

УДК 621.3

Исследование теплогидравлической эффективности штыревого радиатора для охлаждения электронных компонентов

Егоров К. С.^{1,*}, Степанова Л. В.¹

*blackbird05@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе представлены результаты экспериментального исследования теплогидравлической эффективности штыревой поверхности теплообмена со штырями коридорной компоновки квадратного сечения размерами 4 на 4 мм, продольным и поперечным шагами 8 мм. Высота штырей составляет 17 мм. Эксперименты проводились для чисел Рейнольдса от 9 000 до 14 000. Теплогидравлическая эффективность поверхности оценивалась по соотношению между относительным числом Нуссельта и относительным числом Эйлера. Числа Нуссельта и Эйлера относятся к турбулентному течению в гладкой трубе. В результате получено, что эффективность данной поверхности низкая. Предложены несколько конструктивных вариантов улучшения ее теплогидравлической эффективности.

Ключевые слова: число Нуссельта, число Эйлера, радиатор, число Рейнольдса, интенсификация тепло-обмена, эффективность поверхности теплообмена

Введение

Эффективное охлаждение электронных компонентов представляет собой важную задачу, так как это напрямую влияет на их надежность и долговечность. Поэтому разработка и исследование новых высокоэффективных радиаторов охлаждения представляет собой актуальную задачу. Таким образом возрастает актуальность интенсификации процессов конвективного теплообмена и повышения теплогидравлической эффективности радиаторов для охлаждения электронных компонентов.

Как известно из теории конвективного теплообмена, тепловой поток определяется зависимостью Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha F(t_{cm} - t_s), \quad (1)$$

где Q – тепловой поток, Вт;

α – коэффициент теплоотдачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$;

F – площадь теплообмена, $м^2$;

t_{cm} – средняя температура стенки, $^\circ C$;

t_g – температура газа (жидкости), $^\circ C$.

Как следует из формулы (1) увеличение теплового потока Q возможно, как правило, увеличением площади теплообмена F и увеличением коэффициента теплоотдачи α , так как разность температур $t_{cm} - t_g$ между стенкой и газом (жидкостью) обычно величина заданная. В последнем случае необходимо иметь ввиду, что с увеличением коэффициента теплоотдачи обычно возрастают и потери давления (гидравлическое сопротивление), что приводит к необходимости увеличению мощности на их прокачку по тракту течения теплоносителя. В этом случае оптимальным является вариант, когда рост теплоотдачи по сравнению с гладкой (исходной) поверхностью больше чем рост гидравлического сопротивления.

Для практического применения в области охлаждения электронных компонентов можно рекомендовать следующие способы интенсификации теплообмена:

1. использование других рабочих тел, отличных от воздуха, с лучшими теплофизическими характеристиками;
2. использование геометрических интенсификаторов теплообмена.

При выборе и применении того или другого способа интенсификации теплообмена необходимо оценивать не только эффективность ее введения, но и сложность ее технической реализации и стоимости.

Наиболее эффективными рабочими телами являются жидкие теплоносители (например, вода), они позволяют увеличить коэффициент теплоотдачи α по сравнению с воздухом в 10-15 раз. Но при этом использование воздушного охлаждения во многих является предпочтительным, так как применение жидких теплоносителей, значительно усложняет конструкцию системы охлаждения. Из газовых теплоносителей очень хорошими теплофизическими свойствами обладает инертный газ гелий и газовые смеси на его основе с низкими числами Прандтля [1]. Однако гелий является очень текучим газом и необходимо принимать специальные меры для его удержания внутри контура охлаждения.

Использование вместо гладкой поверхности теплообмена различных выступов, ребер, лунок (например, работы [2,3]) позволяет увеличивать не только коэффициент

теплоотдачи α , но и увеличивать поверхность теплообмена F , что позволяет значительно увеличивать тепловой поток.

Коллективом авторов в НУК “Э” проводятся многолетние исследования различных интенсификаторов теплообмена и высокоэффективных поверхностей теплообмена [4,5,6,7] для применения в энергетике. Кроме энергетике, интенсификация теплообмена может быть полезна в различных системах охлаждения, например для охлаждения силовой электроники. Необходимость в дальнейшем исследовании теплогидравлических характеристик радиаторов для охлаждения электронных компонентов и оценка их эффективности актуальны по нескольким причинам.

Во-первых, несмотря на то, что на сегодняшний день выпускается широкий спектр радиаторов для электронных компонентов [8,9], (Продукция австрийской фирмы Dau. Режим доступа: <http://www.symmetron.ru/suppliers/dau/PRE-PRD.shtml> (Дата обращения 09.09.2015)), в некоторых случаях, связанных, например, с технологией изготовления или при компоновочных ограничениях требуется использование радиаторов, отличающихся от стандартных. Очевидно, наиболее целесообразно использовать радиаторы с высокой теплогидравлической эффективностью. Это необходимо при проектировании новых изделий по заказу промышленных предприятий.

Во-вторых, типичные поверхности для охлаждения электроники в основном предназначены для теплообмена при свободной конвекции, и соответственно, определенный интерес представляет анализ теплогидравлической эффективности этих поверхностей при вынужденной конвекции. Эти поверхности характеризуются развитой поверхностью теплообмена и плотной упаковкой штырей или ребер поверхности, которое можно охарактеризовать относительным шагом ребер или штырей. Относительный шаг – это отношение размера ребра (штыря) к расстоянию между ними. В этом случае шаги близки 1,0.

В связи с вышеизложенным была выбрана поверхность относительными шагами, равными 1,0 и высотой штырей 17 мм, что позволяет значительно увеличить поверхность теплообмена.

1. Постановка задачи

В работе была поставлена задача по экспериментальному исследованию тепловых и аэродинамических характеристик штыревой поверхности теплообмена радиатора, а также оценка их теплогидравлической эффективности. Общий вид поверхности теплообмена приведен на рис. 1. Поверхность представляет собой вертикально расположенные штыри коридорного расположения высотой $h_{ш} = 17$ мм квадратного сечения размерами $(a_{ш} \times b_{ш}) 4 \times 4$ мм. Продольный и поперечный шаги составляет 8 мм (зазор между штырями $\delta_{ш} = 4$ мм), размер поверхности теплообмена радиатора 578×220 мм.

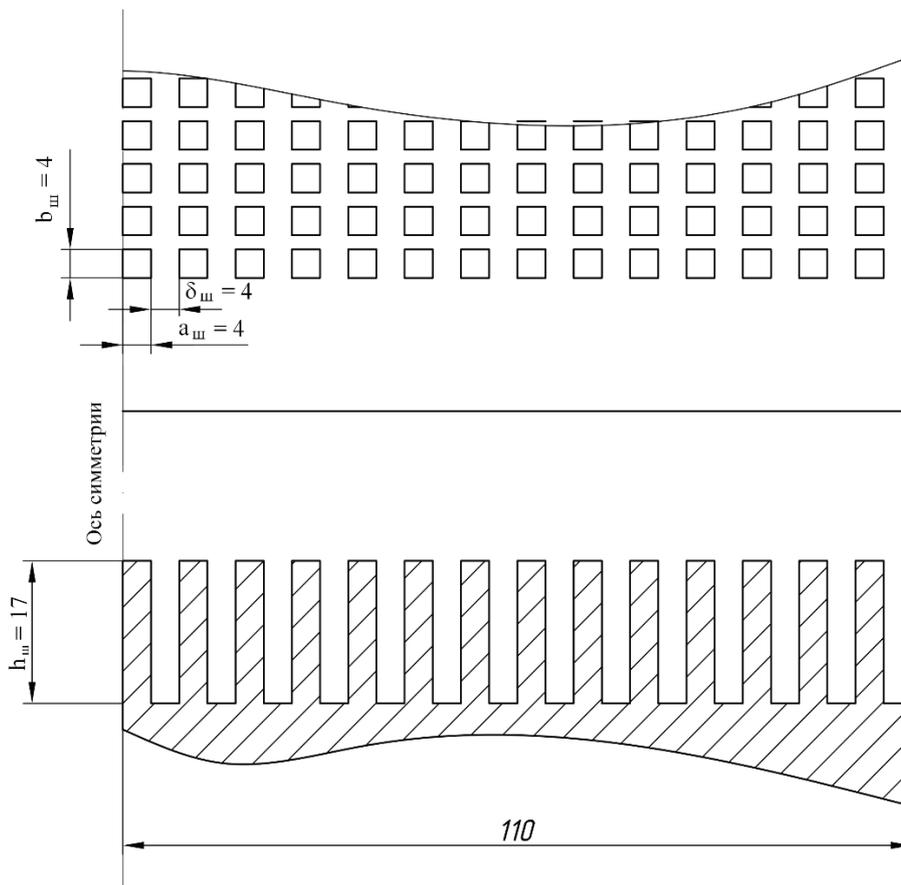


Рис. 1.Общий вид штыревой поверхности теплообмена

Как известно, тепловые и гидравлические характеристики теплообменной поверхности ищутся в виде критериальных зависимостей

$$Nu = f(Re),$$

$$Eu = f(Re),$$

где Nu - число Нуссельта; Re - критерий Рейнольдса; Eu - критерий Эйлера.

2. Экспериментальный стенд

Экспериментальные исследования были проведены на созданном экспериментальном стенде, схема которого представлена на рис.2.

В состав стенда входят электрический вентилятор (1) и модель радиатора (2), которые соединены между собой конфузуром (3). Электрический вентилятор (1) обеспечивает подачу воздуха в модель радиатора (2). На входе вентилятора установлена измерительная диафрагма (4) для измерения расхода воздуха. Перед моделью стоит успокаивающая сетка для выравнивания потока воздуха. Источником питания и управления частотой вращения вентилятора является преобразователь частоты (5) Delta VFD075CP43A(S)-21 фирмы "Deltaelectronics, Inc", (Тайвань). Для нагрева модели радиатора используется электрический нагреватель (6). Источником питания и управления мощностью нагревателя источник питания постоянного тока мощностью 900 Вт типа

Mastech HY3030E (7) фирмы PrecisionMastechEnterprises (Гонконг). Первичные преобразователи (датчики) (8) состоят из датчиков давления типа ЗОНД-10 фирмы ООО НПП “Гидрогазприбор” (Россия), датчиков абсолютного давления ЗОНД АД 1155 фирмы ООО НПП “Гидрогазприбор” (Россия) для измерения атмосферного давления, и термопар типа хромель-капель (ХК) для измерения температуры. Преобразование сигналов в цифровую форму осуществляется с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) USB M-6255 (9) фирмы National Instruments, Inc (США), которые затем передаются в персональный компьютер (10). Холодные спаи термопар помещены в сосуд Дюара, где поддерживается температура 0 °С.

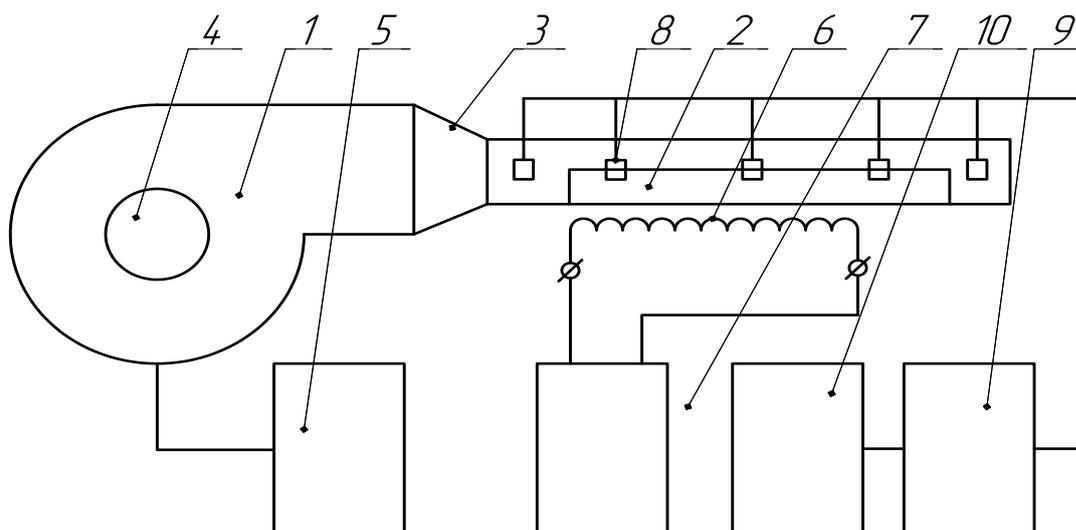


Рис. 2.Схема стенда: 1 – электроventильатор; 2 – модель радиатора; 3 – конфузор; 4 – измерительная диафрагма; 5 – преобразователь частоты Delta VFD075CP43A(S)-21 “Delta electronics, Inc”, (Тайвань); 6 – электрический нагреватель; 7 – источник питания постоянного тока типа Mastech HY3030E фирмы Precision Mastech Enterprises (Гонконг); 8 – первичные преобразователи; 9 – аналого-цифровой преобразователь USB M-6255 фирмы National Instruments, Inc (США); 10 – персональный компьютер

Измерение температуры радиатора производится термопарами в 12 точках, схема расположения термопар по поверхности радиатора изображена на рисунке 3. Чувствительные элементы термопар расположены на расстоянии 2-3 мм от поверхности радиатора. Разность температур на толщине 2-3 мм алюминиевой пластины, не превышает 0,05 °С, что практически не влияет на точность измерений.

В экспериментах диапазон изменения объемного расхода варьировался в пределах от 20 до 200 м³/ч, мощность электрического нагревателя регулировалась в пределах от 30 до 500 Вт. Температура стенки радиатора достигала приблизительно от 90 до 110 °С, подогрев воздуха максимально принимал значения от 10 до 20 °С. Эксперименты проводились при атмосферном давлении, которое изменялось в пределах от 740 до 755 мм. рт. ст.

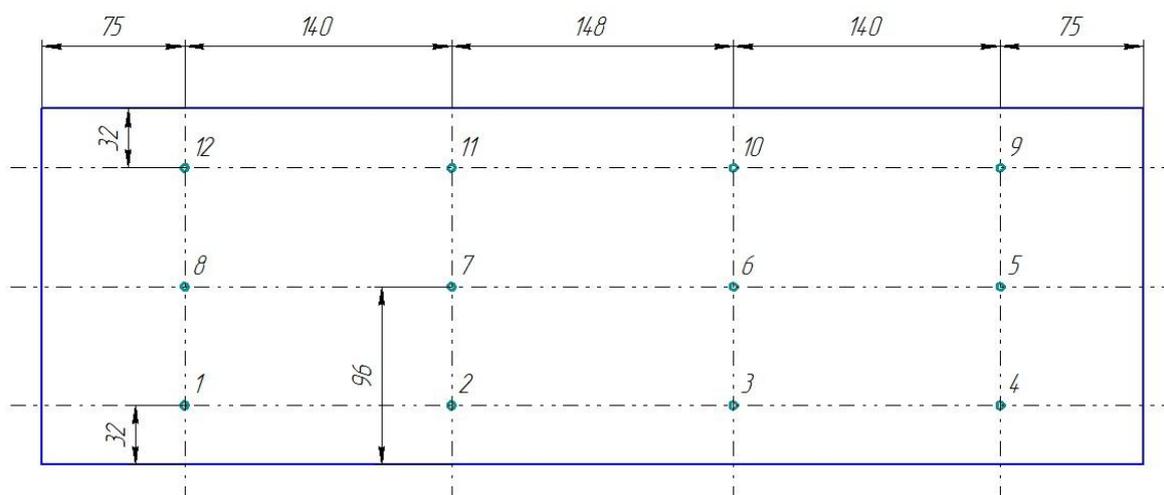


Рис. 3. Схема измерения температуры радиатора в 12-ти точках

3. Методика экспериментального исследования

Измерение расхода воздуха числа Рейнольдса проводилось методом переменного перепада давления на измерительной диафрагме [10,11,12].

Измерение числа Нуссельта осуществлялось стационарным способом путем непосредственного измерения коэффициента теплоотдачи на основе формулы Ньютона-Рихмана:

$$Q_p = \alpha_p F_p (t_{cmp} - t_{вр}),$$

где Q_p – тепловой поток радиатора, $Вт$;

α_p – коэффициент теплоотдачи радиатора, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$;

F_p – площадь теплообмена радиатора, $м^2$;

t_{cmp} – средняя температура стенки радиатора, $^\circ C$;

$t_{вр}$ – температура воздуха в радиаторе, $^\circ C$.

Измерение числа Эйлера осуществлялось способом непосредственного измерения перепада статического давления на радиаторе.

4. Результаты экспериментов

Эффективность интенсификации теплообмена оценивалась по зависимости $\frac{Nu}{Nu_0}$ в зависимости от $\frac{Eu}{Eu_0}$, где Nu_0 и Eu_0 – критерии Нуссельта и Эйлера для исходной (гладкой) поверхности.

Зависимость критерия Нуссельта для исходной (гладкой) поверхности рассчитывалась по зависимости, предложенной Михеевым [13]. Эта зависимость описывает среднее значение критерия для турбулентного режима течения ($Re > 10\,000$) в трубах на стабилизированном участке:

$$Nu_0 = 0,021Re^{0,8} Pr^{0,43},$$

где Re – критерий Рейнольдса, вычисленный по среднерасходной скорости и гидравлическому диаметру канала, Pr – критерий Прандтля. В качестве определяющей температуры принята средняя температура воздуха в трубе.

Зависимость критерия Эйлера для исходной (гладкой) поверхности для изотермических условий рассчитывалась по зависимости Блазиуса [14]. Как и в случае критерия Нуссельта, эта зависимость описывает критерий Эйлера для турбулентного режима течения ($Re > 2\,000$) в трубах на гидродинамически стабилизированном участке

$$Eu_0 = \frac{0,1582}{Re^{0,25}}.$$

На рисунке 4 приведены полученные данные для штыревой поверхности и кривая $\frac{Nu}{Nu_0} = \frac{Eu}{Eu_0}$, которая отражает эффективность исходной (гладкой поверхности).

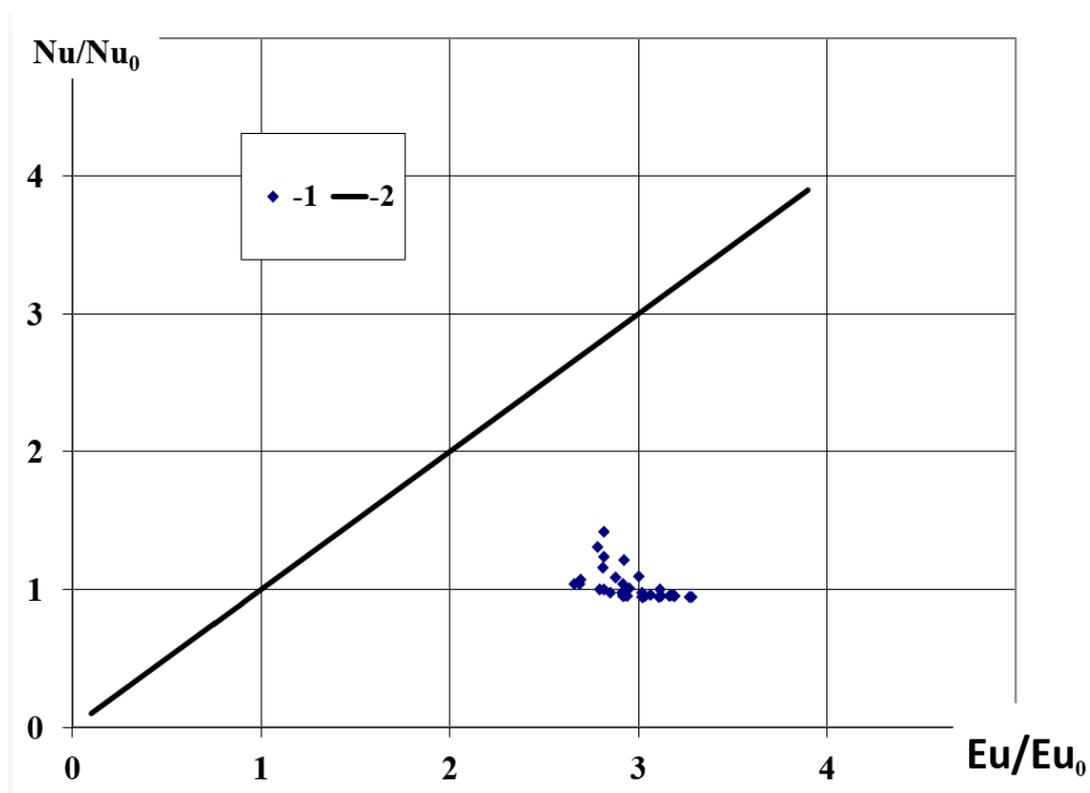


Рис. 4. Зависимость $\frac{Nu}{Nu_0}$ в зависимости от $\frac{Eu}{Eu_0}$. 1 – экспериментальные данные, 2 – кривая $\frac{Nu}{Nu_0} = \frac{Eu}{Eu_0}$

Число Рейнольдса, вычисленное по среднерасходной скорости и средней температуре воздуха в канале, в экспериментах изменялось в пределах от 9 000 до 14 000. В качестве определяющего размера был принят эквивалентный диаметр, рассчитываемый по формуле:

$$d_s = \frac{4F}{P},$$

где F – площадь проходного сечения для воздуха, P – смоченный периметр.

Оценка погрешности проведенных измерений проводилась в соответствии с [15]. Погрешность измерения числа Рейнольдса составляет 3,16 %, числа Эйлера – 3,51 %, числа Нуссельта – 17,1 %.

Заключение

В результате проведенных исследований были впервые получены следующие зависимости для числа Нуссельта и числа Эйлера

$$Nu = 0,019 Re^{0,75},$$

$$Eu = 0,14 Re^{-0,56},$$

которые могут применяться для инженерных расчетов. В перспективе это позволит создать расчетную базу высокоэффективных поверхностей теплообмена, применимых для охлаждения электронных компонентов.

Из представленных данных видно, что поверхность обладает низкой теплогидравлической эффективностью, для ее улучшения необходимо менять геометрические характеристики поверхности. Для улучшения эффективности, очевидно, нужно уменьшить потери давления, т.е. уменьшить критерий Эйлера, так как теплообмен близок к теплообмену на гладкой поверхности. Для этой цели предлагается сделать каналы с продольными ребрами (рис. 5) вместо штыревой поверхности. В этом случае потери давления будут близки к каналу с гладкой поверхностью, теплообмен также будет близок к исходной (гладкой) поверхности, Таким образом, можно будет добиться

$\frac{Nu}{Nu_0} \approx \frac{Eu}{Eu_0}$. Количество отводимого тепла в этом случае будет увеличено за счет

увеличения поверхности теплообмена, так как эффективность штыря в этом случае будет близка к единице. Косвенно об этом свидетельствует то, что при обработке эксперимента коэффициент теплоотдачи относился ко всей поверхности теплообмена (а не к исходной гладкой поверхности), и тем не менее было получена критериальная зависимость для числа Nu , близкая к гладкой поверхности.

Можно также рассмотреть другие варианты изменения геометрии. Основным недостатком данной поверхности является слишком малый продольный шаг штырей,

следствием этого является то что теплообмен близок к течению в канале $\frac{Nu}{Nu_0} \approx 1$. Чтобы этого избежать, необходимо увеличить шаг штырей по направлению течения в 5 - 10 раз [3], что приведет к интенсификации процесса теплообмена.

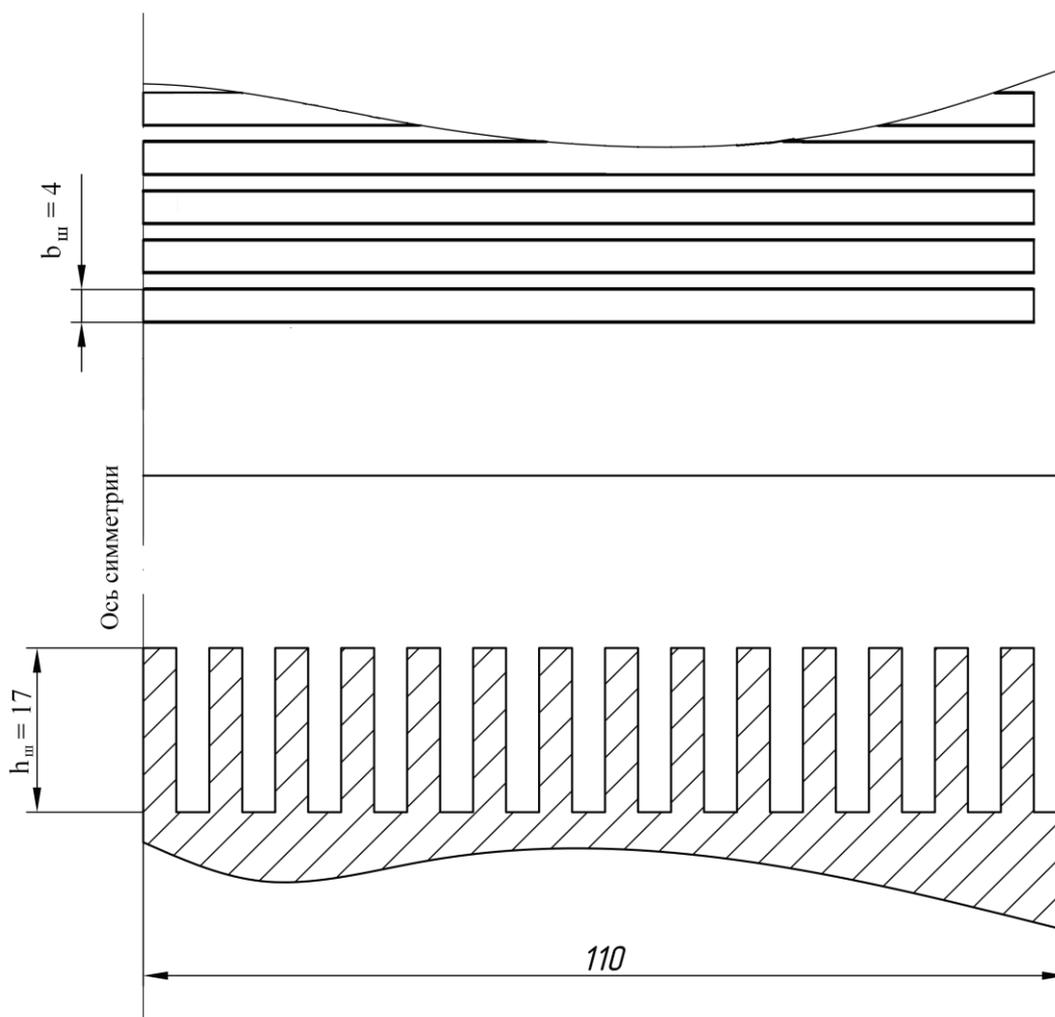


Рис. 5. Новый вариант радиатора

Таким образом, экспериментально получено, что для радиаторов охлаждения электронных компонентов из-за малых шагов характерно обтекание, близкое к гладкой поверхности, а тепловой поток увеличивается за счет увеличения площади теплообмена. Это эффективно при использовании при охлаждении свободной конвекции, если же применять такие поверхности в условиях вынужденной конвекции, то необходимо оптимизировать геометрию таких поверхностей.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (госзадание № 2014/104, код проекта 2092).

Список литературы

1. Arbekov A.N., Surovtsev I.G., Dermer P.B. Efficiency of Heat Transfer in Recuperative Heat Exchangers with HighSpeed Gas Flows at Low Prandtl Numbers // High Temperature. 2014. Vol. 52, no. 3. P. 449-454. DOI: [10.1134/S0018151X14030031](https://doi.org/10.1134/S0018151X14030031)
2. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / НАН Украины, Институт технической теплофизики. Киев: ИТТФ, 2005. 59 с.
3. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
4. Егоров К.С., Каськов С.И., Панова О.И. Влияние числа Рейнольдса на теплогидравлическую эффективность луночного рельефа // 2-я Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 22-25 сентября 2010 г.): тез. докл. М., 2010. С. 170.
5. Афанасьев В.Н., Бурцев С.А., Егоров К.С., Кулагин А.Ю. Цилиндр в пограничном слое плоской пластины // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 2 (83). С. 3-22.
6. Егоров К.С., Щеголев Н.Л. Исследование характеристик высококомпактных пластинчато-ребристых поверхностей теплообмена со смещенным ребром // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 4. С. 351-362. DOI: [10.7463/0612.0431788](https://doi.org/10.7463/0612.0431788)
7. Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Effect of Net Structures on Wall-Free Non-Stationary Air Heat Vortices // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 64. P. 817-828. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.008](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.008)
8. ОСТ 5.8794-88. Радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов. Конструкция, размеры и тепловые характеристики. Введен 1989-01-01. М.: Изд-во Госстандарт, 1988. 96 с.
9. Скрипников Ю.Ф. Радиаторы для полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973. 480 с.
10. ГОСТ 8.586.1-2005 (ISO 5167-1:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования. Введен 2007-01-01. М.: Стандартиформ, 2006. 72 с.
11. ГОСТ 8.586.2-2005 (ISO 5167-1:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования. Введен 2007-01-01. М.: Стандартиформ, 2006. 43 с.
12. ГОСТ 8.586.5-2005. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных

- сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений. Введен 2007-01-01. М.: Стандартиформ, 2006. 143 с.
13. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 488 с.
14. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
15. РМГ 43-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Применение “Руководства по выражению неопределенности измерений”. Введены 2001-06-01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 20 с.

Research of Thermo-Hydraulic Pin-Type Radiator Efficiency for Electronic Device Cooling

K.S. Egorov^{1,*}, L.V. Stepanova¹

[*blackbird05@mail.ru](mailto:blackbird05@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: Nusselt number, Euler number, Reynolds number, amplification of heat transfer, efficiency of heat-transfer area

The paper presents research results of thermo-hydraulic efficiency of heat transfer surface of pin-type radiator. Such a surface comprises the vertical corridor-arranged pins with 4×4 mm square section and longitudinal and transverse pitch of 8mm.

In the experiments a Reynolds number was changed from 9 000 to 14 000. Test stand was developed and constructed to conduct experiments aimed at obtaining the thermo-hydraulic characteristics of a pin-type radiator. The characteristics were obtained by a standard way as a ratio of Nusselt and Euler numbers depending upon Reynolds number. Reynolds number was calculated using the channel equivalent diameter, average combustion speed. The determinative temperature to calculate thermo- physical air parameters is the average mass temperature in a channel.

The thermo-hydraulic efficiency of surface was evaluated by the ratio of Nusselt number to Euler number referred to original (smooth) surface. To compare the results the original (smooth) surface is given the gas turbulent flow in the inner pipe at the stabilized site at $Re=idem$.

The experiments showed that the relative Nusselt number for the surface under consideration equals approximately 1.0 and the relative Euler number equals 3.0. Hence the surface thermo-hydraulic efficiency is low as the heat transfer corresponds to the original (smooth) surface, the surface resistance being about 3 times higher than that of the original (smooth) surface.

To increase thermo-hydraulic efficiency of the given heat transfer surface there is a proposal to redesign surface in such way that it could provide a 5-10 times increasing longitudinal pitch or instead of using pins make the channels along the flow current smooth.

References

1. Arbekov A.N., Surovtsev I.G., Dermer P.B. Efficiency of Heat Transfer in Recuperative Heat Exchangers with HighSpeed Gas Flows at Low Prandtl Numbers. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 3, pp. 449-454. DOI: [10.1134/S0018151X14030031](https://doi.org/10.1134/S0018151X14030031)

2. Khalatov A.A. *Teploobmen i gidrodinamika okolo poverkhnostnykh uglublenii (lunok)* [Heat transfer and hydrodynamics near surface dimples]. Kiev, ITTF NANU Publ., 2005. 59 p. (in Russian).
3. Kalinin E.K., Dreitser G.A., Yarkho S.A. *Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh* [Amplification of heat transfer in channels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 208 p. (in Russian).
4. Egorov K.S., Kas'kov S.I., Panova O.I. Reynolds number effect on the heat hydraulic efficiency of dimpled relief. *2-ya Vserossiiskaya konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov "Budushchee mashinostroeniya Rossii": tez. dokl.* [Abstracts of the 2nd National Conference of Young Scientists and Specialists "The Future of Russian Machine Building"], Moscow, September 22-25, 2010. Moscow, 2010, p. 170. (in Russian).
5. Afanas'ev V.N., Burtsev S.A., Egorov K.S., Kulagin A.Yu. Cylinder in Boundary Layer of Flat Plate. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, no. 2, pp. 3-22. (in Russian).
6. Egorov K.S., Shchegolev N.L. Investigation of characteristics of high-compact plate-fin heat-exchange surfaces with shifted fin. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 4, pp. 351-362. DOI: [10.7463/0612.0431788](https://doi.org/10.7463/0612.0431788) (in Russian).
7. Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Effect of Net Structures on Wall-Free Non-Stationary Air Heat Vortices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 64, pp. 817-828. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.008](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.008)
8. OST 5.8794-88. *Radiatoriy okhlazhdeniya poluprovodnikovyykh priborov. Konstruktsiya, razmery i teplovye kharakteristiki* [Industry Standard 5.8794-88. Heatsinks of semiconductor devices. Construction, dimensions and heat characteristics. Moscow, Gosstandart Publ., 1988. 96 p. (in Russian).
9. Skripnikov Yu.F. *Radiatoriy dlya poluprovodnikovyykh priborov* [Heatsinks for semiconductor devices]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 480 p. (in Russian).
10. GOST 8.586.1-2005 (ISO 5167-1:2003). *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv. Chast' 1. Printsip metoda izmerenii i obshchie trebovaniya* [State Standard 8.586.1-2005 (ISO 5167-1:2003). Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. Part 1: General principles and requirements (MOD)]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 72 p. (in Russian).
11. GOST 8.586.2-2005 (ISO 5167-1:2003). *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv. Chast' 2. Diafragmy. Tekhnicheskie trebovaniya* [State Standard GOST 8.586.2-2005 (ISO 5167-1:2003). State system for ensuring the iniformity of meas-

- urements. Measurement of liquids and gases flow rate and quantity by means of orifice instruments. Part 2. Orifice plates. Technical requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 43 p. (in Russian).
12. *GOST 8.586.5-2005. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv. Chast' 5. Metodika vypolneniya izmerenii* [State Standard 8.586.5-2005. State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurements of liquids and gases flow rate and quantity by means of orifice instruments. Part 5. Measurement procedure]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 143 p. (in Russian).
 13. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transmission]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 488 p. (in Russian).
 14. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistances]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 672 p. (in Russian).
 15. *RMG 43-2001. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Primenenie "Rukovodstva po vyrazheniyu neopredelennosti izmerenii"* [Recommendation for Intergovernmental Standardization 43-2001. State system for ensuring the uniformity of measurements. Applying "Manual of express indeterminateness of measurements"]. Moscow, Standards Publishing House, 2002. 20 p. (in Russian).