

УДК 532.51

С. К. Протасов, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);**А. А. Боровик**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);**Н. П. Матвейко**, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой (БГЭУ)**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИТЧАТОЙ ТАРЕЛКИ**

В статье выполнен анализ публикаций, в которых приведены результаты исследований режимов работы сетчатой тарелки. Установлено, что для определения гидродинамических параметров сетчатой тарелки необходимо учитывать три режима работы – равномерный, газовых струй и инжекционный. Проведены исследования по определению гидравлического сопротивления сетчатой тарелки и межтарельчатого уноса капель жидкости в трех гидравлических режимах. Приведены расчетные зависимости для определения гидравлического сопротивления орошаемой тарелки и для определения межтарельчатого уноса во всех трех режимах работы.

In the analysis of works in which the results of research modes of sieve plates. It was established that to determine the hydrodynamic parameters of sieve plates is necessary to consider three modes of operation – even, and the injection of gas jets. Conducted studies to determine the hydraulic resistance sieve plates and mezhtarelchatogo entrainment of liquid droplets in the three hydraulic modes. Calculated according to the definition of hydraulic resistance of irrigated plates and to determine mezhtarelchatogo ablation in all three modes of operation.

Введение. Ситчатая массообменная тарелка представляет собой тонкое металлическое полотно с отверстиями небольшого диаметра. Она является одной из простейших конструкций среди барботажных массообменных тарелок. По сравнению с колпачковой тарелкой ситчатая обладает такой же эффективностью взаимодействия фаз при значительно меньшей металлоемкости.

В зависимости от скорости газа на тарелке наблюдаются различные гидродинамические режимы. При малых приведенных скоростях (порядка 0,5 м/с) газ барботирует в виде отдельных пузырьков. С повышением скорости они сливаются в сплошную струю. Газовая струя на некотором расстоянии от отверстия из-за сопротивления жидкости разрушается и переходит в поток пузырьков, образующих газожидкостный слой. Этот слой представляет собой пену ячеисто-пленочной структуры. При разрушении пузырей над слоем жидкости образуются мелкие брызги, которые поднимаются над слоем на некоторую высоту в зависимости от их размеров и скорости газа.

Такое взаимодействие фаз на полотне ситчатой тарелки называют равномерным режимом.

Когда скорость газа достигает порядка 1 м/с начинается режим газовых струй, при котором происходит изменение структуры пены. Длина газовых факелов увеличивается и они выходят на поверхность слоя. Ячеистая пена разрушается и превращается в систему, состоящую из относительно крупных брызг и выбрасываемых газом струй жидкости. Верхняя граница слоя становится размытой и над ним появляется значительное количество брызг.

Увеличение скорости газа свыше 2 м/с приводит к тому, что жидкость захватывается вы-

ходящим газом уносится с ним в виде брызг. Этот режим называется инжекционным.

Основная часть. К настоящему времени опубликовано большое число работ по исследованию работоспособности ситчатой тарелки [1, 3]. При этом все расчетные зависимости для определения рабочих параметров тарелки получены в основном для равномерного режима работы, который считается наиболее устойчивым.

Для расширения диапазона работы ситчатой тарелки необходимо располагать расчетными зависимостями для режимов газовых струй и инжекционного.

Основными гидродинамическими параметрами массообменных тарелок являются гидравлическое сопротивление и межтарельчатый унос капель жидкости. Гидравлическое сопротивление характеризует энергетические затраты на перемещение газовой (паровой) фазы. Межтарельчатый унос является одним из основных факторов, ограничивающих повышение скорости (пара) в массообменных аппаратах. От величины брызгоуноса существенно зависит межтарельчатое расстояние и высота массообменной колонны.

Исследования гидродинамических параметров ситчатой тарелки в широком диапазоне изменения скоростей газа (пара) проводили на системе воздух – вода в колонне диаметром 240 мм. Скорость газа по сечению колонны w_k изменяли в пределах от 0,5 до 3,2 м/с, нагрузку по жидкости – в пределах изменения линейной плотности орошения q от 1 до 9 м³/(м·ч). Живое сечение тарелки ϕ изменяли от 0,05 до 0,11. Высоту переливной планки h изменяли в пределах от 0,03 до 0,06 м. Периметр переливной планки составлял 0,168 м.

Схема установки для определения гидродинамических параметров представлена на рисунке.

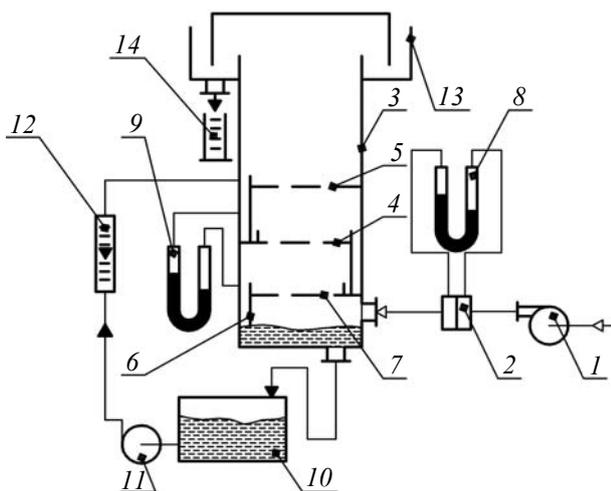


Схема лабораторной установки:

- 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;
- 13 – объемный сепаратор; 14 – мерный стакан

Воздух подавали в нижнюю часть колонны воздуходувкой 1. Расход воздуха измеряли с помощью диафрагмы 2 и дифференциального манометра 8. Воду из емкости 10 подавали центробежным насосом 11 на верхнюю ситчатую тарелку. Расход воды регулировали ротаметром 12. Гидравлическое сопротивление средней ситчатой тарелки измеряли с помощью дифференциального манометра 9. Величину межтарельчатого уноса с верхней тарелки определяли с помощью объемного сепаратора 13, мерного цилиндра 14 и секундомера (точность измерений составляла ± 1 мл). Замеры между каждым изменением расхода воздуха проводили с интервалом в 5 мин.

Гидравлическое сопротивление. Для расчета гидравлического сопротивления ситчатой массообменной тарелки с переливными устройствами принимают, что сопротивление орошаемой тарелки $\Delta p_{ор}$ равно сумме сопротивления сухой тарелки $\Delta p_{сух}$, сопротивления, обусловленного силами поверхностного натяжения, Δp_{σ} и сопротивления столба жидкости на тарелке, $\Delta p_{ст}$:

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

При определении сопротивления сухой тарелки $\Delta p_{сух}$ применяют метод Вейсбаха для определения потерь давления в местных сопротивлениях:

$$\Delta p_{сух} = \xi \frac{\rho_r w_o^2}{2}; \quad (2)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления тарелки; ρ_r – плотность газа (пара), кг/м^3 ; w_o – скорость газа (пара) в отверстиях ситчатой тарелки, м/с .

Коэффициент гидравлического сопротивления ситчатой тарелки не является постоянной величиной. Он 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:

$$\xi = K \left[0,4(1,25 - \varphi) + \lambda \frac{\delta}{d_o} + (1 - \varphi)^2 \right], \quad (3)$$

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

$$\xi = \frac{1}{K_1^2} \left(\frac{t}{d_o} \right)^{0,2} (1 - \varphi^2), \quad (4)$$

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

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

$$\xi = A \frac{1 - \varphi^2}{\varphi^{0,2} \left(\frac{\delta}{d_o} \right)^{0,2}}, \quad (6)$$

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

Анализ зависимостей и расчетных значений коэффициента ξ , проведенный в работе [2], показал, что его величина существенно не отличается при расчете по формулам (3), (4) и (6), однако зависимости (3) и (6) не учитывают влияния скорости газа.

Значения коэффициента ξ , полученные по формуле (5), на 20% больше остальных.

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления ξ по формулам (3) и (4) 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 неорошаемой ситчатой тарелке. Для этого переливные устройства 7

были заглушены, а перепад давления определяли на средней тарелке 4.

В результате обработки опытных данных была получена зависимость гидравлического сопротивления сухой ситчатой тарелки $\Delta p_{\text{сух}}$ от скорости газа w_0 и живого сечения тарелки ϕ :

$$\Delta p_{\text{сух}} = 0,6w_0^{1,8}\phi^{-0,34}. \quad (7)$$

Если выразить из формулы (2) коэффициент гидравлического сопротивления тарелки и подставить вместо $\Delta p_{\text{сух}}$ его выражение из (7), то получим простую зависимость для расчета коэффициента гидравлического сопротивления ситчатой тарелки:

$$\xi = \frac{1,2}{\rho_{\text{г}}\phi^{0,34}w_0^{0,2}}. \quad (8)$$

Полученное выражение (8) показывает, что коэффициент гидравлического сопротивления ситчатой тарелки зависит от плотности газа (пара), живого сечения и скорости газа.

Сопротивление, обусловленное силами поверхностного натяжения, рассчитывают по формуле

$$\Delta p_{\sigma} = \frac{4\sigma}{d_0}, \quad (9)$$

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

Сопротивление слоя жидкости $\Delta p_{\text{ст}}$ зависит от уровня жидкости на тарелке h , м, и плотности газожидкостного слоя $\rho_{\text{см}}$:

$$\Delta p_{\text{ст}} = g\rho_{\text{см}}h, \quad (10)$$

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, что существенно усложняет расчет.

Нами был выполнен анализ опытных зависимостей для расчета гидравлического сопротивления газожидкостного слоя $\Delta p_{\text{ст}}$ на полотно ситчатой тарелки, предложенных различными авторами для равномерного режима работы тарелки. Результаты анализа показали существенные расхождения данных в наиболее устойчивом режиме работы тарелки (равномерном).

Исследования гидравлического сопротивления орошаемой ситчатой тарелки в широком диапазоне скоростей проводили на средней тарелке из трех ситчатых тарелок, установленных в колонне. Это позволило получить наиболее достоверные данные.

В результате обработки опытных данных были получены зависимости для расчета гидравлического сопротивления орошаемой ситчатой тарелки для различных режимов работы:

– равномерного режима в пределах изменения w_k от 0,5 до 1 м/с:

$$\Delta p_{\text{оп1}} = 16,94w_0^{0,105}q^{0,061}h^{0,636}, \Delta = 3,5\%;$$

– режим газовых струй в интервале скоростей w_k от 1,1 до 2 м/с:

$$\Delta p_{\text{оп2}} = 15,64w_0^{0,587}q^{0,122}h^{0,346}, \Delta = 4,4\%;$$

– инжекционного режима в диапазоне скоростей w_k от 2 до 3,2 м/с:

$$\Delta p_{\text{оп3}} = 4,526w_0^{1,17}q^{0,1}h^{0,213}, \Delta = 3,6\%,$$

где w_0 – скорость воздуха в отверстиях тарелки, м/с.

Межтарельчатый унос. Исследования межтарельчатого уноса проводили на установке, представленной на рисунке, в диапазоне скоростей w_k от 0,5 до 3,2 м/с. Количество уносимых капель жидкости с верхней тарелки определяли объемным сепаратором 13.

Опытные данные обработаны и представлены в виде следующих зависимостей:

– для равномерного режима:

$$u = 0,45w_0^{0,84}q^{0,93}\phi^{-2,5};$$

– режима газовых струй:

$$u = 0,22w_0^{2,76}q^{1,1}\phi^{-0,58};$$

– инжекционного режима:

$$u = 0,9 \cdot 10^{-3} w_0^{6,2} q^{1,4} \phi^{4,3},$$

где u – относительный межтарельчатый унос, кг жидкости / кг газа.

Заключение. В результате проведенных исследований получены расчетные зависимости для определения гидравлического сопротивления и межтарельчатого уноса для трех гидродинамических режимов работы ситчатой тарелки – равномерного, газовых струй и инжекционного.

Литература

1. Рабинович, Г. Г. 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. Протасов, С. К. Перепад давления на массообменной ситчатой тарелке / С. К. Протасов, А. А. Боровик, Н. А. Костюченко // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в. – 2008. – Вып. XVI. – С. 169–171.
3. Пенный режим и пенные аппараты / Э. Я. Тарат [и др.]; под ред. И. П. Мухленова, Э. Я. Тарата. – Л.: Химия, 1977. – 304 с.: ил.

Поступила 03.03.2011