

14. Kostyk, K. (2015). Development of the high-speed boring technology of alloy steel. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/11 (78), 8–15. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55015

15. Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., Kostyk, K. (2016). Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/5 (80), 45–49. doi: 10.15587/1729-4061.2016.65454

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Хорошилов О. М.
Дата надходження рукопису 18.05.2016*

Дымко Егор Павлович, заместитель начальника, эксплуатационно-технический отдел, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Мариненко Дмитрий Витальевич, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002
E-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua

Борисенко Сергей Владимирович, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Кравцова Наталья Сергеевна, инженер, кафедра сопротивления материалов, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002

УДК 66.048.375

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.71716

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТАРЕЛОК ПРОВАЛЬНОГО ТИПА В РЕЖИМЕ ПОДВИЖНОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО СЛОЯ

© Г. В. Тараненко

В результате обработки экспериментальных данных по определению гидравлического сопротивления тарелок провального типа были получены критериальные уравнения для определения гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелках провального типа. Тарелки исследовались на модельной системе вода – воздух. Свободное сечение тарелок составляло 16, 25 и 36 %, диаметр отверстий в плате тарелок составлял 0,012 м, диаметр тарелок 0,15 м

Ключевые слова: тарелка, сопротивление, уравнение, отверстие, гидравлический, экспериментальный, газожидкостной, режим, геометрический, характеристика

As a result of the processing the experimental data to determine the pressure drop of dual-flow plates, criteria equations were obtained to determine the pressure drop of the gas-liquid layer on dual-flow plates. Plates were studied on model system «water – air». Free cross-section of plates was 16, 25 and 36 %, a diameter of the holes of plates was 0.012 m, diameter of the plates was 0.15 m

Keywords: plate, drug, equation, hole, hydraulic, experimental, gas-liquid, regime, geometric, characteristic

1. Введение

Тарелки провального типа нашли достаточно широкое применение в химической и смежных с ней отраслей промышленности. Они просты в изготовлении и эксплуатации, а так же способны длительное время работать с загрязненными рабочими средами.

Геометрические характеристики этих тарелок такие, как свободное сечение, диаметр отверстий в плате тарелки, ее наружный диаметр, могут изменяться в широких пределах.

В этих условиях необходимо дальнейшее совершенствование методики гидравлического расчета тарелок провального типа.

2. Анализ литературных данных

Одним из основных параметров работы тарелок провального типа является гидравлическое сопротивление тарелки. Расчету гидравлического сопротивления тарелок провального типа посвящено большое количество работ, что также говорит о сложности поставленной задачи.

Авторы работ применяют различные подходы к получению расчетных уравнений для определения гидравлического сопротивления тарелок провального типа.

В статьях [1, 2] была использована одна и та же физическая модель работы тарелки провального типа, рис. 1.

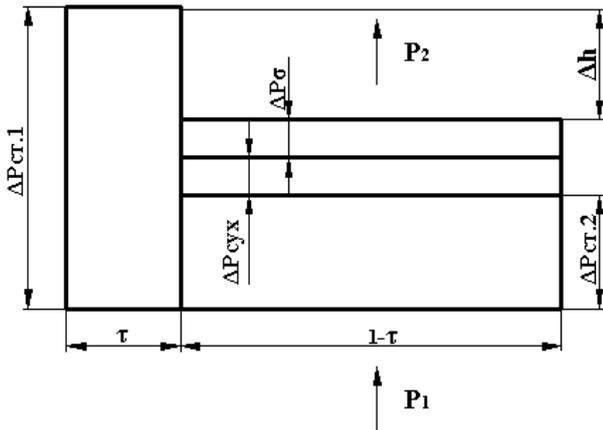


Рис. 1. Распределение статического давления жидкости на тарелке провального типа

Общее гидравлическое сопротивление тарелки $\Delta P_m = P_1 - P_2$, определяли по аддитивности сопротивления сухой тарелки $\Delta P_{сух}$, сопротивления статического столба жидкости $\Delta P_{ст.2}$ и сопротивления сил поверхностного натяжения ΔP_σ .

Сопротивление сухой тарелки определялось по уравнению

$$\Delta P_{сух} = \zeta \frac{\rho_z w_0^2}{2}. \quad (1)$$

Сопротивление сил поверхностного натяжения по уравнению

$$\Delta P_\sigma = 4 \frac{\sigma}{d_0}, \quad (2)$$

$$\Delta P_m = \Delta P_{сух} + \Delta P_{ст.2} + \Delta P_\sigma. \quad (3)$$

Предполагалось, что истечение жидкости с тарелки происходит под действием гидравлического напора Δh , рис. 1. На основании этого предположения авторы записывали скорость истечения жидкости в щелях тарелки уравнением

$$u = \mu_0 \tau \sqrt{2g\Delta h}, \quad (4)$$

где u – скорость истечения жидкости в щелях тарелки, м/с.

Делалось и предположение, что столб жидкости в зоне стекания не содержит пузырьков газа, т. е.

$$\Delta P_{ст.1} = \rho_{жс} gh, \quad (5)$$

где h – высота столба светлой жидкости в зоне стекания, м.

После этого записывалось соотношение между величинами h и Δh :

$$\rho_{жс} gh = \Delta P_m + \rho_{жс} g \Delta h. \quad (6)$$

А соотношение между статическим давлением в зоне барботажа газа ($\Delta P_{ст.2}$) и статическим давлением в зоне стекания жидкости ($\Delta P_{ст.1}$) выражалось коэффициентом β

$$\beta = \frac{\Delta P_{ст.2}}{\Delta P_{ст.1}} = \frac{\Delta P_m - \Delta P_{сух} - \Delta P_\sigma}{\Delta P_m + \rho_{жс} g \Delta h}. \quad (7)$$

В итоге, авторы работы [2] получили уравнение для расчета гидравлического сопротивления тарелок провального типа

$$\Delta P_m = \frac{\zeta}{1-\beta} \frac{\rho_z w_0^2}{2(1-\tau)^2} [1-\tau(1-\beta)] + \frac{4\sigma}{d_{экс}(1-\beta)}. \quad (8)$$

В работе [3] коэффициент β предлагалось определять по уравнению

$$\beta = 1,11 \left(\frac{\rho_z}{\rho_{жс}} \right)^{0,118}. \quad (9)$$

Другим важным параметром, входящим в уравнение (7), является величина τ , которая представляет собой часть площади отверстий тарелки провального типа, занятой стекающей жидкостью.

В работе [1] величина τ определялась из условия минимума потерь энергии газового потока на преодоление гидравлического сопротивления тарелки, которое записывалось в виде

$$\frac{\partial (w_0 \Delta P_m)}{\partial \tau} = 0. \quad (10)$$

Авторы работы [2] получили уравнение для расчета величин $\Delta P_{ст.2}$, ΔP_m , τ , исходя из условия минимума потерь энергии жидкостного потока, проходящего через тарелку провального типа

$$\frac{\partial (\Delta P_{ст.2})}{\partial \tau} = 0, \quad (11)$$

$$\Delta P_{ст.2} = \frac{\beta}{1-\beta} \left[\frac{\zeta \rho_z w_0^2}{2(1-\tau)^3} \right] + \frac{4\sigma}{d_{экс}}, \quad (12)$$

где

$$\tau = \frac{\left[\left(\frac{L_0}{G_0} \right)^2 \frac{\rho_r}{\rho_{жс} \zeta \mu_0^2} \right]^{1/3}}{1 + \left[\left(\frac{L_0}{G_0} \right)^2 \frac{\rho_r}{\rho_{жс} \zeta \mu_0^2} \right]^{1/3}}. \quad (13)$$

Здесь L_0 и G_0 – расходы жидкости и газа, кг/с, μ_0 0,62 – коэффициент расхода при истечении жидкости из отверстия.

Авторы работы [4] связывают определение гидравлического сопротивления тарелок провального типа с гидродинамическими режимами, которые возникают на тарелках. Вначале определяется оптимальный режим работы тарелок провального типа, который зависит от предельных скоростей газа и жидкости работы тарелок, при которых определяется высота пены на тарелках, уравнение (14)

$$\frac{h_n}{d_s} = 4Fr^{0,2}, \quad (14)$$

где – h_n – высота пены на тарелке; d_3 – эквивалентный диаметр отверстия плато тарелки; $Fr = \frac{w_0^2}{gd_3}$ – критерий Фруда; w_0 – скорость газа в свободном сечении тарелки.

Рабочая скорость газа должна быть выбрана несколько ниже предельной скорости газа.

Окончательно предлагается следующее уравнение для расчета гидравлического сопротивления тарелок

$$\Delta p_m = \zeta_{об.} \frac{w_0^2 \gamma_z}{2g} + 0,43h_n \left(\frac{L}{G}\right)^{0,325} \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_{ж.}}\right)^{0,18} \times \left(\frac{\mu_{ж.}}{\mu_z}\right)^{0,0362} \gamma_{ж.} + \frac{4S}{d_3}, \quad (15)$$

где – $\zeta_{об.}$ – коэффициент сопротивления тарелки; L и G – весовые скорости жидкости и газа; $\mu_{ж.}$ и μ_z – вязкость жидкости и газа; S – поверхностное натяжение жидкости.

Авторы работы [5] отмечают, что уравнения, полученные в работе [1], получены для всего интервала работы тарелок и выведены из закономерностей гидростатики. В уравнениях не учтен диаметр колонны. В уравнение входит величина β , которая должна быть определена экспериментально для каждого конкретного случая. В случае применения рекомендованных значений β , расчеты по рассматриваемому уравнению дают, как правило, заниженные результаты по сравнению с опытными данными авторов. Авторы работы [5] принимают, что пена представляет собой местное гидравлическое сопротивление для прохождения как газа, так и жидкости. Они выводят свои уравнения из уравнения Бернулли записанного для первого сечения пены на плато тарелки и второго сечения пены на ее поверхности. В результате авторами получено следующее уравнение для гидравлического расчета тарелок провального типа

$$Eu_0 \frac{\gamma_z}{\gamma_{ж.}} = \frac{0,21}{\sqrt{f}} Fr_{он}^{-1,2}, \quad (16)$$

где $Eu_0 = \frac{\Delta p_n g}{\gamma_z w_0^2}$ – критерий Эйлера рассчитанный по скорости газа в отверстиях тарелки; Δp_n – сопротивление слоя пены; $Fr_{он} = \frac{w_0^2}{gh_n}$ – критерий Фруда рассчитанный по скорости газа в отверстиях тарелки и высоте пены;

Уравнение (16) получено для всех режимов работы тарелки.

Автор работы [6] выводит уравнение для расчета гидравлического сопротивления тарелок провального типа, используя анализ размерностей и выводы, вытекающие из Пи-теоремы.

Рассматривался наиболее общий случай работы тарелки, для расчета гидравлического сопротивления выбрано уравнение (17)

$$\Delta p = f(w_{0z}, w_{0ж.}, \rho_z, \rho_{ж.}, \mu_z, \mu_{ж.}, \sigma, g, l, \delta), \quad (17)$$

где w_{0z} и $w_{0ж.}$ – скорости газа и жидкости в свободном сечении тарелки, м/с; ρ_z и $\rho_{ж.}$ – плотности газа и жидкости, кг·сек²/м⁴; μ_z и $\mu_{ж.}$ – вязкости газа и жидкости, кг·сек/м²; σ – поверхностное натяжение жидкости на границе с газом, кГ/м; g – ускорение силы тяжести, м/сек²; l – характерный линейный размер тарелки (ширина щелей, диаметр отверстий и т. п.), м; δ – толщина тарелки, м.

Окончательно получено следующее критериальное уравнение (18)

$$Eu_{0z} = f\left(\frac{w_{0ж.}}{w_{0z}}, \frac{\gamma_{ж.}}{\gamma_z}, Re_{0ж.}, Ga, \frac{\delta}{a}\right), \quad (18)$$

или

$$Eu_{0z} = A \left(\frac{w_{0ж.}}{w_{0z}}\right)^\alpha \left(\frac{\gamma_{ж.}}{\gamma_z}\right)^\beta Re_{0ж.}^\varepsilon Ga^\zeta \left(\frac{\delta}{a}\right)^\theta, \quad (19)$$

где $Eu_{0z} = \frac{\Delta p}{\gamma_z \frac{w_{0z}^2}{g}}$ – критерий Эйлера для газового потока;

$Re_{0ж.} = \frac{w_{0ж.} l \gamma_{ж.}}{g \mu_{ж.}}$ – критерий Рейнольдса для жидкостного потока;

$Ga = \frac{Re_{0z}^2}{Fr_{0z}} \left(\frac{\gamma_{ж.}}{\gamma_z}\right)^2 \left(\frac{\mu_{ж.}}{\mu_z}\right)^2$ – модифицированный критерий Галилея;

$Re_{0z} = \frac{w_{0z} l \gamma_z}{g \mu_z}$ – критерий Рейнольдса для газового потока;

$Fr_{0z} = \frac{w_{0z}^2}{gl}$ – критерий Фруда для газового потока;

γ_z и $\gamma_{ж.}$ – удельные веса газа и жидкости, Кг/м³.

$A, \alpha, \beta, \varepsilon, \zeta, \theta$ – коэффициенты критериального уравнения.

Далее автор по экспериментальным данным находил значения коэффициентов $A, \alpha, \beta, \varepsilon, \zeta, \theta$.

Из рассмотренных работ видно, что для расчета гидравлического сопротивления тарелок провального типа используются различные подходы.

Необходимо отметить, что авторы работ [5, 6] в результате получили критериальные уравнения для расчета гидравлического сопротивления тарелок провального типа.

Известно, что подобное критериальное уравнение можно получить, как решение дифференциальных уравнений Навье-Стокса для установившегося движения, когда силы вязкости в жидкости имеют существенное значение [7].

$$Eu = f(Re, Fr, \Gamma_i), \quad (20)$$

где – Γ_i – симплекс геометрического подобия.

Уравнение (16), видимо, получено для случая, когда силы вязкости не имеют существенного влияния на гидравлическое сопротивление тарелок провального типа. Интересен подход авторов работы [5],

которые принимают, что пена представляет собой местное гидравлическое сопротивление для прохождения как газа, так и жидкости.

В данной работе рассматривается физическая модель, когда газожидкостной слой на тарелке провального типа оказывает гидравлическое сопротивление потоку газа как местное сопротивление (подобно подходу из работы [5]).

Тогда сила сопротивления газа будет равна

$$F = \zeta S \frac{\rho_g w^2}{2}, \quad (21)$$

где – F – сила сопротивления газовой фазы, Н; ζ – коэффициент сопротивления; S – площадь контакта газа и жидкости, м²; ρ_g – плотность газа, кг/м³; w – скорость газа в сечении колонны, м/с.

Принимаем следующую функциональную зависимость для силы сопротивления газовой фазы

$$F = f(l, \rho_g, w, g, \mu) \quad (22)$$

Тогда степенная зависимость будет иметь следующий вид

$$F = A l^\alpha \rho_g^\beta w^\chi g^\delta \mu^\varepsilon, \quad (23)$$

где – $A, \alpha, \beta, \chi, \delta, \varepsilon$ – коэффициенты.

После соответствующих преобразований по методу анализа размерностей получаем критериальное уравнение

$$F = f(\text{Re}, \text{Fr}) A \rho_g l^2 w^2, \quad (24)$$

или после преобразования

$$Eu = f(\text{Re}, \text{Fr}), \quad (25)$$

где $Eu = \frac{\Delta p_{г.ж.}}{\rho_g w}$ критерий Эйлера; $\Delta p_{г.ж.}$ – гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя, Па; $\text{Re} = \frac{\rho_g w d_0}{\mu}$ – критерий Рейнольдса; $\text{Fr} = \frac{w^2}{g H_{г.ж.}}$ – критерий Фруда,

$H_{г.ж.}$ – высота газожидкостного слоя, м.

В работе [8] показано, что максимальная эффективность массообмена на тарелках провального типа соответствует режиму подвижного газожидкостного слоя, который наступает в точке бифуркации.

В работе [9] сделан вывод, что режим подвижного газожидкостного слоя является турбулентным.

В этом случае принимается, что силы вязкости, действующие в газожидкостном слое, не имеют существенного значения. Поэтому, для дальнейшей обработки из зависимости (25) исключается критерий Рейнольдса.

Обработку экспериментальных данных по измерению гидравлического сопротивления газожидкостного слоя проводили, используя следующую функциональную зависимость

$$Eu = f(\text{Fr}). \quad (26)$$

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является обработка экспериментальных данных по гидравлическому со-

противлению газожидкостного слоя на тарелках провального типа с целью получения расчетных уравнений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- определены условия получения уравнений для расчета гидравлического сопротивления тарелок провального типа. Выбран турбулентный гидродинамический режим работы тарелок провального типа, при котором гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя не зависит от скорости газа рассчитанной на полное сечение колонны, при данной плотности орошения по жидкости. Этот режим подвижного газожидкостного слоя наступает в точке бифуркации, при этом высота газожидкостного слоя составляет около $H_{г.ж.}=0,1$ м;

- получены критериальные уравнения для расчета гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелках провального типа со свободным сечением $f=16, 25, 36$ %, диаметр отверстий составлял $d_0=0,012$ м, тарелки были установлены в колонне диаметром $D_k=0,15$ м. В критериях Эйлера и Фруда использовались скорости газа рассчитанные на полное сечение колонны. В критерий Фруда в качестве геометрического размера подставлялась высота газожидкостного слоя равная $H_{г.ж.}=0,1$ м.

4. Оборудование и методы исследований

Экспериментальные данные были получены на колонне диаметром $D_k=0,15$ м. В колонне были установлены две тарелки. Распределительная тарелка устанавливалась выше рабочей тарелки и имела большее свободное сечение. Ниже устанавливалась рабочая тарелка провального типа, на которой измерялись гидравлическое сопротивление сухой тарелки и общее гидравлическое сопротивление орошаемой тарелки. Измерялась также высота газожидкостного слоя на рабочей тарелке. Геометрические характеристики исследованных тарелок приведены в работе [8].

К обработке были приняты экспериментальные данные, полученные на тарелках № 11, 14, 16.

5. Результаты исследования

К обработке принимались экспериментальные по измерению гидравлического сопротивления газожидкостного слоя, которые рассчитывались из уравнения (27) подобного уравнению (3)

$$\Delta p_{г.ж.} = \Delta p_m - \Delta p_{сyx} - \Delta p_\sigma, \quad (27)$$

где $\Delta p_{г.ж.}$ – гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя, Па; Δp_m – общее гидравлическое сопротивление тарелки, Па; $\Delta p_{сyx}$ – гидравлическое сопротивление сухой тарелки, Па; Δp_σ – гидравлическое сопротивление вызванное силами поверхностного натяжения, Па.

Экспериментальные данные обрабатывались по следующему уравнению

$$Eu_{г.ж.} = A \text{Fr}^b, \quad (28)$$

где $Eu_{г.ж.} = \frac{\Delta p_{г.ж.}}{\rho_g w}$ – критерий Эйлера; $\text{Fr} = \frac{w^2}{g H_{г.ж.}}$ – кри-

терий Фруда; w – скорость газа рассчитанная на полное сечение колонны, м/с; $H_0=0,1$ м – высота газожидкостного слоя в точке бифуркации, A, b – коэффициенты.

Вначале были обработаны экспериментальные данные, полученные на тарелке № 11. Свободное сечение тарелки составляло $f=16\%$, диаметр отверстий в плато тарелки $d_0=0,012$ м. Плотности орошения составляли $L=1,6, 3,2, 8,0, 12,7, 19$ м³/(м²·час). Каждой плотности орошения соответствует определенная скорость газа в точке бифуркации (начало режима подвижного барботажного слоя).

График зависимости функции $L=f(w)$ показан на рис. 2.

Дальнейшая обработка экспериментальных данных проводилась по зависимости (28). Коэффициенты A и b определялись из регрессионного анализа по программе Microsoft Excel. В результате было получено расчетное уравнение

$$Eu = 316Fr^{-2,43}, \quad (29)$$

где $A=316, b=-2,43$.

По уравнению (29) определяли расчетные значения гидравлического сопротивления газожидкостного слоя для каждой плотности орошения.

Сопоставление экспериментальных значений гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелке провального типа с рассчитанными значениями по уравнению (29) показано на рис. 3.

На графики рис. 3, 5, 7, 8 нанесены линии расхождений экспериментальных и расчетных значений $\pm 15\%$.

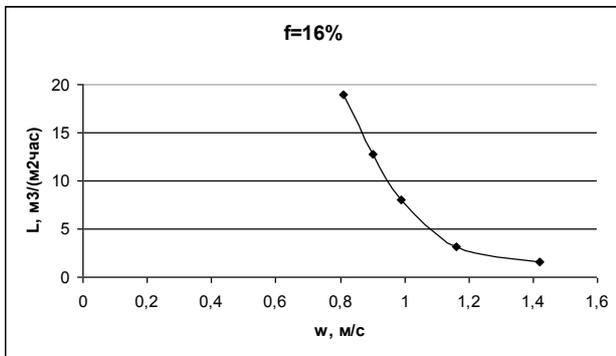


Рис. 2. График зависимости $L=f(w), f=16\%$

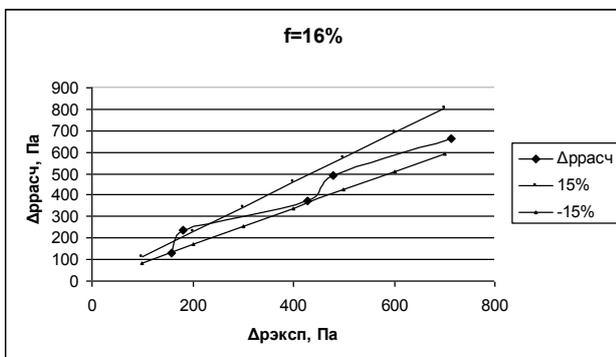


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных значений гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелке провального типа с рассчитанными значениями по уравнению (29)

Далее обрабатывались экспериментальные данные, полученные при исследовании тарелки № 14. Свободное сечение тарелки составляло $f=25\%$, диаметр отверстий в плато тарелки $d_0=0,012$ м. Плотности орошения составляли $L=1,6, 3,2, 8,0, 12,7, 19,0, 30,0$ м³/(м²·час). Каждой плотности орошения соответствует определенная скорость газа в точке бифуркации.

График зависимости функции $L=f(w)$ показан на рис. 4.

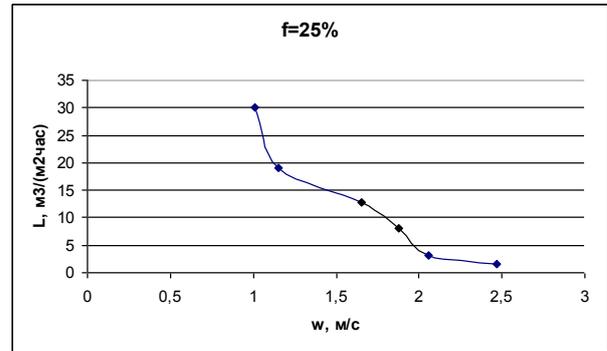


Рис. 4. График зависимости $L=f(w), f=25\%$

В результате обработки экспериментальных данных было получено расчетное уравнение для тарелки № 14 ($f=25\%$).

$$Eu = 447Fr^{-1,73}, \quad (30)$$

где $A=447, b=-1,73$.

Сопоставление экспериментальных значений гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелке провального типа с рассчитанными значениями по уравнению (30) показано на рис. 5.

Далее обрабатывались экспериментальные данные, полученные при исследовании тарелки № 16. Свободное сечение тарелки составляло $f=36\%$, диаметр отверстий в плато тарелки $d_0=0,012$ м. Плотности орошения составляли $L=1,6, 3,2, 12,7, 30,0$ м³/(м²·час). Каждой плотности орошения соответствует определенная скорость газа в точке бифуркации.

График зависимости функции $L=f(w)$ показан на рис. 6.

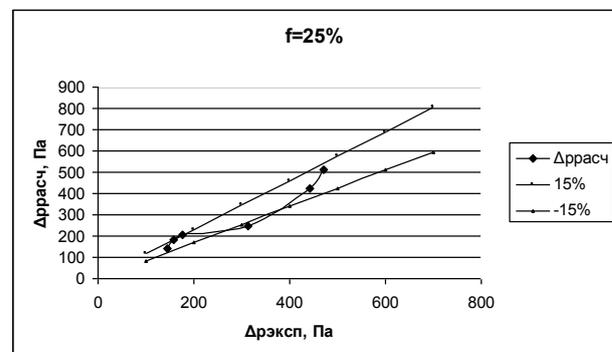


Рис. 5. Сопоставление экспериментальных значений гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелке провального типа с рассчитанными значениями по уравнению (30)

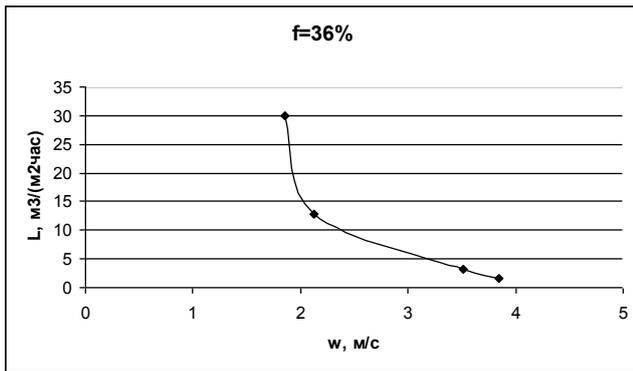


Рис. 6. График зависимости $L=f(w)$, $f=36\%$.

В результате обработки экспериментальных данных было получено расчетное уравнение для тарелки № 16 ($f=36\%$).

$$Eu = 251Fr^{-1.4}, \quad (31)$$

где $A=251$, $b=-1.4$.

Сопоставление экспериментальных значений гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелке провального типа с рассчитанными значениями по уравнению (31) показано на рис. 7.

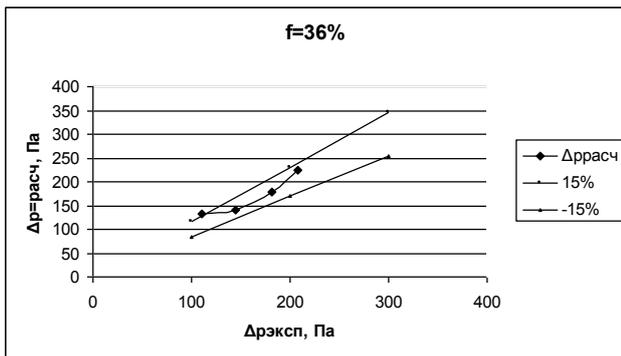


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных значений гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелке провального типа с рассчитанными значениями по уравнению (31).

Окончательно, единым массивом были обработаны экспериментальные данные по определению гидравлического сопротивления газожидкостного слоя для всех трех тарелок. Получено общее уравнение для расчета гидравлического сопротивления тарелок провального типа (32), свободное сечение которых изменяется в пределах $f=16-36\%$. Диаметр колонны составлял $D_k=0,15$ м

$$Eu = 331Fr^{-1.62}, \quad (32)$$

где $A=331$, $b=-1.62$.

Сопоставление экспериментальных значений гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелке провального типа с рассчитанными значениями по уравнению (32) показано на рис. 8.

Основное отличие полученных в данной работе уравнений, которые используются для расчета гидравлического сопротивления тарелок провального типа (29)–(32) от ранее предложенных уравнений

(16), (19), заключается в том, что в уравнения (16), (19) входит скорость газа в отверстиях плато тарелки (w_0), а в уравнения (29)–(32) входит скорость газа рассчитанная на полное сечение колонны (w).

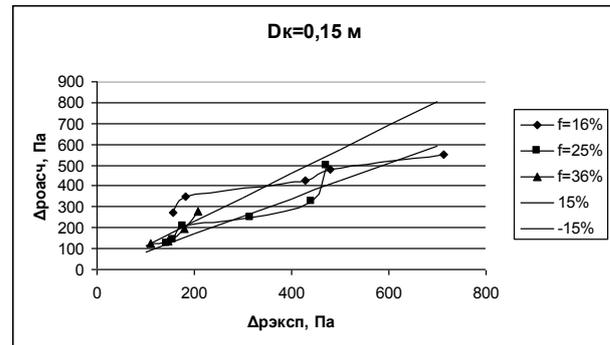


Рис. 8. Сопоставление экспериментальных значений гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелке провального типа с рассчитанными значениями по уравнению (32).

Следует отметить, что в ранее полученное уравнение (16), критерий Фруда входит с отрицательной степенью, как и в уравнения (29) – (32).

Уравнения (29)–(32) получены для определения гидравлического сопротивления газожидкостного слоя в режиме подвижного газожидкостного слоя на тарелках провального типа. Принято, на основании выводов работы [9], что при одинаковой плотности орошения по жидкости, гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя на тарелке провального типа не зависит от скорости газа, рассчитанной на полное сечение колонны. Поэтому, каждой плотности орошения жидкости соответствует только одно значение гидравлического сопротивления газожидкостного слоя, которое не зависит от скорости газа рассчитанной на полное сечение колонны в режиме подвижного газожидкостного слоя.

Графики, рис. 3, 5, 7 показывают, что расхождение между опытными и расчетными значениями гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелках находятся в пределах $\pm 15\%$.

Расхождение между опытными и рассчитанными по уравнению (31) значениями гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелках несколько превышает пределы $\pm 15\%$.

6. Выводы

1. Проведена обработка экспериментальных данных по определению гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелках провального типа на колонне диаметром $D_k=0,15$ м. Опыты проводились на модельной системе вода – воздух. Свободное сечение тарелок составляло $f=16, 25$ и 36% , а диаметр отверстий в плато тарелки – $d_0=0,012$ м. Обработка экспериментальных данных осуществлялась по зависимости (28). Обработывались экспериментальные данные только для режима подвижного газожидкостного слоя на тарелках провального типа. В качестве линейного размера в критерий Фруда подставлялась величина $H_0 = 0,1$ м – высота газожидкостного слоя в точке бифуркации. В критериях Эй-

лера и Фруда использовалась скорость газа, рассчитанная на полное сечение колонны, w .

2. Для тарелок со свободным сечением $f=16\%$ получено расчетное уравнение (29), для $f=25\%$ – уравнение (30), а для $f=36\%$ – уравнение (31).

Расхождение между опытными и рассчитанными по соответствующим уравнениям значениями гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелках, в основном, находятся в пределах значений погрешности $\pm 15\%$ и уравнения (29)–(31) могут быть рекомендованы в качестве расчетных для соответствующих условий.

3. Было получено обобщенное уравнение (32) для тарелок, свободное сечение которых изменялось в пределах $f=16\text{--}36\%$. Расхождение между опытными и рассчитанными значениями гидравлического сопротивления газожидкостного слоя на тарелках превышает значения погрешности $\pm 15\%$, поэтому уравнение (32) может быть использовано для предварительных расчетов гидравлического сопротивления тарелок провального типа.

4. В работе [10] было предложено уравнение для расчета скоростей газовой и жидкой фаз в точке бифуркации для тарелок провального типа с диаметром отверстий $d_0=0,012$ мм и различных свободных сечений этих тарелок. По данному уравнению предварительно можно определить скорости газовой и жидкой фаз в точке бифуркации рассчитываемой тарелки провального типа, а затем с помощью уравнений (29)–(32), полученных в данной работе, определить необходимое гидравлическое сопротивление тарелки провального типа для соответствующих условий.

Литература

1. Дильман, В. В. О гидравлическом сопротивлении решетчатых и дырчатых тарелок [Текст] / В. В. Дильман, Е. П. Даровских, М. Е. Аэров и др. // Хим. пром. – 1956. – № 3. – С. 156–161.
2. Сумшик, Л. Е. О гидравлическом расчете колонн с беспереливными тарелками [Текст] / Л. Е. Сумшик, М. Е. Аэров, Т. А. Быстрова // Хим. пром. – 1962. – № 7. – С. 530–532.
3. Сумшик, Л. Е. Исследование уноса и гидравлический расчет колонн с беспереливными тарелками [Текст] / Л. Е. Сумшик, М. Е. Аэров, Т. А. Быстрова // Хим. пром. – 1963. – № 1. – С. 63–68.
4. Касаткин, А. Г. К расчету колонн с провальными тарелками [Текст] / А. Г. Касаткин, Ю. И. Дытнерский, С. У. Умаров // Хим. пром. – 1958. – № 3. – С. 38–45.
5. Касаткин, А. Г. Гидравлические закономерности процессов на барботажных тарелках провального типа [Текст] / А. Г. Касаткин, Ю. И. Дытнерский, Д. М. Попов // Хим. пром. – 1961. – № 7. – С. 482–491.
6. Молоканов, Ю. К. Определение сопротивления решетчатых тарелок провального типа [Текст] / Ю. К. Мо-

локанов // Химия и технология топлив и масел. – 1962. – № 3. – С. 41–48.

7. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст]: учебник / А. Г. Касаткин. – 10-е изд., дораб. – М.: Химия, 1973. – 752 с.

8. Тараненко, Г. В. Гидравлические и массообменные характеристики тарелок провального типа с различным диаметром отверстий [Текст]: монография / Г. В. Тараненко. – Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2013. – 174 с.

9. Тараненко, Г. В. Исследование локального газосодержания газожидкостного слоя различных режимов работы тарелок провального типа [Текст] / Г. В. Тараненко // ScienceRise. – 2016. – Т. 5, № 2 (22). – С. 60–64. doi: 10.15587/2313-8416.2016.69075

10. Taranenko, G. V. Calculation of the lower operating limit of dual-flow plates with different geometrical characteristics [Text] / G. V. Taranenko // ScienceRise. – 2015. – Vol. 3, Issue 2 (8). – P. 67–73. doi: 10.15587/2313-8416.2015.39196

References

1. Dilman, V. V., Darovskikh, E. P., Ajerov, M. E. et al (1956). O gidravlichskom soprotivlenii reshchatykh I dyrchatykh tarelak [About the hydraulic resistance grid and perforated plates]. Chemical industry, 3, 156–161.
2. Sum-Shik, L. E., Aerov, M. E., Bystrova, T. A. (1962). O gidravlicheskom soprotivlenii kolonn s besperilivnymi tarelkami [On hydraulic calculation of columns with dual-flow plates]. Chemical industry, 7, 530–532.
3. Sum-Shik, L. E., Aerov, M. E., Bystrova, T. A. (1963). Issledovanie unosa I gidravlichesky raschet kolonn s besperilivnymi tarelkami [Study drop entrainment and hydraulic calculation columns with dual-flow plates]. Chemical industry, 1, 63–68.
4. Kasatkin, A. G., Dytneriskij, Ju. I., Umarov, S. U. (1958). K raschetu kolonn s proval'nymi tarelkami [Calculation of columns with dual-flow plates]. Chemical industry, 3, 38–45.
5. Kasatkin, A. G., Dytneriskij, Ju. I., Popov, D. M. (1961). Gidravlichskie zakonomernosti procesov na bardotajnykh tarelkah proval'nolo tipa [Hydraulic regularities of the processes on bubble plates dual-flow of type]. Chemical industry, 7, 482–491.
6. Molokanov, Ju. K. (1962). Opredelenie soprotivleniya reshchatykh tarelak proval'nolo tipa [Determination resistance grid plates dual-flow of type]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 3, 41–48.
7. Kasatkin, A. G. (1973). Osnovnye protsesy i apparaty himicheskoy tehnologii [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Chemistry, 752.
8. Taranenko, G. V. (2013). Gidravlichskie i massoobmennye harakteristiki tarelak proval'nogo tipa s pazlichnym diametrom otversty [Hydraulic and mass transfer characteristics of the dual-flow plates with different diameter holes]. Lygansk: VNU. V. Dahl, 174.
9. Taranenko, G. V. (2016). Research of local gas content of gas-liquid layer for different operating regimes of dual-flow plates. ScienceRise, 5/2 (22), 60–64. doi: 10.15587/2313-8416.2016.69075
10. Taranenko, G. V. (2015). Calculation of the lower operating limit of dual-flow plates with different geometrical characteristics. ScienceRise, 3/2 (8), 67–73. doi: 10.15587/2313-8416.2015.39196

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Архипов О. Г.
Дата надходження рукопису 16.05.2016.

Тараненко Геннадий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиноведения и оборудования промышленных предприятий, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, пр. Центральный, 59-а, г. Северодонецк, Украина, 93400
E-mail: gtaranenko@ukr.net