

УДК 66.048.3.069.835

DOI: 10.15587/2706-5448.2020.208493

АНАЛИЗ РАБОТЫ ТАРЕЛОК ПРОВАЛЬНОГО ТИПА С БОЛЬШИМ СВОБОДНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Тараненко Г. В.

Объектом исследования являются тарелки провального типа с большим свободным сечением. Одним из самых проблемных мест таких тарелок является их низкая эффективность, которая зависит от режима работы тарелок провального типа с большим свободным сечением. Газожидкостный слой на таких тарелках представляют собой капли и пленки жидкости, которые являются дисперсной фазой. При этом сплошной фазой является газ. Недостаточный запас жидкости на тарелках провального типа с большим свободным сечением приводит к снижению эффективности работы таких тарелок.

В ходе исследований использовался метод гидродинамического моделирования. Этот метод заключается в том, что тарелки провального типа исследуются вначале на опытных установках, а их результаты, по определенной методике, используются для расчета промышленных тарелок.

Проведено исследование тарелок провального типа с большим свободным сечением в широком диапазоне изменения нагрузок по газу и жидкости. Определен диапазон работы тарелок. Установлено, что гидравлическое сопротивление тарелок провального типа с большим свободным сечением мало зависит от диаметра колонного аппарата. Показано практически полное совпадение зависимости высоты газожидкостного слоя от скорости газа в сечении колонны для тарелок провального типа с большим свободным сечением, установленных в колоннах с диаметром $D=0,057$, $0,4$ и 2 м. Выявлено, что для моделирования работы тарелок провального типа с большим свободным сечением промышленного диаметра можно использовать колонну диаметром $D=0,057$ м. Например, для тарелок провального типа обычного свободного сечения при гидродинамическом моделировании необходимо использовать опытные установки с колоннами большего диаметра $D=0,15-0,25$ м. Показано, что тарелки провального типа с большим свободным сечением могут работать при значительно более высоких скоростях газа и жидкости, по сравнению с тарелками провального типа с обычным свободным сечением.

Рекомендуется применение тарелок провального типа с большим свободным сечением в процессах абсорбции при больших плотностях орошения.

Ключевые слова: тарелка провального типа, большое свободное сечение колонны, гидравлическое сопротивление, высота газожидкостного слоя.

1. Введение

Массообменные тарелки нашли широкое применение в химической, нефтехимической, пищевой и других отраслях промышленности. Наиболее часто их применяют в процессах ректификации различных продуктов.

Тарелки провального типа имеют минимальную стоимость изготовления, удобны при монтаже и эксплуатации, возможность работы с загрязнёнными средами.

Тарелки провального типа с большим свободным сечением допускают большие линейные скорости, как газа, так и жидкости. Это позволяет проектировать колонны меньшего диаметра при одинаковой производительности.

К недостаткам таких тарелок относится относительно небольшая эффективность их работы.

Актуальной задачей является исследование эффективности массопереноса на тарелках провального с большим свободным сечением.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования являются тарелки провального типа с большим свободным сечением. Данное сечение $f > 0,3$. Тарелки представляют собой плато из различного материала с отверстиями разного диаметра. В данной работе исследовались тарелки с диаметром отверстий $d = 0,012$ м.

Такие тарелки допускают большие линейные скорости газа $w = 2-4$ м/с при различных плотностях орошения $L = 100-5$ м³/(м²·час), соответственно.

Одним из наиболее проблемных мест таких тарелок является относительно небольшая эффективность их работы, а также работа при большой величине брызгоуноса.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – исследовать тарелки провального типа с большим свободным сечением.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Установить диапазон работы тарелок провального типа с большим свободным сечением.

2. Установить зависимость гидравлического сопротивления тарелок провального типа с большим свободным сечением от скорости газа в сечении колонны и плотности орошения по жидкости.

3. Установить зависимость высоты газожидкостного слоя на тарелках провального типа с большим свободным сечением от скорости газа в сечении колонны и плотности орошения по жидкости.

4. Установить область применения тарелок провального типа с большим свободным сечением.

4. Исследование существующих решений проблемы

В литературе рассматриваются несколько моделей расчета эффективности массопереноса на массообменных тарелках.

В [1] для расчета точки эффективности была предложена модель структуры пены на основе анализа изображения пены, взятой на ситчатой тарелке провального типа диаметром 0,153 м дистилляционной колонны. Пена была определена как комбинация пузырьков и непрерывных струй, которые разбивают поверхность пены, образующиеся брызги жидкости падают на поверхность пены. Отмечено, что одновременная передача массы и тепла в сочетании со сложным двухфазным движением жидкости делает дистилляцию трудной для проведения фундаментального анализа.

Эффективность массопереноса на тарелке провального типа связана с динамикой жидкости. Это определяет структуру дисперсии или область контакта между газовой и жидкой фазой. Режимы движения на тарелке провального типа напрямую влияют на эффективность, воздействуя на межфазную поверхность. Традиционно воспринимаемая картина та, что пенный режим состоит из пузырьков в жидкости, которая является непрерывной фазой, и режима спрея, при котором газожидкостный слой состоит из капель в газовой непрерывной фазе. Эти режимы для пены и распыления определяют внезапное изменение природы двухфазной смеси в переходной зоне и предполагают два отдельных выражения для прогнозирования эффективности тарелки в этих двух режимах.

Общая эффективность оценивается путем сложения вкладов, как пузырьков, так и струй, существующих в дисперсии. А данные об эффективности коммерческой тарелки провального типа, с другой стороны, показывают плавный переход эффективности тарелки от точки подвисяния до точки захлебывания тарелки. Это заставило многих исследователей прийти к единой модели эффективности тарелки для режимов пены и спрея. Большинство существующих моделей эффективности тарелок [2–4] основаны на единой модели эффективности.

В [1] режим пены моделируется на основе анализа изображения пены, полученной на тарелке диаметром 0,153 м. Модель описывает пену как комбинацию пузырьков и непрерывных струй. При более высокой нагрузке по газу струйная фракция доминирует и трансформируется в режим спрея. Эта модель пены дополнительно принята для разработки базовой модели, которая прогнозирует эффективность тарелки провального типа. Эффективность модели учитывает вклад барботажного и струйного режимов работы в общий массообмен. На основании принятой структуры барботажного слоя на тарелке провального типа метод оценки общей точечной эффективности E_{OG} показан в виде уравнений (1) и (2). Общую точечную эффективность можно определить, если сложить эффективность барботажной и струйной зон, которые существуют на тарелке.

$$E_{OG} = (1 - f_j) E_B + f_j E_j, \quad (1)$$

где f_j – объемная доля газа, который обходит пузырьки в виде непрерывных струй; E_B и E_j являются вкладом барботажной и струйной зон, соответственно, в общую точечную эффективность E_{OG} .

Из-за неполного распада крупных (первичных) пузырьков оба крупные (первичные) и маленькие (вторичные) пузырьки сосуществуют в зоне барботажа. Таким образом, E_B имеет вклад как крупных, так и маленьких пузырьков:

$$E_B = (1 - FSB) E_{LB} + FSB \cdot E_{SB}, \quad (2)$$

где FSB – доля мелких пузырьков; E_{LB} – общая точечная эффективность для больших пузырьков; E_{SB} – общая точечная эффективность для маленьких пузырьков.

В свою очередь, точечные эффективности E_B и E_j рассчитываются по уравнениям, полученным на основании общей теории дистилляции бинарных смесей.

В [3] разработана модель прогнозирования точечной эффективности для ситчатых тарелок перекрестного типа. Указано, что для преобразования эффективности Мерффри в точечную эффективность требуются модели для смешивания пара и жидкости. Изучение геометрии исследуемой тарелки позволило сделать вывод, что пар, вероятно, будет хорошо смешан между тарелками, так как расстояния между тарелками и диаметром были относительно большими. Отход от этого предположения не будет иметь большого влияние на конечную модель [5]. Эффекты смешивания жидкости могут быть учтены вихревой диффузионной моделью [6].

Моделью предусматривается расчет точечной эффективности через эффективность по Мерффри:

$$\frac{E_{mv}}{E_{ov}} = \frac{1 - e^{-(n'+Pe)}}{(n' + Pe) \left(1 + \frac{n' + Pe}{n'}\right)} + \frac{e^{n'} - 1}{n' \left(1 + \frac{n'}{n' + Pe}\right)}, \quad (3)$$

$$n' = \frac{Pe}{2} \left(\left[1 + \frac{4\lambda E_{ov}}{Pe} \right]^{1/2} - 1 \right), \quad (4)$$

где E_{mv} – эффективность по Мерффри, рассчитанная по концентрациям в паровой фазе; E_{ov} – точечная эффективность, рассчитанная по концентрациям в паровой фазе; Pe – число Пекле; λ – отношение наклона линии равновесия к рабочей линии.

Число Пекле определяется по уравнению:

$$Pe = \frac{Z_l^2}{D_E \bar{t}_L}, \quad (5)$$

где Z_l – длина хода жидкости, м; D_E – коэффициент вихревой диффузии, м²/с; \bar{t}_L – среднее время пребывания жидкости, с.

Длина пути Z_l принимается как расстояние между входом и выходом жидкости на тарелку.

Для очень низких значений Pe (высокое диффузионное обратное перемешивание), уравнение (3) сводится к модели идеального перемешивания, при котором:

$$\frac{E_{mv}}{E_{ov}} = 1.$$

Для очень высоких значений Pe уравнение (3) сводится к модели идеального вытеснения и точечная эффективность в этом случае рассчитывается по уравнению:

$$E_{ov} = \frac{\ln(\lambda E_{mv} + 1)}{\lambda}. \quad (6)$$

Коэффициент вихревой диффузии D_E в уравнении должен быть измерен экспериментально.

Среднее время пребывания жидкости в уравнении (5) основано на задержке пены на тарелке:

$$\bar{t}_L = \frac{h_L A_a}{100Q}, \quad (7)$$

где h_L – задержка жидкости на тарелке, см; A_a – активная или барботажная площадь тарелки, м²; Q – расход жидкости, м³/с.

Величину h_L определяли по методике, разработанной в [7].

Из работ [1, 3] можно сделать следующие выводы:

– разработаны модели для предсказания точечной эффективности как тарелок провального типа [1], так и ситчатых тарелок перекрестного типа [3];

– в [1] модель создана на основании описания структуры газожидкостного слоя на тарелке провального типа, а в [3] используется диффузионная модель работы массообменной тарелки;

– в [1, 3] модели создавались на основе данных, полученных в процессе ректификации различных бинарных систем;

– в [1, 3] для создания моделей точечной эффективности использовалась работа тарелок обычного свободного сечения $f < 0,25$.

В [8] отмечается, что на тарелках провального типа выделяется 3 характерных гидродинамических режима:

- 1) газ распределен в жидкости;
- 2) инверсия фаз;
- 3) жидкость распределена в газе.

Границы указанных гидродинамических режимов зависят от гидродинамических, физико-химических и конструктивных параметров системы и могут колебаться в широких пределах.

Из геометрических параметров выделяются тарелки провального типа с небольшим свободным сечением $f \leq 0,25$ и с большим свободным сечением $f > 0,3$. Для тарелок провального типа с большим свободным сечением нельзя проследить смену гидродинамических режимов с ростом скорости газа. Практически вплоть до точки захлебывания на них образуется весьма невысокий газожидкостный слой с тонкими постоянно разрывающимися пленками жидкости. Характерным для подобных тарелок, особенно при высоких линейных скоростях газа ($w > 1-2$ м/с), является интенсивный брызгоунос, так как практически отсутствует сепарирующий слой газожидкостной пены [8].

В [9] рассматривается работа тарелок провального типа с большим свободным сечением. Массообмен на тарелках провального типа исследовали в процессе ректификации системы метанол – вода (50 мол. %).

На рис. 1 показаны графики зависимости эффективности тарелок провального типа с большим свободным сечением ($f=0,36$ и $f=0,56$) от скорости пара в сечении колонны.

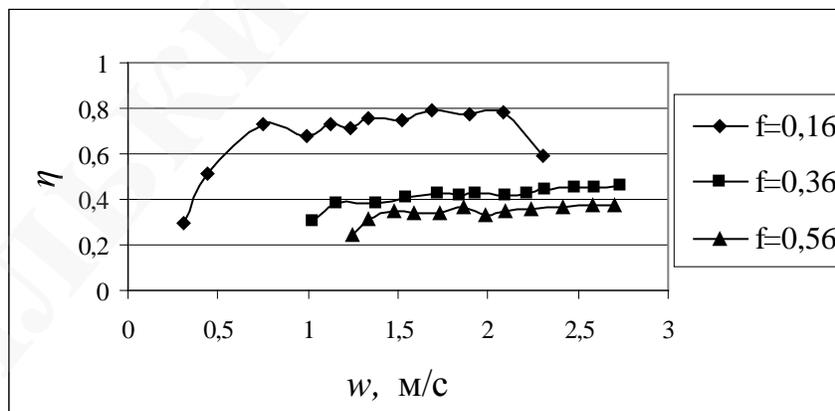


Рис. 1. Зависимость эффективности тарелок провального типа от скорости пара в сечении колонны (система метанол – вода (50 мол. %))

Из рис. 1 видно, что тарелки провального типа стабильно работают во всем диапазоне существования на тарелках газожидкостного слоя, и в это время реализуется только струйный режим работы тарелок.

Для сравнения, на рис. 1 также приведен график зависимости эффективности тарелки от скорости пара в сечении колонны для тарелки провального типа с обычным свободным сечением ($f=0,16$). Видно, что тарелки провального типа с большим сечением работают при больших нагрузках по пару и жидкости, чем тарелки с обычным свободным сечением. При этом эффективность тарелок провального типа с обычным свободным сечением значительно больше, чем эффективность тарелок с большим свободным сечением.

В [10] были исследованы гидродинамические характеристики тарелок провального типа, как с малым, так и с большим свободным сечением, хотя основное внимание было уделено тарелкам провального типа с малым свободным сечением. Диаметр колонны составлял $D=0,057$ м.

В [11] исследовались гидравлические характеристики тарелок провального типа с большим свободным сечением на колонах диаметром $D=0,15$, $0,4$ и 2 м. Исследования проводились на модельной системе вода – воздух. Свободное сечение тарелок составляло $f=0,36$ и $0,56$. Эффективность работы тарелок исследовалась на системе метанол – вода 50 мол. % на колонне диаметром $D=0,3$ м. Свободное сечение тарелок составляло $f=0,36$ и $0,56$. На тарелках был реализован струйный режим работы.

Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что основным параметром, который влияет на работу тарелок провального типа, является их свободное сечение.

5. Методы исследования

В данной работе проведены исследования тарелок провального типа с большим свободным сечением ($f=0,36$ и $0,42$) на лабораторной установке, описание которой приведено в [10].

Диаметр колонны составлял $D=0,057$ м. Измерялись гидравлическое сопротивление тарелки и высота газожидкостного слоя. Исследования проведены в широком диапазоне изменения нагрузок по газу и жидкости на модельной системе воздух – вода.

6. Результаты исследования

На рис. 2 приведен график зависимости гидравлического сопротивления тарелки провального типа с большим свободным сечением ($f=0,36$) в зависимости от скорости газа в сечении колонны. Исследования проведены на колонне диаметром $D=0,057$ м. Для сравнения, показаны графики исследований тарелок провального типа ($f=0,36$), проведенные на колоннах диаметром $D=0,4$ м и $D=2$ м из [11].

Из рис. 2 видно, что у всех тарелок одинаковый диапазон работы. Для плотности орошения $L \approx 100$ м³/(м²·час) тарелки устойчиво работают при высоких скоростях газа, до $w=2$ м/с. Тарелки имеют близкие величины гидравлического сопротивления, учитывая отсутствие на тарелках режима подвижного

газожидкостного слоя, так как на тарелках провального типа с большим свободным сечением нет сплошного слоя жидкой фазы [10].

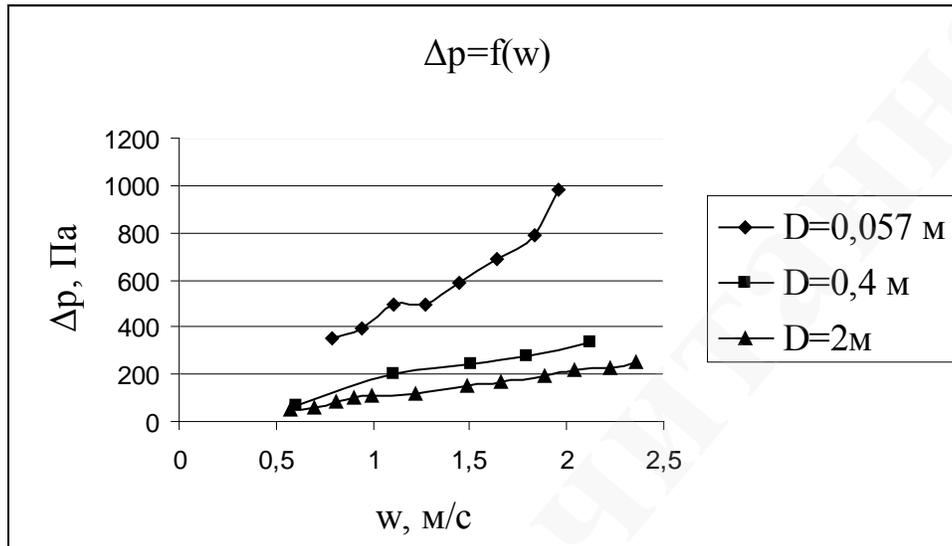


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления тарелок провального типа с большим свободным сечением ($f=0,36$) от скорости пара в сечении колонны. Плотность орошения составляла $L \approx 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$

На рис. 3 приведены графики зависимости высоты газожидкостного слоя на тарелке от скорости газа в сечении колонны для тех же условий, что и на рис. 2. Графики показывают практически полное совпадение для всех тарелок провального типа с большим свободным сечением.

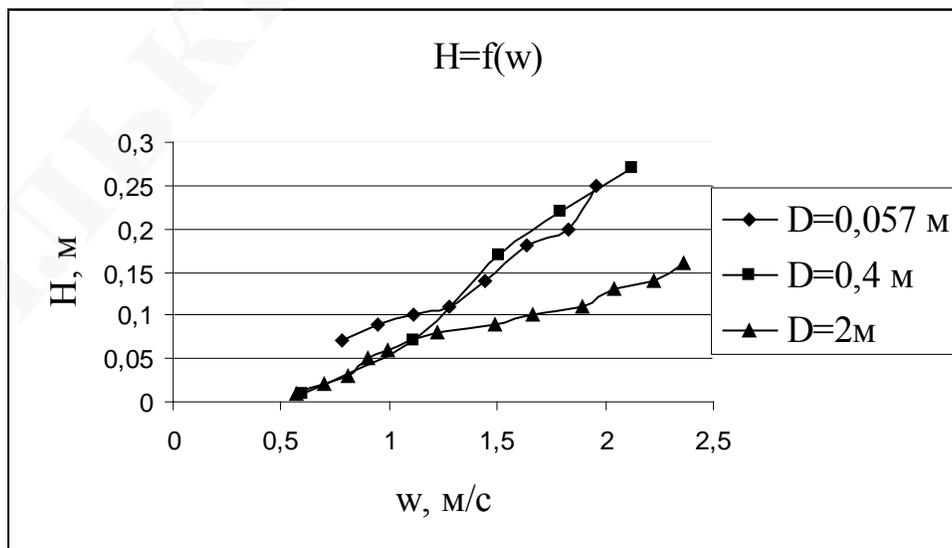


Рис. 3. Зависимость высоты газожидкостного слоя тарелок провального типа с большим свободным сечением ($f=0,36$) от скорости пара в сечении колонны. Плотность орошения составляла $L \approx 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$

Таким образом, можно говорить, что для тарелок провального типа с большим свободным сечением не существует проблемы масштабного перехода.

Колонну диаметром $D=0,057$ м можно использовать для моделирования процессов абсорбции, если необходимы большие нагрузки по жидкой фазе и небольшое гидравлическое сопротивление колонного аппарата.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Установлено, что тарелки провального типа с большим свободным сечением работают при больших скоростях, как газовой, так и жидкой фазами по сравнению с тарелками с малым свободным сечением. Это позволяет устанавливать их в колоннах меньшего диаметра. Работа тарелок провального типа с большим свободным сечением не зависит от диаметра колонного аппарата. Это позволяет для гидродинамического моделирования таких тарелок использовать опытные установки с малым диаметром колонн.

Weaknesses. Показано, что при струйном режиме работы снижается эффективность тарелок провального типа с большим свободным сечением. А при больших скоростях газа на таких тарелках возрастает величина брызгоуноса.

Opportunities. Необходимо в сепарационном пространстве между тарелками установить сепараторы. Они будут играть роль дополнительной зоны контакта фаз, что увеличит общую эффективность контактной ступени.

В мире мало используются тарелки провального типа с большим свободным сечением, поэтому они мало и изучены. Однако исследование таких тарелок будет полезно для других стран в виду их положительных сторон.

Threats. Для изготовления сепараторов и их монтажа потребуются дополнительные затраты.

8. Выводы

1. Установлен диапазон работы тарелок провального типа с большим свободным сечением. Минимальная скорость работы составляет $w_{\min}=0,6$ м/с, а максимальная – $w_{\max}=2$ м/с при плотности орошения $L\approx 100$ м³/(м²·час).

2. Проведено исследование зависимости гидравлического сопротивления тарелок провального типа с большим свободным сечением от скорости газа в сечении колонны для плотности орошения $L\approx 100$ м³/(м²·час). Скорость газа в сечении колонны достигала $w=2$ м/с.

3. Проведено исследование зависимости высоты газожидкостного слоя тарелок провального типа с большим свободным сечением от скорости газа в сечении колонны для плотности орошения $L\approx 100$ м³/(м²·час). Скорость газа в сечении колонны, достигала $w=2$ м/с.

4. Показано, что тарелки провального типа с большим свободным сечением можно применять для плотности орошения до $L\approx 100$ м³/(м²·час). При этом скорость газа в сечении колонны может составить $w=2$ м/с.

Литература

1. Syeda, S. R., Afacan, A., Chuang, K. T. (2007). A Fundamental Model for Prediction of Sieve Tray Efficiency. *Chemical Engineering Research and Design*, 85 (2), 269–277. doi: <http://doi.org/10.1205/cherd06111>
2. *Bubble Tray Design Manual* (1958). New York: American Institute of Chemical Engineers, 94.
3. Chan, H., Fair, J. R. (1984). Prediction of point efficiencies on sieve trays. 1. Binary systems. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 23 (4), 814–819. doi: <http://doi.org/10.1021/i200027a032>
4. Chen, G. X., Chuang, K. T. (1993). Prediction of point efficiency for sieve trays in distillation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 32 (4), 701–708. doi: <http://doi.org/10.1021/ie00016a017>
5. Diener, D. A. (1967). Calculation of Effect of Vapor Mixing on Tray Efficiency. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 6 (4), 499–503. doi: <http://doi.org/10.1021/i260024a018>
6. Gerster, J. A., Hill, A. B., Hochgraf, N. N., Robinson, D. G. (1958). *Tray Efficiencies In Distillation Columns American Institute of Chemical Engineers (AIChE)*. Final report from the University of Delaware. New York, 118.
7. Bennett, D. L., Agrawal, R., Cook, P. J. (1983). New pressure drop correlation for sieve tray distillation columns. *AIChE Journal*, 29 (3), 434–442. doi: <http://doi.org/10.1002/aic.690290313>
8. Mukhlenov, I. P., Tarat, E. IA., Tubolkin, A. F., Tumarkina, E. S. (1977). *Pennii rezhim i pennye apparaty*. Leningrad: Khimiia, 304.
9. Taranenko, G. V. (2019). Gas content on dual-flow plate in a combined contact device. *ScienceRice*, 1 (54), 19–25. doi: <http://doi.org/10.15587/2313-8416.2019.155858>
10. Taranenko, G. V. (2013). *Gidravlicheskie i massoobmennye kharakteristiki tarelok provalnogo tipa s razlichnym diametrom otverstii*. Lugansk: VNU im. V. Dalia, 174.
11. Taranenko, G. V. (1984). *Gidrodinamika i massopredacha kombinirovannogo kontaktного ustroistva*. GIAP, 298.