

С. К. Протасов, доцент; А. А. Боровик, доцент; Н. А. Костюченко, студент

ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ НА МАССООБМЕННОЙ СИТЧАТОЙ ТАРЕЛКЕ

In the article the results of experimental researches of hydraulic resistance plate separator are submitted. Carry-over of liquid in the effluent gas stream between two plates is studied. The influence of regime and geometrical parameters on losses of pressure is shown. Calculation dependences of carry-over of liquid in the effluent gas stream and hydraulic resistance are received. Diapasons of stable work are determined.

Введение. Для расчета перепада давления на ситчатой массообменной тарелке с переливными устройствами обычно принимают, что перепад давления на орошаемой тарелке $\Delta p_{ор}$ равен сумме перепадов давления на сухой тарелке $\Delta p_{сух}$, перепада, обусловленного силами поверхностного натяжения, Δp_{σ} и перепада, который затрачивается на преодоление давления столба жидкости на тарелке, $\Delta p_{ст}$:

$$\Delta p_{ор} = \Delta p_{сух} + \Delta p_{\sigma} + \Delta p_{ст}. \quad (1)$$

В некоторых литературных источниках используют величину перепада давления в газожидкостном слое:

$$\Delta p_{г-ж} = \Delta p_{\sigma} + \Delta p_{ст}. \quad (2)$$

При определении перепада давления $\Delta p_{сух}$, затрачиваемого на преодоление гидравлического сопротивления неорошаемой ситчатой тарелки, применяют метод Вейсбаха для определения потерь давления в местных сопротивлениях:

$$\Delta p_{сух} = \xi \frac{\rho_{г} w_{о}^2}{2}; \quad (3)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления тарелки; $\rho_{г}$ – плотность газа (пара), кг/м³; $w_{о}$ – скорость газа (пара) в отверстиях ситчатой тарелки, м/с.

Коэффициент гидравлического сопротивления ситчатой тарелки не является постоянной величиной.

Анализ литературных данных показывает, что коэффициент гидравлического сопротивления ситчатой тарелки зависит от режима течения газа в отверстиях тарелки (Re_o), толщины полотна тарелки δ , диаметра отверстий d_o , шага между отверстиями t и способа изготовления отверстий (сверление, штамповка и т. д.).

Для практического использования в работе [1] предложены зависимости:

$$\xi = K \left[0,4(1,25 - \varphi) + \lambda \frac{\delta}{d_o} + (1 - \varphi)^2 \right], \quad (4)$$

где K – коэффициент, который зависит от отношения δ/d_o и определяется с помощью опытной графической зависимости; φ – доля живого сечения тарелки; λ – коэффициент трения в гладких трубах.

$$\xi = \frac{1}{K_1^2} \left(\frac{t}{d_o} \right)^{0,2} (1 - \varphi^2), \quad (5)$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от δ/d_o и Re_o и определяемый с помощью опытной графической зависимости;

$$\xi = (1 - \varphi)^2 + (0,5 - 0,4\varphi) + \frac{4000\varphi d_o}{Re_o^{0,2}} \frac{\delta}{d_s}; \quad (6)$$

$$\xi = A \frac{1 - \varphi^2}{\varphi^{0,2} \left(\frac{\delta}{d_o} \right)^{0,2}}, \quad (7)$$

где $A = 0,94$ или $A = 1$ для треугольного и квадратного расположения отверстий на тарелке.

Основная часть. Диапазон устойчивой работы стандартной ситчатой тарелки находится в пределах изменения скорости газа w_k , рассчитанной на полное сечение массообменного аппарата, в пределах от 0,5 до 1,2 м/с.

Согласно ОСТ 26-01-125-81, ситчатые тарелки используются с долей живого сечения φ от 0,03 до 0,16, толщиной полотна тарелки δ от 3 до 10 мм и диаметром отверстий d_o от 2 до 8 мм.

Расчеты коэффициента гидравлического сопротивления ξ по зависимостям (4), (5), (6) и (7) выполняли для ситчатой тарелки с диаметром отверстий $d_o = 5$ мм, толщиной полотна $\delta = 5$ мм, шагом между отверстиями $t = 12$ мм и живым сечением $\varphi = 0,11$. При этом меняли скорость газа w_k в диапазоне устойчивой работы тарелки.

Расчетные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1
Расчет коэффициента ξ по зависимости (4), (5), (6), (7) и (10)

w_k , м/с	0,6	0,8	1,0	1,2	$\xi_{ср}$
ξ_4	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
ξ_5	1,40	1,37	1,34	1,29	1,35
ξ_6	1,74	1,71	1,69	1,67	1,70
ξ_7	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46
ξ_{10}	1,51	1,43	1,36	1,31	1,40

Анализ зависимостей и расчетных значений коэффициента ξ показывает, что его величина существенно не отличается при расчете по формулам (4), (5) и (7), однако зависимости (4) и (7) не учитывают влияния скорости газа.

Значения коэффициента ξ , полученные по формуле (6), на 20% больше остальных.

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления ξ по формулам (4) и (5) необходимо использовать графические зависимости для определения коэффициента K , что усложняет расчеты.

Чтобы выявить влияние скорости газа и доли живого сечения тарелки на величину коэффициента гидравлического сопротивления ξ , нами были проведены опыты на установке, приведенной на рисунке.

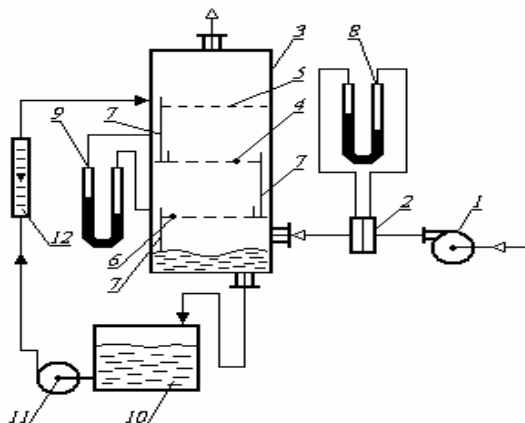


Рисунок. Схема лабораторной установки:
1 – воздуходувка; 2 – измерительная диафрагма;
3 – корпус аппарата; 4 – исследуемая ситчатая тарелка; 5, 6 – распределительные тарелки;
7 – переливные устройства;
8, 9 – дифференциальные манометры;
10 – емкость; 11 – насос; 12 – ротаметр

Исследования проводили на ситчатой тарелке с геометрическими параметрами, которые использовали для расчета ξ . Скорость газа w_k устанавливали в пределах от 0,6 до 3,2 м/с. Живое сечение тарелки изменяли в пределах от 0,05 до 0,11 за счет количества отверстий. Переливные устройства были заглушены.

В результате обработки опытных данных была получена зависимость гидравлического сопротивления сухой ситчатой тарелки $\Delta p_{\text{сух}}$ от скорости газа w_k и живого сечения тарелки ϕ :

$$\Delta p_{\text{сух}} = 0,6 w_k^{1,8} \phi^{-2,14}. \quad (8)$$

Из формулы (3) выразим коэффициент гидравлического сопротивления тарелки и подставим вместо $\Delta p_{\text{сух}}$ его выражение из (8):

$$\xi = \frac{\Delta p_{\text{сух}}}{\rho_{\Gamma} w_0^2} = \frac{0,6 w_k^{1,8} \phi^{-2,14}}{\rho_{\Gamma} \frac{w_0^2}{2}}. \quad (9)$$

Заменим в выражении (9) w_0 на w_k из соотношения $w_0 = w_k / \phi$.

Тогда получим опытную зависимость для расчета коэффициента гидравлического сопротивления ситчатой тарелки

$$\xi = \frac{0,6 w_k^{1,8} \cdot \phi^{-2,14} \cdot 2}{\rho_{\Gamma} \frac{w_k^2}{\phi^2}} = \frac{1,2}{\rho_{\Gamma} \phi^{0,14} w_k^{0,2}}. \quad (10)$$

Полученное выражение (10) показывает, что коэффициент гидравлического сопротивления ситчатой тарелки зависит от плотности газа (пара), живого сечения и скорости газа.

Для сопоставления полученной зависимости (10) с известными выполнены расчеты, которые представлены в табл. 1 в виде ξ_{10} .

Из таблицы видно, что данные, полученные по формуле (10), лучше всего согласуются с данными формулы (5) по характеру изменения в зависимости от скорости газа. По абсолютной величине среднего значения $\xi_{\text{ср}}$ в пределах скоростей от 0,6 до 1,2 м/с наши данные практически совпадают с данными, полученными по формулам (4) и (7).

Перепад давления, обусловленный силами поверхностного натяжения рассчитывают по формуле

$$\Delta p_{\sigma} = \frac{4\sigma}{d_0}, \quad (11)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м.

Перепад давления $\Delta p_{\text{ст}}$, обусловленный статическим давлением находящейся на полотне тарелки жидкости, зависит от высоты столба жидкости h , м, и плотности газожидкостного слоя $\rho_{\text{см}}$:

$$\Delta p_{\text{ст}} = g \rho_{\text{см}} h, \quad (12)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Плотность смеси жидкости и газа $\rho_{\text{см}}$ в свою очередь является величиной переменной и зависит от многих факторов.

Представленная в работе [2] опытная зависимость плотности воздуховодяной смеси от скорости газа для различных живых сечений и диаметров отверстий в тарелке свидетельствует, что $\rho_{\text{см}}$ уменьшается от 400 до 200 кг/м³ при увеличении скорости газа по колонне от 0,6 до 1,2 м/с.

В работе [3] получена зависимость для расчета плотности газожидкостной смеси в зависимости от скорости газа и плотности орошения:

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{ж}} (1 - K_2 q^{n_2} w_k^{K_3 \cdot q}), \quad (13)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; $K_2 = 0,465 h^{-0,121}$; q – плотность орошения, м³/(м·ч); $n_2 = 0,000983 h^{-1,515}$; $K_3 = 0,000042 h^{-2,73}$.

Касаткин П. Г. и сотрудники [4] получили опытную зависимость для расчета перепада давления, зависящую от высоты столба жидкости на тарелке:

$$\Delta p_{ст} = \frac{0,33\rho_{ж}h^{1,2}g}{w_{к}^{0,4}\varphi^{0,1}}. \quad (14)$$

С целью сопоставления предложенных зависимостей проведены расчеты для системы воздух – вода. В расчетах принимали значения $\varphi = 0,11 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $h = 0,06 \text{ м}$, $q = 3 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$.

Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчет $\Delta p_{ст}$ по данным работ [2–4] и зависимостей (14), (15)

$w_{к}, \text{ м/с}$	0,6	0,8	1,0	1,2
$\Delta p_{ст2}$	217	176	165	123
$\Delta p_{ст3}$	215	189	168	149
$\Delta p_{ст4}$	170	158	138	128
$\Delta p_{ст5}$	206	193	184	176

Перепады давления $\Delta p_{ст2}$ и $\Delta p_{ст3}$ рассчитывали по формуле (12). При определении $\Delta p_{ст2}$ использовали опытные значения плотности газожидкостного слоя работы [2], а для определения $\Delta p_{ст3}$ – значения $\rho_{см}$, рассчитанные по формуле (13). Значения $\Delta p_{ст4}$ определяли по зависимости (14).

Из табл. 2 видно, что зависимость (14) дает более низкие значения по сравнению с данными работ [2, 3], которые между собой согласуются с точностью 7%. При этом только зависимость (13) учитывает влияние количества подаваемой жидкости на тарелку.

Нами были проведены опыты на системе вода – воздух по определению перепада давления, возникающего при прохождении газа через слой жидкости на тарелке диаметром 0,24 м. Кроме изменения скорости газа от 0,5 до 1,2 м/с, меняли высоту переливной планки в пределах от 0,03 до 0,08 м и плотность орошения в пределах от 1 до 9 м³/(\text{м}\cdot\text{ч}).

Схема опытной установки представлена на рисунке.

В результате обработки опытных данных была получена зависимость для расчета перепада давления, который затрачивается на преодоление сопротивления столба газожидкостного слоя на ситчатой тарелке:

$$\Delta p_{ст} = 7,36 \frac{q^{0,075} h^{0,766}}{w_{к}^{0,23}}, \quad (15)$$

где h – высота переливной планки, мм.

По формуле (15) выполнены расчеты $\Delta p_{ст5}$ при $q = 3 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$, $h = 60 \text{ мм}$. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Сопоставление полученных значений $\Delta p_{ст5}$ с данными других авторов показывает, что наши результаты лучше всего согласуются с результатами работ [2, 3].

Заключение. В результате проведенных исследований получена простая зависимость для расчета коэффициента гидравлического сопротивления ситчатой массообменной тарелки, которая учитывает влияние скорости газа и его плотности.

Получена расчетная формула для определения гидравлического сопротивления столба жидкости на тарелке. Полученные зависимости (10) и (15) позволяют, используя известные формулы (1), (3) и (11), рассчитать перепад давления на орошаемой ситчатой тарелке.

Литература

1. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки: справочник / Г. Г. Рабинович [и др.]; под ред. Е. Н. Судакова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1979. – 568 с., ил.
2. Кутателадзе, С. С. Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырькович. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
3. Протасов, С. К. Расчет гидравлического сопротивления ситчатой тарелки с учетом режимов ее работы / С. К. Протасов, А. А. Боровик, Е. Ю. Карабач // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2004. – Вып. XII. – С. 175–179.
4. Пенный режим и пенные аппараты / Э. Я. Тарат [и др.]; под ред. И. П. Мухленова, Э. Я. Тарата. – Л.: Химия, 1977. – 304 с., ил.