

УДК 532.551

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОМ УЗЛЕ ВЫПАРНОГО АППАРАТА

Носко С.В., к.т.н., доц., Котелевец А.В. студ.

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", г. Киев

03056, Киев - 056, пр. Победы, 37

E-mail: atoll-sonic@rambler.ru

Наведені дослідження нестабілізованої течії в розподільному каналі випарного апарату. Надані рекомендації з розрахунку гідродинамічних характеристик потоку та вибору геометричних параметрів каналу, який забезпечує формування плівкової течії.

Ключові слова: нестабілізована течія, гідродинамічний розрахунок потоку.

Researches of not stabilised current in the distributive channel of the evaporating device are presented. Recommendations about races a couple of hydrodynamic characteristics of a stream and to a choice of geometrical parametres of the channel providing formation of a film current are resulted.

Key words: non-stabilized flow, hydrodynamic calculation of a stream.

Введение. Несмотря на большую экономичность современных выпарных аппаратов, они являются самыми энергоемкими участками производства вискозных волокон и целлофановой пленки [1].

Как показал обзор литературы [2-5], основным сдерживающим фактором при разработке надежных высокопроизводительных выпарных аппаратов, работающих с использованием способа "падающей пленки", контактирующей с восходящим газовоздушным потоком, являются гидродинамическая несовершенство их распределительных устройств. В результате, в процессе работы, в распределительном узле имеют место пульсации, турбулентность и вихреобразования потока рабочей жидкости. Кроме того, данные выпарные аппараты весьма чувствительны к неравномерной подаче упариваемой жидкости.

Все эти факторы приводят к нарушению пленочного течения, сплошности пленки и разрыву "пленочного стакана", что сопровождается резкому уменьшению поверхности контакта фаз и процесса теплообмена. В результате происходит снижение производительности технологического цикла. В связи с этим, для обеспечения удовлетворительной работы аппарата необходимо подавать увеличенный, по сравнению с расчетным в 3-3,3 раза, расход упариваемой жидкости, что приводит к возрастанию энергозатрат.

Цель работы. Провести гидродинамический расчет потока упариваемой жидкости в распределительном канале выпарного аппарата, выбор его геометрических параметров обеспечивающих стабилизацию пленочного течения раствора с целью повышения производительности оборудования.

Материал и результаты исследований. Производственные испытания и лабораторные исследования позволили оценить степень дестабилизации потока в распределительном узле аппарата и обосновано применить теорию начального участка для

гидродинамического расчета. Исследуемый пенный выпарной аппарат (рис.1) состоит из цилиндрического корпуса 1, подводящих отверстий 2 и 3. В средней части корпуса расположено кольцевое корыто 4 с направляющим элементом, состоящим из двух профильных концентрических колец 5 и 6, соединенных между собой ребрами 7 [6].

Установка в выпарном аппарате направляющего элемента позволяет обеспечить гидродинамический режим течения упариваемой жидкости, необходимый для пленочного течения, устранить пульсации и вихреобразования, т.е. создать "пленочный стакан" с максимальной поверхностью контакта при минимальном расходе упариваемой жидкости, интенсифицировать тепло- и массообмен и за счет этого повысить производительность выпарного аппарата при меньших энергозатратах.

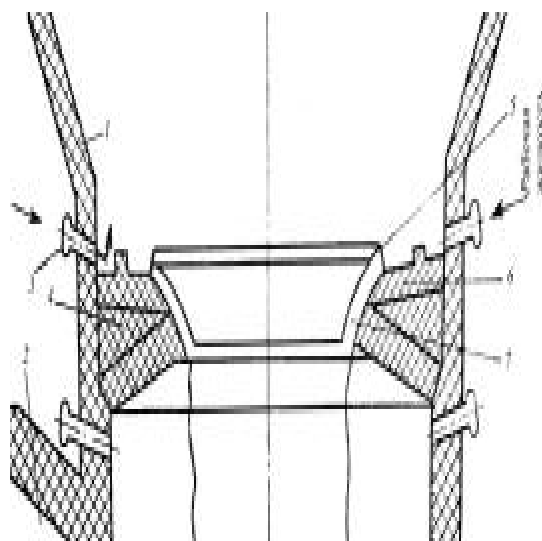


Рисунок 1- Пенный выпарной аппарат

Описанное выше конструкционное решение, обеспечивающее ламинарное пленочное течение, формирующееся на гидродинамическом начальном участке (распределительный узел аппарата), основывалось на аналитических и экспериментальных исследованиях нестабилизированного потока жидкости.

Для дальнейших аналитических исследований инерционного течения, ньютоновской жидкости в распределительном канале, целесообразно привести уравнение движения к условиям данной задачи. Для этого введем следующие предположения:

1. Течение жидкости в канале стационарное: члены, содержащие производные по времени равны нулю.

2. Считаем течение двумерным: опускаем члены, содержащие составляющие скорости U_z и её производных.

3. Течение изометрическое.

После приведенных преобразований уравнения движения и неразрывности могут быть сведены к одному дифференциальному уравнению:

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial X} - \frac{\partial U_x}{\partial Y} \int \frac{\partial U_x}{\partial X} \cdot dY = \quad (1)$$

$$= -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial Y} + n \frac{\partial^2 U_x}{\partial Y^2},$$

где U_x - продольная составляющая скорости потока; ρ - плотность жидкости; ν - кинематическая вязкость; H - высота канала.

В качестве граничных условий принимаем:

1. Условие, составляющее в задании закона распределения скорости во входном сечении канала, при $X=0$:

$$U_x(Y) = \frac{n_1 + 1}{n_1} \cdot U_{x\text{CP}} \cdot \left[1 - \left(\frac{Y}{H} \right)^{n_1} \right], \quad (2)$$

где n_1 - безразмерная постоянная, зависящая от геометрии входного сечения, реологических свойств жидкости.

2. Условия в конце участка гидродинамической стабилизации, при $x=L_H$

$$U_x(Y) = \frac{3}{2} \cdot U_{x\text{CP}} \cdot \left[1 - \left(\frac{Y}{H} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где L_H - длина гидродинамического начального участка.

3. Условия полного прилипания жидкости к ограничивающий канал стенкам, при $Y = 0$:

$$U_x(Y) = 0. \quad (4)$$

Используя метод Бусинеска, решение дифференциального уравнения (1) относительно функции скорости для начального участка $U_x(Y)$ можно получить, если предположить, что

$$U_x(Y) = U_x^*(Y) + w(x, y), \quad (5)$$

где $U_x^*(Y)$ - функция скорости для участка со стабилизированным течением; $w(x, y)$ - так называемый "дефицит" скорости, принимающий максимальное значение на входе в гидродинамический начальный участок ($x=0$) и близкий к нулю в конце участка инерционного течения ($x=L_H$).

Для дальнейшего решения введем следующие безразмерные переменные:

$$x_d = \frac{Y^2}{H^2}, \quad (6)$$

$$W_d = x_d \frac{\partial w}{\partial x_d}. \quad (7)$$

После подстановки новых переменных (6) и (7) дифференциальное уравнение (1) можно привести к виду:

$$\frac{3 \operatorname{Re} \cdot H^2}{8 D_{\text{пр}}} \frac{1-x_d}{x_d} \frac{\partial W_d}{\partial x_d} = \quad (8)$$

$$= \frac{\partial^2 W_d}{\partial x_d^2}.$$

Данное дифференциальное уравнение имеет решение:

$$Y_d(x_d) = A_1 x_d - A_2 x_d^2 + A_3 x_d^3 - \quad (9)$$

$$- A_4 x_d^4 + \dots,$$

где

$$W_d = C \cdot e^{8 \cdot m \cdot x_d \cdot D_{\text{пр}} / 3 \cdot \operatorname{Re} \cdot H^2} \cdot Y_d(x_d), \quad (10)$$

Коэффициенты A_1, A_2, \dots, A_4 являются функциями величины m в уравнении (9) и определяются из соответствующих алгебраических выражений.

После определения коэффициентов ряда (10) и соответствующего анализа получим следующее уравнение для определения m :

$$1 - 0,25m + 0,0222222m^2 - 0,0010217m^3 - \quad (11)$$

$$- 0,0000287m^4 = 0$$

Действительные корни этого уравнения будут

$$m_1 = 8,625; \quad m_2 = 11,0625.$$

Значения коэффициентов A_i , соответствующие m_1 и m_2 представлены в табл. 1.

Интегрируя уравнение (8), определяем величину ω :

$$w = \int \frac{W_d}{x_d} dx_d = - \sum_{K=1}^2 C_K \cdot e^{8m \cdot x_d / \text{ДГР} / 3 \text{Re} H^2} \times \int \frac{Y_{Kd}(x_d)}{x_d} dx_d \quad (12)$$

Таблица 1 – Значения коэффициентов A_i , соответствующие m_1 и m_2

A	m_1	m_2
A_1	1	1
A_2	4,3126	5,5312
A_3	7,6367	12,042
A_4	8,5885	16,2003
A_5	6,9971	15,6215
A_6	3,9284	9,8167
A_7	1,3229	3,5043
A_8	0,2301	0,6226
A_9	0,0152	0,0413

Постоянные C_1 и C_2 определяются из условий на входе в гидродинамический начальный участок.

$$\min_{x_d} \int [C_1 b_1 + C_2 b_2 + w_0(x)] dx_d, \quad (13)$$

где $w_0(\xi_x)$ – “дефицит” на входе в гидродинамический начальный участок.

Учитывая, что определение параметров C_1 и C_2 , характеризующих условия на входе, из формулы (13) приводит к громоздким выражениям, то для практического решения соотношение (13) представлялось в следующем виде:

$$\min \sum_{i=1}^K \left[C_1 \cdot e^{-8m \cdot x_d / \text{ДГР} / 3 \text{Re} H^2} \cdot b_1(x_{id}) + C_2 \cdot e^{-8m \cdot x_d / \text{ДГР} / 3 \text{Re} H^2} \cdot b_2(x_{id}) + w_0(x_{id}) \right]^2, \quad (14)$$

где $w_0(\xi_{i\delta})$ – значение “дефицита” скорости на входе в гидродинамический начальный участок, при $x=x_i$ определяемое из выражения (5) и соотношения

$$U_X(Y) = \text{const} \left[1 - \left(\frac{Y}{H} \right)^3 \right].$$

Следовательно, определение параметров C_1 и C_2 из выражения (14) сводится к решению системы линейных уравнений. В таблице 2 приведено значение C_1 и C_2 для различных величин m .

Таблица 2 – Значение C_1 и C_2 для различных величин m

m_i	C_1	C_2
1	1,712	- 5,334
2	1,225	- 0,048
3	3,154	- 1,753

Таким образом, определив параметры C_1 и C_2 можно рассчитать и построить картину развития профиля скорости на гидродинамическом начальном участке исследуемого канала. В качестве примера на рис.2 как результат подобного расчёта представлена картина распределения скорости по длине и сечению прямоугольного канала ($H=0,025$ м) при $\text{Re}=1500$, для ньютоновской жидкости (воды).

Длина участка гидродинамической стабилизации в рассматриваемом случае является величиной переменной и зависит от условий входа.

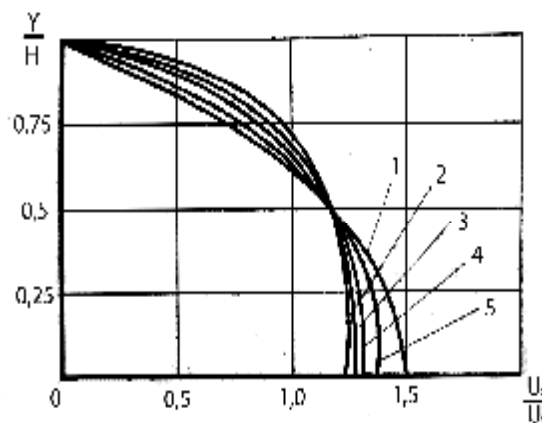


Рисунок 2 – Профили скоростей на входе в гидродинамический начальный участок при $m=3$: 1- квадратичная парабола; 2- теоретическая парабола; 3- аппроксимация кривой 2; 4,5- развитие профиля скоростей, $x=0,135$ м и $x=0,462$

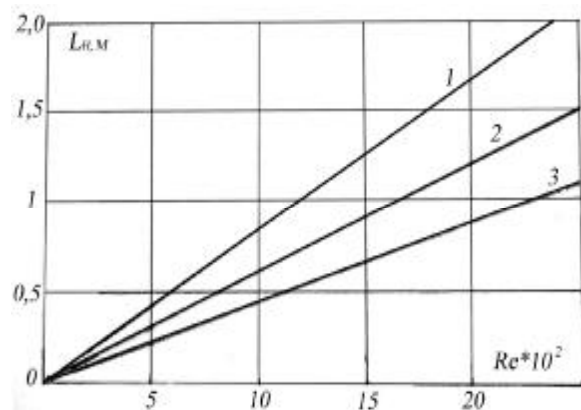


Рисунок 3 – Зависимость длины гидродинамического начального участка от числа Рейнольдса: 1- $m=4$; 2- $m=3$; 3- $m=1$

Для исследуемого случая (форма эпюры скоростей на входе в канал отличается от прямоугольной) значения параметров C_1 и C_2 позволяют вывести соотношение, связывающее значение длины участка инерционного течения L_H , число Рейнольдса, (C_1, C_2) и необходимую степень развития профиля скоростей (99%):

$$\frac{\left| \left[U_X^*(Y) + w(X, Y) \right] - U_X^*(Y) \right|}{U_X^*(Y)} \cdot 100\% \leq 1\% \quad (15)$$

или

$$\frac{w(X, Y)}{1,5 \cdot U_{CP} \cdot (1 - x_d)} \cdot 100\% \leq 1\%. \quad (16)$$

Подставляя соотношение для β_1 , при $x=0$ имеем

$$\frac{C_1 \cdot e^{-8 \cdot m_1 \cdot L_H \cdot D_{HP} / 3 Re \cdot H^2} \cdot b_1(0)}{1,5} + \frac{C_2 \cdot e^{-8 \cdot m_2 \cdot L_H \cdot D_{HP} / 3 Re \cdot H^2} \cdot b_2(0)}{1,5} \leq 1\% \quad (17)$$

Решая последнее выражение относительно L_H при различных C_1 , C_2 и Re , получим значение длины гидродинамического начального участка в зависимости от условий входа и выхода и числа Рейнольдса.

Выводы. 1. Аналитические исследования течения вязких жидкостей на гидродинамическом начальном участке распределительного канала предоставили возможность определить протяженность зоны инерционного течения в зависимости от условий входа.

2. На основании проведенных исследований была разработана конструкция распределительного узла выпарного аппарата, устраняющая пульсации, вихреобразование потока и обеспечивающая равномерную толщину пленки упариваемой жидкости, что необходимо для эффективной работы аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таубман Е.И. Выпаривание.-М.: Химия, 1982.-328 с.
2. Живайкин Л.Н. О толщине пленки жидкости в аппаратах плёночного типа // Химическое машиностроение.- 1961. - № 6. - С. 25-29.
3. Торнер Р.В. Основные процессы переработки полимеров. - М.: Химия, 1972. - 452 с.
4. Коминер А.А., Яхно О.М. Гидромеханика в инженерной практике. - К.: Техника, 1987.- 175 с.
5. Воронцов Е.Г. Граничные случаи течения кольцевой орошающей пленки жидкости. Химическое машиностроение. 1985. - № 42. - С. 46-48.
6. Авт. свид. № 865300 СССР. В 01D 1/22, В 01D 1/00. Пенный выпарной аппарат./ О.М. Яхно, Е.Ф. Ястреб, С.Н. Лавренко, С.В. Носко /. Опубл.23.09.81. Бюл. №35.

Стаття надійшла 05.05.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Саленком О.Ф.