

УДК 536.24

Оптимальные геометрические характеристики разрезного оребрения в свободно-конвективных системах охлаждения

Д. В. Николаева, А. А. Лопатин

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), Казань;

e-mail: Dashulkakuku@mail.ru

Поступила в редакцию 16.07.2018

Представлены результаты экспериментального исследования процесса теплоотдачи в условиях естественной конвекции поверхностей с разрезным оребрением. Представлена схема стенда и диапазон исследуемых величин. Приведены результаты экспериментальных исследований. Проведен анализ наиболее оптимальных, с точки зрения теплоотдачи, параметров работы устройства. Проведено сравнение эффективности теплоотдачи разрезного и гладкого ребра. Получены критериальные зависимости, описывающие процесс теплоотдачи в рассматриваемых условиях.

Ключевые слова: оребрение, теплоотдача, конвекция, интенсификация.

Введение

Интерес к исследованию вопросов интенсификации теплоотдачи в системах охлаждения современного оборудования обусловлен бурным развитием радиоэлектронного и электросилового оборудования и, как следствие, значительным ростом тепловыделения с единицы поверхности.

Очевидно, что существующие проблемы отвода тепловых потоков высокой плотности не могут быть разрешены с помощью некоего универсального метода охлаждения, так как у каждого теплонагруженного элемента существуют свои индивидуальные рабочие характеристики и параметры, обусловленные конструкцией и условиями эксплуатации оборудования, требованиями экологической и пожарной безопасности, особенностями электропитания и др. Так, в ситуации, когда необходимо обеспечить охлаждение токопроводящих элементов, например силовых диодов, транзисторов, источников ионизирующего излучения, преобразователей тока, как правило, возможно применение только воздушно-конвективных систем охлаждения, соответствующих требованиям электробезопасности. Во многом такие жесткие эксплуатационные характеристики связаны с конструктивными особенностями представленного электросилового оборудования.

Достаточно большое количество исследований в современной литературе посвящено охлаждению высокопроизводительного электронно-вычислительного оборудования с высокими значениями плотностей тепловых потоков. Некоторые проблемы отвода тепловых потоков высокой плотности в элементах промышленного электронного оборудования рассмотрены в [1–4]. В работе [3] для более интенсивного обеспечения процесса теплоотдачи используется сетчато-проволочное и пластинчато-просечное оребрение.

Одним из наиболее ярких примеров электросилового оборудования, нуждающегося в постоянном охлаждении, являются рентгеновские дефектоскопы непрерывного действия. Данный тип аппаратов составляет основу промышленного неразрушающего контроля и широко применяется при строительстве и эксплуатации газо-, нефте- и продуктопроводов, авиационной и ракетно-космической техники и др.

Одним из основных условий успешной работы рентгеновского дефектоскопа непрерывного действия является строгое соблюдение температурного режима, так как в случае локального перегрева источника ионизирующего излучения – трубки – возможно его физическое разрушение и, как следствие, выход аппарата из строя с последующим

дорогостоящим ремонтом. Для стеклянных рентгеновских трубок такой критической температурой является 80 °С.

В основном переносные дефектоскопы используются в полевых условиях. Исходя из этого, к ним предъявляются достаточно жесткие условия по надежности и массогабаритным характеристикам.

На рис. 1 представлены рентгеновские дефектоскопы непрерывного действия «Ратмир-190» фирмы «Тестрон» (Санкт-Петербург) и «Egesco» компании GE Inspection Technologies (Швейцария). Важной характеристикой таких аппаратов является рабочий цикл, представляющий собой время непрерывной работы, отнесенное к одному часу. Система охлаждения швейцарского аппарата «Egesco» обеспечивает бесперебойную работу в течении как минимум 60 минут, т. е. реализует рабочий цикл равный 1. Российский дефектоскоп по причине низкой эффективности охлаждения не может реализовать полный рабочий цикл, что является существенным недостатком по сравнению с зарубежными аналогами.

В современных переносных рентгеновских аппаратах непрерывного действия чаще всего применяется воздушное охлаждение на основе свободной и вынужденной конвекции. Эффективность таких систем в большей степени зависит от компоновочной схемы и материала радиатора. В настоящее время как в России, так и за рубежом выпускается достаточно много аппаратов непрерывного действия. Среди отечественных образцов можно выделить такие модели как Ратмир и Витязь.

В результате анализа современных литературных источников определены возможные компоновочные схемы размещения теплоотдающих поверхностей в системах воздушного охлаждения радиоэлектронного оборудования. Наиболее оптимальным с точки зрения минимизации гидравлического сопротивления конструкции в целом, а также максимального термического контакта, является осевое размещение ребер.

Оптимизация массогабаритных характеристик современных систем охлаждения и термостабилизации главным образом связана с интенсификацией процесса теплоотдачи. Одним из основных способов увеличения теплоотдачи является нанесение на теплообменные поверхности различных интенсификаторов. В современной тематической литературе достаточно большое внимание уделяется развитию поверхностей с помощью сфери-



Рис. 1. Рентгеновские аппараты «Ратмир-190» и «Egesco»

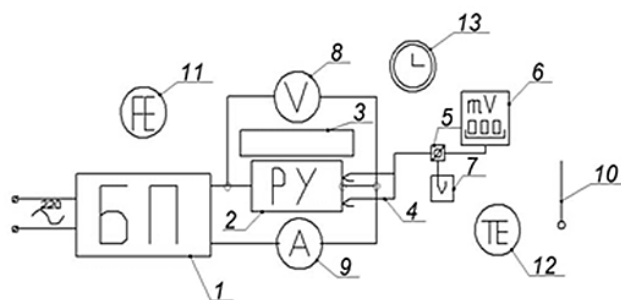


Рис. 2. Принципиальная схема стенда: 1 – саморегулируемый блок питания; 2 – рабочий участок; 3 – кожух; 4 – термопары хромель-копелевые; 5 – ручной переключатель входов, снабженный ручкой; 6 – милливольтметр; 7 – холодный спай хромель-копелевой термопары; 8 – мультиметр; 9 – амперметр; 10 – термометр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

ческих и цилиндрических лунок, выемок и выступов, нанесения на ребра накатки, перфораций, а также частичное либо полное рассечение. Рассмотренный в данной статье метод позволяет осуществить интенсификацию теплоотдачи не только за счет увеличения теплообменной поверхности, но и за счет срыва потока с кромки ребра.

В представленной работе рассматриваются вопросы интенсификации теплоотдачи в системах охлаждения с разрезным оребрением.

1. Методика исследования

Для проведения экспериментов был создан стенд, полностью имитирующий работу рентгеновского дефектоскопа непрерывного действия. Схема стенда представлена на рис. 2.

Экспериментальный стенд состоял из нагревателя 1, рабочего участка 2, попеременно опускающегося кожуха 3 и контрольно-измерительных приборов 4–13.

Рабочий участок – деталь экспериментального стенда с гладкими, либо разрезными ребрами.

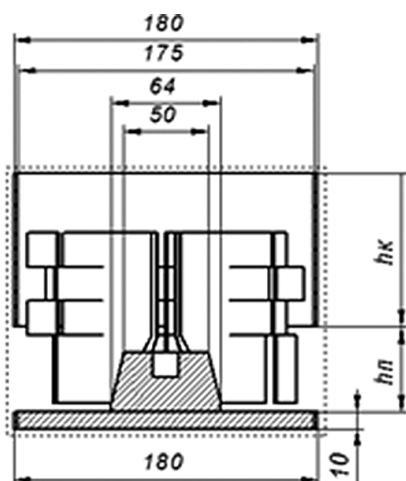


Рис. 3. Фронтальный разрез с указанием высот поднятия кожух

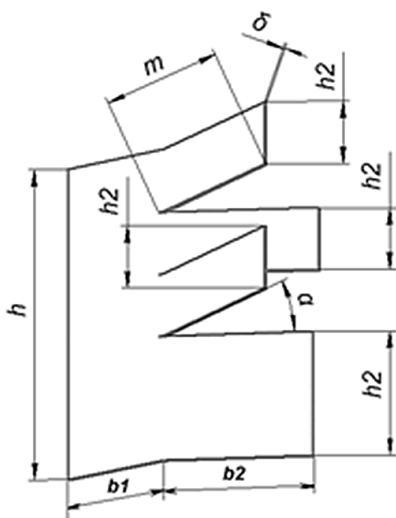


Рис. 4. Конструкция разрезного ребра: h – высота поверхности ребра, $b=(b_1+b_2)$ – ширина ребра, δ – толщина ребра, h_1, h_2 – высота лепестков, m – глубина их рассечения

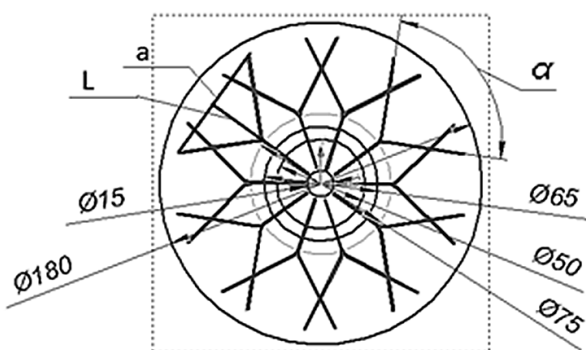


Рис. 5. Рабочий участок с разрезными ребрами, вид сверху. α – угол раскрытия ребер; L – максимальное значение расстояния между ребрами; L – перпендикуляр, проведенный от точки рассечения ребер к линии a

Кожух – полая труба, обеспечивающая стесненность условий процесса теплоотдачи около рабочего участка. В процессе проведения эксперимента кожух поднимался на определенную высоту.

Нулевая отметка высоты поднятия кожуха соответствовала уровню нижнего основания рабочего участка.

Было исследовано два принципиально разных рабочих участка – с гладкими и разрезными ребрами. В процессе работы была исследована теплоотдача около вертикальных пластин гладкого и разрезного ребра. Ребра были расположены осевым образом. Чертеж разреза установки показан на рис. 3. В качестве источника ионизирующего излучения использовался тепловой клин, обеспечивающий аутентичные режимные и геометрические параметры реального аппарата, в том числе излучаемую плотность теплового потока и температуру рабочей поверхности [5, 6]. Тепловые нагрузки варьировались в диапазоне $Q=5-180$ Вт с соответствующими числами Релея $Ra=1.5 \cdot 10^6-15 \cdot 10^6$. В ходе экспериментов оценивалось влияние стесненных условий на теплоотдачу.

На рис. 4 представлена поверхность разрезного медного ребра. Высота поверхности ребра $h=100$ мм, ширина $b=80$ мм, а толщина ребра $\delta=1$ мм. Высота лепестков и глубина их рассечения составляли соответственно $h_1=40$ мм, $h_2=20$ мм и $m=50$ мм. Рабочий участок состоял из 20 одинаковых ребер, расположенных под углом 18° друг к другу (рис. 5).

В ходе исследований было изучено влияние стесненности (высоты поднятия кожуха) на теплоотдачу. Для проведения каждой серии экспериментов кожух фиксировался на высоте в диапазоне от 10 до 100 мм с шагом 10 мм от уровня начала ребра. Кроме того, в экспериментах варьировался угол отгиба разрезной части ребер в диапазоне от 10° до 60° ($10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ и 60°). Общая площадь оребрения составила 1533 см^2 . На рис. 5 представлена схема расположения ребер с обозначением углов раскрытия разрезной части.

2. Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 6 в виде зависимости $Nu=f(Ra)$ и показывают влияние стесненности (высоты расположения кожуха) на теплоотдачу. Число Релея рассчитывалось по формуле:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\chi}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; L – характеристический размер области жидкости; ΔT – разность температур между стенками и жидкостью; ν – кинематическая вязкость жидкости; χ – температуропроводность жидкости; β – коэффициент теплового расширения жидкости, а число Нуссельта по формуле:

$$Nu = al/\lambda, \quad (2)$$

где l – характерный размер; λ – коэффициент теплопроводности среды; a – коэффициент теплоотдачи.

В качестве характерного размера была выбрана высота ребра рабочего участка. Определяющими температурами были температура окружающего воздуха и значение среднего температурного напора.

Как следует из представленного графика, числа Нуссельта монотонно возрастают во всем диапазоне чисел Релея с увеличением подвода тепла для нагрева рабочего участка. Для сравнения на графике нанесены данные по теплоотдаче системы с гладкими (неразрезными) ребрами. При этом во всем диапазоне чисел Релея коэффициент теплоотдачи a для гладкого оребрения от 1.5 до 3 раз ниже, чем для разрезного. Кроме того, на рис. 6 представлены результаты расчета для гладкого ребра в условиях свободной конвекции по формуле Михеева М. А. (3) и Исаченко В. П. (4) [7, 14]:

$$Nu = 0.5Ra^{0.25}, \quad (3)$$

$$Nu = 0.63Ra^{0.25}. \quad (4)$$

Отклонение экспериментальных данных авторов от представленных зависимостей не превышает 6%, что свидетельствует о достоверности полученных результатов. В соответствии с данными М. А. Михеева [7–9] можно утверждать, что исследуемая область параметров – число Релея в диапазоне от 10^6 до $1.5 \cdot 10^7$ – в условиях свободной конвекции около вертикальных пластин относится к ламинарному режиму течения.

Исследования проводились таким образом, что положение кожуха (вы-

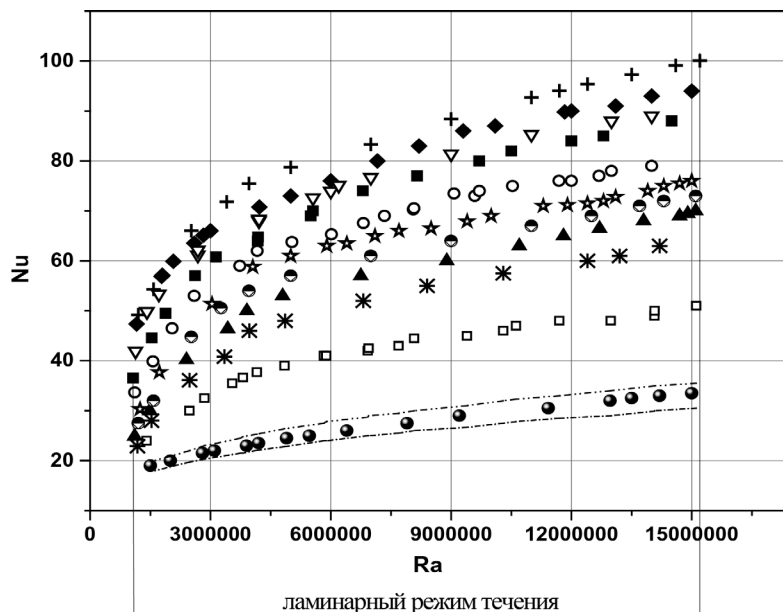


Рис. 6. Конвективная теплоотдача исследуемых поверхностей. Высота поднятия кожуха $h_{п}$: \square – кожух отсутствует, $*$ – 90 мм, \blacktriangle – 80 мм, \circ – 70 мм, \star – 60 мм, \circ – 50 мм, $+$ – 40 мм, \blacklozenge – 30 мм, ∇ – 20 мм, \blacksquare – 10 мм, \bullet – гладкое ребро, расчет по известным зависимостям: \cdots – формула Михеева М. А., $-\cdot-$ – формула Исаченко В. П.

сота его поднятия) в экспериментах варьировалась в диапазоне от 10 до 100 мм с шагом 10 мм. Наибольшая тепловая эффективность достигается при $h_{п}=40$ мм. На рис. 7 показана зависимость чисел Нуссельта от высоты поднятия вертикально расположенного кожуха при фиксированных числах Релея. Течение в вертикальных каналах с использованием различных интенсификато-

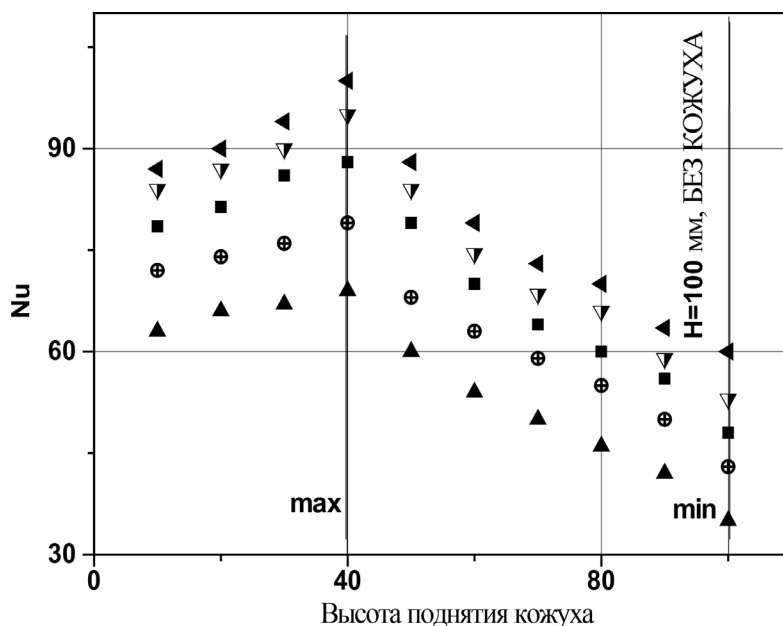


Рис. 7. Зависимость чисел Нуссельта от высоты поднятия кожуха. Значения чисел Релея: \blacktriangle – 3000000, \oplus – 6000000, \blacksquare – 9000000, ∇ – 12000000, \blacktriangleleft – 15000000

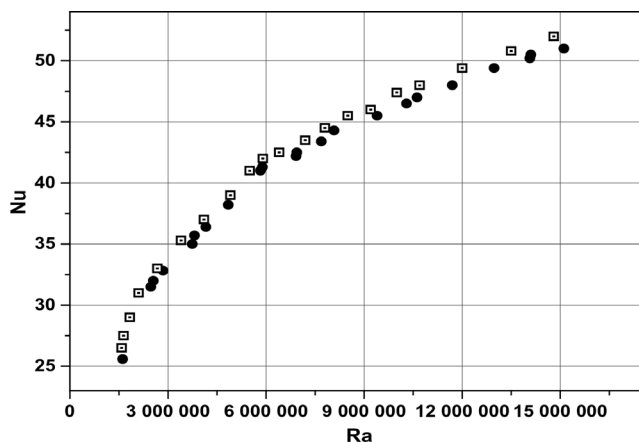


Рис. 8. Влияние стесненности канала при высоте поднятия кожуха 100 мм, ● – эксперимент без кожуха, □ – эксперимент при поднятии кожуха на высоту 100 мм

ров более подробно рассмотрено в [9, 10]. Представленные на графике зависимости имеют ярко выраженный максимум, соответствующий высоте поднятия кожуха 40 мм. Дальнейшее поднятие кожуха приводит к снижению теплоотдачи и достигает своего минимального значения при $h_n = 100$ мм. Интенсификация теплоотдачи в диапазоне h_n от 10 до 40 мм является в данном случае результатом совместного влияния двух факторов, а именно, формирования области подсоса воздуха из окружающего пространства через зазор, образующийся между основанием и кромкой кожуха, а также возникновения явления самотяги в пространстве между кожухом и оребрением. Дополнительный приток внешнего воздуха приводит к росту градиента температур и, как следствие, увеличению теплоотдачи. В определенный момент (в нашем случае при $h_n > 40$ мм) за счет снижения эффекта стесненности потока степень влияния самотяги в процессе теплоотдачи значительно уменьшается, что в свою очередь приводит к снижению интенсивности теплообменных процессов. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, представленными в [11].

Еще одним аспектом, рассмотренным в работе, был вопрос, касающийся определения возможного влияния на теплоотдачу положения

кожуха в верхней точке над рабочим участком, соответствующего $h_n = 100$ мм. Для определения возможного влияния была проведена серия сравнительных экспериментов с установленным в максимально верхнем положении кожухом и без него (рис. 8). Разница между экспериментальными данными не превышает 3%, что вполне укладывается в диапазон относительной погрешности измерений. В соответствии с результатами, представленными на рис. 8, можно сделать вывод об отсутствии влияния кожуха, установленного в положении $h_n = 100$ мм, на теплоотдачу во всем диапазоне чисел Рейля. Фактически, отсутствие влияние положения кожуха в максимально верхней точке на теплоотдачу может быть связано с вырождением эффекта самотяги, и такие эксперименты можно приравнять к исследованиям без внешнего кожуха.

Еще одним параметром, оказывающим значительное влияние на теплоотдачу в условиях свободной конвекции, является угол раскрытия разрезной части оребрения рабочего участка.

На рис. 9, 10 представлены зависимость числа Nu от Ra при различных углах раскрытия. Экспериментальные данные представлены при положении внешнего кожуха $h_n = 40$ мм, соответствующего максимальной теплоотдаче. Как следует из графика, максимальная теплоотдача достигается при угле раскрытия лепестков разрезного оребрения 30° . Данный максимум, по всей видимости, объясняется тем, что с увеличением угла раскрытия ребер (от 10°) происходит размыкание и срыв пограничных слоев и, как следствие, турбулизация потока движущегося теплоносителя. Описание динамики, смыкания и размыкания пограничных слоев в газовых теплоносителях, а также основные способы интенсификации теплоотдачи более подробно описаны в [7]. Однако дальнейшее увеличение угла раскрытия больше 30° приводит к снижению теплоотдачи. Это можно объяснить формированием замкнутого пространства вокруг нагревателя, которое значительно уменьшает рабочую область протекаемого процесса, резко ухудшая отвод нагретого воздуха. Фактически при углах больше 45°

Эффективность разрезного оребрения при различных углах раскрытия ребер

Средняя интенсификация теплоотдачи	Угол раскрытия				
	10°	20°	30°	45°	60°
α_p/α_T	в 2.4 раза	в 2.8 раза	в 3 раза	в 1.8 раза	в 1.6 раза

речь может идти о формировании области с ухудшенным теплообменом за счет взаимного влияния ребер и, как следствие, снижения температурного градиента между охлаждаемыми

поверхностями и теплоносителем. Для сравнения на рис. 9 нанесены экспериментальные данные по теплоотдаче при гладком оребрении. Для удобства в таблице представлены значения интенсификации теплоотдачи разрезного оребрения по сравнению с гладким в зависимости от угла раскрытия разрезной части.

3. Результаты рассмотрения подобных процессов

Оценку влияния различных факторов на теплоотдачу целесообразно проводить с использованием критериальных зависимостей. На основе анализа условий проведения экспериментов, а также полученных данных были выявлены основные влияющие факторы и выбран вид критериальной зависимости:

$$Nu = c \cdot Ra^m \cdot (H/h)^n \cdot (a/2L)^k, \quad (5)$$

где c – произвольный безразмерный коэффициент; H/h – параметр влияния высоты поднятия кожуха на процесс теплоотдачи; $a/2L$ – параметр влияния угла раскрытия ребер на процесс теплоотдачи; a – максимальное расстояние между ребрами; L – перпендикуляр, проведенный от точки рассечения ребер к линии a .

Как следует из рис. 6 и 9, расслоение экспериментальных данных происходит по двум геометрическим параметрам, а именно по высоте кожуха и углу раскрытия разрезного оребрения. Исходя из этого, были получены два параметрических числа подобия, учитывающих высоту кожуха H/h и безразмерный угол раскрытия разрезного оребрения $a/2L$. Экспериментальные данные охватывали диапазон чисел Релея от 10^6 до $1.5 \cdot 10^7$.

В результате анализа подобных процессов получены критериальные зависимости числа Нуссельта от числа Релея, безразмерной высоты кожуха, а также геометрического параметра подобия, учитывающего угол

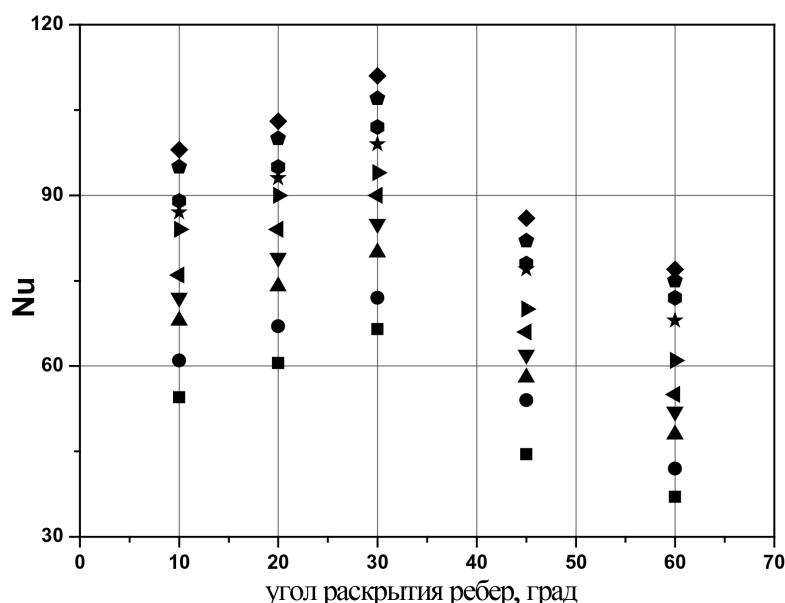


Рис. 9. Влияние угла раскрытия ребер на теплоотдачу. Высота поднятия кожуха $h_{п}$: ■ – кожух отсутствует, ● – 90 мм, ▲ – 80 мм, ▼ – 70 мм, ◀ – 60 мм, ▶ – 50 мм, ◆ – 40 мм, ⬠ – 30 мм, ⬡ – 20 мм, ★ – 10 мм

раскрытия разрезной части оребрения. Введение понятия критериальной зависимости для описания общего процесса теплоотдачи представлено в [8, 9, 12]. Схема обозначения параметров геометрического подобия показана на рис. 5. Критериальные зависимости представлены формулами (6)–(9).

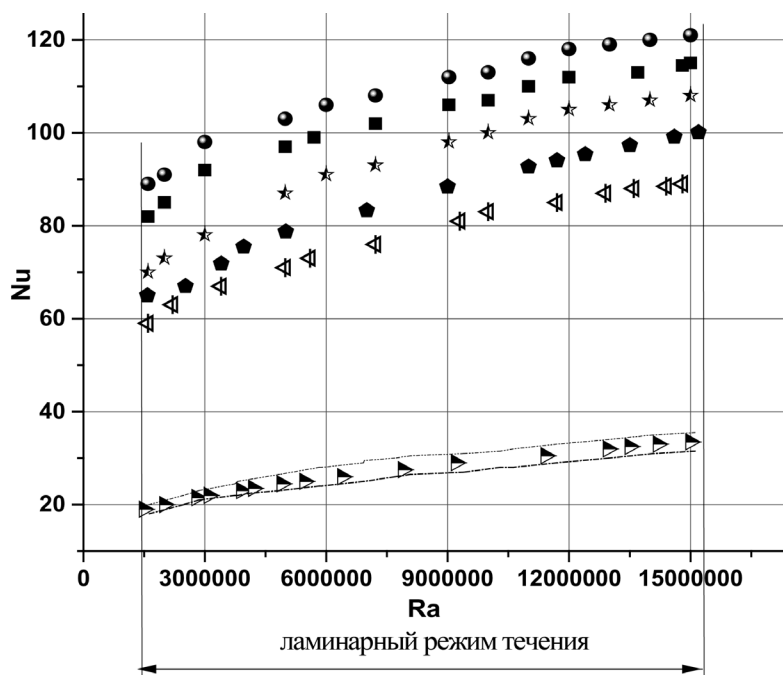


Рис. 10. Влияние угла раскрытия ребер на теплоотдачу в сравнении с гладким ребром. Угол раскрытия ребер: ★ – 10°, ■ – 20°, ● – 30°, ⬠ – 45°, ◀ – 60°, ▶ – гладкое ребро; расчет по известным зависимостям: ----- формула Михеева М. А., -.-.-.- формула Исаченко В. П.

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

если $12.5 \leq (H/h_n) \leq 50$, то (6)

$$Nu = 3.55 \cdot Ra^{0.24} \cdot (H/h)^{-0.05} \cdot (a/2L)^{0.2},$$

если $5 \leq (H/h_n) < 12.5$, то (7)

$$Nu = 0.84 \cdot Ra^{0.24} \cdot (H/h)^{0.5} \cdot (a/2L)^{0.2},$$

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

если $12.5 \leq (H/h_n) \leq 50$, то (8)

$$Nu = 1.12 \cdot Ra^{0.24} \cdot (H/h)^{-0.05} \cdot (a/2L)^{-0.7},$$

если $5 \leq (H/h_n) < 12.5$, то (9)

$$Nu = 0.26 \cdot Ra^{0.24} \cdot (H/h)^{-0.05} \cdot (a/2L)^{-0.7},$$

где H – общая высота кожуха; h_n – высота поднятия кожуха.

Представленные зависимости с достаточной точностью ($\pm 7\%$) описывают динамику достижения наибольшей эффективности теплоотдачи по параметрическим критериям подобия. Изменение показателей степеней в формулах указывает на перегиб и наличие максимума по исследуемому критерию. Уравнения (6) и (8) описывают теплоотдачу при высотах поднятия кожуха в диапазоне 10–40 мм, уравнения (7) и (9) – при высоте поднятия кожуха 40–100 мм. Показатель степени при числе Релея хорошо коррелируется с данными В. П. Исаченко, М. А. Михеева и др. [7, 13, 14].

Вывод

Представленные результаты экспериментального исследования теплоотдачи показывают эффективность использования разрезного оребрения в условиях естественной конвекции в диапазоне чисел Релея $1.5 \cdot 10^6$ – $15 \cdot 10^6$. Разрезание кромки ребра при осевом расположении ребер улучшает теплоотдачу в среднем в 2.4–3 раза и препятствует образованию пограничного слоя благодаря срыву потока. Положительным фактором увеличения среднего коэффициента теплоотдачи является создание стесненности условий. Наиболее оптимальными параметрами установки является угол раскрытия ребер рабочего участка 30° и высота поднятия кожуха 40 мм. Схема экспериментального стенда, представленная в данной работе, может быть использована для отвода тепловых потоков в процессе работы рентгеновских дефектоскопов, а также в системах охлаждения элементов радиоэлектронного оборудования.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a – кратчайшее расстояние между двумя точками соседних ребер;
 b – ширина ребра, мм;
 h – высота, мм;
 L – перпендикуляр из точки рассечения ребра к прямой a ;
 m – глубина нанесения оребрения, мм;
 T – температура, К;
 Q – тепловой поток, Вт;
 Nu – число Нуссельта;
 Ra – число Релея;
 α – коэффициент теплоотдачи; угол раскрытия ребер, град;
 δ – толщина ребра, мм.

Индексы

г – гладкое, неразрезное ребро;
к – кожух;
п – поднятие кожуха;
р – разрезное ребро;
1, 2 – лепестки ребра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Письменный Е. Н.** Новые эффективные развитые поверхности теплообмена для решения задач энерго- и ресурсосбережения // Промышленная теплотехника. 2007. Т. 29. № 5. С. 7–16.
2. **Семеняко А. В., Письменный Е. Н., Терех А. М., Руденко А. И., Мацюк Г. Н.** Оптимизация геометрических размеров оребрения плоско-овальной трубы // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2012. № 2 (10). С. 21–25.
3. **Письменный Е. Н., Бурлей В. Д., Баранюк А. В., Терех А. М., Полупан Г. П., Карвахал М. И., Сильва Ф. С.** Тепловая эффективность поверхности с пластинчато-просеченным оребрением // Труды 4-й РНКТ. Москва. 2006. Т. 6. С. 281–284.
4. **Письменный Е. Н., Эпик Э. Я., Баранюк А. В., Терех А. М., Бурлей В. Д.** Структура потока в полуоткрытых плоских каналах с разрезными стенками элементов охлаждения РЭА // Промышленная теплотехника. 2007. Т. 29. № 4. С. 45–52.
5. **Лопатин А. А.** Особенности теплообмена в вынужденно-конвективных системах охлаждения радиоэлектронного оборудования с частично разрезным оребрением // Энергетика Татарстана. 2012. № 3. С. 30–34.
6. **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.
7. **Михеев М. А., Михеева И. М.** Основы теплопередачи. М.: «Энергия», 1977. 344 с.
8. **Мухачев Г. А., Щукин В. К.** Термодинамика и теплопередача. М.: Высш. шк., 1991. 480 с.
9. **Попов И. А.** Гидродинамика и теплообмен внешних и внутренних свободноконвективных вертикальных течений с интенсификацией. Интенсификация теплообмена / Под общ. ред. Ю. Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2007. 326 с.

10. 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.
11. Дахин В. В., Цветков О. Б., Крестунов О. П., Семашко С. Е. Экспериментальное изучение свободно-конвективного охлаждения теплонагруженных поверхностей // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 2. С. 7–15.
12. Нейло Р. В., Туз В. Е. Теплообмен и гидродинамика одиночного горизонтального цилиндра в вертикальном щелевом адиабатном канале в условиях термогравитационной конвекции // Труды шестой Российской национальной конференции по теплообмену. 2014. С. 361–364.
13. Терехов В. В., Терехов В. И. Свободноконвективный теплообмен в дифференциально обогреваемой вертикальной полости при дополнительном подводе тепла через нижнюю стенку // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 1. С. 96–103.
14. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сухомел А. Г. Теплопередача. М.: «Энергия», 1975. 488 с.

Optimal geometric characteristics of slotted finning in freely convective cooling systems

D. V. Nikolaeva, A. A. Lopatin

*Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (KNITU-KAI), Kazan
e-mail: Dashulkakuku@mail.ru*

The article presents the results of the heat transfer study of a split rib under natural convection conditions. The purpose of this study is finding the effective ways to intensify heat transfer in the systems of electric power and radio-electronic equipment and determining optimal parameters of these devices operation. To achieve the goal, a number of tasks were formulated. These tasks include: developing of experimental test bench and methods for measurements conducting; performing a series of experiments. They also include the study of the initial air parameters and geometry of the rib, the effect of constraints stringency on the intensity of heat transfer; basic measurements errors determining; obtaining criterion dependencies for the heat transfer coefficient and Nusselt number computing. A series of experiments were conducted, which results allowed obtain an algorithm for determining and computing the main characteristics of the heat transfer process. The obtained experimental values deviation from the calculation performed according to the dependences of M. Mikheev and V. Isachenko dependencies did not exceed 6%. The conditions stringency factor, as well as of the optimal opening angle of the ribs determination, effect positively the process of heat transfer intensification. The heat transfer maximum was obtained at the casing rise of 40 mm within the range of 10 mm to 100 mm and the ribs opening angle of 30 degrees within the operating range of 10–60 degrees. Analysis of the flow under study in the area of laminar flow regime was performed in the course of this work. Criterion dependencies for heat transfer coefficient and Nusselt number computing were obtained. The heat transfer coefficient of the split rib is 2.3–4 times greater on the average, than this of the smooth rib.

Keywords: split rib, heat transfer, convection, intensification

REFERENCES

1. Pis'mennyj E. N. Novye ehffektivnye razvitye poverkhnosti teploobmena dlya resheniya zadach ehnergo- i resursoberezheniya [New effective developed heat exchange surfaces for solving energy and resource saving problems]. *Promyshlennaya teplotekhnika – Industrial heat engineering*, 2007, vol. 29, no. 5, pp. 7–16. In Russ.
2. Semenyako A. V., Pis'mennyj E. N., Terekh A. M., Rudenko A. I., Matsyuk G. N. Optimizatsiya geometricheskikh razmerov orebreniya plosko-oval'noj trubyy [Optimization of geometrical dimensions of finning of flat-oval tube]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii – Modern science: research, ideas, results, technologies*, 2012, no. 2 (10), pp.21–25. In Russ.
3. Pis'mennyj E. N., Burlej V. D., Baranyuk A. V., Terekh A. M., Polupan G. P., Karvahal M. I., Sil'va F. S. Teplovaya ehffektivnost' poverkhnosti s plastinchato-prosechennym orebreniem [Thermal efficiency of a surface with lamellar-sliced finning] *Trudy 4-j RNKT – Proceedings of the 4th National heat exchange conference*, Moscow, 2006, vol. 6, pp. 281–284. In Russ.
4. Pis'mennyj E. N., Epic E. Ya., Baranyuk A. V., Terekh A. M., Burley V. D. Struktura potoka v poluotkrytykh ploskikh kanalakh s razreznymi stenkami ehlementov okhlazhdeniya REA [Flow structure in semi-open planar channels with cut-off walls of REA cooling elements]. *Promyshlennaya teplotekhnika – Industrial heat engineering*, 2007, vol.29, no. 4, pp. 45–52. In Russ.
5. Lopatin A. A. Osobennosti teploobmena v vyzhdenno-konvektivnykh sistemakh okhlazhdeniya radioehlektronogo oborudovaniya s chastichno razreznym orebreniem [Features of heat exchange in forcedly-convective systems of cooling the radio-electronic equipment with partially cut-

- ting ribbing]. *Energetika Tatarstana—Power industry of Tatarstan*, 2012, no. 3, pp. 30–34. In Russ.
6. **Lopatin A.A.** Teploobmen i soprotivlenie v sistemakh okhlazhdeniya elektrosilovogo oborudovaniya s razreznym orebreniem [Heat transfer and resistance in cooling systems of electric power equipment with cutter fins]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva – Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*, 2013, no. 2–1, pp. 187–190. In Russ.
 7. **Mikheev M.A., Mikheeva I.M.** *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. Moscow: Energiya, 1977. 344 p. In Russ.
 8. **Mukhachev G.A., Schukin V.K.** *Termodinamika i teploperedacha* [Thermodynamics and heat transfer]. Moscow: Vysshaya shkola, 1991. 480 p. In Russ.
 9. **Popov I.A.** *Gidrodinamika i teploobmen vneshnikh i vnutrennikh svobodnokonvektivnykh vertikal'nykh techenij s intensivatsiej. Intensifikatsiya teploobmena. Pod obshch. red. Yu. F. Gortyshova* [Hydrodynamics and heat exchange of external and internal freely convective vertical flows with intensification. Heat transfer intensification. Gen. ed. Yu. F. Gortyshov]. Kazan: Center for Innovative Technologies, 2007. 326 p. In Russ.
 10. **Gortyshov Yu. F., Popov I.A., Usenkov R.A.** Teplootdacha svobodnokonvektivnykh techenij pri nalichii poverkhnostnykh intensivatorov [Heat transfer of free convection currents in the presence of surface intensifiers]. *Izvestiya Vysshih uchebnykh zavedenij. Aviacionnaya tekhnika – News of higher educational establishments. Aviation equipment*, 2003, no. 3, pp. 29–32. In Russ.
 11. **Dakhin V.V., Tsvetkov O.B., Krekturnov O.P., Semashko S.E.** Eksperimental'noe izuchenie svobodno-konvektivnogo okhlazhdeniya teplonagruzhennykh poverkhnostej [Experimental studying is free-convective cooling of the heat loaded surfaces]. *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protssesy i apparaty pishhevyykh proizvodstv – Scientific journal of NIU ITMO. Series: Processes and apparatuses of food production*, 2014, no. 2, pp. 7–15. In Russ.
 12. **Neilo R.V., Tuz V.E.** Teploobmen i gidrodinamika odinonchnogo gorizontalnogo tsilindra v vertikal'nom shhelevom adiabatnom kanale v usloviyakh termogravitatsionnoj konveksii [Heat exchange and hydrodynamics of a single horizontal cylinder in a vertical slit adiabatic channel under thermogravitational convection]. *Trudy shestoj Rossijskoj nacional'noj konferencii po teploobmenu* [Proceedings of the 6th Russian national conference on heat transfer], 2014, pp. 361–364. In Russ.
 13. **Terekhov V.V., Terekhov V.I.** Free-convective heat transfer within a differentially heated vertical plane during additional heat supply through a bottom wall. *High Temperature*, 2012, vol. 50, no. 1, pp. 91–97.
 14. **Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukhomel A.G.** *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energiya, 1975. 488 p. In Russ.