

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОДОЛЬНО-ОРЕБРЕННЫХ ТРУБАХ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВКАХ

Ю. А. Степанишина

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель А. В. Овсянник

Способы интенсификации теплообмена при конденсации:

Осуществление капельной конденсации. В случае капельной конденсации коэффициент теплоотдачи в 5–10 раз больше, чем при пленочной. Однако устойчивый характер капельная конденсация имеет лишь в очень ограниченных случаях. Применение лиофобизаторов дает эффект лишь непродолжительное время. Химические соединения смываются с теплопередающей поверхности, а полимерные покрытия из-

за своей низкой теплопроводности должны иметь толщину в несколько микрон, они также через некоторое время отслаиваются или разрушаются. Покрытия из благородных металлов также подвержены этим явлениям, кроме того, чрезвычайно дороги;

Использование поверхностей с мелким оребрением способствует интенсификации процесса пленочной конденсации.

Вертикальная компоновка конденсаторов. Это объясняется тем, что при горизонтальном расположении трубного пучка конденсат, стекая с верхних рядов труб на нижнее, вновь попадает на теплопередающую поверхность ребер, что нерационально. Вертикальная компоновка к тому же является наиболее предпочтительной для целого ряда аппаратов химических, нефтехимических и газохимических производств.

Впервые метод интенсификации теплообмена при пленочной конденсации на вертикальной трубе за счет применения мелкоребристой поверхности был предложен Грегоригом в 1954 г. Поверхность строится таким образом, чтобы толщина пленки вдоль гребня не менялась. При конденсации пара на мелкоребристой вертикальной поверхности в пленке конденсата, находящейся на гребне волнистого профиля, под действием сил поверхностного натяжения возникает избыточное давление по отношению к давлению пара, во впадине волнистого профиля давление в пленке становится меньше, чем давление пара. Так в пленке возникает градиент давления, под действием которого жидкость стягивается с выступа во впадину, по которой она затем стекает под действием силы тяжести. На выступе же остается пленка очень малой толщины (см. рис. 1), за счет чего интенсивность теплообмена на этом участке поверхности и в целом по трубе значительно возрастает.

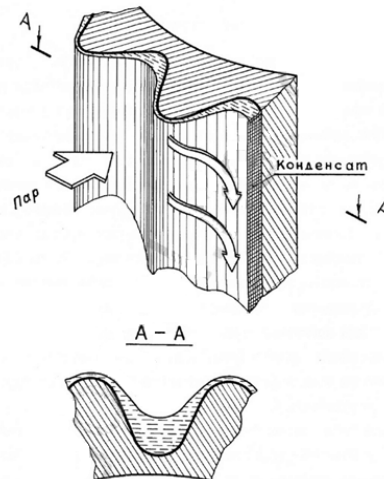


Рис. 1. Элемент вертикальной рифленой поверхности и распределение пленки конденсата на ней

Результаты экспериментов (рис. 2) свидетельствуют о том, что значения коэффициентов теплоотдачи при конденсации водяного пара на трубах с продольным мелковолнистым оребрением (расчетная кривая 1) в несколько раз превосходят значения, получаемые при конденсации на гладких трубах (расчет по формуле Нуссельта – кривая 2).

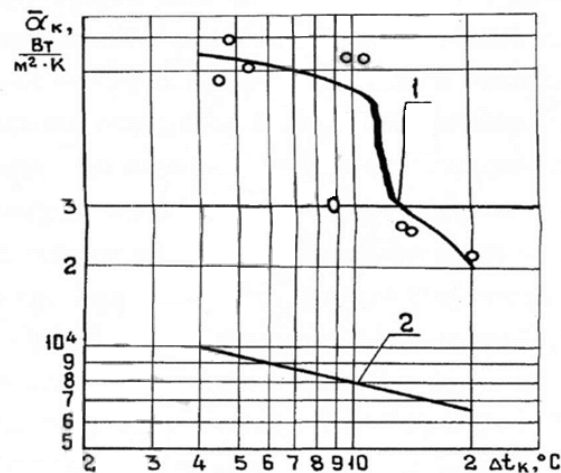


Рис. 2. Результаты исследования Р. Грегори

Хотя профиль волнистого гребня и является весьма эффективным с точки зрения теплообмена, поверхности Грегори не нашли широкого применения на практике, поскольку при их изготовлении требуется с высокой точностью выдерживать закон изменения кривизны поверхности от точки к точке. Каждое конкретное сочетание рабочего вещества и режимных параметров ведет к необходимости изготовления индивидуальной формы геометрии оребрения, что трудно реализовать на практике.

Более простой в изготовлении является круглая форма ребер. Теоретическое исследование процесса теплообмена при конденсации водяного пара на горизонтальных трубах проведено в работе А. П. Солодова и В. П. Исаченко. Результаты расчета представлены в работе в виде графической зависимости:

$$\text{Nu}(K_1 \cdot \text{We})^{-0,25} = f(L \cdot K_1^{-0,75} \cdot \text{We}),$$

где Nu – число Нуссельта; K_1 – число Кутателадзе; $L = \frac{R}{H}$; We – число Вебера.

Расчетная зависимость неудобна для практического использования, так как она дана не в аналитической форме и содержит в правой и левой части одни и те же комплексы. Начиная с некоторой высоты трубы, зависимость дает резкое уменьшение коэффициента теплоотдачи до значений, имеющих место на гладкой трубе, что обусловлено полным затоплением выступов. То есть зависимость пригодна только для расчета труб, высота которых совпадает с $H_{кр}$. Также зависимость неудовлетворительно отслеживает влияние изменения радиуса полуокружностей на средний коэффициент теплоотдачи.

Вертикальные трубы с продольными ребрами в виде полуокружностей с $R = 0,5$ мм и $R = 0,35$ мм экспериментально исследовались В. Г. Рифертом, Г. Г. Леонтьевым, С. И. Чаплинским. Опыты проводились на водяном паре. Интенсивность теплообмена в опытах на трубах с $R = 0,5$ мм и $R = 0,35$ мм оказалась практически одинаковой. Авторы объясняют этот факт тем, что на трубах с меньшим радиусом кривизны больше значение величин градиента давления от действия сил поверхностного натяжения, однако больше и относительное затопление поверхности. В результате отношение средних значений коэффициентов теплоотдачи для двух сравниваемых поверхностей оказывается близким к

единице. Полученный результат на практике мог явиться следствием и того, что фактический профиль после накатки, по существу, имел трапецеидальную форму.

Трапецеидальная форма оребрения исследовалась в работах Н. В. Зозули, В. А. Карху. Результаты экспериментов показали, что ребристые трубы с трапецеидальными ребрами не дают большой степени интенсификации теплообмена. При высоте трубы, 0,75 м средний коэффициент теплоотдачи, отнесенный к поверхности гладкой трубы был в 2,5–3,5 раза выше, чем для гладкой. Однако с учетом коэффициента оребрения это ненамного больше, чем на гладкой поверхности.

Еще более простыми и технологичными в изготовлении по сравнению с полукруглыми и трапецеидальными ребрами являются ребра со скругленными выступами и впадинами. Учитывая то, что изготовление таких труб освоено промышленностью, наибольший практический интерес представляет исследование именно этого типа поверхностей. На рис. 3 представлены сводные данные по интенсификации теплообмена при конденсации пара на вертикальных рифленых поверхностях, полученные при анализе результатов основных экспериментальных работ по данному вопросу. Все данные отнесены к значениям коэффициентов теплоотдачи при конденсации пара на гладкой поверхности, рассчитанные по формуле Нуссельта. Среднее по всей поверхности значение температурного напора на стороне конденсации определялось по показаниям термомпар, зачеканенным в стенку трубы. Для холодильных установок разность температур между теплообменивающимися средами в конденсаторах составляет 5–10 °С. На рис. 3 видно, что для данной области наибольшая степень интенсификации процесса от оребрения была достигнута Грегоригом по конденсации водяного пара (линия 1). Однако коэффициент поверхностного натяжения хладагентов в 7–9 раз больше чем у воды, поэтому соотношение между теплоотдачей оребренной и гладкой поверхностями для хладагентов будет меньше, что видно по положению линий 5 (хладагент R-11), 7 (хладагент R-113), 8 (изобутан).

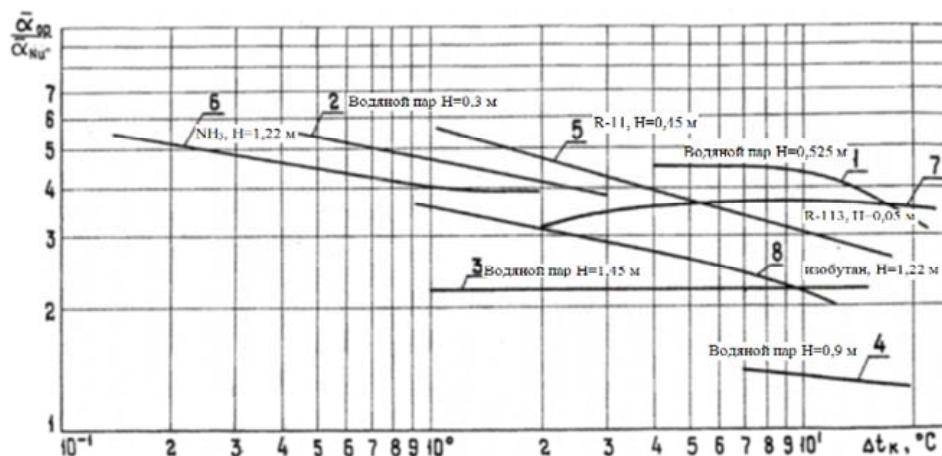


Рис. 3. Интенсификация теплообмена при конденсации пара на вертикальных рифленых поверхностях

Если сравнивать между собой методики определения коэффициента теплоотдачи оребренной поверхности, графическая интерпретация которых изображена линиями 5, 7, 8, то необходимо отметить следующее:

– линия 5 (исследования Х. Фуджи и Т. Хонды) – сопоставление результатов расчета весьма удовлетворительно согласуется с данными опытов по конденсации

R-11 на вертикальных трубах с $H = 0,446$ м. Однако расчет по методике очень трудоемок, что ограничивает возможности его практического применения.

– линия 7 (исследования В. Накаямы и С. Хирасавы) – несмотря на хорошую сходимость результатов экспериментов и их численного решения, авторы получили очень сильную зависимость коэффициента теплоотдачи от высоты поверхности и предложили оснащать поверхности с мелким продольным оребрением конденсаторо-отводящими устройствами (юбками). Этот результат находится в противоречии со всеми известными из литературы экспериментальными данными, которые свидетельствуют о том, что юбка не оказывает влияния на теплоотдачу.

– линия 8 (Д. Мишель и Р. Мэрфи) – сопоставление результатов экспериментов на горизонтальных и вертикальных трубах позволило авторам сделать вывод о том, что одиночные вертикальные трубы могут давать значение коэффициента теплоотдачи в 1,7 раза выше, чем одиночные горизонтальные. Предложили, в случаях, когда падение коэффициента теплоотдачи с ростом H существенно, использовать юбки.

Выводы

Применение вертикальных труб с мелким продольным оребрением является высокоэффективным методом интенсификации теплообмена при пленочной конденсации.

В литературе отсутствуют достаточно надежные и апробированные расчетные методики, пригодные для инженерных расчетов. Большинство из известных экспериментальных работ не содержит данных, необходимых для практического использования полученных результатов.

Большинство из известных экспериментальных данных относится к конденсации водяного пара.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что профиль Грегориго и ребра со скругленными выступами и впадинами – наиболее эффективное оребрение. Более простыми и технологичными в изготовлении являются трубы со скругленными поверхностями выступов и впадин, получаемые методом накатки. Наибольший практический интерес представляет исследование именно этого типа поверхностей.