

Одержані результати дозволяють зробити висновок про те, що використання більш розведених електролітів (з нижчою концентрацією йонів молибдату) дозволяє одержувати більш корозійностійкі покриття та за однакової щільності струму ці покриття з товщиною 10 – 15 мкм ще й мають значно меншу пористість. Тому запропонований склад електроліту для електроосадження є вельми перспективним для захисту від корозії поверхонь що знаходяться в агресивних харчових середовищах та при підвищених температурах.

Література

1. Поветкин В.В., Ковенский И.М. Структура электрохимических покрытий. – М.: Металлургия, 1988. – 136 с.
2. Беленький М.А., Иванов А.Ф. Электроосаждение металлических покрытий. Справ. изд. – М.: Металлургия, 1985.
3. Zvyagintseva A.V., Kravtsova Y.G. Boron Coating with Ultradisperse Particles Inclusion. // Electrochemistry: From Nanostructures to Power Plants. 55-th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry. Thessalonica, 2001 – p. 594.

УДК 664.046

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛЁНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ПО НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В КОНТАКТЕ С ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Кирилов В.Х., д-р техн. наук, профессор, Худенко Н.П., канд. техн. наук, доцент
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Рассматривается разделенное двухфазное течение тонкого слоя жидкости и потока газа. Предполагается безвихревое движение обеих фаз. Для потенциалов скоростей по жидкости и газу решения уравнений Лапласа сопрягаются на поверхности контакта посредством интеграла Коши. Проводится исследование устойчивости двухфазного течения по отношению к длинноволновым возмущениям на поверхности раздела. В результате определены область устойчивости двухфазного потока и предельная скорость газа. Установлено, что такие поверхности слабо влияют на предельную скорость газа.

We consider a split two-phase flow of a thin layer of liquid and gas flow. It is assumed irrotational motion of both phases. For potentials rates for liquid and gas solutions of the Laplace mates at the contact surface by Cauchy's integral. A study of the stability of two-phase flow with respect to long disturbances at the interface. As a result, the stability region defined two-phase flow and a top speed of gas. It is established that such surfaces have little effect on the speed limit of the gas.

Ключевые слова: безвихревое течение жидкости и газа, потенциал скоростей, интеграл Коши-Лагранжа, предельная скорость газа, неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.

При свободном течении пленки жидкости по гладкой наклонной поверхности в результате естественной неустойчивости, имеющей капиллярную и гравитационную природу, на поверхности жидкости можно выделить две группы волнообразований. Регулярные волны малой амплитуды и одиночные волны (солитоны), амплитуды которых в несколько раз превышают среднюю толщину вязкого остаточного слоя.

При наличии взаимодействующего газового потока возникает новый вид неустойчивости, который впервые установили Кельвин (1871) и затем Гельмгольц (1909), в связи с изучением вопроса образования волн ветром. Полученное теоретическое решение позволило показать, что поток, движущийся вдоль волновой поверхности раздела фаз, приводит к возникновению разряжения над гребнями волн и повышению давления во впадинах, т.е. поток газа над жидкостью стремится поддержать всякое, имеющееся на поверхности жидкости, волновое движение. При достаточно большой скорости движения воздуха амплитуда волн на поверхности раздела является возрастающей во времени, а сама поверхность – неустойчивой.

Как показано в работе [1], на основании результатов Майлса и Брук-Бенджамина, для длинных волн вклад в силы, стремящиеся изменить форму волны, от флуктуирующего касательного напряжения значительно меньший, чем от нормального напряжения. На этом основании, при исследовании устойчивости

поверхности пленки жидкости, обе среды (жидкость и газ) можно рассматривать как идеальные жидкости и применить теорию потенциальных течений.

На рис. 1 изображена схема двухфазного нисходящего прямого течения.

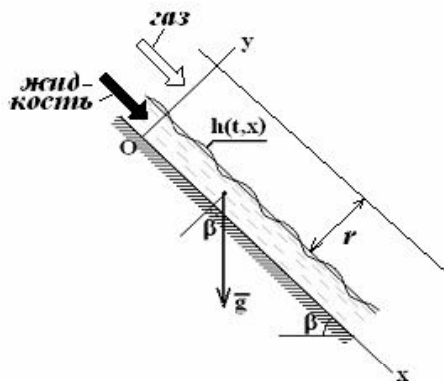


Рис. 1 – Схема двухфазного нисходящего прямого течения

Уравнения неразрывности и интегралы Коши-Лагранжа для жидкости и газа имеют следующий вид [2] (индекс 1 соответствует жидкости, а 2 – газу):

$$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \phi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial \tau} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial y} \right)^2 \right] - g \sin \beta \cdot x + \frac{P_1}{\rho_1} = f_1(\tau), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial \tau} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial y} \right)^2 \right] - g \sin \beta \cdot x + \frac{P_2}{\rho_2} = f_2(\tau), \quad (4)$$

где $\phi_1 = \phi_1(\tau, x, y)$ и $\phi_2 = \phi_2(\tau, x, y)$ - потенциалы скоростей соответственно для жидкости и газа

$$U_1 = \frac{\partial \phi_1}{\partial x}, \quad V_1 = \frac{\partial \phi_1}{\partial y} \quad (5)$$

$$U_2 = \frac{\partial \phi_2}{\partial x}, \quad V_2 = \frac{\partial \phi_2}{\partial y} \quad (6)$$

Граничные условия представляются как

$$\text{при } y = 0 \quad \frac{\partial \phi_1}{\partial y} = 0, \quad (7)$$

$$\text{при } y = r \quad \frac{\partial \phi_2}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

$$\text{при } y = h(\tau, x) \quad \frac{\partial \phi_1}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial \tau} + U_0 \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (9)$$

$$\text{при } y = h(\tau, x) \quad \frac{\partial \phi_2}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial \tau} + V_0 \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (10)$$

Динамическое условие на свободной поверхности с учетом сил поверхностного натяжения запишется в форме

$$\text{при } y = h(\tau, x) \quad P_1 - P_2 = - \frac{\sigma h''_{xx}}{(1+h_x'^2)^{3/2}}. \quad (11)$$

Пусть под воздействием газового потока на свободной поверхности плёнки жидкости возникают возмущения в виде длинных волн ($h_0/\lambda \ll 1$)

$$h(\tau, x) = h_0 + h_1(\tau, x) = h_0 + a e^{j k(x - c\tau)}, \quad (12)$$

где h_0 – толщина слоя жидкости при ламинарном безволновом течении;

a – амплитуда возмущения;

λ – длина волны ($\lambda \gg h_0$);

k – волновое число ($k = 2\pi / \lambda$);

c – скорость волны.

Для исследования устойчивости невозмущённого движения жидкости ($h = h_0$) предполагаем, что c – комплексная величина

$$c = c_1 + i c_2. \quad (13)$$

Предположим, что длина волны возмущения является большой, т.е. $k \cdot h_0 \ll 1$. Тогда $(h'_x)^2 \ll 1$ и граничное условие (11) упрощается и запишется следующим образом:

$$P_1 - P_2 = \sigma \cdot k^2 h \text{ при } y = h(\tau, x). \quad (14)$$

При наличии возмущения на свободной поверхности $h(\tau, x) = h_0 + h_1(\tau, x)$ соответственно получают возмущения поля давлений и потенциалов скоростей для жидкости и газа

$$P_1(\tau, x, y) = P_1^{(0)}(x) + P_1^{(1)}(\tau, x, y), \quad P_1(\tau, x, y) = P_1^{(0)}(x) + P_1^{(1)}(\tau, x, y),$$

$$\phi_1(\tau, x, y) = \phi_1^{(0)}(x) + \phi_1^{(1)}(\tau, x, y), \quad \phi_2(\tau, x, y) = \phi_2^{(0)}(x) + \phi_2^{(1)}(\tau, x, y).$$

Для невозмущённого ламинарного течения распределения полей давлений и потенциала скоростей имеет следующий вид:

$$P_1^{(0)}(x) = P_1(0) + \rho_1 g \sin \beta \cdot x, \quad P_2^{(0)}(x) = P_2(0) + \rho_2 g \sin \beta \cdot x, \quad (15)$$

$$\phi_1^{(0)}(x) = U_0 x, \quad \phi_2^{(0)}(x) = V_0 x. \quad (16)$$

где $P_1(0)$, $P_2(0)$ – давления жидкости и газа на входе в аппарат, U_0, V_0 – соответственно скорость жидкости и газа.

Потенциал скоростей для жидкости и газа определяем в форме

$$\phi_1(\tau, x, y) = U_0 x + \psi_1(y) \cdot e^{j k(x - c\tau)}, \quad (17)$$

$$\phi_2(\tau, x, y) = V_0 x + \psi_2(y) \cdot e^{j k(x - c\tau)}. \quad (18)$$

Подставляя данные выражения в уравнения Лапласа (1) – (2) и используя граничные условия (7) – (10), имеем

$$\phi_1(\tau, x, y) = U_0 x + i a (U_0 - c) \frac{ch k y}{sh k h_0} \cdot e^{j k(x - c\tau)}, \quad (19)$$

$$\phi_2(\tau, x, y) = V_0 x - i a (V_0 - c) \frac{ch k (r - y)}{sh k (r - h_0)} \cdot e^{j k(x - c\tau)}, \quad (20)$$

а дисперсное соотношение получается путем исключения давления P_1 и P_2 из (3), (4) и (14), оно имеет вид (с точностью до членов второго порядка малости)

$$P \cdot (U_0 - c)^2 + Q \cdot (V_0 - c)^2 = \sigma \cdot k, \quad (21)$$

где $P = \rho_1 c t h k \cdot h_0$, $Q = \rho_2 c t h k (r - h_0)$. Разделим мнимую и действительную части в данном соотношении, тогда учитывая (13), имеем

$$P \left[(U_0 - c_1)^2 - c_2^2 \right] + Q \left[(V_0 - c_1)^2 - c_2^2 \right] = \sigma k \quad (22)$$

$$\text{и } c_1 = \frac{P \cdot U_0 + Q \cdot V_0}{P + Q}. \quad (23)$$

Исключая c_1 из (22), найдем

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{P + Q}} \left[\frac{P \cdot Q}{P + Q} (V_0 - U_0) - \sigma k \right]^{1/2}, \quad (24)$$

Откуда, если скорость газа V_0 удовлетворяет неравенству

$$V_0 > U_0 + \left(\frac{P + Q}{P \cdot Q} \sigma k \right)^{1/2}, \quad (25)$$

то $c_2 > 0$ и поверхность раздела фаз неустойчива, и длинноволновые возмущения экспоненциально возрастают с течением времени. В противном случае, когда $c_2^2 < 0$ имеет место устойчивость. Для нейтральной кривой при $c_2 = 0$ предельная скорость газа, после которой начинается неустойчивость, определяется формулой

$$V_0 = U_0 + \left(\frac{P+Q}{P \cdot Q} \sigma k \right)^{1/2}, \quad (26)$$

В случае противоточного движения жидкости и газа предельная скорость газа V_* удовлетворяет неравенству

$$V_* > \left(\frac{P+Q}{P \cdot Q} \sigma k \right)^{1/2} - U_0. \quad (27)$$

Проведём количественную оценку предельной скорости по соотношению (27) при различных углах наклона β рабочей поверхности.

Средняя по расходу скорость жидкости равна отношению плотности q_0 орошения к толщине жидкостного слоя

$$U_0 = \frac{q_0}{h_0}, \quad (28)$$

причём толщина плёнки жидкости равна

$$h_0 = \sqrt[3]{\frac{3\nu q_0}{g \sin \beta}}. \quad (29)$$

Расчёт проводился при следующих значениях величин, входящих в соотношение (27) с учётом (28) и (29): $\rho_1 = 995,7 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 1,165 \text{ кг/м}^3$, $\nu_1 = 0,805 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\sigma = 712,2 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м}$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $\lambda = 0,01 \text{ м}$, $k = 2\pi / \lambda = 628,32 \text{ 1/м}$, $r_0 = 0,005 \text{ м}$, $q_0 = 0,322 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Результаты расчёта:

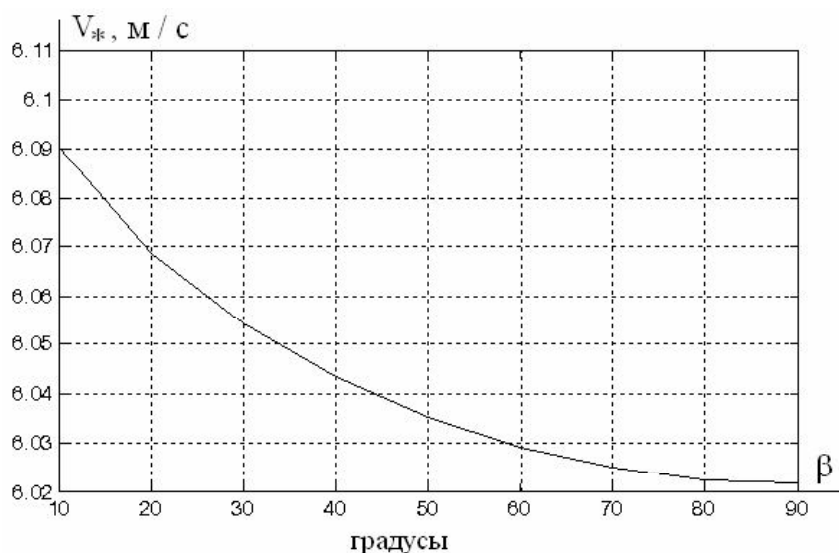


Рис. 2 – Предельная скорость газа

Вывод

Наклон рабочей поверхности слабо влияет на предельную скорость газа.

Литература

1. Хьюит Дж., Холл-Гейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука. 1978. – 736 с.