

УДК 621.187

**Ю. А. КУЛИКОВ**, докт. техн. наук, проф. ВНУ им. В. Даля, Луганск;  
**А. Г. АЖИППО**, с.н.с. ВНУ им. В. Даля;  
**Т. А. ОРОБЦОВ**, асп. ВНУ им. В. Даля

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОРЕБРЕНИЯ ТРУБ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Приводятся результаты исследований, направленных на определение рациональных параметров оребрения труб малого диаметра теплообменных аппаратов для вязких жидкостей. Выбраны значения параметров трапециевидного оребрения, изготовленного методом накатки, при которых эффективность теплоотдачи достигает значений  $E_p=0,96...0,98$ .

**Ключевые слова:** оребренная труба, диаметр оребрения, шаг оребрения, средняя толщина ребра, эффективность, критерий, интервал варьирования.

**Вступление.** Процесс течения вязкой жидкости при поперечном омывании пучка оребренных труб сопровождается конвективным теплообменом различной степени эффективности, поскольку теплоотдача от ребер и неоребренной поверхности различна. Ожидаемая эффективность теплоотдачи оребренной поверхности, изготовленной по технологии ВНИИМетМаша (метод накатки трапециевидных ребер на гладкой трубчатой заготовке) находится в диапазоне  $0,96...0,98$  [1, 2]. Известные методики расчета [3, 4] не дают возможности достаточно точно определить теплоотдачу данного вида поверхности и, таким образом, расчетным путем оптимизировать ее параметры. Указанные обстоятельства обуславливают необходимость применения для этой цели метода математического планирования.

**Основные достижения предшествующих исследований.** Важнейшими факторами, определяющими эффективность теплоотдачи оребренной поверхности с низкими ребрами, являются диаметр оребрения  $d_{op}$ , толщина основания ребра  $\delta_1$  и шаг оребрения  $t_p$ . Предшествующие исследования показали, что для создания компактных теплообменных аппаратов для вязких жидкостей (топливоподогревателей и маслоохладителей) указанные параметры должны находиться в следующих диапазонах:  $d_{op}=10,22...13,8$  мм;  $\delta_1=0,5...0,6$  мм;  $t_p=1,6...2$  мм [5].

В литературе [6] указывается на влияние средней толщины ребра  $\delta_{cp}$  на эффективность теплоотдачи и, следовательно, средняя толщина ребра приобретает важное значение.

На рис.1 приведены расчетные зависимости, оценивающие влияние высоты ребра и средней толщины ребра на эффективность теплоотдачи.

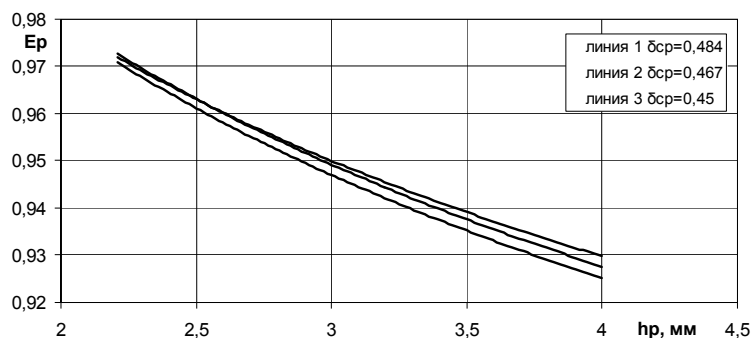


Рисунок 1 – Эффективность теплоотдачи оребренной поверхности в зависимости от параметров оребрения

© Ю. А. Куликов, А. Г. Ажиппо, Т. А. Оробцов, 2013

Как видно из рис.1 что при уменьшении высоты ребра  $h_p$  от 4 мм до 2,2 мм эффективность теплоотдачи  $E_p$  возрастает то 0,93 до 0,97. Известно [7] что с увеличением толщины ребра увеличивается коэффициент теплоотдачи что подтверждается характером зависимостей представленных выше.

**Задача исследования.** Определение на основе экспериментальных данных рациональных значений выше указанных геометрических параметров оребрения трубы при которых эффективность теплоотдачи оребренной поверхности достигает максимальных значений.

**Материалы исследования.** Вычислительная работа по определению рациональных геометрических параметров оребрения существенно упрощается [8], если применить математическое планирование эксперимента, т.е. нормировать факторы  $\Phi$  планирования. При этом исследуемая область изменения параметра разбивается на  $k$  участков (принимая  $k=2$ , т.е. будем осуществлять трехфакторное трехуровневое планирование) и введем относительные безразмерные факторы влияния  $x$ , равные

$$x_i = \frac{\Phi_i - \Phi_n}{\Delta\Phi_i},$$

где  $\Delta\Phi_i = (\Phi_{i_{max}} - \Phi_{i_{min}})/2$  – интервал варьирования;

$\Phi_{i_{max}}, \Phi_{i_{min}}$  - соответственно максимальное и минимальное значения фактора.

При этом начальным (нулевым) значением варьируемого параметра, как обычно, выбираем его среднюю величину

$$\Phi_n = (\Phi_{i_{max}} + \Phi_{i_{min}})/2.$$

Для аппроксимации неизвестных зависимостей удобно пользоваться полиномами. В данном случае неизвестную зависимость принимаем в виде уравнения регрессии - многочлена второй степени

$$E_p = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{11} \cdot x_1^2 + a_{22} \cdot x_2^2 + a_{33} \cdot x_3^2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3,$$

где  $x_1$ - диаметр оребрения  $d_{op}$ ;

$x_2$ - шаг оребрения  $t_p$ ;

$x_3$ - средняя толщина ребра  $\delta_{cp}$ .

При этом выбор опытных точек основан на ортогональном планировании равноотстоящих узлов. Данная особенность планирования позволяет заранее вычислить векторы, состоящие из целых чисел, при помощи которых можно легко найти коэффициенты регрессии.

Согласно планам, приведенным в табл. 1 фиксировались три уровня каждого из факторов:

- $x_{imin}=-1$ , соответствующий нижнему пределу варьирования  $i$  –того независимого параметра;
- $x_{in}=0$  – середине интервала варьирования;
- $x_{imax}=+1$  – верхнему пределу.

Таблица 1 - Матрица планирования эксперимента и его результаты для пучков оребренных труб

Факторы влияния (независимые параметры)				Экспериментальная функция отклика	Результаты расчета
Уровни варьирования	d <sub>оп</sub> , мм	t <sub>р</sub> , мм	δ <sub>ср</sub> , мм	Y <sub>n</sub>	F <sub>n</sub>
Нулевой уровень	12	1,8	0,467		
Интервал варьирования	1,8	0,2	0,017		
Верхний уровень	13,8	2	0,484		
Нижний уровень	10,2	1,6	0,45		
№ опыта	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>		
1	+1	+1	+1	0,942	0,939267
2	+1	+1	-1	0,939	0,943367
3	+1	-1	+1	0,931	0,933367
4	+1	-1	-1	0,935	0,935467
5	-1	+1	+1	0,978	0,977667
6	-1	+1	-1	0,983	0,980767
7	-1	-1	+1	0,979	0,974767
8	-1	-1	-1	0,973	0,975867
9	0	0	0	0,959	0,960067
10	+1	0	0	0,941	0,936533
11	-1	0	0	0,972	0,975933
12	0	+1	0	0,964	0,964933
13	0	-1	0	0,961	0,959533
14	0	0	+1	0,953	0,957933
15	0	0	-1	0,966	0,960533

Значения неизвестных коэффициентов уравнения регрессии a<sub>ij</sub> получены по формуле [8]

$$a_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^{15} F_n b_{ijn}}{C_{ij}},$$

где значения F<sub>n</sub> приведены в табл. 1, а b<sub>ijn</sub> и C<sub>ij</sub> приведены в табл. 2.

Кроме плана экспериментов представленного ниже в табл. 2 приведены также результаты испытаний по определению эффективности ребра.

Таблица 2 - Данные для вычисления коэффициентов уравнения регрессии

№ опыта	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>11</sub>	a <sub>22</sub>	a <sub>33</sub>	a <sub>12</sub>	a <sub>13</sub>	a <sub>23</sub>
	c <sub>ij</sub>									
	45	10	10	10	18	18	18	8	8	8
	b <sub>ijn</sub>									
1	-2	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	-2	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
3	-2	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
4	-2	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1
5	-2	-1	-	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1
6	-2	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
7	-2	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1
8	-2	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1
9	13	0	-1	0	-2	-2	-2	0	0	0
10	8	1	0	0	+5	-4	-4	0	0	0
11	8	-1	0	0	+5	-4	-4	0	0	0
12	8	0	0	0	-4	5	-4	0	0	0
13	8	0	+1	0	-4	5	-4	0	0	0
14	8	0	-1	+1	-4	-4	5	0	0	0
15	8	0	0	-1	-4	-4	5	0	0	0

Проверка коэффициентов регрессии на статистическую значимость проводилась сравнением их абсолютных величин с соответствующими доверительными интервалами, при этом коэффициент a<sub>ij</sub> является статистически значимым с заданной доверительной вероятностью Р при выполнении условия [8, 9,10]

$$|a_{ij}| \geq \Delta a_{ij}.$$

Для определения доверительного интервала использовалось известное соотношение

$$\Delta a_{ij} = \pm t_{\alpha N} \cdot S\{a_{ij}\},$$

где  $t_{\alpha N}$  - критерий Стьюдента, табулированный в зависимости от степени риска  $\alpha$  и числа проведенных опытов  $N$ ;

$$S\{a_{ij}\} = S\{y\} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N \sum_{u=1}^n (y_{ku} - \bar{y}_k)^2}{N \cdot (n-1)}} \quad - \text{ середнеквадратическая ошибка при}$$

определении коэффициента регрессии  $a_{ij}$  (ошибка опытов);

$u$  – текущий индекс эксперимента в  $k$ -ом опыте при числе экспериментов  $n \geq 2$  и числе опытов  $N$ ;

$y_{ku}$  – значение определяемого параметра в  $u$ -ом эксперименте  $k$ -го опыта;

$\bar{y}_k$  – среднее значение определяемого параметра в  $k$ -ом опыте.

**Результаты исследований.** Анализ зависимости, оценивающей эффективность теплоотдачи оребренной поверхности представленной в виде уравнения регрессии (1) показал, что при изменении диаметра оребрения в наибольшей степени эффективность теплоотдачи оребренной поверхности зависит от шага оребрения (рис. 2, 3 и 4).

$$\begin{aligned} E_p = & 0,96007 - 0,0197 \cdot x_1 + 0,0027 \cdot x_2 - 0,0013 \cdot x_3 - \\ & - 0,00383 \cdot x_1^2 + 0,00217 \cdot x_2^2 - 0,00087 \cdot x_3^2 + \\ & + 0,00075 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,00025 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0005 \cdot x_2 \cdot x_3. \end{aligned} \quad (1)$$

После проверки коэффициентов уравнения регрессии на значимость [9, 10] окончательно получено следующее уравнение

$$\begin{aligned} E_p = & 0,96007 - 0,0197 \cdot x_1 + 0,0027 \cdot x_2 - 0,0013 \cdot x_3 - \\ & - 0,00383 \cdot x_1^2 + 0,00217 \cdot x_2^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Установлено также, что уменьшение диаметра оребрения, увеличение толщины ребра и увеличения шага оребрения приводит к увеличению эффективности теплоотдачи оребренной поверхности.

Величина эффективности теплоотдачи оребренной поверхности при изменении указанных выше факторов влияния в исследованных диапазонах возрастала от 0,9334 до 0,9807 (см. рис. 2, 3 и 4).

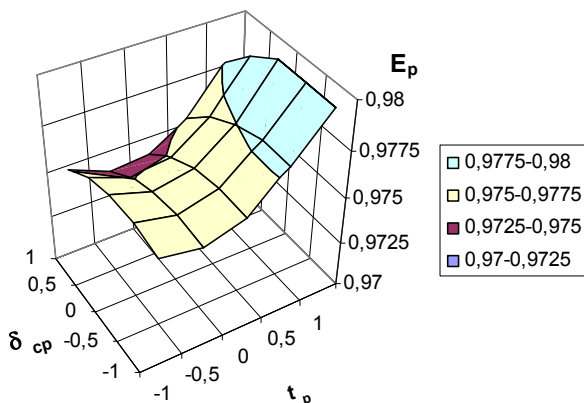


Рисунок 2 - Зависимость эффективности теплоотдачи оребренной поверхности для диаметра  $d_{op}=10,22$  мм от шага оребрения и средней толщины ребра

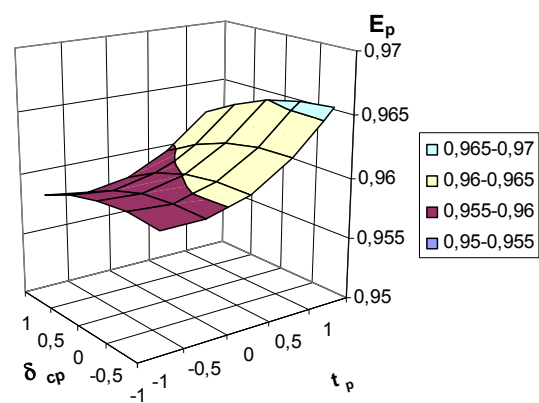


Рисунок 3 - Зависимость эффективности теплоотдачи оребренной поверхности для диаметра  $d_{op}=12$  мм от шага оребрения и средней толщины ребра

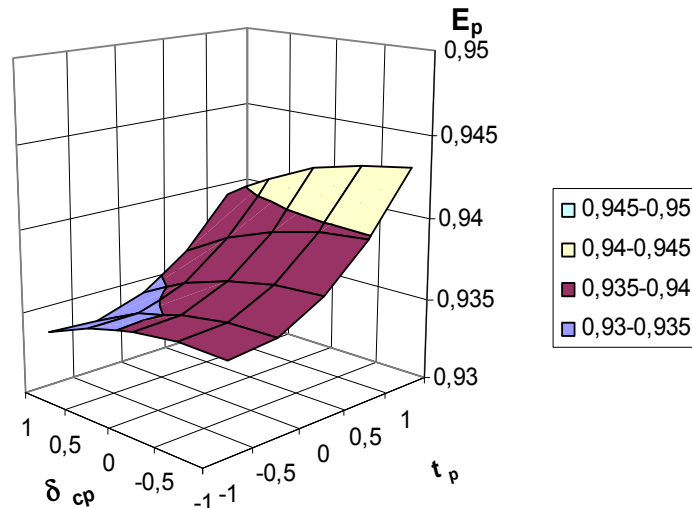


Рисунок 4 - Зависимость эффективности теплоотдачи оребренной поверхности для диаметра  $d_{op}=13,8$  мм от шага оребрения и средней толщины ребра

Значение эффективности теплоотдачи оребренной поверхности  $E_p=0,9807$  достигается при следующих значениях факторов влияния:  $d_{op}=10,22$  мм,  $t_p=2$  мм и  $\delta_{cp}=0,467$  мм.

Максимальная погрешность определения эффективности оребренной поверхности не превышала  $\pm 0,6\%$  при доверительной вероятности  $P=0,95$ .

Таким образом, полученное уравнение регрессии адекватно опытными данным.

**Выводы:** Анализ проведенных исследований позволил выбрать рациональные геометрические параметры оребрения: высоту ребра (диаметр оребрения); среднюю толщину ребра и шаг оребрения. Получена зависимость в виде уравнения регрессии для численной оценки влияния параметров оребрения на эффективность теплоотдачи.

**Список литературы:** 1. Куликов Ю.А., Ажиппо А.В., Гончаров А.В., Быкадоров В.В., Оробцов Т.А. (под ред. проф., д.т.н. Куликова Ю.А.). Компактные теплообменники из пучков труб с винтовым оребрением для транспортных машин. – Луганск: Издательство «Елтон - 2», 2011. – 201с. иллюстр. 2. Трубы ребристые, изготовленные методом накатки. – М.: ВНИИМетМаш, 1962. 3. Кузнецов Е. Ф. Маслоохладители из труб с низкими спиральными ребрами / Е. Ф. Кузнецов, Р. И. Мин, И. Е. Шахнович // Энергомашиностроение. – 1965. – № 11. 4. Охладители водомасляные. Методы расчета: [Проект руководящего технического материала]. – Л.: ЦНИДИ, 1981. – 102 с. 5. Куликов Ю. А. Выбор рациональных параметров оребренной трубы для теплообменных аппаратов вязких жидкостей ДВС транспортных машин / Куликов Ю. А., Гончаров А. В., Ажиппо А. Г., Оробцов Т. А. // Вісник Національного транспортного університету. – 2012. – № 25. – С. 99 – 102. 6. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – [ изд. 2-е, стереотип ]. – М.: Энергия, 1977. – 342 с. 7. Куликов Ю. А. Системы охлаждения силовых установок тепловозов / Куликов Ю. А. –

М.: Машиностроение, 1988. – 280 с. **8.** Рафалес – Ламарка Э.Э Инструкция по планированию эксперимента. - Луганск: УКРНИИУглеобогащение, 1969. – 120 с. **9.** Основы научных исследований / Крутов В.И., Грушко И.М., Попов В.В., Савельев А.Я., Сумароков Л.Н./ Ред. В.И. Крутова. – М.: "Высшая школа", 1989. – 400 с. **10.** Завадский Ю.В. Планирование эксперимента в задачах автомобильного транспорта. Учебное пособие. М., МАДИ, 1978. 156с.

*Поступила в редколлегию 10.05.2013*

УДК 621.187

**Выбор рациональных параметров оребрения труб теплообменных аппаратов для вязких жидкостей** / Ю. А. Куликов, А. Г. Ажиппо, Т. А. Оробцов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2013. – № 30 (1003). – С. 37–43. – Бібліогр.: 9 назв.

Наведено результати досліджень, скерованих на визначення раціональних параметрів оребрення труб малого діаметру теплообмінних апаратів для в'язких рідин. Вибрані значення параметрів трапецевидного оребрення, виготовленого методом накатки, при яких ефективність тепловіддачі досягає значень  $E_p=0,96\dots0,98$ .

**Ключові слова:** оребрена труба, діаметр оребрення, крок оребрення, середня товщина ребра, ефективність, критерій, інтервал варіювання.

Happen to the results of the studies directed on determination rational parameter rib tubes of the small diameter heat exchanger device for viscous liquids. They Are Chose importances parameter trapezoid rib made by wear down method, under which efficiency heatexchanger reaches importance  $E_r=0,96\dots0,98$ .

**Keywords:** rib tube, rib diameter, step rib, average thickness rib, efficiency, criterion, interval of variation.