

Результатом операции «Вычитание» из заготовки детали «Блок цилиндра» компонента «Механическая обработка» является образование новых поверхностей после удаления слоя материала при фрезерной, сверлильной, расточной и других операциях. При необходимости, компонентов «Механическая обработка» может быть несколько (один учитывает токарную операцию, второй – сверлильную и т.д.).

К основным преимуществам методики следует отнести:

1. Уменьшение трудоемкости процесса построения модели детали, из-за его нелинейности;

2. Возможность параллельной работы нескольких конструкторов над одной деталью, определив исходную точку моделирования.

Преимущества при внедрении на машиностроительном предприятии:

1. Возможность использования координатно-измерительных машин для проверки реальных изделий, т.к. их трехмерные модели являются достоверными;

2. Наличие трёхмерной модели заготовки детали и компонента «Механическая обработка» существенно упростит работу инженера-технолога:

- посредством создания вспомогательных приливов, платиков или других элементов при моделировании заготовки детали, инженер-конструктор определяет комплект черновых технологических баз для первой операции механической обработки [5].

- применение трёхмерных моделей режущих инструментов (при наличии на предприятии электронной библиотеки) в процессе построения компонентов «Механическая обработка» обеспечивает предварительный выбор инструмента инженером-конструктором;

- компоненты «Механическая обработка» могут быть использованы в качестве основы для построения траекторий инструментов в САМ-системе.

3. Трёхмерную модель заготовки детали, учитывающую литейные уклоны, полость разъема и др., можно использовать для изготовления технологической оснастки (в том числе методом быстрого прототипирования).

Применение методики, рассмотренной в данной статье, положительно отразится на степени достоверности разрабатываемых трёхмерных моделей (особенно трёхмерных моделей деталей сложных конфигураций), что является актуальным на машиностроительных предприятиях, в конструкторских и технологических бюро.

#### Список литературы:

1. ГОСТ 2.102-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Виды и комплектность конструкторских документов. - Взамен ГОСТ 2.102-68; введ. 2014-06-01. - Москва: Стандартинформ, 2014. - 15 с.

2. ГОСТ 2.052-2015. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Электронная модель изделия. Общие положения. - Взамен ГОСТ 2.052-2006; введ. 2017-03-01. - Москва: Стандартинформ, 2016. - 14 с.

3. Ли Кунву. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / Кунву Ли. - СПб.: Питер, 2004. - 560 с.

4. Дипломное и курсовое проектирование механического оборудования и технологических комплексов предприятий строительных материалов, изделий и конструкций: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.С. Богданов, А.С. Ильин, В.Я. Дрюзер и др. - Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. — 784 с.

5. ГОСТ 21495-76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. - Москва: Изд-во стандартов, 1977. - 37 с.

UDC 66.045.126

### IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF HEAT TRANSFER OF PLATE-RIBBED HEAT EXCHANGER

*Kondrashov Nikita P.*

*graduate student, Moscow polytech*

*Lagutkin Mikhail G.*

*Dr. Sc., professor, Moscow polytech*

УДК 66.045.126

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПЛАСТИНЧАТО-РЕБРИСТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

*Кондрашов Н.П.*

*аспирант, «Московский политех»*

*Лагуткин М.Г.*

*д-р техн. наук, профессор, «Московский политех»*

*г. Москва, РФ*

**The relevance of the research** due to the need to improve the efficiency of plate-fin heat exchangers, since their prostrate is of a compact design (reaches 2000 m<sup>2</sup> of heat exchange surface per 1 m<sup>3</sup> of heat exchanger volume) high values of heat transfer coefficients, the ability to carry out the process of heat transfer between several heat carriers provided them with a fairly large distribution in various industries, primarily in cryogenic technology.

**The main aim** search using computer simulation of new, more efficient options for finning (nozzles) of plate-fin heat exchangers, which allow to increase the values of heat transfer coefficients with an insignificant increase in energy consumption for ensuring the movement of coolants. Substantiation using laboratory studies of the reliability of data on hydraulic resistances and heat transfer of a plate-fin heat exchanger obtained using computer simulation.

**Objects of researches** plate-fin heat exchanger, influence of the design of two finning options (nozzles), with a smooth continuous finning element and with finning in the form of an angular perforated tape, on the hydraulic resistance of a plate-fin heat exchanger and values of heat transfer coefficients.

**Methods of researches:** computer simulation of a heat exchange package of a plate-fin heat exchanger with two types of nozzles, with a smooth continuous finning element and with finned perforated corner tape. Determination of the values of hydraulic resistance coefficients and heat transfer coefficients for the two structures of the nozzles of a plate-fin heat exchanger under investigation. Conduct a full-scale experiment in a laboratory setting to confirm the reliability of the results obtained using computer simulation.

**Research results.** A computer model of a plate-fin heat exchanger is built. Using computer simulation, empirical dependencies are obtained for the calculation of hydraulic resistance coefficients and heat transfer coefficients for two types of nozzles under investigation. The results of computer simulation are confirmed by a full-scale experiment in a laboratory setup. The method of choosing the most rational profile of corrugated inserts is justified. It is shown that computer simulation can be used to determine the most rational profile of the nozzles of plate-fin heat exchangers, ensuring their high efficiency.

**Актуальность исследований** обусловлена необходимостью повышения эффективности пластинчато-ребристых теплообменников, так как их простота конструкции, компактность (достигает 2000 м<sup>2</sup> поверхности теплообмена на 1 м<sup>3</sup> объема теплообменника), высокие значения коэффициентов теплоотдачи, возможность проводить процесс теплопередачи между несколькими теплоносителями обеспечило им достаточно большое распространение в различных отраслях промышленности, в первую очередь в криогенной технике.

**Цель исследований:** поиск с помощью компьютерного моделирования новых более эффективных вариантов оребрения (насадок) пластинчато-ребристых теплообменников, позволяющих повысить значения коэффициентов теплоотдачи при незначительном увеличении энергозатрат на обеспечение движения теплоносителей. Обоснование с помощью лабораторных исследований достоверности данных по гидравлическим сопротивлениям и теплопередаче пластинчато-ребристого теплообменника, полученных с помощью компьютерного моделирования.

**Объекты исследований:** пластинчато-ребристый теплообменник, влияние конструкции двух вариантов оребрения (насадок), с гладким сплошным оребряющим элементом и с оребрением в виде угловой перфорированной ленты, на гидравлическое сопротивление пластинчато-ребристого теплообменника и значения коэффициентов теплоотдачи.

**Методы исследований:** компьютерное моделирование теплообменного пакета пластинчато-ребристого теплообменника с двумя видами насадок, с гладким сплошным оребряющим элементом и с оребрением в виде угловой перфорированной ленты. Определение значений коэффициентов гидравлического сопротивления и коэффициентов теплоотдачи для двух исследуемых конструкций насадок пластинчато-ребристого теплообменника. Проведение натурного эксперимента на лабораторной установке с целью подтверждения достоверности результатов, полученных с помощью компьютерного моделирования.

**Результаты исследований.** Построена компьютерная модель пластинчато-ребристого теплообменника. С помощью компьютерного моделирования получены эмпирические зависимости для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления и коэффициентов теплоотдачи для двух типов исследуемых насадок. Результаты компьютерного моделирования подтверждены натурным экспериментом на лабораторной установке. Обоснован метод выбора наиболее рационального профиля гофрированных насадок. Показано, что компьютерное моделирование может быть использовано для определения наиболее рационального профиля насадок пластинчато-ребристых теплообменников, обеспечивающих их высокую эффективность.

**Key words:** Plate-fin heat exchangers, nozzle, efficiency, heat transfer coefficients, hydraulic resistance, energy consumption, computer simulation.

**Ключевые слова:** Пластинчато-ребристые теплообменники, насадка, эффективность, коэффициенты теплоотдачи, гидравлическое сопротивление, энергозатраты, компьютерное моделирование.

### Введение

Простота конструкции и высокая эффективность пластинчато-ребристых теплообменников (ПРТ) позволила им сначала занять ведущее место на летательных аппаратах, а затем получить широкое распространение в других транспортных средствах – автомобилях, тракторах и др. Пластинчато-ребристые теплообменники так же часто используются в криогенной технике. В общем случае они

представляют собой набор плоских пластин, между которыми установлены гофрированные насадки. Подвод теплоносителей к соответствующим каналам осуществляется с помощью коллекторов.

Широкое распространение пластинчато-ребристые теплообменники получили благодаря своей компактности, достигающей 2000 м<sup>2</sup> поверхности теплообмена на 1 м<sup>3</sup> объема теплообменника, что

во много раз превышает компактность всех остальных видов теплообменников. В пластинчато-ребристых теплообменниках возможно одновременно в одном блоке проводить теплообмен не только от одного теплоносителя к другому, но и между четырьмя и более теплоносителями, что достигается соответствующей конструкцией коллекторов [1].

В одном и том же теплообменнике расстояние между пластинами, а также тип гофрированных насадок могут быть различны, что позволяет обеспечить необходимые коэффициенты теплоотдачи и гидравлические сопротивления при прохождении потоков через теплообменник в зависимости от расхода теплоносителей и их физико-химических свойств.

Современные пластинчато-ребристые теплообменники различны по своей форме и виду гофрированных насадок, образующих для прохода теплоносителя каналы того или иного профиля. Наиболее распространены насадки, профиль которых представлен в виде треугольника с острыми или закругленными углами, в виде трапеции или прямоугольника. Также встречаются ПРТ с круглыми и рассеченными каналами [2,3 и др.].

Анализ наиболее распространенных насадок показал, что большое влияние на эффективность процесса теплопередачи оказывают  $h$  – высота оребрения (насадки);  $t$  – шаг оребрения, для гофрированной поверхности – это расстояние между одинаковыми точками соседних гофров;  $N$  – количество ребер, приходящееся на один метр ширины пакета;  $h_p$  – шаг ребер, расстояние между двумя соседними ребрами;  $\delta_r$  – толщина ребра, толщина листового материала, из которого отштампована оребренная

поверхность;  $L$  – длина оребрения, полная длина оребрения в направлении движения потока, которая соответствует исследованному образцу теплообменной поверхности;  $l$  – длина турбулизатора оребрения, применяемая для рассеченных типов оребрений и описывающая длину любого рода единичной насечки, выполненной на оребрении в направлении движения теплоносителя

Введение перфораций или зазубренностей в ребрах увеличит эффективность теплопередачи, однако, такое введение также увеличит потери давления теплоносителей. Введение перфораций в ребрах также приводит к потере площади поверхности теплопередачи, приходящейся на единицу объема теплообменника.

В настоящее время актуальной проблемой является энерго- и ресурсосбережение. Для решения данной задачи в первую очередь необходимо создавать компактные, но в то же время и эффективные конструкции ПРТ.

Для упрощения подбора наиболее рационального по своим параметрам оребрения, чтобы ПРТ был высокоэффективным и недорогим, можно воспользоваться компьютерным моделированием.

Для исследования различных профилей гофрированных насадок (ребрения) строилась 3D модель пластинчато-ребристого теплообменника в программе SolidWorks.

Изначально, для проверки работы модели, были смоделированы насадки, которые используются в промышленности. Такие насадки показаны на рис. 1, где а – насадка с гладким сплошным оребряющим элементом; б – насадка с оребрением в виде угловой перфорированной ленты;

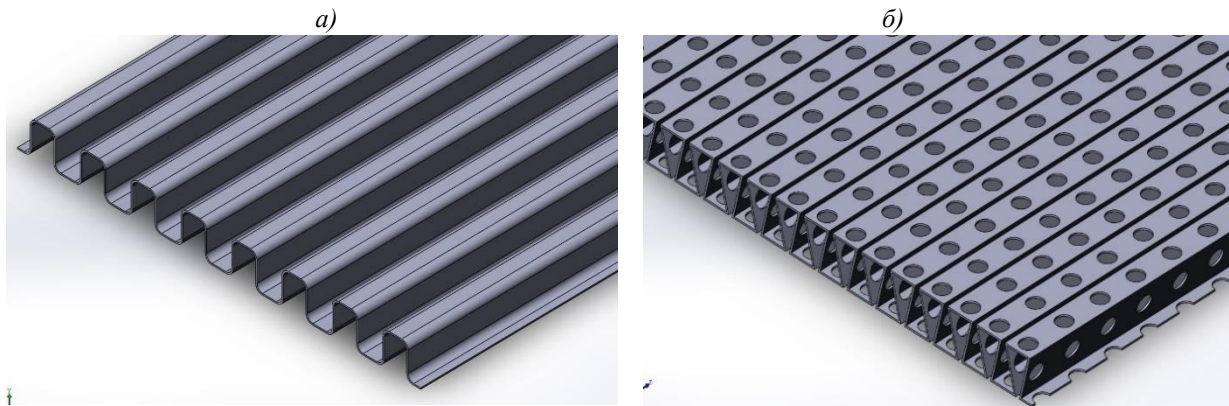


Рис. 1. Модель насадок ПРТ

Fig. 1. Model of a plate-fin heat exchanger

На рис. 2 показана модель теплообменного пакета ПРТ с двумя видами насадок с визуализацией тепловых потоков в каждом из каналов. В канал с гладкими оребряющими элементами подается теп-

лоноситель, в данном случае воздух, с температурой  $t=20^\circ\text{C}$ , а в канал с оребряющими элементами в виде гофрированной ленты воздух подается с  $t=70^\circ\text{C}$

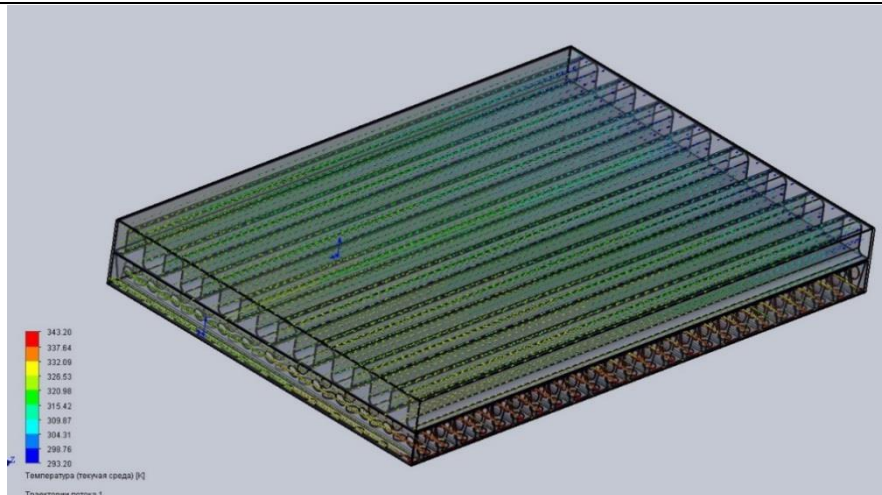


Рис. 2. Модель теплообменного пакета с двумя видами насадок  
 Fig. 2. The model of heat exchange package with two types of nozzles

Результаты компьютерного анализа представлены в виде зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega \cdot d_{\text{э}} \cdot \rho}{\mu} \quad (\text{рис.3})$$

и зависимости произведения критерия Стантона  $St = \frac{\alpha}{C_p \cdot \rho \cdot \omega}$  и Прандтля  $Pr^{2/3}$  ( $Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda}$ ) от критерия Рейнольдса

(рис.4), где  $\omega$  – скорость теплоносителей, м/с;  $d_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр канала, м;  $\rho$  – плотность теплоносителей при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  –

динамическая вязкость теплоносителей при средней температуре, Па·с;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $C_p$  – теплоемкость теплоносителей при средней температуре, Дж/кг;  $\lambda$  – теплопроводность теплоносителей при средней температуре, Вт/(м·°C).

Коэффициент гидравлического сопротивления для каналов рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot \omega^2} \cdot \frac{d_{\text{э}}}{L} \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – перепад статического давления в канале, Па;  $L$  – длина теплообменного канала, м;  $d_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр канала, м.

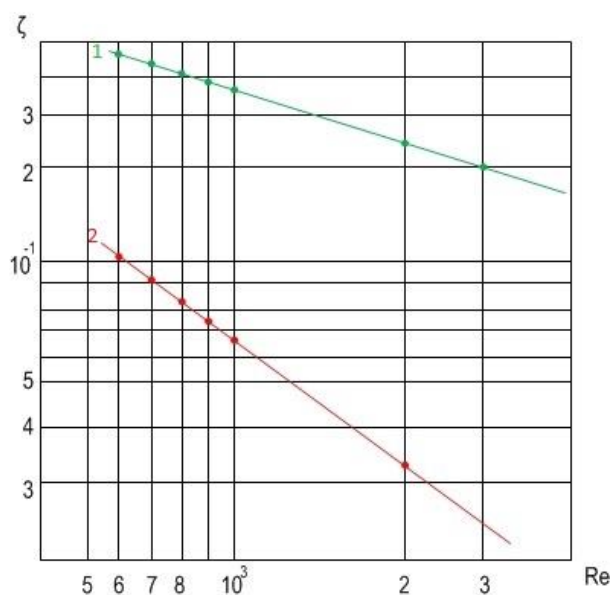


Рис. 3. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от критерия Рейнольдса, где 1 – насадка с ребристыми элементами в виде угловой перфорированной ленты, 2 – насадка с гладкими ребристыми элементами.

Fig. 3. The dependence of the coefficient of hydraulic resistance of the Reynolds criterion, where 1 is a nozzle with ribbed elements in the form of a corner perforated tape, 2 is a nozzle with smooth ribbed elements.

Так как в пластинчато-ребристом теплообменнике невозможно определить характерный размер канала, коэффициент теплоотдачи обычно определяют не из критерия Нуссельта, как в большинстве рекуперативных теплообменниках, а из критерия Стантона.

$$St = \frac{\alpha}{C_p \cdot \rho \cdot \omega}$$

Критерий Прандтля характеризует физико-химические свойства теплоносителя.

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda}$$

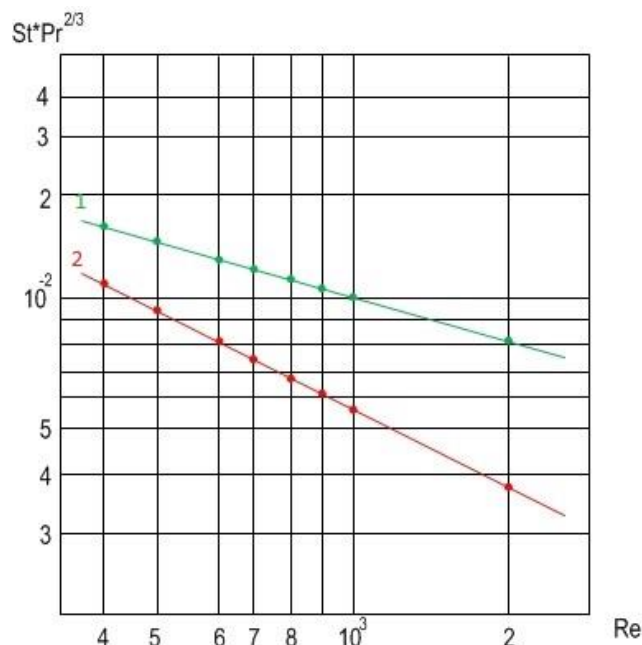


Рис. 4. Зависимость критерия Стантона от критерия Рейнольдса, где 1 – насадка с оребряющими элементами в виде угловой перфорированной ленты, 2 – насадка с гладкими оребряющими элементами.

Fig. 4. The dependence of the Stanton criterion on the Reynolds criterion, where 1 is a nozzle with ribbed elements in the form of a corner perforated tape, 2 is a nozzle with smooth ribbed elements.

Для подтверждения достоверности данных, полученных с помощью компьютерного моделирования, нами был проведен натурный эксперимент на лабораторной установке.

Экспериментальная установка ПРТ включает в себя теплообменный пакет, состоящий из гладких разделяющих пластин и расположенных между ними оребряющими элементами аналогичными анализированными при компьютерном моделировании.

Эксперимент проводится следующим образом:

Теплоноситель (воздух) из помещения последовательно проходит измерительное сопло, один из каналов оребряющих элементов, затем происходит нагрев воздуха с последующем прохождением через другой канал теплообменника, и вентилятором выбрасывается в атмосферу. В результате полученные значения легли на прямые, приведенные на рис. 3 и 4, что подтверждает возможность использования компьютерного моделирования для обоснованного выбора рационально профиля гофрированных насадок ПРТ.

Проанализировав графики, представленные на рис. 3 и 4, можно сделать вывод, что у насадки с

оребряющими элементами в виде угловой перфорированной ленты теплопередающая способность выше, чем у насадки с гладкими оребряющими элементами, но выше и гидравлическое сопротивление.

Сравнения тепловых поверхностей для оценки оребрения может проводиться по методу предложенному Е.В. Дубровским. [4] Сопоставление эффективности гофрированных насадок ПРТ можно проводить по трем критериям эффективности: по тепловому потоку  $K_Q$ , по мощности  $K_N$ , по площади  $K_F$ . Благодаря компьютерной модели, мы можем рассчитать коэффициенты гидравлического сопротивления и коэффициенты теплоотдачи ПРТ для соответствующей гофрированной насадки без проведения натурных экспериментов.

После проведения испытаний вышеуказанных насадок и анализа полученных данных, была проведена оценка эффективности оребрения насадки в виде угловой перфорированной ленты (насадка 2) по сравнению с насадкой с гладкими оребряющими элементами (насадка 1).

Результаты аппроксимируются с помощью метода наименьших квадратов зависимостями вида:

$$\text{Pr}^{2/3} St = C \cdot \text{Re}^m \quad (2)$$

$$\xi = B \cdot \text{Re}^n \quad (3)$$

Выбираем последовательно несколько значений  $\text{Re}_2$  для канала. Для конкретного примера  $\text{Re}_2$  был принят 500, 700, 1100, 1400, 2100. из условия равенства затрат мощности и поверхностей определяем значения числа  $\text{Re}_Q$ ,  $\text{Re}_N$ ,  $\text{Re}_F$

$$\text{Re}_{q1} = \sqrt{\frac{B}{64} \cdot \text{Re}_2^{n+3}} \quad (4)$$

$$\text{Re}_{N1} = \left[ \frac{C \cdot \text{Re}_2^{m+1}}{0.468} \right]^{2.5} \quad (5)$$

$$\text{Re}_{F1} = \left[ \frac{64 \cdot C \cdot \text{Re}_2^{m-n-2}}{0.468 \cdot B} \right]^{-5/8} \quad (6)$$

где  $C$ ,  $B$ ,  $m$ ,  $n$  – коэффициенты, полученные из графиков на рис. 3 и 4. Для прямой 1:  $C=0,368$ ,  $m=-0.5$ ,  $B=64$ ,  $n=-1$ ; для прямой 2:  $C=0.14$ ,  $m=-0.375$ ,  $B=20$ ,  $n=0.585$ . Получив значения  $\text{Re}_Q$ ,  $\text{Re}_N$ ,  $\text{Re}_F$  приступает к определению критериев эффективности от числа Рейнольдса

$$K_Q = \frac{C \cdot \text{Re}_2^{m+1}}{0.468 \cdot \text{Re}_{q1}^{0.4}} \quad (7)$$

$$K_N = \frac{B \cdot \text{Re}_2^{m+3}}{64 \cdot \text{Re}_{N1}^2} \quad (8)$$

$$K_F = \frac{0.468 \cdot \text{Re}_{F1}^{0.4}}{C \cdot \text{Re}_2^{m+1}} \quad (9)$$

Наилучшим режимом будет то значение числа  $\text{Re}$ , которому соответствует наибольшее значение  $K_Q$  или наименьшее значение  $K_N$  и  $K_F$

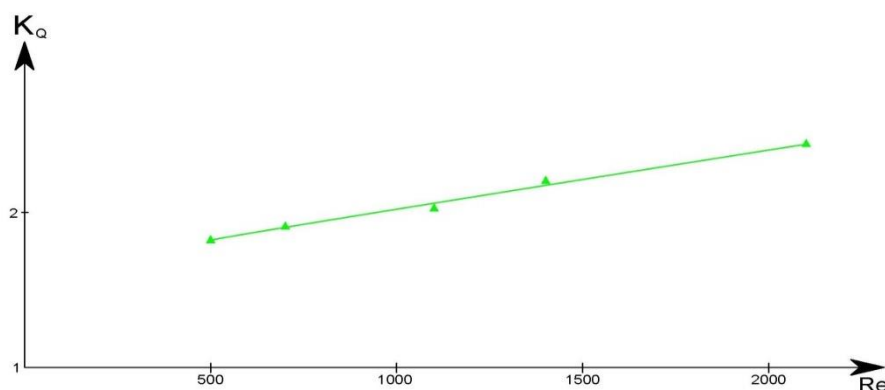


Рис. 5. Зависимость критерия эффективности по тепловому потоку от критерия Рейнольдса  
Fig. 5. The dependence of the efficiency criterion of the heat flux from the Reynolds criterion.

Для насадки с оребряющими элементами в виде угловой перфорированной ленты полученные результаты отражены на графиках (рис. 5, 6,7)

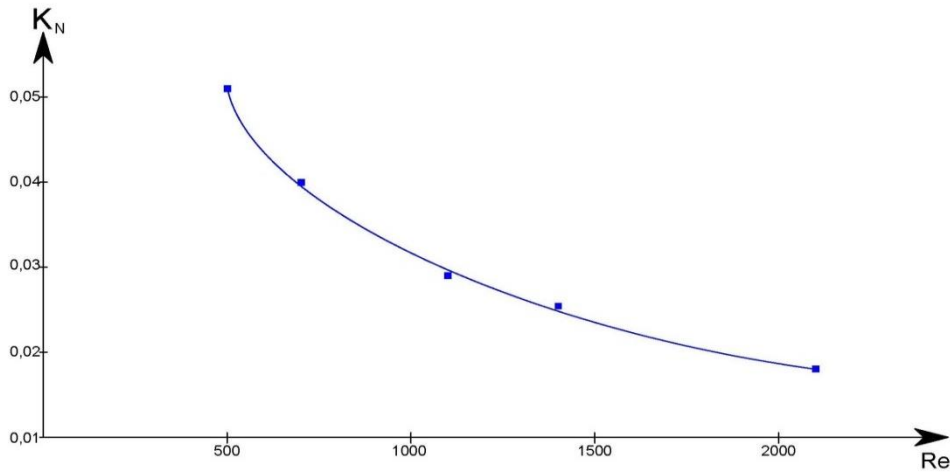


Рис. 6. Зависимость критерия эффективности по мощности от критерия Рейнольдса.  
Fig. 6. The dependence of power efficiency criterion on Reynolds criterion.

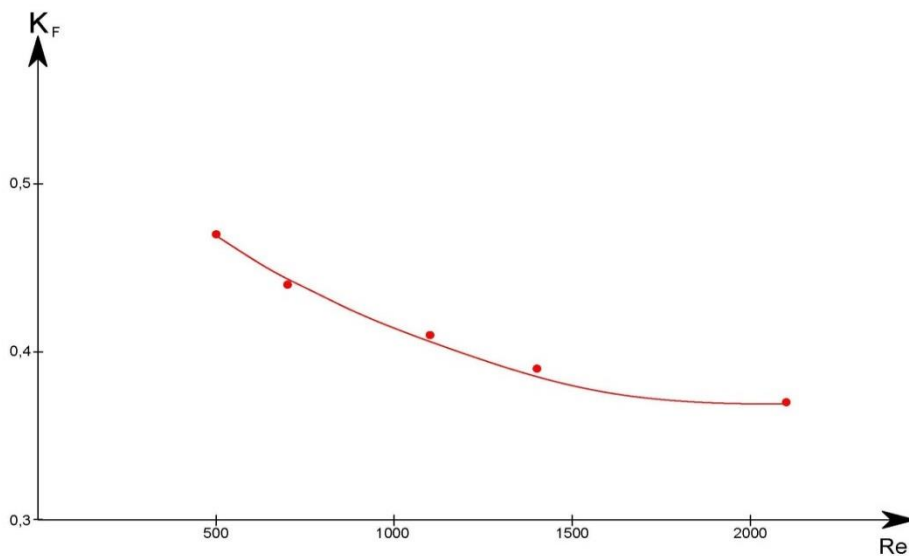


Рис. 7. Зависимость критерия эффективности по площади от критерия Рейнольдса.  
Fig. 7. The dependence of the area efficiency criterion on the Reynolds criterion.

Из полученных графиков видно, что наилучший режим достигается при  $Re_2 \geq 2100$ , так как ему соответствует наибольшее значение  $K_Q$  и наименьшее значение  $K_N$  и  $K_F$ .

#### Выводы

На сегодняшний день известно большое количество гофрированных насадок для пластинчато-ребристых теплообменников, поиск новых и более эффективных вариантов оребрения (насадок) является актуальной задачей, поскольку дает возможность снизить капитальные затраты на изготовление теплообменников и энергозатраты при их эксплуатации, связанные с гидравлическим сопротивлением каналов теплообменников. Исследование двух теплообменных поверхностей с помощью компьютерного моделирования, результаты которого были подтверждены натурным экспериментом, позволило получить зависимости, показывающие влияние числа Рейнольдса на критерии эффективности. Установлено, что целесообразно эксплуатировать пластинчато-ребристые

теплообменники при числах Рейнольдса больше 2000. Метод сравнительной оценки с использованием данных, полученных в результате компьютерного моделирования в программе COSMOSFloWorks, является наиболее рациональным, поскольку при достоверных результатах позволяет исключить затраты на изготовление экспериментальной модели насадки и самой лабораторной установки для ее испытаний, уменьшить время на получение данных по коэффициентам теплоотдачи и гидравлическим сопротивлениям насадки. Данные, полученные в результате компьютерного эксперимента, позволяют обосновать выбор наиболее высокоэффективной конструкции насадки.

#### Список литературы

1. Барановский Н.В., Коваленко Л.М., Ястребенецкий А.Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. М. Машиностроение, 1972. – С. 287
2. Воронин Г.И., Дубровский Е.В. Эффективные теплообменники, М., «Машиностроение». – 1973. – С.96

3. Ганеев Т.Р. Разновидности современных пластинчатых теплообменных аппаратов, их устройство и отличия// Наука и бизнес: пути развития. – 2017. - №12. – С. 19-23

4. Дубровский Е.В. Метод относительного сравнения теплогидравлической эффективности теплообменных поверхностей. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1977. № 6. С. 118-128

5. Кейс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. М.: Энергия, 1967. - С 223.

6. Кондрашов Н.П., Лагуткин М.Г. Пути повышения эффективности пластинчато-ребристых теплообменников// Динамика взаимоотношений различных областей науки в современных условиях. Изд-во МЦИИ «ОМЕГА САЙНС» – 2017. – С. 33-37

7. Левин М.Ю. Выбор компактного пластинчато-ребристого теплообменного аппарата// Наука в центральной России. – 2013. -№4. – С.71-75

8. Мхоян А.А., Кирдяшкин А.В., Глазов В.С. Оптимизация ребер разной формы //Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать третья Междунар. Науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (2-3 марта 2017 г., Москва): Тез. Докл. В 3 т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 296-297

9. Сычков А.Е. Высокоэффективные пластинчато-ребристые теплообменники// Компрессорная техника и пневматика. – 2010. - №3. – С. 6-11

10. Чичиндаев А. В. Комплексная оценка эффективности компактных пластинчато-ребристых теплообменников// Авиакосм. приборостроение. - 2005. -№ 9. -С. 52-59.

---

### ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАМОЧНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАВНОМЕРНОГО АЗИМУТАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ

---

*Кривенцев Евгений Александрович.*

*Аспирант*

*Южно-Российский Государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова.*

*Факультет военного обучения, Военная кафедра войск связи.*

*Начальник учебной части - заместитель начальника кафедры.*

*г. Новочеркасск, Ростовской обл. РФ.*

[DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.4.60.13-18](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.4.60.13-18)

### THE USE OF FRAMEWORK RADIATORS FOR THE FORMATION OF UNIFORM AZIMUTHAL COVERAGE

*Kriventsev Evgeny Aleksandrovich.*

*Postgraduate student,*

*South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov.*

*Faculty of military training, military Department of communication troops.*

*Head of the educational part, Deputy head of the Department.*

*Novocherkassk, Rostov region of Russia.*

В статье рассмотрена задача, посвященная оценке возможности использования рамочных излучателей для формирования равномерного азимутального покрытия. Данная задача базируется на исследовании функции распределения тока рамочного излучателя, представленной пятизвенной моделью разложения Фурье.

The article deals with the problem of assessing the possibility of using frame emitters to form a uniform azimuthal coating. This problem is based on the study of the current distribution function of the frame emitter represented by a five-link Fourier expansion model.

**Ключевые слова:** рамочный излучатель; равномерное азимутальное покрытие; проволочные структуры; функция распределения тока; интегро-дифференциальное уравнение; коэффициенты разложения Фурье; комплексная нагрузка.

**Key words:** framework mast; uniform azimuthal coverage; the wire structure; the distribution function of current; integro-differential equation; the coefficients of Fourier transformation; complex-valued load.

Опыт эксплуатации современных систем мобильной связи, наблюдения и контроля, выдвинул ряд конструктивных и энергетические требований к антенным устройствам, используемых в перспективных сетях Wi-Fi и Wi-Max. К этим требованиям относятся: малый вес, прочность и вибрационная устойчивость; всенаправленная или управляемая в горизонтальной плоскости характеристика направленности, обеспечивающая равномерное азимутальное покрытие; максимально реализуемый ко-

эффициент полезного действия; возможность подключения нескольких источников возбуждения; хорошее согласование антенн с фидерной линией.

Реализовать указанные, в ряде случаев противоречивые, требования можно с помощью проволочных структур, формирующих в пространстве необходимое распределение тока. Наиболее приемлемыми для достижения данной цели являются рамочные излучатели.

Оценка возможности использования рамочного излучателя для формирования равномерного