

**Ю.Б. ДАНИЛОВ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**И.Г. ГАВРИЛИЧЕНКО**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **ВЫПАРИВАНИЕ ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ ДВИЖЕНИИ ПЛЕНКИ РАСТВОРА**

Построена математическая модель течения и выпаривания пленки раствора в вертикальных полуцилиндрах, цилиндрах, плоскости и конусах. Модель апробирована с помощью экспериментов. Модель позволяет получать толщину пленки и коэффициент теплопередачи.

**Ключевые слова:** выпаривание, теплопередача, плёночное течение, поверхностное испарение.

**Введение и постановка задачи.** Современные направления развития и совершенствования ресурсосберегающих технологических процессов открывает большие возможности и перспективы использования плёночных течений при выпаривании растворов. Проведение процессов в тонких жидкостных слоях обладает рядом преимуществ: так, например, коэффициенты теплопередачи, практически чем в 2 раза выше, чем при течении в трубах. Оптимальные режимы работы плёночных аппаратов имеют место при невысоких температурных напорах, что позволяет создавать выпарные аппараты с многократным использованием тепла греющего пара.

**Анализ последних достижений и литературы.** Фундаментальные основы гидродинамики и теплообмена в жидкостных пленках заложены в работах Жаворонкова Н.М., Капицы П.Л., Кутателадзе С.С., Малюсова В.А. и др., а также в работах – Нуссельта В., Глазера Г., Допплера А.Е., Мак-Адамса В.Х., Хоблера Т. и др. Ими созданы основы подхода к решению проблемы, описаны основные закономерности процессов тепло- и массообмена в тонком слое.

В дальнейшем эти положения были развиты в обстоятельных теоретических и экспериментальных исследованиях Байкова В.И., Воронцова Е.Г., Гимбутиса Г.И., Живайкина Л.Я., Когана В.Б., Кулова Н.Н., Таубмана Е.И., Тобиличева Н.Ю., Вильке В., Струве Г., Уйхиды Ю.В. и др.

© Ю.Б. Данилов, И.Г. Гавриличенко. 2013

Механизмы теплоотдачи и кинетики процесса определяются гидродинамикой жидкостного потока, условиями на границах: стенка – жидкость, жидкость – пар. Хотя поверхностному испарению – кипению в пленке посвящается все большее число работ, механизм процесса и закономерности теплопереноса до настоящего времени изучены недостаточно. Большая часть аналитических решений основана на анализе течения пленки конденсата, впервые разработанном Нуссельтом. На основе этих решений получаются уравнения для расчета средней толщины пленки и коэффициентов теплоотдачи или для расчета тепловой нагрузки.

С практической точки зрения наибольший интерес представляет теплоотдача в пленке при интенсивном поверхностном испарении. Теплоперенос происходит от греющей поверхности стенки через пристенный пограничный слой, толщину пленки и газовую поверхность. Основное термическое сопротивление, имеет место в пограничных слоях.

Большое количество работ, посвященных теплоотдаче в пленке при поверхностном испарении, не охватывают в полной мере случаи течения пленки по поверхности опрокинутого конуса, когда по мере движения пленки уменьшается периметр сечения конуса, требуют экспериментального подтверждения определение толщины пленки, влияние плотности орошения, удельного теплового потока и других факторов при кипении в пленке на теплопередающей поверхности, выполненной в виде вертикального полуцилиндра.

**Цель исследований, постановка проблемы.** Рассматриваемые выпарные аппараты являются аппаратами пленочного типа, выполненного в виде вертикального полуцилиндра, цилиндра, плоские или усеченного конуса, обладают высокими коэффициентами теплопередачи и низкими энергозатратами, ввиду исключения из конструкции многочисленных гидropотерь в громоздких системах и устройствах коммуникаций для перетоков раствора, пара и конденсата, имеющих место в действующих многокорпусных установках.

Они имеют низкую металлоемкость из-за оригинального решения вопросов сепарации между теплообменными элементами, а принятые конструктивные решения обеспечивают высокую устойчивость конструкций, что позволяет применять тонколистовой конструкционный материал.

**Теоретические предпосылки решения задач экспериментальных исследований.** На работоспособность теплообменного элемента, выполненного в виде вертикального полуцилиндра или усеченного конуса, влияет целый ряд конструктивных и технологических факторов. С точки зрения связанной задачи гидродинамики и теплообмена можно выделить следующие факторы: уменьшение поверхности теплообмена при движении раствора от периферии к центру и увеличение при этом толщины стекающей пленки; уменьшение толщины пленки за счет испарения растворителя; изменение плотности теплового потока от греющего пара к раствору, связанное, прежде всего, с изменением толщины пленки раствора; изменение температуры кипения раствора при изменении его концентрации. С целью анализа влияния перечисленных факторов на работу аппарата была разработана математическая модель работы конического и, как частный случай, цилиндрического или плоского теплообменного элемента. Рассматриваемый элемент представляет собой наклонную или вертикальную поверхность, по внутренней поверхности которой стекает упариваемый раствор, а снаружи происходит обогрев паром. Схема элемента представлена на рис.

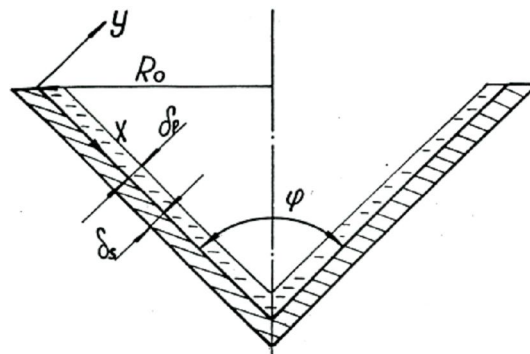


Рис. Схема теплообменного элемента

Будем рассматривать течение раствора как ламинарное и пренебрежем, в первом приближении, термическим сопротивлением пленки конденсата греющего пара. Принятые предпосылки в дальнейшем будут оценены. В этом случае система уравнений тепломассопереноса может быть сведена к двум уравнениям:

$$\mu_p \cdot d^2 \cdot \left( \frac{U_x}{dy^2} \right) = -\rho_p \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad (1) \quad \frac{d^2 t}{dy^2}, \quad (2)$$

с граничными условиями

$$U_x = 0, \quad y = 0, \quad (3) \quad \frac{dU_x}{dy}, \quad y = \delta_x, \quad (4)$$

$$t_s = t_m, \quad y = -\delta_s, \quad (5) \quad t_p = t_k(x), \quad y = -\delta_p, \quad (6)$$

$$t_p = t_s, \quad y = 0, \quad (7) \quad \lambda_p \cdot \frac{dt_p}{dy} = \lambda_s \cdot \frac{dt_s}{dy}, \quad y = 0, \quad (8)$$

$$\delta_p = (x = 0) = \delta_0, \quad (9)$$

Решение системы (1) и (2) с граничными условиями (3 ÷ 9) может быть представлено в виде:

$$t_p = t_k + \frac{(t_{zn} - t_k) \cdot \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_p}\right) \cdot (\delta_p - y)}{\delta_s} + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_p}\right) \cdot \delta_p; \quad (10)$$

$$0 < y < \delta_p$$

$$t_s(x) = t_{zn} + \frac{(t_{zn} - t_k) \cdot (\delta_s + y)}{\delta_s} + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_p}\right) \cdot \delta_p; \quad (11)$$

$$-\delta_s < y < 0$$

$$U_x(y, x) = \frac{9 \cdot \rho_p}{2 \cdot \mu \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot (2 \cdot \delta_p - y^2)}, \quad (12)$$

$$0 < y < \delta_p$$

Исходя из уравнения теплового баланса:

$$-\frac{r \cdot d \cdot G}{dx} = q(x) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(R_0 - x \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right), \quad (13)$$

В результате получаем уравнение, определяющее изменение толщины пленки раствора вдоль образующей элемента:

$$\frac{d\delta_p}{dx} = \frac{\delta_p \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{3 \cdot \left(R - x \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right)} - \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s \cdot R_0 \cdot (t_{zn} - t_k) \cdot \delta_0^3}{3 \cdot r \cdot G_0 \cdot \delta_p^2 \cdot \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_p}\right) \cdot \delta_p + \delta_s}, \quad (14)$$

При выводе уравнения (14) использовалось кинетическое уравнение:

$$q = \frac{\lambda_p \cdot dt_0}{dy}, \quad \text{при } y = 0; \quad (15)$$

Начальное значение расхода  $G_0 = G(x = 0)$ , связанное с плотностью орошения зависимостью:

$$\Gamma_0 = \frac{G_0}{2 \cdot \pi \cdot R_0}, \quad (16)$$

Величины  $G_0$  и  $\delta$ , в случае ламинарного течения пленки раствора, связаны между собой соотношением

$$\delta_0 = \left( 3 \cdot \mu_p \cdot G_0 \left( 2 \cdot \pi \cdot \rho_p^2 \cdot 9 \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot R_0 \right) \right)^{1/3}; \quad (17)$$

Для дальнейшего анализа уравнения (4.14) приведем его к безразмерной форме:

$$\frac{d\eta}{d} = \frac{\eta \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{3 \cdot \left( 1 - \xi \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right) - \frac{2 \cdot \pi \cdot S_p \cdot k_\lambda}{\eta^2 \cdot k_\lambda \cdot \eta + k_s}}, \quad (18)$$

а начальное условие запишем в виде:

$$\eta = 1, \quad \xi = 0, \quad (19)$$

Здесь введены обозначения:

$$\eta = \frac{\delta_p}{\delta_0}; \quad \xi = \frac{x}{R_0}; \quad S_p = \frac{\lambda_s \cdot (t_{zp} - t_k) \cdot R_0^2}{r \cdot G_0 \cdot \delta_0}; \quad k_\lambda = \frac{\lambda_s}{\lambda_Q}; \quad ks = \frac{S_s}{S_0}. \quad (20)$$

Безразмерный комплекс  $S_p$  связывает как теплофизические, так и реологические свойства раствора и греющего пара.

Применение модели позволяет выбрать оптимальную конструкцию элемента.

**Методика расчета коэффициента теплопередачи.** Исходными данными для расчета являются:  $G_0$  ( $\text{кг}/\text{с}$ ),  $R_0$  ( $\text{м}$ ),  $L$  ( $\text{м}$ ),  $\varphi$  ( $^\circ$ ),  $t_m$  ( $^\circ\text{C}$ ),  $t_{bn}$  ( $^\circ\text{C}$ ),  $\delta_s$ ,  $r$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_s$ ,  $\rho_p$ ,  $\mu_p$ . Вычисляем комплексы по уравнениям (20).

Проводим численное решение задачи Коши для уравнения (18)

с начальным условием  $\eta(\xi = 0) = 1,0$ . Для значения  $\xi = \frac{L}{R_0}$  находим чис-

ленным интегрированием значение

$$\eta_0 = \eta(\xi_0), \quad (21)$$

Определяем локальный коэффициент теплопередачи:

$$k_L = \frac{\lambda_s \cdot (t_m - t_k)}{k_\lambda \cdot (\delta_L + \delta_s)}. \quad (22)$$

Определяем средний коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{\lambda_s \cdot (t_{zp} - t_k)}{k_\lambda \cdot \left( \frac{(1 + \eta_0) \cdot \delta_0}{2} + \delta_s \right)}. \quad (23)$$

Перечень принятых условных обозначений:  $G$  – расход раствора, кг/с;  $W$  – расход выпаренной воды, кг/с;  $t$  – температура, °С;  $c$  – удельная теплоемкость, кДж/кг, °С;  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $P$  – периметр теплообменного элемента, м;  $d$  – диаметр, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  – длина, м;  $P$  – давление, Па;  $Q$  – тепловая нагрузка, Вт;  $q$  – удельная тепловая нагрузка, Вт/м<sup>2</sup>;  $R$  – радиус, м;  $r$  – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;  $U$  – скорость, м/с;  $U_x$  – ось координат в направлении течения, м;  $y$  – ось координат, направленная нормально к направлению течения, м;  $yz$  – ось координат, м;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $\Gamma$  – массовая плотность орошения, кг/(м с);  $\Gamma_y$  – объемная плотность орошения, м<sup>2</sup>/с;  $\delta$  – толщина пленки, м;  $\Theta$  – краевой угол смачивания, град.;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  $\tau$  – время, с;  $\varphi$  – угол, град.;  $k_{пл} \frac{\sigma^3 \cdot Q}{q^4 \cdot \mu}$  – пленочное число, (критерий Капицы);  $Ku = \frac{q}{\rho_n \cdot U_x}$  – критерий кипения;  $Re = \frac{4 \cdot \Gamma \nu}{\nu}$  – критерий Рейнольдса для пленочного течения.

Индексы:  $\rho$  – раствор;  $b$  – выпаренная вода;  $k$  – кипение;  $\theta$  – начальная величина;  $bn$  – вторичный пар;  $gn$  – греющий пар;  $s$  – стенка элемента;  $исх.$  – исходный раствор;  $1, 2, 3$  – стадии выпаривания.

**Список литературы:** 1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена // М.: Атомиздат. 1970. – 416 с. 2. Данилов Ю.Б., Ульянов Л.М. Теоретические и экспериментальные исследования теплопередачи и кипения в выпарных аппаратах со стекающей плёнкой // Интегрированные технологии энергосбережения. – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – № 3. – С. 84–96. 3. Гимбутис Г. Теплообмен в гравитационном течении плёнки жидкости // Вильнус. Моксла. 1988. – 232 с. 4. Воронцов Е.Г., Татанайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных плёнках // К.: Техника. 1972. – 196 с.

Поступила в редколлегию 15.11.13

УДК 696.41

**Выпаривание при гравитационном течении пленки раствора // Ю.Б. Данилов, И.Г. Гавриличенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х.: НТУ «ХПІ» – 2013. – № 55 (1028). – С. 148–153. Бібліогр.: 4 назв.**

Побудована математична модель течії та випаровування плівки розчину в вертикальних напівциліндрах, циліндрах, площині та конусах. Модель апробована за допомогою експериментів. Модель дозволяє одержувати товщину плівки та коефіцієнт теплопередачі.

**Ключові слова:** випарювання, теплопередача, плівкова течія, поверхневе випарювання.

The mathematical model for that transfer with liquid film evaporation in the circle confuser was created in the paper. It was shown that the created model fit to experimental data.

**Key words:** evaporation, heat transfer, film flow, surface evaporation.