

С.К. Протасов, доцент; А.А. Боровик, ст. преподаватель; Е.Ю. Карабач, студент

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СИТЧАТОЙ ТАРЕЛКИ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ ЕЕ РАБОТЫ

In the article the results of experimental researches of hydraulic resistance of irrigating plate executed as a sieve are submitted. The influence of regime and geometrical parameters on losses of pressure and modes of interaction of phases is shown.

К настоящему времени опубликовано большое число работ по исследованию работоспособности ситчатой массообменной тарелки [1–7], которая обладает высокой эффективностью, простотой конструкции и низкой металлоемкостью.

В публикациях [5–7] выявлено три основных гидродинамических режима работы ситчатой тарелки: равномерный, газовых струй и инжекционный.

Для расчета гидравлического сопротивления орошаемой ситчатой тарелки авторы приводят зависимости, которые не учитывают наличие указанных режимов.

В целях удобства исследований и расчетов гидравлическое сопротивление тарелки ΔP обычно разделяют на сопротивления сухой тарелки $\Delta P_{с.г}$ и газожидкостного слоя на ней $\Delta P_{сл}$:

$$\Delta P = \Delta P_{с.г} + \Delta P_{сл}. \quad (1)$$

Сопротивление сухих тарелок рассчитывают по формуле

$$\Delta P_{с.г} = \xi \frac{\rho_{г} w_{о}^2}{2}, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления тарелки; $\rho_{г}$ – плотность газа, кг/м^3 ; $w_{о}$ – скорость газа в отверстиях тарелки, м/с .

Сопротивление газожидкостного слоя $\Delta P_{сл}$ состоит из статического сопротивления $\Delta P_{ст}$, которое обусловлено давлением находящейся на тарелке жидкости, и сопротивления ΔP_{σ} , которое обусловлено действием сил поверхностного натяжения. Второй составляющей, как правило, можно пренебречь в связи с ее незначительной величиной.

Касаткин с сотрудниками [8], рассматривая барботажный слой жидкости как местное гидравлическое сопротивление, получили простейшую зависимость для $\Delta P_{сл}$:

$$\Delta P_{сл} = g \rho_{сл} H \approx g \rho_{ж} h, \quad (3)$$

где $\rho_{сл}$ – плотность газожидкостного слоя, кг/м^3 ; H – высота газожидкостного слоя, м ; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м^3 ; h – высота исходного слоя жидкости, м .

Однако использовать на практике такой метод достаточно проблематично, так как плотность слоя изменяется с изменением скорости газа, расхода жидкости и других параметров процесса.

Зависимость (3) хорошо отвечает физическому смыслу процесса (для равномерного режима), в связи с чем целесообразно определить зависимость плотности газожидкостной смеси от параметров процесса. Плотность смеси газа и жидкости определяется по формуле

$$\rho_{см} = \rho_{г} \varphi + \rho_{ж} (1 - \varphi), \quad (4)$$

где φ – газосодержание, $\rho_{г}$ – плотность барботируемого газа, кг/м^3 ; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости кг/м^3 .

Как видно из уравнения (4), задача по определению плотности сводится к определению газосодержания смеси.

Целью данной работы является изучение гидродинамических режимов на ситчатой тарелке и получение зависимостей показателей гидродинамического режима (ΔP , $\rho_{\text{сл}}$) от его параметров (w_r , q , h_o).

Гидродинамические исследования ситчатой тарелки проводили на системе вода-воздух. Расходы воды и скорости воздуха в аппарате изменяли от 1 до 7 м³/м²·ч и от 0,6 до 3,4 м/с соответственно. Высоту переливного устройства варьировали в пределах от 40 до 60 мм с шагом 10 мм, живое сечение тарелки составляло 11%.

Эксперимент проводили в колонне диаметром 240 мм.

Гидродинамическое сопротивление газожидкостного слоя рассчитывали как разность сопротивлений орошаемой (ΔP) и сухой тарелок ($\Delta P_{\text{с.т}}$).

$$\Delta P_{\text{сл}} = \Delta P - \Delta P_{\text{с.т}}. \quad (5)$$

Опытные данные представлены зависимостью гидравлического сопротивления газожидкостного слоя от скорости движения газа в колонне в логарифмических координатах (рис. а, б).

На рисунке видно, что в диапазоне скоростей $0,6 \leq w_r \leq 3,2$ м/с наблюдается три режима работы ситчатой тарелки. Таким образом, для оценки факторов, влияющих на величину гидравлического сопротивления газожидкостного слоя, необходимо учитывать режимы работы ситчатой тарелки. По зависимостям (рис.) можно определить интервалы существования этих трех гидродинамических режимов.

В интервале значений скоростей от 0,6 до 1,1–1,2 м/с наблюдается равномерный режим (газ распределен в жидкости). При данном режиме газ барботирует через слой жидкости в виде пузырей, которые всплывают к поверхности жидкости за счет выталкивающей силы. Газожидкостный слой в равномерном режиме можно рассматривать как дисперсную систему, причем дисперсионной средой является жидкость, а дисперсной фазой – газ. В пределах этого режима с увеличением скорости газа жидкость начинает обособляться, образуя деформированные, непрерывно сливающиеся и разрушающиеся, движущиеся агрегаты жидкости.

Второй режим – газовых струй – наблюдается в интервале значений скоростей газа ($1,1-1,2 \leq w_r \leq 2-2,2$ м/с). В данном режиме газ образует в слое жидкости газовую струю, пронизывающую жидкость практически по всей высоте слоя.

Третий режим – инжекционный. Пределы существования данного режима ($2-2,2 \leq w_r \leq 2,8-3,2$ м/с). В этом режиме сплошной фазой является газ, а дисперсной – жидкость. С увеличением скорости газа неоднородность слоя растет, вследствие чего уменьшается количество жидкости, находящийся в виде агрегатов. Такое соотношение структуры слоя не изменяется до скоростей уноса жидкости.

Для опытного определения газосодержания слоя жидкости на ситчатой тарелке преобразуем уравнение (3), подставив в него (4). Получим

$$\Delta P_{\text{сл}} = gh_o[\rho_r \varphi + \rho_{\text{ж}}(1 - \varphi)]. \quad (6)$$

Выразим φ из (6):

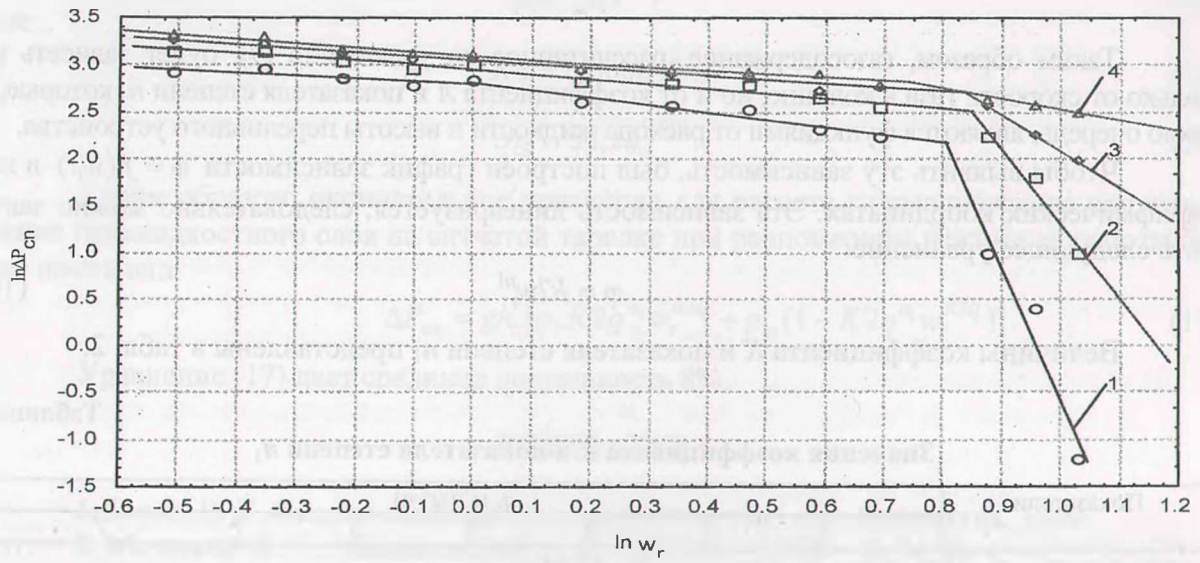
$$\varphi = \frac{\rho_{\text{ж}} - \Delta P_{\text{сл}} / gh_o}{\rho_{\text{ж}} - \rho_r}. \quad (7)$$

Согласно экспериментальным данным, мы получили зависимости гидравлического сопротивления газожидкостного слоя от скорости газа в колонне при различных плотностях орошения, которые линеаризуются в логарифмических координатах.

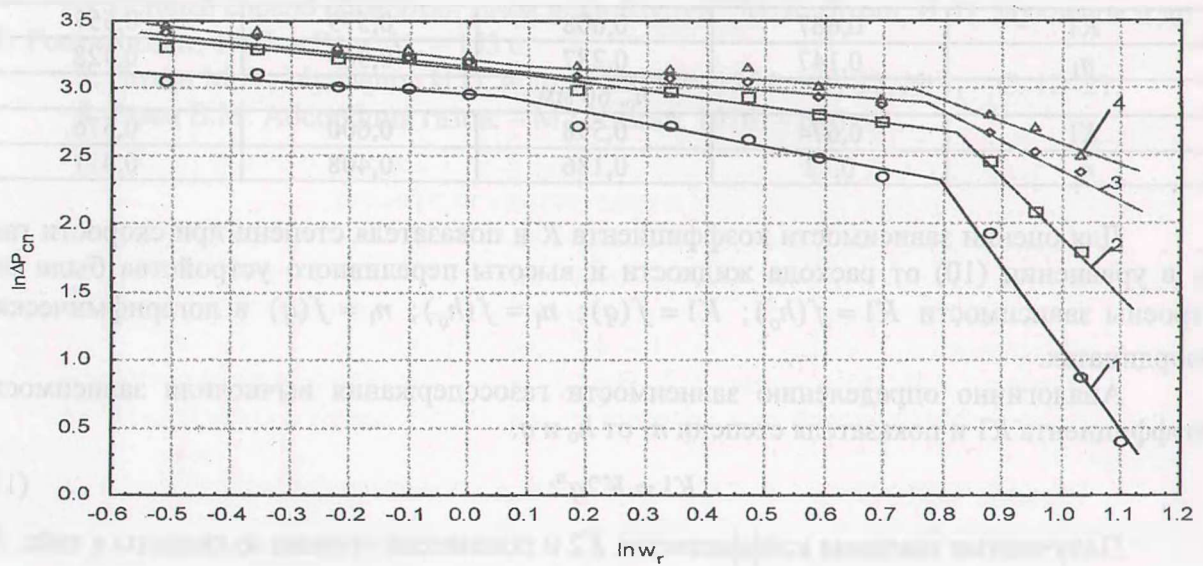
Очевидно существование зависимости типа

$$\Delta P_{\text{сл}} = Aw_{\text{r}}^n \quad (8)$$

Полученные значения показателя степени и коэффициента A сведены в табл. 1.



а



б

Рис. Зависимость гидравлического сопротивления ($\Delta P_{\text{сл}}$) от скорости движения газа в колонне (w_r) при различных высотах переливного устройства h_0 : а – 50 мм; б – 60 мм; и для различных плотностей орошения q : 1 – $1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 2 – $3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 3 – $5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 4 – $7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Таблица 1

Значения показателя степени n и коэффициента A

$q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	$h_0, \text{ мм}$					
	40		50		60	
	A	n	A	n	A	n
1	125,84	-0,483	163,86	-0,264	192,48	-0,227
2	156,18	-0,492	193,64	-0,372	237,70	-0,246
3	174,34	-0,532	208,51	-0,410	237,70	-0,481
4	187,54	-0,480	219,42	-0,426	252,14	-0,442

Для того чтобы определить газосодержание φ , уравнение (7) нужно привести к виду

$$\varphi = \frac{\rho_{ж} - (A/g h_0) w_{г}^n}{\rho_{ж} - \rho_{г}} \quad (9)$$

Таким образом, газосодержание, рассчитанное по уравнению (9), будет зависеть не только от скорости газа в колонне, но и от коэффициента A и показателя степени n , которые, в свою очередь, являются функциями от расхода жидкости и высоты переливного устройства.

Чтобы выявить эту зависимость, был построен график зависимости $\varphi = f(w_{г})$ в логарифмических координатах. Эта зависимость линеаризуется, следовательно можно записать следующее уравнение:

$$\varphi = K l w_{г}^{n_1} \quad (10)$$

Величины коэффициента K и показателя степени n_1 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициента K и показателя степени n_1

Показатели	$q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$			
	1	3	5	7
$h_0, 40 \text{ мм}$				
$K1$	0,672	0,590	0,540	0,507
n_1	0,277	0,409	0,560	0,572
$h_0, 50 \text{ мм}$				
$K1$	0,667	0,608	0,579	0,557
n_1	0,147	0,287	0,369	0,428
$h_0, 60 \text{ мм}$				
$K1$	0,674	0,598	0,600	0,576
n_1	0,12	0,186	0,408	0,411

Для оценки зависимости коэффициента K и показателя степени при скорости газа n_1 в уравнении (10) от расхода жидкости и высоты переливного устройства были построены зависимости $K1 = f(h_0)$; $K1 = f(q)$; $n_1 = f(h_0)$; $n_1 = f(q)$ в логарифмических координатах.

Аналогично определению зависимости газосодержания вычислили зависимость коэффициента $K1$ и показателя степени n_1 от h_0 и q .

$$K1 = K2 q^{n_2} \quad (11)$$

Полученные значения коэффициента $K2$ и показателя степени n_2 сведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициента $K2$ и показателя степени n_2

$h_0, \text{ мм}$	$K2$	n_2
40	0,687	-0,129
50	0,670	-0,092
60	0,668	-0,077

Определяя соответственно зависимости этих коэффициентов от h_0 получили:

$$K2 = 0,465 h_0^{-0,121}; \quad (12)$$

$$n_2 = 0,000983 h_0^{-1,515} \quad (13)$$

Проведя подобные преобразования для показателя степени при скорости газа в уравнении (10), получили:

$$n_1 = K3q^{n_3}, \quad (14)$$

где

$$K3 = 0,000042h_0^{-2,73}; \quad (15)$$

$$n_3 = 54,2h_0^{1,529}. \quad (16)$$

Таким образом, окончательное уравнение для расчета гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на ситчатой тарелке при равномерном режиме ее работы будет иметь вид

$$\Delta P_{\text{сл}} = gh_0[\rho_r K2q^{n_2} w_r^{R3q} + \rho_{\text{ж}}(1 - K2q^{n_2} w_r^{R3q})]. \quad (17)$$

Уравнение (17) дает среднюю погрешность 8%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз, 1959.
2. Мочалова Л. А., Кишиневский М. Х. // ЖПХ. – 1958. – Т. 31, № 4. – С. 533–552.
3. Собчук Ю.И., Сурков Е.И. // Хим. пром. – 1952. – № 6. – С. 165–166.
4. Siemes W. Chem. Ind. Techn. 1954. – Bd. 26, № 8–9б. – S. 479–496. – № 11; – S. 614–630.
5. Мухленов И.П. Автореф. докт. дис. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1955.
6. Пенный способ обработки газов и жидкостей / М. Е. Позин, И. П. Мухленов и др. – Л.: Госхимиздат, 1955. – Вып. 31. – 153 с.
7. Позин М.Е., Мухленов И.П. и др. // ЖПХ. – 1954. – Т. 27, № 1, – С. 12–21.
8. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. – 656 с.