

УДК 536.423.4

В.В. Горин, доц., канд. техн. наук

Одесская государственная академия технического регулирования и качества

Влияние неизотермичности теплообменной поверхности на эффективность оребрения при конденсации пара

Представлены теоретические исследования влияния неизотермичности поверхности на теплообмен при конденсации на гладкой и оребренной поверхностях
неизотермичность поверхности теплообмена, локальные коэффициенты теплоотдачи, толщина пленки, эффективность оребрения

В.В.Горін

Одеська державна академія технічного регулювання та якості

Вплив неизотермічності теплообмінної поверхні на ефективність оребрення при конденсації пари

Наведені теоретичні дослідження впливу неизотермічних поверхні на теплообмін при конденсації на гладкій та оребреній поверхнях.

Встановлено, що неизотермічність поверхні теплообміну надає істотний вплив на середні коефіцієнти тепловіддачі, приводячи до їх зниження.

неизотермічність поверхні теплообміну, локальні коефіцієнти тепловіддачі, товщина плівки, ефективність оребрення

Постановка проблемы и анализ публикаций

В современных системах кондиционирования и в теплонасосных установках процесс конденсации пары происходит преимущественно внутри горизонтальных труб и каналов. В этом оборудовании применяют в основном различные хладоны.

Не смотря на то, что с момента появления первых работ по исследованию конденсации на оребренных поверхностях опубликованы сотни новых результатов интерес к изучению процессов гидродинамики и теплообмена на таких поверхностях, особенно в случае конденсации внутри горизонтальных труб, не уменьшается. Это связано как с появлением новых хладагентов, альтернативных ранее используемым в технике хладонов R-12, R-22, так и с более точной техникой исследования режимов течения двухфазного потока внутри труб, а также с новыми методами интенсификации, такими как закрутка потока, трехмерные ребра и тому подобное.

В период 2005 – 2010 гг. опубликовано больше 200 работ с результатами новых исследований, но остались нерешенными две главных проблемы в этой области.

Первая – отсутствие методик расчета гидравлического сопротивления и теплоотдачи при конденсации внутри гладких и оребренных труб, которые с достаточной для конструирования точностью, позволят рассчитывать коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления при конденсации рабочих веществ в теплообменном оборудовании с конденсацией в горизонтальных трубах.

Вторая – отсутствие исследований влияния неизотермичности интенсифицированных поверхностей на теплообмен с учетом двухмерного поля температур.

Постановка задачі

Начальным шагом к решению проблемы влияния неізотермичности интенсифицированных поверхностей на теплообмен является необходимость в проведении теоретических исследований этих процессов.

Результаты исследований

1. Влияния неізотермичности поверхности на интенсивность теплопереноса в тонких пленках жидкости.

Во многих процессах теплообмена со стекающими жидкими пленками существует неізотермичность поверхности по длине пробега пленки вследствие неравномерности обогрева или охлаждения стенки, переменных локальных коэффициентов теплоотдачи или толщины пленки.

Перепады температур по толщине и длине пробега x пленки чаще всего не превышают $10 \div 30$ К, поэтому параметр неізотермичности $\varphi = T_{cm} - T_{ж} \approx 1$ и можно, основываясь на результатах исследований по обтеканию жидкостью пластины, пренебречь влиянием незначительных изменений по длине пробега пленки x физических свойств жидкости на профиль скорости и температуры в пограничном слое. При нагреве, охлаждении или испарении пленки жидкости, когда отсутствует влияние температурного напора стенка - пленка ΔT_x на интенсивность процесса, локальный коэффициент теплоотдачи α_x будет стоянным по x .

Этот вывод получается также при анализе результатов решения задачи теплообмена при ламинарном пленочном течении жидкости на неізотермической поверхности в работе [1].

В [5.1] получена зависимость для локальной теплоотдачи:

$$\frac{\alpha_x}{\alpha_{из}} = 1 + 0,2\gamma_1 + 0,175\bar{\gamma}_1; \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{T'_{cm}}{T_{cm} - T_{пл}} \delta_x Re Pr; \bar{\gamma}_1 = \frac{T'_{пл}}{T_{cm} - T_{пл}} \delta_x Re P,$$

где T'_{cm} и $T'_{пл}$ - производные температур стенки по x .

Покажем, что слагаемые γ_1 и $\bar{\gamma}_1$ чаще всего много меньше единицы. Зададим степенной закон изменения по:

$$\Delta T_x = (k + 1) \Delta \bar{T} \left(\frac{x}{l} \right)^k. \quad (2)$$

Максимальное значение производной $\frac{d\Delta T_x}{dx}$ при $k > 0$ будет при $x = l$.

Если положить линейное изменение температуры по $\alpha_x = f(\Delta T_x)$ ($k = 1$), то 2-е и 3-е слагаемые в (1) будут иметь соизмеримые с единицей величины при $RePr > 2500$ для $l = 1$ м. В диапазоне изменения чисел $Pr = 1,5-10$ число Re при этом будет значительно превышать не только критическую величину Re перехода в волновое течение, когда уже, строго говоря, несправедливо решение (1), но будет соответствовать турбулентному течению пленки, когда математическое описание задачи в [1] неприемлемо в принципе.

При короткой длине пробега пленки, например, для горизонтальной трубы и высоких k следует учитывать по (1) влияние неізотермичности на α_x . Но следует заметить, что большие k , близкие к единице, могут иметь, как показали результаты решения уравнения теплопроводности при граничных условиях 3-го рода в [2], лишь при низкой теплопроводности λ_{cm} стенки, $\lambda_{cm} \leq 16 \text{ Вт/мК}$.

При конденсации пара $\alpha_x = f(\Delta T_x)$ и будет отличаться от $\alpha_{из}$, когда $\Delta T_x = \text{const}$ по x , что показано впервые в [3]. Это следует из решения уравнения

енергии для пленки конденсата. Так, при конденсации пара на вертикальной пленке при нуссельтовских допущениях для ламинарного течения конденсата имеем уравнение

$$\delta_x^3 d\delta_x = \frac{4\mu\Delta T_x}{r\rho^2g} dx. \tag{3}$$

Приняв $\delta=0$ при $x=0$, получим в результате интегрирования (3) зависимость для δ_x :

$$\sigma_x = \left[\frac{4\mu\lambda \int_0^x \Delta T_x}{g\rho^2r} \right]^{0.25}, \tag{4}$$

как видно, имеющую существенное отличие от зависимости, определяющей δ_x при $\Delta T_x = const$. В [4] в результате решения уравнений движения и энергии более полных, а именно: с учетом инерционных и конвективных членов, чем в постановке Нуссельта, показано, что, как и для изотермической поверхности, решение в виде (4) справедливо, когда $k = r/C_p\Delta T_x > 5$ и $Pr = 1 + 100$.

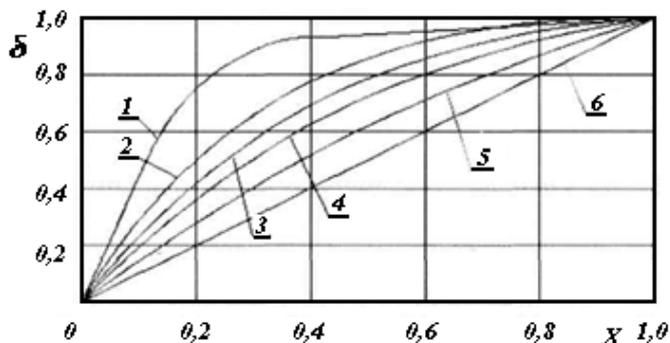
Так как $\alpha_x = \lambda/\sigma_x$ для ламинарной пленки, из (4) сразу ясно, что α_x для $T_x = var$ отличается от $\alpha_{из}$. Объяснить физически это можно, если построить зависимость изменения толщины пленки конденсата по x .

Примем закон изменения ΔT_x по x в виде (2). Используя (2) и (4), получим соотношение, определяющее изменение профиля пленки по длине пути конденсата:

$$\bar{\delta} = \frac{\delta_x}{\delta_1} = \left(\frac{x}{l} \right)^{\frac{k+1}{4}}.$$

Заметим, что зависимость (4) допускает $k > -1$, т.к. при $k \leq -1$ $\delta_x = \infty$ при $x=0$.

На рис.1 показано изменение профиля пленки по $X = x/l$ при различной степени неизотермичности. При $k > 0$ δ_x везде, за исключением начальной и конечной точек, меньше, а при $k < 0$, наоборот, больше, чем δ_x для изотермической поверхности, когда $k = 0$. Отсюда и различия в локальных α_x для изотермической и неизотермической поверхностей.



1 - степень неизотермичности $k = -0,5$; 2 - 0; 3 - 0,5; 4 - 1,0; 5 - 2; 6 - 3

Рисунок 1 - Изменение толщины пленки конденсата по длине пути

Задача о влиянии неизотермичности поверхности на $\bar{\alpha}_l$ при течении ламинарной пленки жидкости постоянной толщины решалась в [5] в сопряженной постановке для случая, когда температура пленки на свободной поверхности T_{nl} постоянная, а температура стенки на внешней поверхности изменяется по x линейно. Показано, что при реальных геометрических размерах аппаратов решение задачи зависит от двух параметров: $P = l/\delta_x RePr$ и $Bi = \lambda b_{ст}/\lambda_{ст} \delta_{ст}$.

Для тонких ламинарных пленок ($Re \leq 100$) $\lg P \geq 0$ и средний $\bar{\alpha}_l$, который в [5] определен по разности температур стенки при $x=1$ и T_{nl} , вычисляется по следующей

зависимости:

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{\alpha}_1 \delta_x}{\lambda} = 0,55 \frac{1}{Bi+1}. \quad (6)$$

При $Bi \ll 1$ из (6) получается $Nu = 0,55$, а должно быть $Nu = 1$.

При конденсации пара на изотермической поверхности в [3] было показано, что на плоской поверхности $\overline{\alpha}_1$ инвариантен относительно неравномерности поля температур. Этот результат следует как из анализа рис.1 (для всех k при $x = l$ $\delta_x/\delta_l = 1$), так и непосредственно из определения $\overline{\alpha}_1$

$$\overline{\alpha}_1 = \frac{\lambda \int_0^l \frac{\Delta T_x dx}{\delta}}{l \Delta T} \quad (7)$$

используя для δ_x зависимость (4), а для ΔT_x - (2).

Для криволинейных контуров поверхности $\overline{\alpha}_1$ зависит от неизотермичности стенки, так как, согласно решению в [3], с использованием (2) имеем:

$$\frac{\overline{\alpha}_1 \delta_x}{\lambda} = \left(\frac{4}{3}\right)^{3/4} \left[\int_0^l (k+1) X^k f^{1/3}(X) dx \right]^{3/4} \quad (8)$$

где $f(X)$ - форма поверхности,

$$\alpha_x = \left[\frac{3 \lambda \Delta \overline{T}_{lm}}{\rho^2 g r} \right]^{1/4}, \quad (9)$$

В технике чаще всего криволинейные поверхности - это горизонтальные трубы. Для них $f(X) = \sin(nX)$, $l = \pi d/2$. Решим численно интеграл в правой части (8) для различных k от -1 до 4.

Результаты вычислений представлены на рис.2 в виде зависимости отношения a_i к $a_{из}$, когда $k = 0$, от степени неизотермичности.

Как видно из графика, любая неизотермичность поверхности горизонтальной трубы приводит к снижению $\overline{\alpha}_1$ по сравнению с изотермической поверхностью. Для $k > 0$ при изменении k до 2 $\overline{\alpha}_1$ ниже всего на 17% $\overline{\alpha}_{из}$.

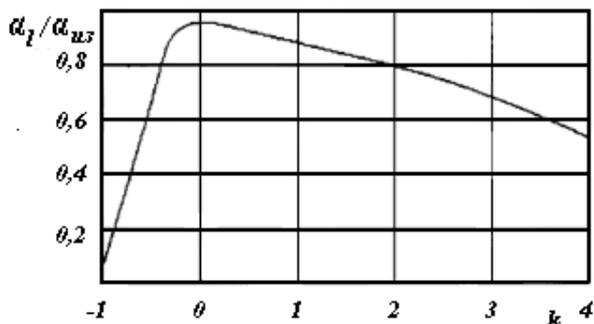


Рисунок 2 – Влияние степени неизотермичности на интенсивность конденсации пара на горизонтальной трубе

При нагреве, охлаждении, конденсации или испарении пленки жидкости в условиях отсутствия влияния T_x на α_x и учитывая, как показано выше, независимость α_x от температуры стенки, отношение $\overline{\alpha}_1$ к $\overline{\alpha}_{из}$ можно определить следующим образом:

$$\frac{\overline{\alpha}_1}{\overline{\alpha}_{из}} = \frac{\int_0^l \alpha_x \Delta T_x dx}{\overline{\alpha}_{из} \int_0^l \Delta T_x dx} \quad (10)$$

Положим $\alpha_x = a x^n$, T_x определим по зависимости (2). Тогда

$$\frac{\overline{\alpha}_1}{\overline{\alpha}_{из}} = 1 + \frac{nk}{n+k+1}. \quad (11)$$

При этом по условию определения интеграла (10) $n + k + 1 > 0$. Согласно (11), при постоянном по x $\alpha_x (n = 0)$ $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_{n+1}$, если делать сравнение при одинаковых $\Delta \bar{T}$, а не по ΔT_x при $x = l$, как в [5].

В остальных случаях в зависимости от знака n и k возможны как $\bar{\alpha}_1 / \bar{\alpha}_{n+1} < 0$ так и $\bar{\alpha}_1 / \bar{\alpha}_{n+1} > 0$. Так, при течении пленки жидкости по горизонтальной трубе $n < 0$ и ΔT_x растет с увеличением x ($k > 0$). Важным при расчете средней теплоотдачи при течении пленки по неизотермической поверхности является определение степени неизотермичности поверхности, т. е. показателя k в зависимости (2). Эта величина может быть найдена в результате решения уравнения теплопроводности для стенки при граничных условиях 3-го рода. Поэтому k будет являться функцией как геометрических характеристик и теплопроводности $\lambda_{ст}$ стенки, так и величины и степени неравномерности α_x по x .

2. Влияния неизотермичности на теплообмен при конденсации на оребренной поверхности.

Расчеты эффективности оребрения при конденсации пара без учета возможного влияния сил поверхностного натяжения приведены в работах [6,7]. Рассмотрены ребра постоянного поперечного сечения с одномерным распределением температур по высоте ребра, при этом коэффициенты теплоотдачи при конденсации описаны зависимостями Нуссельта [8]. В [7] приведены результаты решений в виде отношения безразмерных перепадов температур $\theta = \Delta T / \Delta T_0$ от характеристического параметра ребра

$$N^2 = m = \frac{\alpha_0 P h^2}{\lambda_{ст} f}$$

где P , f и h - соответственно, периметр, площадь поперечного сечения и высота ребра, а α_0 - коэффициент теплоотдачи, который для вертикального ребра рассчитывается при $x = h$. Распределение температур по длине горизонтального цилиндрического ребра показано на рис.3.

Профили температур для вертикальных ребер, направленных вершиной вверх и вниз, лишь незначительно отличаются от профиля на рис.3. Это же относится к эффективности ребер (рис.4) [7].

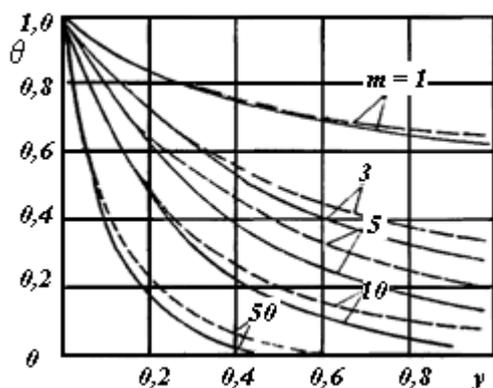
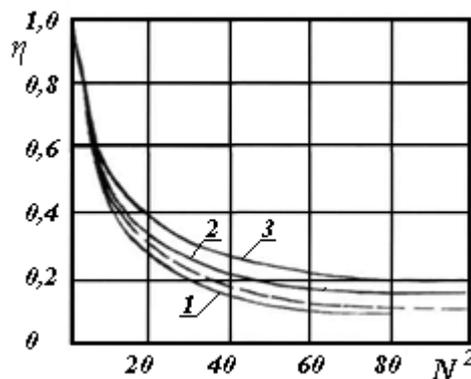


Рисунок 3 - Перепад температур в прямоугольном ребре: сплошные линии - расчет по [7] при $\alpha = f(x)$, пунктирные - по (12)



1 - ребро горизонтальное; 2, 3 -вертикальное, обращенное соответственно, торцом вверх и вниз
Рисунок 4 - Эффективность ребра при конденсации на нем пара [7]

С учетом [9] влияния неоднородности теплоотдачи по высоте ребра линии на рис. 3 и 4 совпадают с расчетом по известным [7] соотношениям для профиля

температур:

$$\theta = \frac{c h N (1-x)}{c h N}, \quad (12)$$

где $x' = x/h$, h - высота ребра; и эффективности ребра η :

$$\eta = \frac{c h N}{N}. \quad (13)$$

В (12) и (13) α_0 рассчитывается при $x = h$.

На безразмерный профиль температур θ и эффективность ребра η помимо N влияет, как известно, профиль ребра. Лучшей эффективностью обладает вогнутый параболический профиль, худшей - прямоугольный. Однако это различие заметно проявляется при больших N , согласно [7], при $N > 2$. Таким образом, основное влияние на неизотермичность ребер при конденсации будет оказывать локальная теплоотдача и высота ребра. Для жидкостей с низкой теплопроводностью, типа фреонов, для кольцевых ребер на горизонтальной трубе эффективность оребрения η близка к единице при $D_p/D_{тн} < 1,4$. Интенсивность конденсации в случае η , близким к единице, выше по сравнению с гладкой поверхностью для горизонтальной трубы из-за увеличения поверхности и за счет более высоких коэффициентов теплоотдачи на коротких участках, каковыми являются ребра.

Поэтому в конденсаторах низкокипящих жидкостей относительно высокие ребра, когда еще не проявляется эффект поверхностных сил нашли применение в промышленности. Для случая конденсации водяного пара поперечные ребра, согласно данным [7], дают низкую эффективность. Так $\eta = 0,4 - 0,5$ при $m < 10$, что для стали с $\lambda_{ст} = 50 \text{ Вт/м К}$ соответствует высоте ребра $h < 2$ мм. При такой высоте на процесс конденсации начинают оказывать влияние поверхностные силы, с одной стороны, усиливающие конденсацию на ребре, а с другой - создающие утолщенный, по сравнению с гладкой трубой, поддонный слой в случае горизонтального расположения ребер.

При продольном оребрении вертикальной поверхности, когда конденсат по ребру и между ребрами течет в одном направлении под действием силы тяжести, интенсификация конденсации может быть связана лишь с увеличением поверхности теплообмена. Анализ эффективности такого оребрения, т.е. когда пренебрегают влиянием поверхностных сил, рассмотрен в [7]. Задача решена в одномерном приближении и пренебрежении влиянием поверхностных сил. Полученные в результате решения профили температур совпадают при одинаковых m с данными для поперечных ребер.

Выводы

1. Установлено, что неизотермичность поверхности теплообмена как в гладких трубах и каналах, так и, тем более, в оребренных, оказывает существенное влияние на средние коэффициенты теплоотдачи, приводя к их снижению.

2. В случае конденсации на ребрах необходимо учитывать 2-х мерность поля температур, которая приводит к более резкому снижению температуры по высоте ребра и большему снижению среднего коэффициента теплоотдачи.

Список литературы

1. Nusselt W. Oberfachtn Kondensation des Wasserdampfes. - Zeitschrift VDI. - 1916. - Bd. 60. - P. 541-546, 568-575.
2. Котельникова О. П., Степанянц Л. Г. Параметрический метод решения задач при пленочном течении жидкости// ИФЖ. - 1983. - т. X. - № 4. - С. 632-636.
3. Лабунцов Д. Л. Обобщение теории конденсации Нуссельта на условия пространственно-неравномерного поля температур теплообменной поверхности// В кн. Теплообмен и гидравлическое сопротивление. Труды МЭИ. - 1965. - вып. 63. - С. 79-85.

4. Линхард, Дир. Ламинарная пленочная конденсация на неизотермических поверхностях, поверхностях с произвольным тепловым потоком и на ребрах// Теплопередача. Труды ASME. – 1974. - т. 96. - № 2. - С. 90-98.
5. Холпанов Л. П. и др. Сопряженный теплообмен между пленкой жидкости и твердой стенкой// ИФЖ. - т. 27. - № 6. - С. 1091-1097.
6. Михалевич А.А., Песляк В.И. Расчет эффективности оребрения в условиях конденсации теплоносителя на мелкорребристой поверхности// Доклады АН БССР. – 1975. - т. 19. - С. 420-423.
7. Зозуля Н.В., Карху В.А. Распределение температуры и коэффициент теплоотдачи при конденсации пара на прямоугольном ребре// ИФЖ. – 1967. - т. 13. - № 6. - С. 853-858.
8. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. - М.: Энергия, 1977. - 236 С.

V.Gorin

Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality

Impact nonisothermal heat transfer surfaces on the efficiency finned vapor condensation

Theoretical studies of the effect on the non-isothermal heat transfer surface condensation on smooth and ribbed surfaces.

Conducting theoretical investigations of vliyaniniya nonisothermicity intensified heat exchange surfaces

Nonisothermal heat transfer surface has a significant effect on the average heat transfer coefficient, leading to their decline.

nonisothermal heat exchange surface, film thickness, fin efficiency

Одержано 18.04.13

УДК 621.73+007

Б.Б. Кришкін, доц., канд. техн. наук

Кіровоградський національний технічний університет

Оптимізація технології холодного об'ємного штампування накидних гайок рукавів високого тиску

У статті описано методику моніторингу та оптимізації конструктивних параметрів робочих деталей штамп для холодного об'ємного штампування деталі «Гайка накидна» із візуалізацією отриманих результатів за допомогою програмного комплексу DEFORM 3D
пуансон, матриця, зусилля, деформації, видавлювання, напруження

Б.Б. Крышкин, доц., канд. техн. наук

Кировоградский национальный технический университет

Оптимизация технологии холодной объёмной штамповки накидных гаек рукавов высокого давления

В статье описана методика мониторинга и оптимизации конструктивных параметров рабочих деталей штампа для холодной объёмной штамповки детали «Гайка накидная» с визуализацией полученных результатов при помощи программного комплекса DEFORM 3D
пуансон, матрица, усилия, деформации, выдавливание, напряжения