

ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ТЕПЛООТДАЧЕ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ С ОСЕВЫМ РАЗРЕЗНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Лопатин А.А.^{*}, Николаева Д.В.^{**}, Габдуллина Р.А.^{***}

*Институт авиации, наземного транспорта и энергетики,
КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия*

^{} e-mail: aalopatin@kai.ru*

*^{**} e-mail: Dashulkakuku@mail.ru*

*^{***} e-mail: rozzy94@mail.ru*

Рассмотрены вопросы интенсификации теплоотдачи в системе охлаждения теплонагруженных элементов радиоэлектронного оборудования на основе разрезного оребрения. Приведены результаты сравнения математического и физического моделирования. Оценено влияние способа подвода тепла к разрезному оребрению. Представлена оптимизация рабочего участка. Произведен расчет пограничного слоя на поверхности осевого оребрения. Получены критериальные зависимости для расчета теплоотдачи исследуемого стенда.

Ключевые слова: системы охлаждения, разрезные ребра, теплообмен, интенсификация теплообмена, тепловой поток, расчет толщины пограничного слоя.

Введение

Вопросам охлаждения и термостабилизации теплонагруженных элементов радиоэлектронного оборудования в современной литературе уделяется достаточно много внимания, о чем свидетельствует количество статей и монографий по данной тематике. Современное радиоэлектронное и электросиловое оборудование характеризуется значительным тепловыделением, абсолютные значения которого могут достигать 300 Вт и более. Такие значения обусловлены, прежде всего, стремительным развитием радиоэлектроники и микроиндустрии, способствующим увеличению производительности и одновременной миниатюризации микрочипов и иных элементов современного электрооборудования.

Кроме того, тепловыделение является одним из основных причин нестабильной работы радиоэлектронного оборудования. Среди основных факторов, оказывающих максимальное деструктивное воздействие, — повышенная температура элементов. Поэтому необходим непрерывный отвод тепла от теплонагруженных элементов. В зависимости от конструкции и формы охлаждаемых компонентов применяются различные решения для организации непрерывного теплоотвода. Некоторые проблемы от-

вода больших тепловых потоков от элементов промышленного электронного оборудования рассмотрены в [1—3]. Правильный выбор типа системы охлаждения обеспечивает безотказную работу всех охлаждаемых компонентов устройства.

Вопросы интенсификации теплоотдачи в технических системах изложены в [4—10]. В [2, 9] представлены критериальные уравнения различных авторов для расчета числа Нуссельта при естественной конвекции. В [1, 10] описаны экспериментальные исследования интенсификации конвективного теплообмена в прямоугольных рассеченных каналах и в каналах с дискретными турбулизаторами. В исследованных рассеченных каналах реализуется процесс рациональной интенсификации конвективного теплообмена, надёжно управляемый изменением значений основных безразмерных геометрических параметров. В [7] для условий свободной конвекции получены обобщающие зависимости для дискретно-шероховатых каналов, исследованы режимы течения и механизмы интенсификации. В работах [11—14] авторы экспериментально исследовали один из параметров, характеризующих как качественно, так и количественно системы охлаждения, — термическое сопротивление.

Использование ребер приводит к увеличению значения коэффициента теплоотдачи в десятки раз. Такой способ интенсификации теплообмена подразумевает широкое разнообразие видов оребрения: продольное, поперечное, накатное, спиральное и многие другие [15, 16]. В [15] представлен анализ целесообразности использования различных видов оребрения с точки зрения агрегатного состояния теплоносителя. Выбор оптимального количества ребер представлен в [16].

В данной статье рассмотрен один из наименее изученных видов оребрения — разрезное оребрение. Эффективность данного вида оребрения заключается в регулярном срыве потока с кромки ребра при продольном движении теплоносителя, вследствие чего происходит систематическое разрушение образующегося пограничного слоя. Интенсификация теплоотдачи систем с разрезным оребрением также рассмотрена в [17–19].

Цель данной работы — исследовать эффективность разрезного оребрения в условиях естественной конвекции. В процессе исследования были поставлены следующие задачи:

- создание экспериментального стенда с участками разрезных и гладких ребер для выявления эффективности разрезания кромки ребра;
- проведение серии экспериментов с переменной мощностью подвода тепла;
- определение наиболее эффективной модели интенсификации теплоотдачи при варьировании угла раскрытия «лепестков» ребра;
- проведение визуализации течения для рассмотрения динамики образования пограничного слоя около ребра и определения характера движения теплоносителя в межреберном пространстве;
- расчет толщины пограничного слоя;
- получение критериальных зависимостей для расчета числа Нуссельта в описываемом процессе.

Экспериментальный стенд. Методика проведения эксперимента

Для проведения эксперимента по исследованию теплоотдачи был разработан стенд, схема которого представлена на рис. 1.

Для исследования эффективности предложенного способа интенсификации теплоотдачи был проведен сопоставительный анализ участков с гладкими и участков разрезными ребрами. Ребра выполнены из меди марки М1 и расположены концентрически. Влияние условий стесненности при попеременном опускании трубы кожуха на рабочий участок, а также оптимальный угол раскрытия «лепестков» ребер были определены эксперименталь-

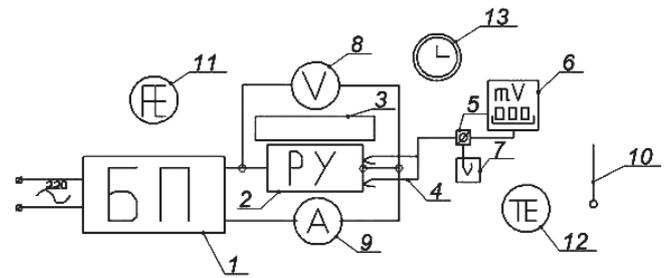


Рис. 1. Принципиальная схема стенда: 1 — саморегулируемый блок питания; 2 — рабочий участок; 3 — кожух; 4 — термопары хромель-копелевые; 5 — ручной переключатель входов, снабженный ручкой; 6 — милливольтметр; 7 — холодный спай хромель-копелевой термопары; 8 — мультиметр; 9 — амперметр; 10 — термометр лабораторный ртутный; 11 — анемометр; 12 — цифровой термометр и инфракрасный термометр; 13 — секундомер

ным путем, толщина пограничного слоя и критериальные уравнения — аналитическим. Влияние способа подвода тепла, определение оптимального количества рассечений кромки ребра и распределение температур по поверхности ребра рассчитаны численным методом.

Работа стенда осуществлялась следующим образом. Генератор тока и напряжения обеспечивал подвод тепла [20]. Диапазон тепловых нагрузок изменялся в области от 5 до 190 Вт. Исследуемый диапазон чисел Рэлея: $1,5 \cdot 10^6$ — $15 \cdot 10^6$. Мощность теплового потока определялась по показаниям амперметра и вольтметра. Сила тока изменялась в диапазоне от 0,25 до 2 А, с шагом 0,25 А, напряжение — от 13,6 до 94 В. На поверхности ребра были установлены две пары хромель-копелевых термопар для фиксирования значений температуры. Общее значение температуры ребра определялось как среднее арифметическое показаний термопар. Диапазон исследуемой мощности нагрева определялся начальным условием работы устройства — критической (максимально допустимой) температурой нагрева, которая составляет 80 °С. Высота поднятия кожуха над основанием рабочего участка изменяется от 10 до 100 мм (шаг 10 мм), угол раскрытия ребер варьируется от 10° до 60°.

Обработка экспериментальных данных

В качестве характерного размера была выбрана высота ребра рабочего участка. Определяющими температурами приняты температура окружающего воздуха и значение среднего температурного напора. Критериальная зависимость имеет следующий вид:

$$Nu = cRa^m(H/h)^n(a/2L)^k, \tag{1}$$

где c — произвольный безразмерный коэффициент; Ra — число Рэлея; H/h — параметр влияния высоты поднятия кожуха на процесс теплоотдачи; $a/2L$ — параметр влияния угла раскрытия ребер на процесс теплоотдачи; a — максимальное значение расстояния между ребрами; L — длина перпендикуляра, проведенного от точки рассечения ребер к линии a .

В ходе обработки полученных данных были определены основные погрешности измеряемых и рассчитываемых величин. Результаты обработки представлены в табл. 1.

На рис. 2 и 3 показаны результаты исследования теплоотдачи для гладких и разрезных ребер при

различных высотах поднятия кожуха (рис. 2), а также при разных углах раскрытия ребер (рис. 3).

Нулевой уровень высоты кожуха соответствует основанию рабочего участка. В качестве сравнения результатов экспериментов с данными известных авторов на рис. 2 и 3 нанесены линии расчета по формулам М.А. Михеева [17]

$$Nu = 0,46Ra^{0,25}; \tag{2}$$

и В.П. Исаченко [18] для свободной конвекции:

$$Nu = 0,63Ra^{0,25}. \tag{3}$$

Максимальные значения теплоотдачи достигаются при высоте поднятия кожуха на 40 мм (см. рис. 2) и угле раскрытия ребер 30° (см. рис. 3).

Таблица 1

Оценка погрешности результатов эксперимента

Наименование измеряемого параметра	Диапазон изменения измеряемого параметра	Абсолютная погрешность, Δ	Относительная погрешность δ, %		Доверительная вероятность P	
			δ _{min} , %	δ _{max} , %		
Сила тока I, А	0,25..2 А	±0,025 А	±1,25	±10	0,95	
Напряжение U, В	12,3..94,4 В	±0,01 В	±0,01	±0,081	0,95	
Напряжение на термопаре, установленной на ребре, U _{Iw} , мВ	1,31..5,48 мВ	±0,001 мВ	±0,018	±0,076	0,95	
Напряжение на термопаре, установленной в окружающем воздухе, U ₀ , мВ	1,31..1,98 мВ	±0,001 мВ	±0,05	±0,076	0,95	
Температура потока воздуха около ребра t _п , °С	20..80 °С	±0,1 °С	±0,125	±0,5	0,95	
Высота ребра l, м	0,1 м	±0,001 м	±1	±1	0,95	
Ширина ребра b, м	0,08 м	±0,001 м	±1,25	±1,25	0,95	
Высота поднятия кожуха h, м	0,01...0,1 м	±0,001 м	±1	±10	0,95	
Глубина рассечения «лепестков» ребер m, м	0,05 м	±0,001 м	±2	±2	0,95	
Высота кожуха H, м	0,5 м	±0,001 м	±0,2	±0,2	0,95	
Угол разгиба ребер, °	10°...60°	±0,5°	±0,83	±5	0,95	
Время, с	2,3...5,6 с	±0,05 с	±0,09	±2,17	0,95	
Скорость потока воздуха w _в на входе в канал кожуха, м/с	0,1...0,45 м/с	±0,01 м/с	±2,22	±10	0,95	
Тепловой поток Q, Вт	3...189 Вт	Δ _{min}	±1,24	±10,2	0,95	
		±0,308				Δ _{max}
Коэффициент теплоотдачи α, Вт/(м²·К)	7...35 Вт/(м²·К)	±0,2	±0,258	±0,737	±2,85	0,95

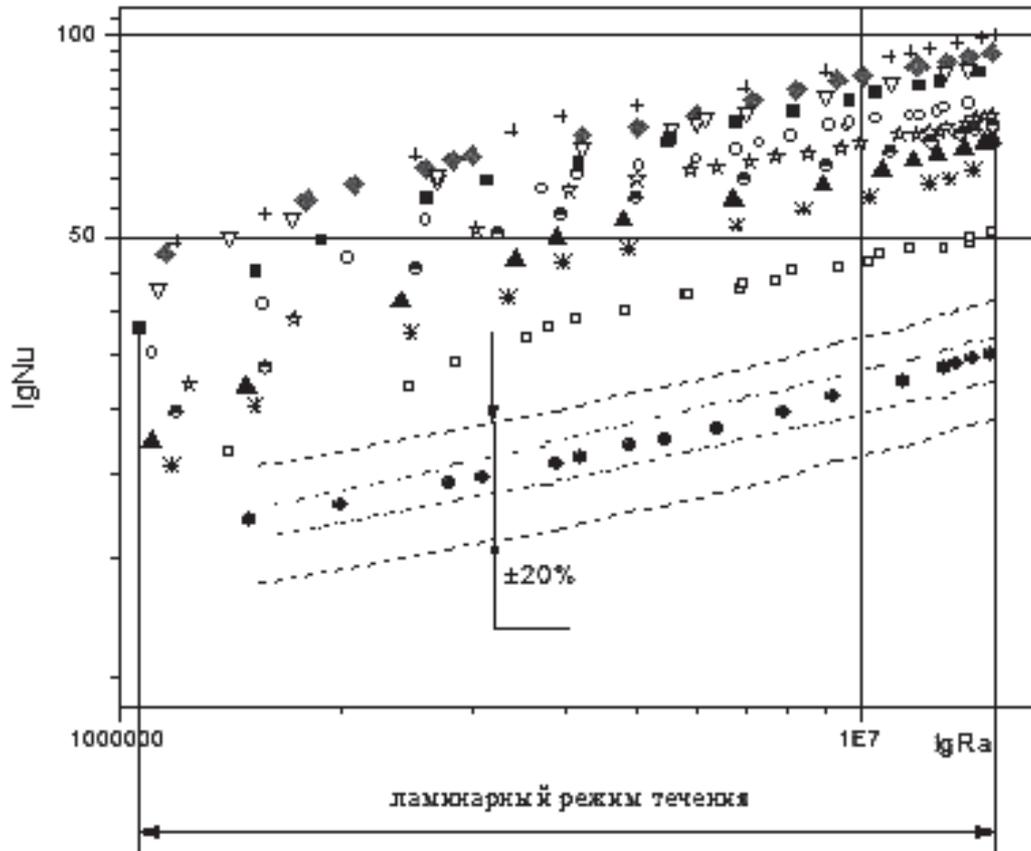


Рис. 2. Исследование конвективной теплоотдачи поверхностей. Высота поднятия кожуха h_f : \square — кожух отсутствует; $*$ — $h_f = 90$ мм; \blacktriangle — $h_f = 80$ мм; \odot — $h_f = 70$ мм; \star — $h_f = 60$ мм; \circ — $h_f = 50$ мм; $+$ — $h_f = 40$ мм; \blacklozenge — $h_f = 30$ мм; \blacksquare — $h_f = 10$ мм; ∇ — $h_f = 20$ мм; \bullet — гладкое ребро.

Расчет по известным зависимостям: --- ф-ла М.А. Михеева, - - - ф-ла В.П. Исаченко

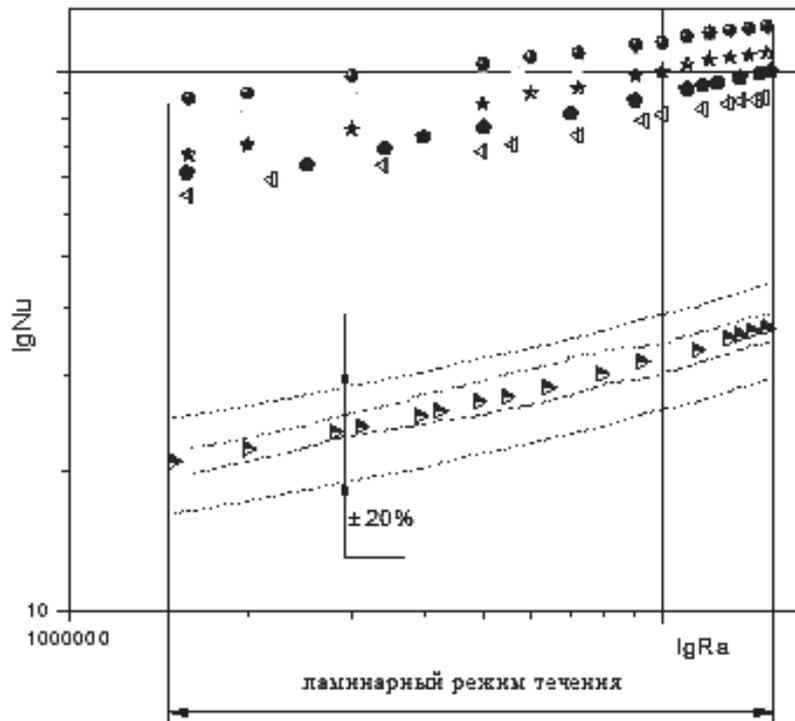


Рис. 3. Влияние угла разгиба ребер на теплоотдачу в сравнении с гладким ребром. Угол раскрытия ребер: \star — 10° , \blacksquare — 20° , \bullet — 30° , \blacklozenge — 45° , \blacktriangleleft — 60° , \blacktriangleright — гладкое ребро.

Расчет по известным зависимостям: --- ф-ла М.А. Михеева, - - - ф-ла В.П. Исаченко

Наличие данных максимумов объясняется образованием эффекта самотяги в полости стесняющего кожуха и размыканием пограничных слоев. При уменьшении высоты поднятия кожуха количество поступающего в область кожуха рабочего воздуха уменьшается, воздух около ребер нагревается. При увеличении высоты поднятия трубы кожуха уменьшается область ребер, находящихся внутри трубы, что ухудшает интенсивность процесса. При угле раскрытия ребер менее 30° происходит смыкание пограничных слоев, что значительно ухудшает процесс теплоотдачи. При углах раскрытия ребер на 45° и 60° уменьшается диаметр окружности основания рабочего участка, что негативно сказывается на общем процессе интенсификации.

Визуализация течения и исследование пограничного слоя

На рис. 4 представлены результаты визуализации движения теплоносителя. Визуализация течения позволяет оценить преимущества применения разрезного оребрения. Срыв потока с кромки ребра препятствует образованию пограничного слоя.

Проведенная визуализация позволяет оценить характер движения теплоносителя около разрезного и гладкого ребра, выявить необходимость дальнейшего исследования толщины пограничного слоя. Для решения данного вопроса была произведена серия экспериментов по определению падения температуры теплоносителя на перпендикулярном удалении от поверхности ребра. Аналитически, на основании данных по температурному напору и ко-

эффициентам теплоотдачи воздушной среды, было определено значение толщины пограничного слоя в различных точках ребра. Пример расчета пограничного слоя для разрезного ребра показан на рис. 5. На данном рисунке ось X представляет собой ось радиального удаления координаты от центра рабочего участка. Температура, при увеличении значений по оси X , уменьшается, поэтому ось ординат по температуре направлена противоположно. Представленный на рис. 5 график иллюстрирует рост толщины пограничного слоя по мере удаления от центра ребер рабочего участка. Это вызвано изменением значений температурного напора и скорости потока теплоносителя. На рис. 6 представлен график падения температуры воздуха около ребра и проиллюстрирован срыв пограничного слоя с кромки ребра.

Таким образом, разрезание и раскрытие «лепестков» ребра позволяют интенсифицировать теплоотдачу при продольном обтекании теплоносителя вследствие отсутствия непрерывного роста толщины пограничного слоя и возникновения дополнительной турбулизации потока.

В ходе проведения экспериментов по теплоотдаче около разрезного ребра в условиях естественной конвекции были получены следующие критериальные зависимости:

при угле раскрытия $\alpha < 30^\circ$:

$$12,5 \leq (H / h_{\text{п}}) \leq 50 :$$

$$\text{Nu} = 3,55\text{Ra}^{0,24} (H / h_{\text{п}})^{-0,05} (a / 2L)^{0,2} ; \quad (4)$$

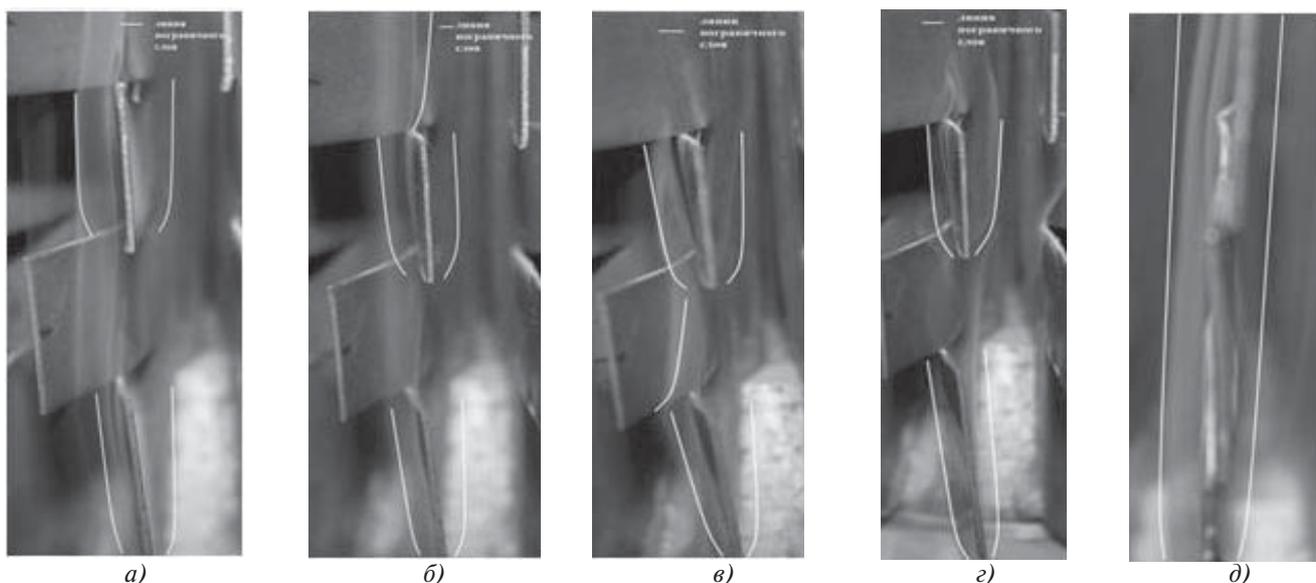


Рис. 4. Визуализация течения, пограничный слой разрезного ребра при различных значениях силы тока I , А и мощности нагрева ребер P , Вт: a — $I = 0,5$ А, $P = 13$ Вт; b — $I = 1$ А, $P = 48$ Вт; c — $I = 1,5$ А, $P = 106,5$ Вт; d — $I = 2$ А, $P = 188$ Вт; e — пограничный слой прямого гладкого ребра: $I = 2$ А, $P = 188$ Вт

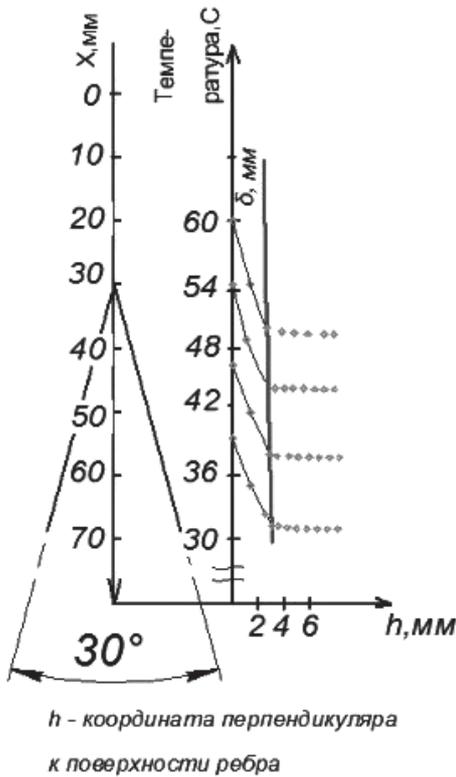


Рис. 5. Изменение толщины пограничного слоя по радиальной координате согласно виду сверху на рабочий участок разрезными ребрами, при мощности нагрева 188 Вт

$$5 \leq (H/h_{\text{п}}) < 12,5:$$

$$Nu = 0,84Ra^{0,24} (H/h_{\text{п}})^{0,5} (a/2L)^{0,2}; \quad (5)$$

при угле раскрытия $\alpha > 30^\circ$:

$$12,5 \leq (H/h_{\text{п}}) \leq 50:$$

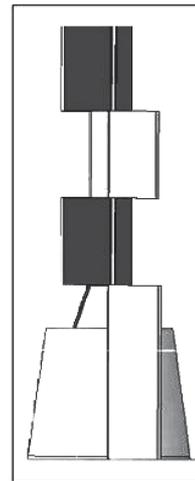
$$Nu = 1,12Ra^{0,24} (H/h_{\text{п}})^{-0,05} (a/2L)^{-0,7}; \quad (6)$$

$$5 \leq (H/h_{\text{п}}) < 12,5:$$

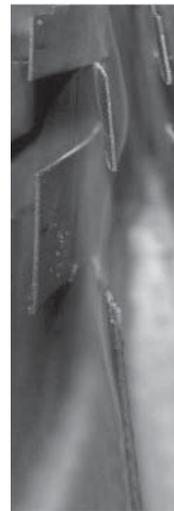
$$Nu = 0,26Ra^{0,24} (H/h_{\text{п}})^{0,5} (a/2L)^{-0,7}, \quad (7)$$

где H — общая высота кожуха; $h_{\text{п}}$ — высота поднятия кожуха.

Расчет по данным зависимостям учитывает влияние стесненности условий, вызванной интенсивным движением теплоносителя в области трубы кожуха, а также влияние угла раскрытия «лепестков» ребер на теплоотдачу. Разные показатели степени параметров $H/h_{\text{п}}$ и $a/2L$ обусловлены наличием двух экстремумов: по высоте поднятия кожуха $H/h_{\text{п}} = 12,5$ (высота поднятия кожуха над уровнем



а)



б)

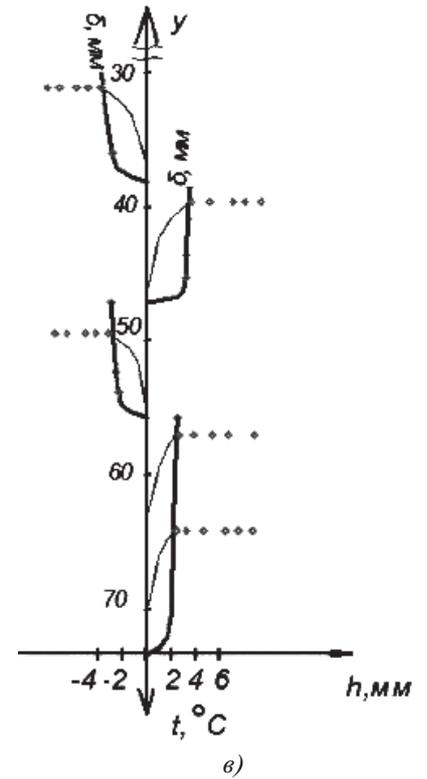


Рис. 6. Изменение температуры воздуха около разрезного ребра согласно виду спереди на рабочий участок, при мощности нагрева 188 Вт: а — чертёж; б — визуализация; в — расчет

нижнего основания рабочего участка 40 мм) и по углу раскрытия ребер на 30° .

Выводы

На основе анализа литературных источников и с учетом результатов, полученных в экспериментальных исследованиях, установлено, что с точки зрения практической применимости осевого разрезного оребрения существует ряд особенностей, связанных, прежде всего, с тем, что «лепестки», полученные в результате рассечения теплообменной поверхности, могут рассматриваться как самостоятельные ребра. Представлены результаты исследования интенсификации теплоотдачи в условиях естественной конвекции с использованием разрезных ребер. Показана эффективность использования разрезного оребрения, в ходе эксперимента выявлены наиболее оптимальные геометрические параметры рабочего участка. Выполнена визуализация процесса теплоотдачи. Произведен расчет толщины пограничного слоя около разрезного ребра. Получены

критериальные зависимости для расчета теплоотдачи систем с осевым разрезным оребрением. Перспективной применения результатов данного исследования является верификация экспериментальных данных в программах численного моделирования.

Библиографический список

1. *Письменный Е.Н., Эпик Э.Я., Баранюк А.В., Терех А.М., Бурлей В.Д.* Структура потока в полукрытых плоских каналах с разрезными стенками элементов охлаждения РЭА // *Промышленная теплотехника*. 2007. Т. 29. № 4. С. 45-52.
2. *Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Бурлей В.Д., Васильев А.Ф., Ежова В.В.* Обобщение экспериментальных данных по аэродинамическому сопротивлению продольно-омываемых плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением // *Энергетика: экономика, технологии, экология*. 2006. №1. С. 97-101.
3. *Fabbri M., Dhir V.K.* Optimized Heat Transfer for High Power Electronic Cooling Using Arrays of Microjets // *Journal of Heat Transfer*. 2005. Vol. 127. No. 7, pp. 760-769. DOI: 10.1115/1.1924624
4. *Васильев В.Я.* Рациональная интенсификация конвективного теплообмена рассечением длинных гладких каналов // *Вестник Московского авиационного института*. 2010. Т. 17. №3. С. 143-152.
5. *Попов И.А.* Гидродинамика и теплообмен внешних и внутренних свободноконвективных вертикальных течений с интенсификацией. Интенсификация теплообмена: Монография / Под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. — Казань: Центр инновационных технологий, 2007. — 326 с.
6. *Дрейцер Г.А., Лобанов И.Е.* Предельная интенсификация теплообмена в трубах за счет искусственной турбулизации потока для газообразных теплоносителей с переменными теплофизическими свойствами // *Вестник Московского авиационного института*. 2005. Т. 12. № 3. С. 18-25.
7. *Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Усенков Р.А.* Теплоотдача свободноконвективных течений при наличии поверхностных интенсификаторов // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2003. № 3. С. 29-32.
8. *Baldwin C.S., Bhavnani S.H., Jaeger R.C.* Toward optimizing enhanced surfaces for passive immersion cooled heat sinks // *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. 2000. Vol. 23. No. 1, pp. 70-79. DOI: 10.1109/6144.833044
9. *Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И.* Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: Монография / Под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. — Казань: Центр инновационных технологий, 2009. — 531 с.
10. *Васильев В.Я.* Эффективность процесса рациональной интенсификации конвективного теплообмена в каналах с дискретными турбулизаторами // *Вестник Московского авиационного института*. 2010. Т. 17. № 3. С. 153-162.
11. *Кикнадзе Г.И., Олейников В.Г.* Самоорганизация смерчеобразных вихревых структур в потоках газов и жидкостей и интенсификация тепло- и массообмена. — Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1990. — 45 с.
12. *Афанасьев В.Н., Леонтьев А.И., Чудновский Я.П.* Теплообмен и трение на поверхностях, профилированных сферическими углублениями. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990. — 118 с.
13. *Гачечиладзе И.А., Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К.* и др. Теплообмен при самоорганизации смерчеобразных структур // *Труды Минского международного форума. Проблемные доклады. Секция 1-2. Минск: Наука и техника*, 1988. С. 83-85.
14. *Александров А.А., Горелов Г.М., Данильченко В.П., Резник В.Е.* Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при обтекании поверхностей с развитой шероховатостью в виде сферических углублений // *Промышленная теплотехника*. 1989. Т. 11. № 6. С. 57-61.
15. *Фраас А., Оцисик М.* Расчет и конструирование теплообменников: Пер. с английского. — М.: Атомиздат, 1971. — 328 с.
16. *Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В.* Теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом. — Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 1999. — 174 с.
17. *Письменный Е.Н.* Новые эффективные развитые поверхности теплообмена для решения задач энерго- и ресурсосбережения // *Промышленная теплотехника*. 2007. Т. 29. № 5. С. 7-16.
18. *Лопатин А.А.* Теплообмен и сопротивление в системах охлаждения электросилового оборудования с разрезным оребрением // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2013. № 2-1. С. 187-190.
19. *Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Рогачев В.А., Баранюк А.В., Терех А.М., Полупан Г.П., Карвахал М.И., Сильва Ф.С.* Тепловая эффективность поверхности с пластинчато-просеченным оребрением // *Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-4)*. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. Т. 6. С. 281-284.
20. *Лопатин А.А., Николаева Д.В.* Исследование возможностей разрезного оребрения в системах охлаждения радиоэлектронного оборудования // *Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-2015»*: Сборник докладов. Казань: Бриг, 2015. С. 586-592.

EXPERIMENTAL DATA GENERALIZATION ON HEAT TRANSFER IN COOLING SYSTEM WITH AXIAL SECTIONAL FINNING IN CONDITIONS OF FREE CONVECTION

Lopatin A.A.* , Nikolaeva D.V.** , Gabdullina R.A.***

*Institute of Aviation, Land Transport and Energy,
KNRTU-KAI, 10, K. Marx str., Kazan, 420111, Russia*

* e-mail: aalopatin@kai.ru

** e-mail: Dashulkakuku@mail.ru

*** e-mail: rozzy94@mail.ru

Abstract

At present, power electronic components with high heat release have been widely applied in various fields of modern industry. The main problem the developers of the element base are facing consists in creating cooling and thermal stabilization systems capable of removing heat fluxes of high density, while working in a wide range of ambient temperatures. When creating such systems, it is necessary, alongside with the thermal ones, to account for the mass-size characteristics of the device as a whole. Thus, much depends on the heat transfer intensification method selection.

Quite enough attention is paid in modern literature to the issues of radio electronic equipment thermally loaded elements, as evidenced by a significant number of articles and monographs on this topic. Heat release is one of the main causes of the unstable operation of radio electronic equipment. Among the basic factors exerting maximum destructive effect, the increased temperature of the elements is one of the main ones. Thus, the devices operation in the field of the radio electronic equipment is closely associated with heat removal from the thermally loaded components. Depending on the structure and shape of the cooled components, various solutions are employed for organizing continuous heat removal.

Certain problems of large heat fluxes removing in the elements of industrial electronic equipment were considered in [1-3]. The correct choice of the cooling system type ensures trouble-free operation of all cooled components of the device.

A considerable amount of publications in modern scientific publications, both in Russia and abroad, attest to the considerable interest in the issues related to the heat transfer intensification for surfaces of various shapes and sizes as applied to cooling systems for electronic equipment. The issues of heat transfer intensification are set forth in [4-10]. In particular, the criterion equations of various authors for the Nusselt number computing for natural convection are presented in [2, 9]. Experimental studies of the convective heat transfer intensification in

rectangular dissected channels and in channels with discrete turbulators were described in [1, 10]. In the studied dissected channels, a process of rational convective heat transfer intensification was implemented, reliably controlled by changing the values of the basic dimensionless geometric parameters. The generalizing dependences for discrete-rough channels were obtained in [7] for free convection conditions, and flow modes and mechanisms of intensification were studied. In [11-14], the authors experimentally studied one of the parameters characterizing the cooling systems both qualitatively and quantitatively, namely, the thermal resistance.

The fins application as a method of heat transfer intensifying leads to the increase in the heat transfer coefficient value by a factor of tens. This method of intensification implies a wide variety of various types of fins, such as: longitudinal, transverse, rolling, spiral and many others [15,16]. In [15] the analysis of the expediency of employing different types of fins from the viewpoint of the coolant aggregate state is presented. The optimal edges number selection is presented in [16]. The heat transfer intensification of the systems with a cut-off fin is also considered in [17-20].

The purpose of this work consists in studying the efficiency of the split finning under conditions of natural convection. A test bench was developed for performing the experiment on the study of heat transfer. While the experiments on heat transfer near the cut edge under conditions of natural convection, criterion dependencies were obtained.

Relying on the analysis of literature sources and accounting for the results obtained while experimental studies, the authors established that from the viewpoint of the of axial split finning practical applicability, there are a number of specifics, associated primarily with the fact that the “petals”, obtained as a result of dissection of the heat exchange surface, can be considered as independent ribs. The studies of heat transfer intensification under conditions of natural convection with the cut ribs application were conducted and presented as a result of the work. While the experiment,

the effectiveness of the use of split finning is demonstrated, and the most optimal geometric parameters of the working area were revealed. The process of heat transfer was visualized. The boundary layer thickness near the cut edge was computed. Criterion dependencies for heat transfer computing of the systems with axial cut fins were obtained. The prospect of this study is of experimental data verification by numerical modeling programs.

Keywords: cooling systems, split fins, heat exchange, heat exchange intensification, heat flow, boundary layer thickness computing.

References

1. Pis'mennyi E.N., Epik E.Ya., Baranyuk A.V., Terekh A.M., Burlei V.D. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2007, vol. 29, no. 4, pp. 45-52.
2. Pis'mennyi E.N., Rogachev V.A., Burlei V.D., Vasil'ev A.F., Ezhova V.V. *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, 2006, no. 1, pp. 97-101.
3. Fabbri M., Dhir V. K. Optimized Heat Transfer for High Power Electronic Cooling Using Arrays of Microjets. *Journal of Heat Transfer*, 2005, vol. 127, no. 7, pp. 760-769. DOI: 10.1115/1.1924624
4. Vasil'ev V.Ya. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 143-152.
5. Popov I.A. *Gidrodinamika i teploobmen vneshnikh i vnutrennikh svobodnokonvektivnykh vertikal'nykh techenii s intensifikatsiei. Intensifikatsiya teploobmena* (Hydrodynamics and heat exchange of external and internal free-convective vertical flows with intensification. Heat transfer intensification), Kazan, Tsentr innovatsionnykh tekhnologii, 2007, 326 p.
6. Dreitser G.A., Lobanov I.E. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2005, vol. 12, no. 3, pp. 18-25.
7. Gortyshov Yu.F., Popov I.A., Usenkov R.A. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2003, no. 3, pp. 29-32.
8. Baldwin C.S., Bhavnani S.H., Jaeger R.C. Toward optimizing enhanced surfaces for passive immersion cooled heat sinks. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2000, vol. 23, no. 1, pp. 70-79. DOI: 10.1109/6144.833044
9. Gortyshov Yu.F., Popov I.A., Olimp'ev V.V., Shchelchikov A.V., Kas'kov S.I. *Teplogidravlicheskaya effektivnost' perspektivnykh sposobov intensivatsii teplootdachi v kanalakh teploobmennogo oborudovaniya. Intensifikatsiya teploobmena* (Thermal-hydraulic efficiency of the perspective ways of heat transfer intensification in the heat transfer equipment channels. Heat transfer intensification), Kazan, Tsentr innovatsionnykh tekhnologii, 2009, 531 p.
10. Vasil'ev V.Ya. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 153-162.
11. Kiknadze G.I., Oleinikov V.G. *Samoorganizatsiya smercheobraznykh vikhrevykh struktur v potokakh gazov i zhidkostei i intensivatsiya teplo- i massoobmena* (Self-organization of tornado-like vortex structures in gas and liquid flows and heat and mass transfer intensification), Novosibirsk, Institut teplofiziki SO AN SSSR, 1990, 45 p.
12. Afanas'ev V.N., Leont'ev A.I., Chudnovskii Ya.P. *Teploobmen i trenie na poverkhnostyakh profilirovannykh sfericheskimi uglubleniyami* (Heat transfer and friction on surfaces profiled with spherical recesses), Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 1990, 118 p.
13. Gachechiladze I.A., Kiknadze G.I., Krasnov Yu.K. *Materialy Minskogo mezhdunarodnogo foruma. Problemye doklady. Sektsiya 1-2*. Minsk, Nauka i tekhnika, 1988, pp. 83-85.
14. Aleksandrov A.A., Gorelov G.M., Danil'chenko V.P., Reznik V.E. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 1989, vol. 11, no. 6, pp. 57-61.
15. Fraas A.P., Ozisik M.N. *Heat exchanger design*, New York, John Wiley & Sons, 1965, 379 p.
16. Gortyshov Yu.F., Olimp'ev V.V. *Teploobmennye apparaty s intensivatsirovannym teploobmenom* (Heat exchangers with intensified heat exchange), Kazan, Kazanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1999, 174 p.
17. Pis'mennyi E.N. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2007, vol. 29, no. 5, pp. 7-16.
18. Lopatin A.A. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2013, no. 2-1, pp. 187-190.
19. Pis'mennyi E.N., Burlei V.D., Rogachev V.A., Baranyuk A.V., Terekh A.M., Polupan G.P., Karvakhal M.I., Sil'va F.S. *Trudy Chetvertoi Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu (RNKT-4)*, Moscow, MEI, 2006, vol. 6, pp. 281-284.
20. Lopatin A.A., Nikolaeva D.V. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Problemy i perspektivy razvitiya aviatsii, nazemnogo transporta i energetiki ANTE-2015"*. *Sbornik dokladov*, Kazan, Brig, 2015, pp. 586-592.