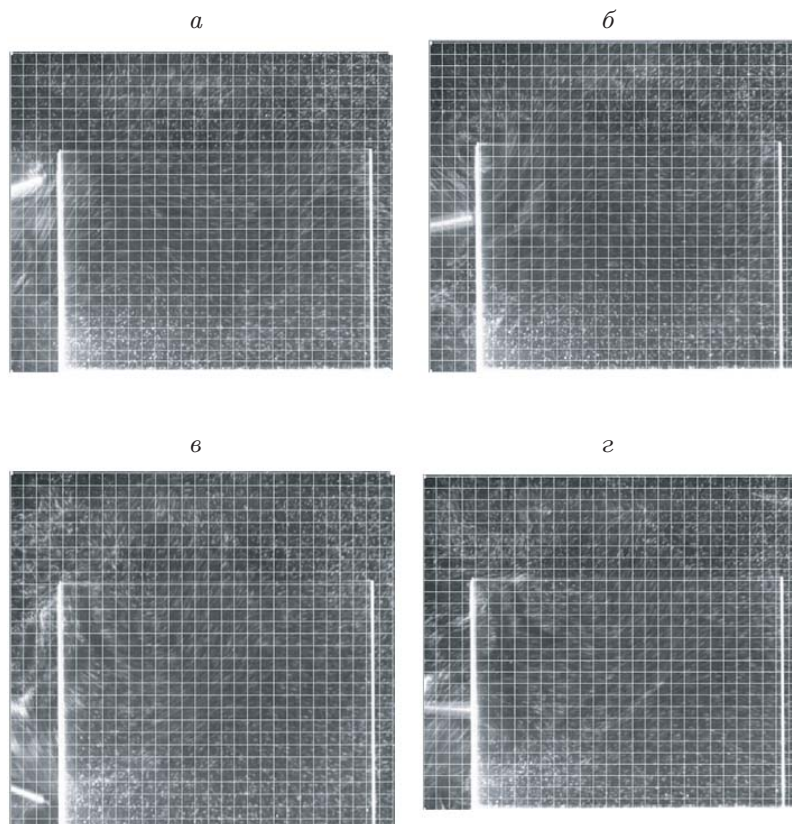


Рис. 7. Поля скоростей потока при различных положениях лопасти пьезоэлектрического вентилятора в течение периода колебаний:

a — верхнее положение, *б* — промежуточное положение между верхним и нижним положениями, *в* — нижнее положение, *г* — промежуточное положение между нижним и верхним положениями

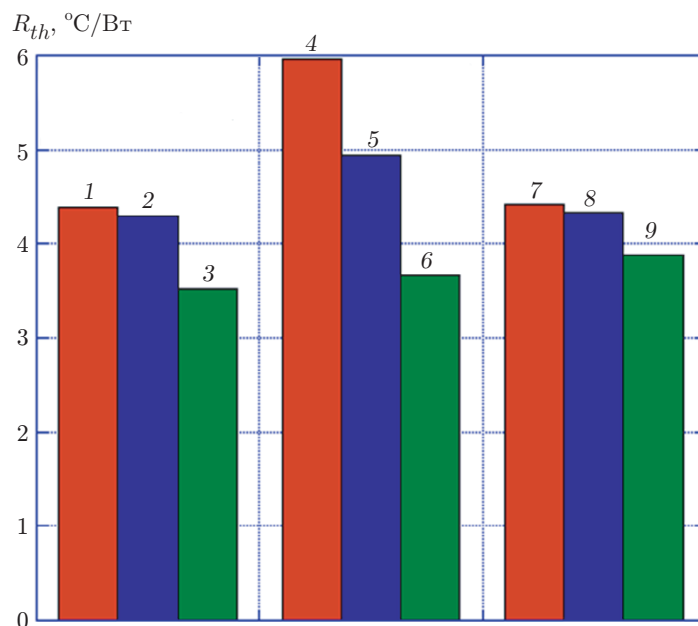


Рис. 8. Диаграмма теплового сопротивления радиатора при наличии вертикально расположенного пьезоэлектрического вентилятора и различных значениях x , y :
 1–3 — $x = 1$, 4–6 — $x = 2$, 7–9 — $x = 3$; 1, 4, 7 — $y = 3$, 2, 5, 8 — $y = 6$, 3, 6, 9 — $y = 9$

Воздушный поток уносит тепло из радиатора, что приводит к интенсификации процесса теплопередачи.

На рис. 8 представлена диаграмма теплового сопротивления радиатора при вертикальном расположении пьезоэлектрического вентилятора. В случае расположения края лопасти вентилятора в центре радиатора ($x = 1$ мм) интенсивность теплопереноса больше, чем в случае его расположения на переднем крае радиатора ($y = 3$ мм). Вертикально расположенный пьезоэлектрический вентилятор создает сложный трехмерный поток. На крае лопасти вентилятора образуются трехмерные вихри, что приводит к образованию циркулирующего потока и способствует охлаждению радиатора.

На рис. 9 приведена диаграмма теплового сопротивления радиатора при горизонтальном расположении пьезоэлектрического вентилятора. Эффективность работы пьезоэлектрического вентилятора наибольшая, в случае если он расположен горизонтально в точке $x = 1$ мм, $y = 6$ мм. Эффективность работы горизонтально расположенного пьезоэлектрического вентилятора увеличивается по мере приближения его положения к переднему краю радиатора.

Заключение. С использованием метода инфракрасной термографии и PIV-метода исследованы характеристики теплопередачи однореберных и пластинчато-ребристых радиаторов, охлаждаемых пьезоэлектрическими вентиляторами. Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы.

При максимальной амплитуде колебаний лопасти вентилятора существенно увеличивается объем воздуха, поступающего в ребра радиатора. Тепловое сопротивление однореберного радиатора при наличии пьезоэлектрического вентилятора, расположенного выше радиатора на отрезке $z/h \in [0,25, 0,50]$, в 3,494 раза меньше, чем при естественной конвекции. В случае пластинчато-ребристого радиатора при наличии пьезоэлектрического вентилятора, установленного на расстоянии $z/L = 0,5$, тепловое сопротивление в 3,38 раза меньше, чем при естественной конвекции. Чем меньше расстояние между краем лопа-

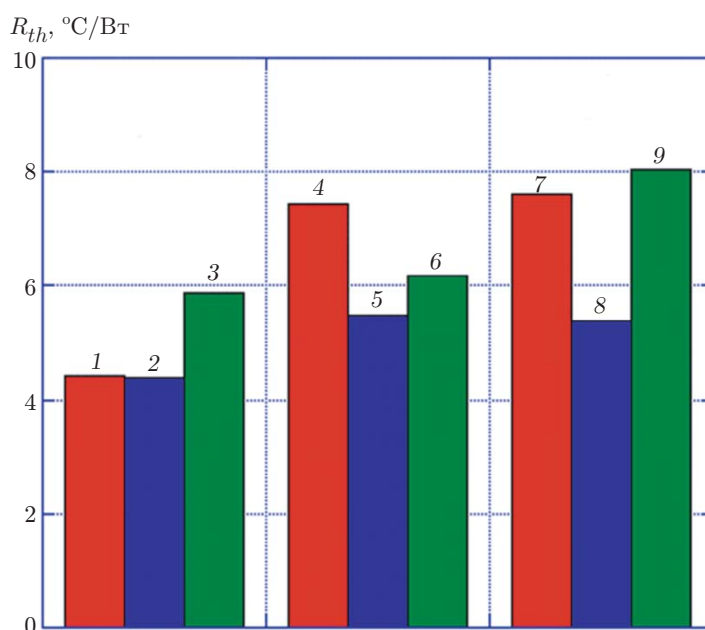


Рис. 9. Диаграмма теплового сопротивления радиатора при наличии горизонтально расположенного пьезоэлектрического вентилятора и различных значениях x , y :

1–3 — $x = 1$, 4–6 — $x = 2$, 7–9 — $x = 3$; 1, 4, 7 — $y = 3$, 2, 5, 8 — $y = 6$, 3, 6, 9 — $y = 9$

сти пьезоэлектрического вентилятора и радиатором, тем меньше тепловое сопротивление радиатора. С увеличением расстояния от лопасти вентилятора до одностороннего радиатора тепловое сопротивление увеличивается. Пьезоэлектрические вентиляторы повышают эффективность теплопередачи в 3–4 раза по сравнению с естественной конвекцией. Эффективность охлаждения пластинчато-ребристого радиатора при наличии пьезоэлектрического вентилятора в 3–5 раз выше, чем при его отсутствии. Движения лопасти пьезоэлектрического вентилятора из крайнего верхнего положения в крайнее нижнее положение приводят к образованию вихрей, вращающихся против и по часовой стрелке соответственно. Эти вихри оказывают существенное влияние на процесс охлаждения радиатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li H.-Y., Chao S.-M., Chen J.-W., Yang J.-T. Thermal performance of plate-fin heat sinks with piezoelectric cooling fan // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 57, iss. 2. P. 722–732. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.005.
2. Acikalin T., Wait S. M., Garimella S. V., Raman A. Experimental investigation of the thermal performance of piezoelectric fans // Heat Transfer Engng. 2004. V. 25. P. 4–14. DOI: 10.1080/01457630490248223.
3. Wait S. M., Basak S., Garimella S. V., Raman A. Piezoelectric fans using higher flexural modes for electronics cooling applications // IEEE Trans. Components, Packag., Manufact. Technol. 2007. V. 30. P. 119–128. DOI: 10.1109/TCAPT.2007.892084.
4. Abdullah M. K., Abdullah M. Z., Ramana M. V., et al. Numerical and experimental investigations on effect of fan height on the performance of piezoelectric fan in microelectronic cooling // Intern. Comm. Heat Mass Transfer. 2009. V. 36. P. 51–58. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.08.017.

5. **Kimber M., Garimella S. V., Raman A.** Local heat transfer coefficients induced by piezoelectrically actuated vibrating cantilevers // J. Heat Transfer. 2007. V. 129. P. 1168–1176. DOI: 10.1115/1.2740655.
6. **Kim Y. H., Cierpka C., Werely S. T.** Flow field around a vibrating cantilever: coherent structure eduction by continuous wavelet transform and proper orthogonal decomposition // Intern. J. Fluid Mech. 2011. V. 669. P. 584–606. DOI: 10.1017/S0022112010005318.
7. **Zapryagaev V. I., Kavun I. N., Rybak S. P., Pivovarov A. A.** Reconstruction of transonic flow parameters in the cone wake // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2022. V. 63, N 6. P. 940–949. DOI: 10.1134/S0021894422060049.
8. **Nogueira J., Lecuona A., Rodriguez P. A.** Limits on the resolution of correlation PIV iterative methods. Fundamentals // Experiments Fluids. 2005. V. 39, iss. 2. P. 305–313. DOI: 10.1007/s00348-005-1016-2.
9. **Okamoto K.** Comparison of sub-pixel estimation of PIV using frequency response analysis // J. Visual. 2002. V. 5. P. 355–361. DOI: 10.1007/BF03182350.
10. **Kim Y. H., Wereley S. T., Chun C. H.** Phase-resolved flow field produced by a vibrating cantilever plate between two endplates // Phys. Fluids. 2004. V. 16. P. 145–162. DOI: 10.1063/1.1630796.
11. **Acikalin T., Raman A., Garimella S. V.** Two-dimensional streaming flows induced by resonating thin beams // J. Acoust. Soc. Amer. 2003. V. 114. P. 1785–1795. DOI: 10.1121/1.1610453.
12. **Acikalin T., Garimella S. V., Raman A., Petroski J.** Characterization and optimization of the thermal performance of miniature piezoelectric fans // Intern. J. Heat Fluid Flow. 2007. V. 28. P. 806–820. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.10.003.
13. **Huang C. H., Chen Y. F., Ay H.** An inverse problem in determining the optimal position for piezoelectric fan with experimental verification // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 289–301. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.037.
14. **Li H. Y., Wu Y. X.** Heat transfer characteristics of pin-fin heat sinks cooled by dual piezoelectric fans // Intern. J. Thermal Sci. 2016. V. 110. P. 26–35. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.030.
15. **Kimber M., Suzuki K. N., Kitsunai K., Seki S. V.** Pressure and flow rate performance of piezoelectric fans // IEEE Trans. Components, Packag., Manufactur. Technol. 2009. V. 32, iss. 4. P. 766–775. DOI: 10.1109/TCAPT.2008.2012169.
16. **Yoo J. H., Hong J. I., Cao W.** Piezoelectric ceramic bimorph coupled to thin metal plate as cooling fan for electronic devices // Sensor Actuator. 2000. V. 79. P. 8–12. DOI: 10.1016/S0924-4247(99)00249-6.
17. **Maaspuro M.** Piezoelectric oscillating cantilever fan for thermal management of electronics and LEDs — A review // Microelectron. Reliab. 2016. V. 63. P. 342–353. DOI: 10.1016/j.microrel.2016.06.008.
18. **Hsu H.-P., Chao C., Hung Y. L., et al.** Thermal and fluid characteristics of single fin heat sink with piezoelectric cooling fan // J. Flow Visual. Image Process. 2019. V. 26, N 1. P. 1–22. DOI: 10.1615/JFlowVisImageProc.2018028199.
19. **Raffel M., Westerweel J.** Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data // Experiments Fluids. 1994. V. 16. P. 236–247. DOI: 10.1007/BF00206543.

*Поступила в редакцию 30/III 2023 г.,
после доработки — 10/VIII 2023 г.
Принята к публикации 25/IX 2023 г.*