

## АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ХЛАДАГЕНТОВ

Ю. А. Степанишина

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Научный руководитель А. В. Овсянник

Целью данного исследования является изучение закономерностей теплообмена при конденсации паров хладагентов для решения актуальных практических задач изыскания эффективных теплообменников поверхностей.

Экспериментальный материал о теплообмене при конденсации хладагентов на оребренных трубах [1]–[9] весьма ограничен и как показано в работе [6], в ряде случаев противоречив. Для обобщения накопленного опыта и выявления наиболее общих закономерностей мною были изучены результаты опытов ученого Хижнякова С. В. (Ленинградский технологический институт холодильной промышленности). Характеристика опытных трубок и условия постановки экспериментов представлены на рис. 1.

Номер трубки	Диаметр, мм		Размер ребра, мм							Расстояние между ребрами	Степень оребрения	Температура конденсации (°С) в опытах	
	внешний	внутренний	высота	ширина	толщина			с Ф-12	с Ф-22				
					в торце	у основания	средняя						
1	—	16	12	—	—	—	—	—	—	—	—	30	—
2	20	16	12	2	2	0,5	1,8	1,15	0,85	3,63	—	30	30
3	20,4	16	12	2,2	2	1,14	1,14	1,14	0,86	4,52	—	30	30
4	21	18,6	13,1	1,2	2,03	0,78	1,43	1,1	0,93	2,87	—	30	30
5	20,4	16	12	2,2	1,07	0,4	0,4	0,4	0,67	7,45	—	30	30

Рис. 1. Характеристика опытных трубок и условия постановки эксперимента

Как видно из рис. 2, опытные значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  для гладкой трубы (сплошная прямая № 1) меньше рассчитанных по теоретической формуле Нуссельта примерно на 10 %. Для исследованных оребренных трубок величины  $\alpha$  отнесенные к полной наружной поверхности трубок  $F_n$ , т. е.  $\alpha_n$  1,6–2 раза выше, чем для гладкой трубки. При этом для трубок № 2–4 оказались практически одинаковыми, а для трубки № 5 более низкими.

Экспериментальные значения  $\alpha$ , полученные в данной работе для трубок с примерно одинаковой геометрией оребрения, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [5] и существенно превышают опытные результаты [3].

На рис. 2 нанесены линии зависимости  $\alpha_n = f(q_{k_n})$  для оребренных трубок, полученные расчетным путем с помощью методов, рассмотренных в работах [3], [6], [9]. Способ расчета, рекомендованный в работе [8], не рассматриваем, так как, по указанию ее авторов, в случае отношений наружного диаметра ребра  $D_n$  к наружному диаметру трубки  $D_0$  близких к единице, он дает практически те же результаты, что и методика, предложенная зарубежными исследователями [1], [2], [5]. Эта методика в несколько преобразованном виде использована в работе [6].

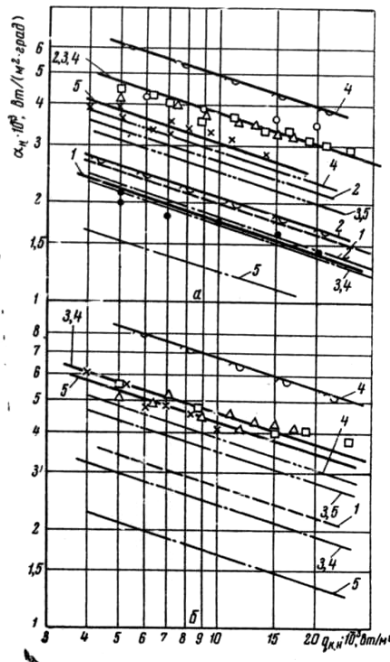


Рис. 2. Зависимость  $\alpha_n = f(q_{k,n})$  при конденсации фреона-12 (а) и фреона-22 (б) на гладкой и оребренных трубках при  $t_k = 30^\circ\text{C}$  (цифры на графике соответствуют нумерации трубок на рис. 1): — экспериментальные кривые; расчет: — по формуле Нуссельта для трубки № 1; —•— по методике [3], [4]; —·— по методике [6]; —~— по методике [9]; экспериментальные точки для трубок: ● — № 1, ○ — № 2, △ — № 3, □ — № 4, × — № 5

Рассчитанные по формуле Слепян [3] величины  $\alpha$  оказываются ниже опытных в 2,3—2,7 раза.

На рис. 1 нанесены величины  $\alpha_n$  для трубок № 2 и 4, рассчитанные по формуле [9]:

$$\text{Nu} = 0,72(\text{Ga} \cdot \text{Pr} \cdot K)^{0,25} \cdot \text{We}^{0,2} \cdot Z_1^{0,28} \cdot Z_2^{0,62}, \quad (1)$$

где  $Z_1 = \frac{a}{h \cdot \text{tg} \varphi}$  и  $Z_2 = \frac{b}{h \cdot \sin \varphi}$  — критерии формы элементов оребрения равны бесконечности.

В первом случае для трубки № 2 они оказываются в 1,8 раза ниже, а во втором для трубки № 4 — в 1,25 раза выше опытных. Для трубок № 3 и 5 с ребрами постоянной толщины воспользоваться этим уравнением не представляется возможным, так как в этом случае:  $\varphi = 0$ ,  $Z_1 = Z_2 = \infty$ .

Очевидно, расхождение между расчетом и экспериментом вызвано явлением щелевой капиллярности, которое не учитывается уравнением (1). Кроме того, при определении критерия  $We$  при небольшой высоте  $h$  ребра и малом расстоянии между ребрами  $S'$  ( $S' = S - \delta_{\text{cp}}$ , где  $\delta_{\text{cp}}$  — средняя толщина ребра) следует учитывать не только радиус  $R_1$  — торца ребра, но и  $R_2$  — мениска жидкого конденсата в межреберных участках.

Коэффициенты теплоотдачи, рассчитанные по формуле [6]  $\alpha_n = \alpha_0 \cdot \psi$ , в 1,28—1,52 раза ниже опытных.

Эти расхождения обусловлены тем, что данная формула не учитывает уменьшения толщины конденсатной пленки на ребре за счет сил поверхностного натяжения. Затопление нижней части ребер конденсатом здесь учтено эмпирическим коэффициентом, который в соответствии с данными Хенрици принят в работе [6] равным 0,85. Однако его величина при более точной оценке должна зависеть от высоты  $h$  ребра и расстояния между ребрами  $S'$ .

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Геометрические размеры элементов оребрения необходимо выбирать так, чтобы силы поверхностного натяжения в пленке конденсата на ребрах примерно на порядок превосходили силы тяжести.

2. В случае многорядного (по высоте конденсатора) пучка оребренных трубок эффективность трапецидального оребрения может быть снижена, поэтому необходимо предусмотреть мероприятия по устранению залива межреберного пространства.

3. Представленные в известной литературе зависимости не могут обобщить имеющиеся экспериментальные данные различных авторов.

#### Литература

53. Katz D., Hope R., Datsko S., Robinson D. «J. of the ASRE», 1947, March.
54. Beatty K., Katz D. «Chem. Engng. Progr.», 1948, vol. 44 p. 55, January.
55. Слепян, Е. Определение коэффициентов теплоотдачи при конденсации пара фреона-12 на гладкой и ребристых трубах / Е. Слепян // Холодил. техника. – 1952. – № 1.
56. Соколова (Слепян), Е. Исследование теплоотдачи при конденсации фреона-22 / Е. Соколова (Слепян) // Холодил. техника. – 1957. – № 3.
57. Henrici H. «Kaltetechnik», Bd. 15, Heft 8, 1963.
58. Данилова, Г. Н. О методике расчета коэффициента теплоотдачи при конденсации фреонов на пучке оребренных труб / Г. Н. Данилова, О. П. Иванов, С. В. Хижняков // Холодил. техника. – 1968. – № 6.
59. Экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи при конденсации Ф-113 на наружной поверхности горизонтальной трубы / Г. Н. Данилова [и др.] // Вопр. радиоэлектроники. Сер. ТРТО. – 1968. – Вып. 2.
60. Бузник, В. М. Исследование теплообмена при конденсации фреона / В. М. Бузник, Г. Ф. Смирнов, И. И. Луканов // Судостроение. – 1969. – № 1.
61. Зозуля, Н. В. Интенсификация процесса теплоотдачи при конденсации фреона-113 на горизонтальных трубках / Н. В. Зозуля, В. П. Боровков, В. А. Карху // Холодил. техника. – 1969. – № 4.