

тех пор, пока сумма настроенных расходов потребителей не оказывается равной величине подачи насоса. При этом дросселирующий элемент  $\delta$  возвращается в исходное состояние.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ НА ОРЕБРЕННЫХ И ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Литвиненко В. В., Шаповалов А. В.  
Гомельский государственный технический университет  
им. П. О. Сухого

Научный руководитель: к.т.н. Овсянник А. В.

Для отвода тепловых потоков высокой плотности в различных областях техники (преимущественно в ядерной энергетике, металлургии) получают все большее распространение процессы кипения на оребренных и шероховатых поверхностях.

Идея применения ребра в кипящей жидкости состоит в том, что даже при температурах в основании, соответствующих пленочному режиму кипения, за счет передачи тепла теплопроводностью в зоны интенсивной теплоотдачи (околокритические области пузырькового и переходного режимов кипения) суммарный тепловой поток, отводимый ребром, сохраняется высоким.

Приведем результаты экспериментальных данных по кипению чистого фреона-12 на горизонтальных ребристых трубках с различной геометрией оребрения (табл. 1).

В табл. 1  $d_0$  - основной диаметр трубок;  $D_H$  - наружный диаметр ребра;  $d_{вн}$  - внутренний диаметр трубок;  $S_p$  - шаг ребра;  $a$  - угол ребра;  $\delta_0$  - толщина ребра у его основания;  $\delta_T$  - толщина торца ребра;  $\delta_{ср}$  - средняя толщина ребра;  $F_H$  - полная наружная поверхность трубок;  $F_{вн}$  - внутренняя поверхность трубок;  $G$  - вес 1 пог. м трубок;  $l$  - длина экспериментального участка.

Табл. 1

Номер трубки	Тип трубки	$d_0$ мм	$d_{вн}$ мм	$D_H$ мм	$S_p$ мм	$a$	$\delta_0$ мм	$\delta_T$ мм	$\delta_{ср}$ мм	$F_H, м^2/1 \text{ пог. м.}$	$F_{вн}, м^2/1 \text{ пог. м.}$	$\frac{F_H}{F_{вн}}$	$\frac{G}{F_H}$	$l$ м
1	Накатная	16,5	13,2	21	2	35	1,5	0,3	0,9	0,145	0,0415	3,5	9,5	0,4
2	С прямыми круглыми ребрами	17,55	12	24,475	1,413	-	0,85	0,85	0,85	0,39	0,0377	10,35	7,65	0,4

Была создана экспериментальная установка, позволяющая провести опыты в диапазоне тепловых нагрузок  $q = 500 + 20000 \text{ Вт/м}^2$  (для гладкой трубы  $q = 500 + 40000 \text{ Вт/м}^2$ ) и температур кипения  $t_0 = -30 + 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Как показывают графики, коэффициенты теплоотдачи при кипении фреона-12 на ребристой поверхности  $\alpha_p$  значительно выше, чем на гладкой  $\alpha_{гг}$  (рис. 1-2).

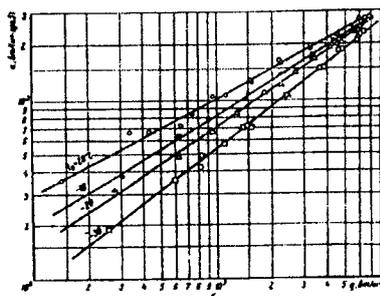


Рис. 1. Зависимость  $\alpha = f(q)$  при кипении фреона-12 на ребристой трубке №2

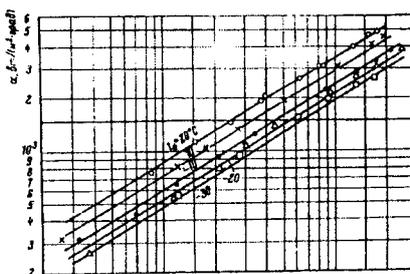


Рис. 2. Зависимость  $\alpha = f(q)$  при кипении фреона-12 на ребристой трубке №1

Отношение  $\frac{\alpha_p}{\alpha_{гг}}$  для исследованных трубок возрастает с уменьшением теплового потока и понижением температуры кипения, особенно оно велико в условиях характерных для работы испарителей холодильных машин.

Увеличение интенсивности теплоотдачи при кипении на ребристых трубках связано со своеобразием условий возникновения, роста и отрыва пузырей по сравнению с гладкими.

Визуальные наблюдения показали, что зарождение пузырей происходит у основания ребер. Это объясняется тем, что в местах соединения ребер с трубкой они хуже смачиваются жидкостью, в связи с этим плотность теплового потока, отводимого с данной площади, имеет большее значение.

Как видно из рис. 1. трубка №2, имеющая наименьшее расстояние между ребрами, наиболее эффективна по сравнению с трубкой №1 при низких температурах кипения. Ее преимущество уменьшается с увеличением температуры кипения. В данном случае имеет место эффект 'запаривания' поверхности теплообмена вследствие образования паровой пленки у основания ребер. На основании вышесказанного можно сделать вывод, что трубы испарителей работающих на фреоне-12 в диапазоне температур  $t_0 = 0 + -30 \text{ }^\circ\text{C}$ , целесообразно делать с расстоянием между ребрами  $0.3 + 0.5 \text{ мм}$ , которое соизмеримо с величинами отрывных диаметров пузырей в этих условиях.

Наиболее эффективным и надежным способом интенсификации теплоотдачи при кипении является применение пористых металлических покрытий.

Рассмотрим опытные данные, полученные на установке, экспериментальными образцами для которой служили трубы из нержавеющей стали с параметрами, приведенными в табл. 2. Теплообмен при кипении пропана исследовался в диапазоне  $q = 0.1 + 100 \text{ кВт/м}^2$ , температур от  $-10$  до  $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

На гладких трубах с шероховатой поверхностью (образцы В и S) и труб с пористым покрытием первые центры парообразования возникали на шероховатостях в верхней части трубы. При увеличении тепловой нагрузки картина становится сходной с кипением на полированной трубе, однако интенсивность теплоотдачи в 2.5+3 раза выше, чем на гладких трубах (рис. 3). В области  $q)20+30 \text{ кВт/м}^2$  наблюдалась сильная экранизация поверхности трубы паровыми пузырями и снижалась интенсивность роста теплоотдачи. Гистерезис по тепловому потоку носил ярко выраженный характер.

Табл. 2

№ образца	А	В	S	5	6	7	2	3
$\delta$ , мм	гладкая поверхность	гладкая поверхность	гладкая поверхность	0,1	0,15	0,3	0,2	0,1
$\epsilon$ , %	наждачная бумага $R_z = 1.3 \text{ мкм}$	$R_z = 4 \text{ мкм}$	дробеструйная обработка	12,31	12,73	12,83	12,59	12,74

На интенсивность теплоотдачи оказывали влияние толщина покрытия и его пористость. На образцах с одинаковой пористостью покрытия максимальная теплоотдача наблюдалась на образце №2 ( $\delta = 0.2 \text{ мм}$ ). Увеличение толщины покрытия до 0,3 мм привело к снижению теплоотдачи. Уменьшение пористости покрытия с 12,8 до 4,3 % значительно снижает теплоотдачу.

Проведенное исследование показало, что нанесение пористых металлических покрытий на поверхность теплообмена позволяет существенно (в 3-5 раз в области низких тепловых нагрузок,  $q(8 \text{ кВт/м}^2$ , и в 2.5+3 раза в области высоких,  $q)8 \text{ кВт/м}^2$ ) увеличить интенсивность теплоотдачи при кипении пропана на горизонтальных трубах. Лучшие результаты получены для покрытий толщиной около 0,2 мм и пористостью около 12,5%.

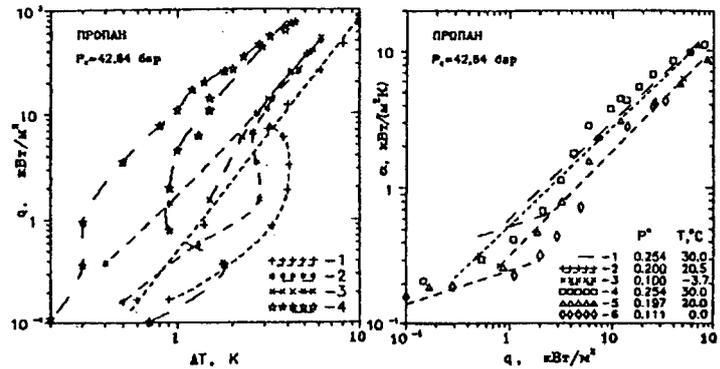


Рис. 3. Слева: типичные кривые кипения пропана на трубах с различной внешней поверхностью,  $T=293\text{K}$ : 1-образец А; 2-S; 3-B; 4-№7. Справа: сравнение результатов по кипению пропана на гладких трубах: 1-[6]; 2,3-[5]; 4-6 – образец А.