

УДК 536.423.4

Горин В.В., Буз В.Н., Смирнов Г.Ф.

**ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ
ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НА РЕБРАХ
ТРЕУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ**

*Национальний технічний університет «Київський політехнічний інститут»,
Одеський національний університет, Інженерний центр «Промгазопарат»*

Постановка и актуальность задачи. Последние годы особый интерес у инженеров и научных работников, работающих в различных направлениях техники, вызывают различные формы приложения так называемых микрооребрённых поверхностей для теплообменных аппаратов разного назначения. Оказывается, что весьма перспективно для таких форм интенсификации процессов и улучшения массогабаритных характеристик аппаратов их приложение к поверхностям конденсации. При этом до сих пор остаются невыясненными полностью условия и принципы воздействия на этот процесс различных физических сил [1].

Цель работы. Именно в этой связи, а также с учетом подхода к проблеме взаимодействия физических сил при конденсации, который последние годы развивается авторами, выполнена настоящая работа.

Математическая модель. Рассмотрим процесс конденсации на ребристой поверхности, представленной на рис. 1.

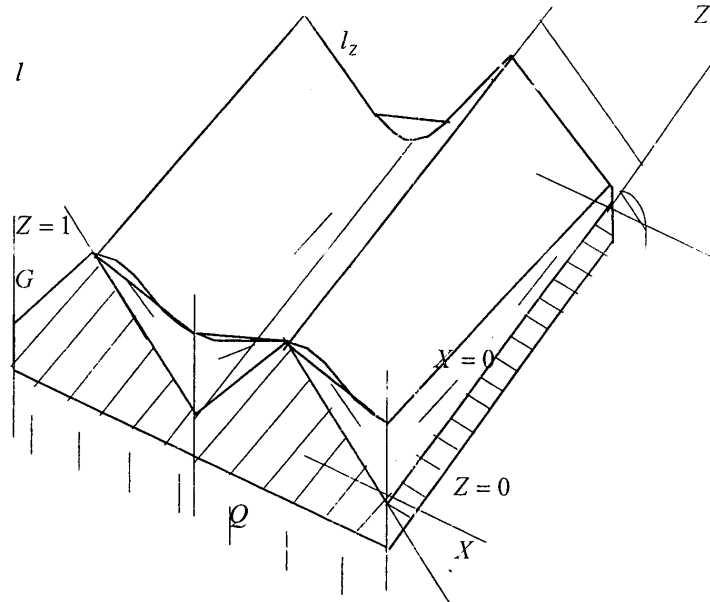


Рисунок 1 – Схема конденсации на оребренной поверхности с отводом конденсата по межреберным канавкам

Над ребристой поверхностью находится насыщенный пар, от нижней поверхности стенки отводится тепло. Сконденсировавшаяся жидкость стекает вдоль оси x от вершины ребра к основанию. Далее жидкость движется по канавке вдоль основания ребра (вдоль оси z). Рассмотрим случай, когда влияние силы тяжести пренебрежимо.

Причиной движения жидкости является сила давления. Минимальное давление в пленке жидкости будет в сечении отсоса (при $z = z$), максимальное – на вершине ребра. Вдоль движения жидкости давление в пленке падает из-за действия сил трения. Будем полагать, что на боковой поверхности ребра скорость жидкости вдоль оси z , пренебрежимо в сравнении со скоростью вдоль оси x . При движении ручья жидкости в треугольной канавке вдоль основания ребра основную роль играет составляющая вектора скорости вдоль оси z .

Задача о конденсации на поверхности ребра соответствует одной из задач, рассмотренных авторами ранее в связи с аналитическими исследованиями процесса конденсации в условиях конденсации с отсосом за пределами поверхности теплообмена [2, 3].

Для составления полной модели рассматриваемого процесса необходимо рассмотреть эту задачу совместно с задачей о течении жидкости с переменным расходом в треугольной канавке вдоль основания ребра (вдоль оси Z) к сечению отсоса.

Будем условно полагать, что до сечения X_f (на рис. 1) течение жидкости одномерно вдоль оси X , а при $X > X_f$ течение одномерно вдоль оси Z к источнику отсоса. Вдоль оси Z расход жидкости является величиной переменной и в любом сечении Z определяется уравнением

$$G = \rho_1 w \delta_f \delta_f \text{ctg}(\beta/2). \quad (1)$$

Изменение расхода происходит в соответствии с уравнением

$$dG = 2\rho_1 u_f \delta_f dz. \quad (2)$$

Из последних двух уравнений следует

$$\frac{d(w\delta_f^2)}{dz} = 2u_f \delta_f \text{tg}(\beta/2) \quad (3)$$

или в безразмерной форме

$$\frac{d \text{Re}_z}{dZ} = \frac{\text{Re}_f \text{tg}(\beta/2)}{\Delta_f L^2} - \frac{2 \text{Re}_z}{\Delta_f} \frac{d\Delta_f}{dZ}. \quad (4)$$

Здесь β – угол в основании канавки; w – средняя скорость в живом сечении потока жидкости вдоль оси z ; индекс f относится к параметрам жидкостной пленки при $X = X_f$; $\text{Re}_z = \frac{\rho_l w l}{\mu_l}$; $Z = \frac{z}{l_z}$; $L = \frac{l}{l_z}$.

Потери давления при движении жидкости в канавке вдоль основания ребра (вдоль оси Z) в простейшем случае для ламинарного течения определяется уравнением:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{C}{\text{Re}_z} \frac{\rho_1 w^2}{2d_e}, \quad (5)$$

где C – константа; d_e – эквивалентный диаметр.

Приняв $d_e = \frac{4\pi}{\dot{I}} = \frac{4\delta_f^2 \operatorname{ctg}(\beta/2)}{2\delta_f(1+\operatorname{ctg}(\beta/2))} = \frac{2\delta_f}{1+\operatorname{tg}(\beta/2)}$ и перейдя к безразмерным пе-

ременным из последнего уравнения получим:

$$\frac{dP_f}{dZ} = \frac{C(1+\operatorname{tg}(\beta/2))^2 \operatorname{Re}_z}{8 \Delta_f^2}. \quad (6)$$

Математическая модель рассматриваемого процесса конденсации для случая изотермической поверхности конденсации содержит уравнения из предыдущих работ авторов [2, 3] с соответствующими граничными условиями и уравнениями (3, 4, 5 и 6) с их граничными условиями (7):

$$\text{при } Z=0 \quad \operatorname{Re}_z = 0; \text{ при } Z=1 \quad P_f = P_{f1} \quad \Delta = \Delta_{f1}. \quad (7)$$

Принятые правые граничные условия в (7), как и в рассматриваемых ранее вариантах модельной задачи для элемента поверхности конденсации с отсосом жидкости, являются не единственными, возможны и другие типы граничных условий.

Алгоритм расчета предусматривает численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (4), (6) с граничными условиями (7), на каждом шаге которого производится численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В обоих случаях задача сводилась к задаче Коши, а недостающие условия на левых границах определялись по заданным граничным условиям на правых границах путем решения системы соответствующих нелинейных уравнений.

Распределения толщины пленки вдоль образующей ребра (рис. 2) соответствуют ранее выполненным расчетам с той лишь разницей, что все эти распределения получены не для разных режимов отсоса жидкости, а для разных сечений Z одного и того же режима. Различие обуславливается разными значениями P_f в каждом сечении из-за гидравлических потерь жидкости по канавке в основании ребер.

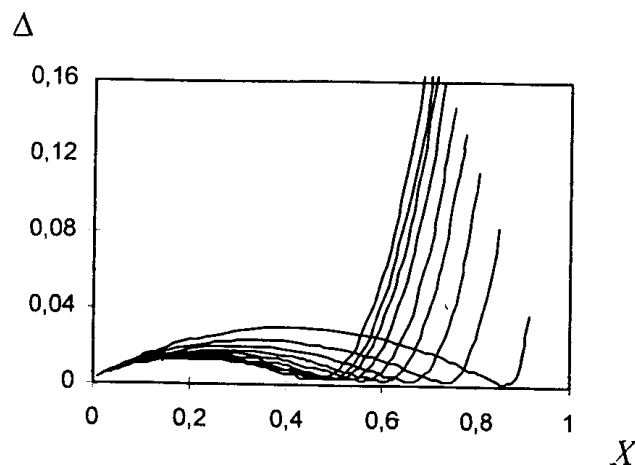


Рисунок 2 – Распределение толщины пленки конденсата вдоль поверхности конденсации для различных сечений Z :

1 – 0,1; 2 – 0,3; 3 – 0,4; 4 – 0,5; 5 – 0,6; 6 – 0,7; 7 – 0,8; 8 – 0,9; 9 – 1

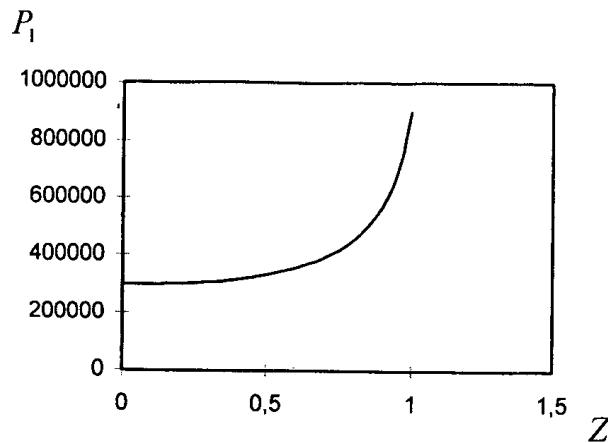


Рисунок 3 – Изменение безразмерного давления вдоль канавки отвода жидкости

при $B = 0$; $K = 0,001$; $A = 2 \cdot 10^{-5}$; $P_{z=1} = 9 \cdot 10^4$; $\beta = \frac{\pi}{2}$

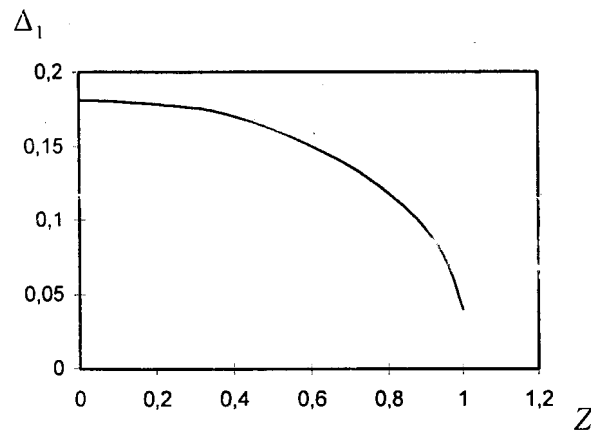


Рисунок 4 – Изменение толщины пленки конденсата в основании ребра вдоль канавки отвода жидкости для указанных условий рис. 1

Выводы: 1. Как следует из рис. 3, гидравлические потери вдоль канавки (по оси Z) изменяются существенно нелинейно. Эта нелинейность обуславливается, с одной стороны, возрастающим вдоль оси Z расходом жидкостного ручья, с другой стороны – уменьшающейся площадью поперечного сечения (рис. 2) из-за действия сил поверхностного натяжения.

2. Из-за различий в распределениях Δ по сечениям изменяется вдоль оси Z и среднее по образующей число Нуссельта (рис. 5). Эта кривая имеет характерный для конденсации с отсосом пленки жидкости максимум.

Полученное в результате расчета различие кривизны пленки по сечениям вдоль оси Z (рис. 2) соответствует различию давления в жидкостной пленке. Это должно привести к движению жидкости вдоль оси Z по всей поверхности, а не только в основании ребер. Как и ожидалось, течение пленки жидкости по поверхности конденсации, строго говоря, не одномерное, как принято в рассматриваемой модели. Насколько существен вклад этой неоднородности, и в каких условиях она проявляется, следует устанавливать из специальных дополнительных расчетов.

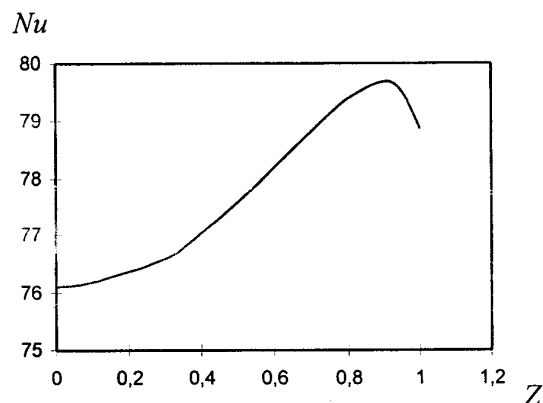


Рисунок 5 – Изменение среднего по образующей ребра Нуссельта в направлении отвода жидкости для указанных условий рис. 1

Список принятых обозначений

L, l – длина; P, p – давление; W, w, u – скорость; Q – тепловой поток; G – массовый расход; d – диаметр; Z, X, Y, z, y – координаты; β – угол; δ – толщина (пленки, стенки); Π – периметр; ρ – плотность; μ – динамическая вязкость.

Безразмерные комплексы: $Re = \frac{WL}{\nu}$ – число Рейнольда; $Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$ – число Нуссельта; $A; B; P \dots$ безразмерные числа для конденсации с отсосом.

Индексы: 1 – жидкость; f – сечение; 1 – сечение отсоса.

Литература

1. Rifert V.G. & Smirnov H.F. “Condensation Heat Transfer Enhancement”; WIT-Press, Southampton, Boston. 2004. 372 pp.
2. Smirnov H.F. and Buz V.N. The condensation on the profiled surfaces without gravitational low of liquid film//Proc. of the “Heat and Mass. Transfer. International Forum – Minsk-96”. Vol. 4, Part 2, pp. 131-135, Minsk, 1996 (in Russian).
3. Buz V.N., Smirnov H.F. The film-wise condensation on the finned surfaces and with artificial suction in space conditions//Proc. of the Intern. Symp. “The Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation”. May, 1997, Moscow, Russia, pp. 545–549.

УДК 536.423.4

Горін В.В., Буз В.Н., Смирнов Г.Ф.

ПРОЦЕСИ ТЕПЛОМАСООБМІНУ І ГІДРОДИНАМІКИ ПРИ КОНДЕНСАЦІЇ НА РЕБРАХ ТРИКУТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕТИНУ

У статті розглянута задача конденсації пари на мікроребренних поверхнях теплообмінних апаратів. Приведена математична модель процесу конденсації і алгоритм розрахунку для граничних умов шляхом рішення системи диференціальних рівнянь, розроблених авторами.

стаття надійшла до редакції 21.08.2008 р.