

**Степанюк Андрій Романович**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056  
E-mail: ynk@kpi.ua

**Кичак Руслан Віталійович**, аспірант, кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056  
E-mail: kkrnvh@gmail.com

УДК 066.015.23

DOI: 10.15587/2313-8416.2019.155858

## ГАЗСОДЕРЖАНИЕ НА ТАРЕЛКЕ ПРОВАЛЬНОГО ТИПА В КОМБИНИРОВАННОМ КОНТАКТНОМ УСТРОЙСТВЕ

© Г. В. Тараненко

*Проведено исследование тарелок провального типа с большим свободным сечением, которые предлагаются устанавливать в комбинации с пакетом гофрированной насадки с косым гофром. Пакет насадки устанавливается над тарелкой провального типа в качестве сепаратора газожидкостного слоя, таким образом, пакет насадки является второй зоной контакта фаз в условиях массопередачи. Такое комбинированное контактное устройство допускает большие линейные скорости газа.*

*Установлено, что гидродинамические характеристики комбинированного контактного устройства практически не зависят от диаметра колонного аппарата в условиях нагрузок по жидкой фазе характерных для процессов ректификации*

**Ключевые слова:** комбинированное контактное устройство, колонна, геометрические характеристики, ректификация, сепаратор, тарелка провального типа

### 1. Введение

В химической и других отраслях промышленности достаточно широко изучаются гидравлические характеристики тарелок провального типа [1–3]. Эти работы посвящены исследованию тарелок провального типа с небольшим свободным сечением ( $f < 0,25$ ).

В настоящее время актуальной задачей является увеличение линейной скорости газа (пара) в колонных аппаратах. Это позволяет уменьшить поперечное сечение аппарата, при сопротивлении массопередаче сосредоточенном в газовой фазе. Также уменьшается время пребывания контактирующих веществ в аппарате, что важно, если эти вещества термолabile [4].

Этой цели можно достичь, если снабдить колонный аппарат тарелками провального типа с большим свободным сечением. Однако такие тарелки имеют низкую эффективность. Для увеличения общей эффективности ступени контакта фаз в сепарационное пространство тарелки провального типа помещают сепаратор, который предназначен для

уменьшения брызгоуноса с нижележащей тарелки провального типа. В таком комбинированном контактном устройстве сепаратор выполняет задачу второй зоны контакта фаз [5].

Для эффективной работы в комбинации с тарелками провального типа с большим свободным сечением, сепаратор включает в свою конструкцию регулярную насадку с косым гофром [6]. Эта насадка допускает большие производительности по газу и жидкости, имеет небольшое гидравлическое сопротивление и обладает хорошими сепарационными характеристиками.

### 2. Анализ литературных данных

В [7] рассматриваются исследования гидравлических и кинетических характеристик комбинированного контактного устройства [5], которые проведены в широком диапазоне изменения скоростей, как газовой, так и жидкой фазах.

Геометрические характеристики исследованных тарелок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики тарелок

Номер тарелки	1 2 3 4 5 6	7 8 9	10 11 12	13 14 15
Диаметр колонны, $D_k$ , м	0,15	0,3	0,4	2,0
Свободное сечение, $f \times 10^2$	16 22 25 30 36 46	16 36 56	16 36 56	16 25 36
Диаметр отверстия, $d_0 \times 10^3$ , м	8 12 12 12 12 7	8 12 12	12 12 12	12 12 12

Эквивалентный диаметр насадки составлял  $d_3=0,0099$  м и высота пакета насадки была равной  $l_n=0,05$  м.

Расстояние от плато тарелки до нижней кромки пакета насадки выбиралась из условия максимальной производительности при минимуме расстояния между тарелкой и сепаратором на основании экспериментальных данных, и составило  $H_c=0,4$  м.

Установлено, что верхним рабочим пределом комбинированного контактного устройства является «захлебывание» пакета насадки. Проведенные исследования показали, что скорость «захлебывания» отдельно установленного пакета насадки больше, чем скорость «захлебывания» комбинированного контактного устройства, потому, что на пакет насадки, находящейся в составе комбинированного контактного устройства, оказывает влияние брызгоунос с нижележащей тарелки.

Учет влияния брызгоуноса на «захлебывание» комбинированного контактного устройства проводили следующим образом.

$$Y = w_3^2 \frac{a}{\varepsilon^3 \cdot g} \mu_{жс}^{0,16} \frac{\rho_2}{\rho_{жс}} \quad (1)$$

$$X = \left( \frac{L_0}{G_0} \right)^{1/4} \left( \frac{\rho_2}{\rho_{жс}} \right)^{1/8} \quad (2)$$

$$Y = A \exp(-4X) \quad (3)$$

где

$A=6,6$  – коэффициент,  
 $a=364 \text{ м}^2/\text{м}^3$  – удельная поверхность насадки,  
 $\varepsilon=0,906$  – доля свободного объема,  
 $G_0$  – расход газа (пара), кг/с,  
 $g=9,81$  ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>,  
 $L_0$  – расход жидкости, кг/с,  
 $w_3$  – скорость «захлебывания» комбинированного контактного устройства, м/с,  
 $\mu_{жс}$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с,  
 $\rho_2$  – плотность газа (пара), кг/м<sup>3</sup>,  
 $\rho_{жс}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>

В уравнениях (1) – (3), которые получены для расчета отдельно установленного пакета насадки, подставляли значение скорости газа, при которой «захлебывалось» комбинированное контактное устройство. В результате получали некоторое «фиктивное» значение плотности орошения ( $L_\phi$ ), которое было больше плотности орошения  $L$ , при которой «захлебывалось» комбинированное контактное устройство. Оказалось, что величины отношений  $\frac{L_\phi}{L}$ , отложенные в координатах  $\lg\left(\frac{L_\phi}{L}\right) = f(\lg w_3)$ , ложатся на прямую линию, т.е. «фиктивную» плотность орошения ( $L_\phi$ ) можно определять по уравнению

$$\frac{L_\phi}{L} = B \cdot w_3^c \quad (4)$$

где  $B=0,36$ ;  $c=1,4$ .

Уравнение (4) получено для тарелок провального типа с большим свободным сечением ( $f=0,36$ ).

В работе установлено, что диаметр колонны практически не оказывает влияния на верхний рабочий предел комбинированного контактного устройства с тарелкой провального типа с большим свободным сечением.

В [7] приведены результаты исследования эффективности комбинированного контактного устройства.

Массопередачу, которая лимитируется сопротивлением газовой фазы, исследовали в процессе ректификации на системе метанол–вода (50 мол. %). Исследовались тарелки 7, 8, 9 (табл. 1).

В [7] показано, рис. 1, что двум режимам работы тарелок провального типа соответствует два участка на кривых зависимости  $\eta = f(w_3)$ . На участке кривой, соответствующему режиму равномерного барботажа газа, эффективность возрастает с увеличением скорости пара в сечении колонны. На участке кривой, соответствующему режиму неравномерного барботажа газа – эффективность практически не зависит от скорости пара в сечении колонны.

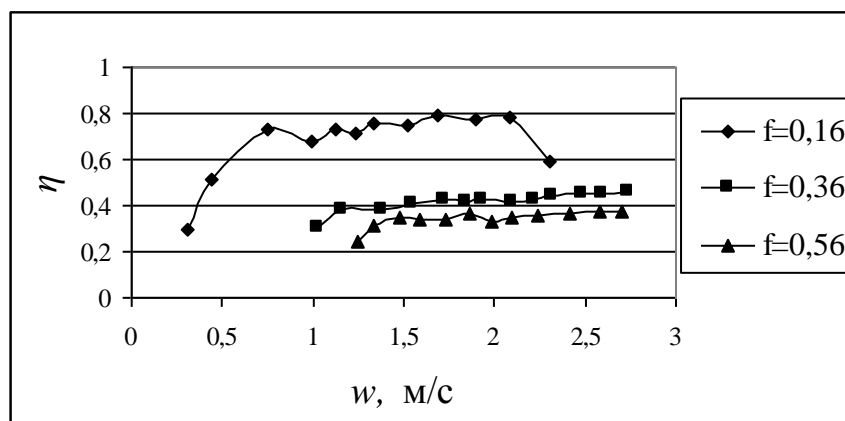


Рис. 1. Зависимость эффективности тарелок провального типа от скорости пара в сечении колонны. Система метанол – вода

Установка в сепарационном пространстве пакета насадки значительно повышает общую эффективность ступени контакта фаз, особенно

при установке пакета насадки над тарелкой провального типа с большим свободным сечением, рис. 2.

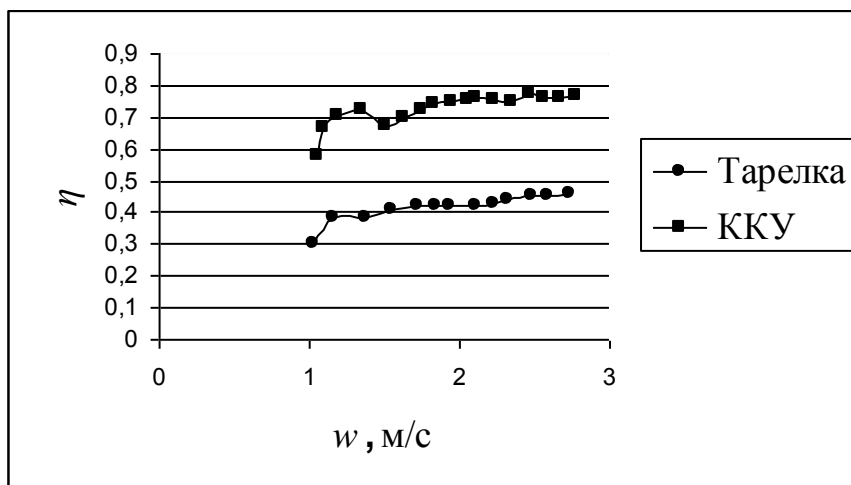


Рис. 2. Зависимость эффективности тарелки провального типа и комбинированного контактного устройства (ККУ) от скорости пара в сечении колонны. Система метанол – вода. Тарелка со свободным сечением  $f=0,36$

Массопередачу на комбинированном контактном устройстве нельзя рассчитывать по аддитивности массопередачи на тарелке провального типа и пакете гофрированной насадки, поэтому к обработке принимались экспериментальные данные по эффективности всего комбинированного контактного устройства.

Для сравнения различных типов контактных устройств используется комплексный показатель, уравнение (5), [7]

$$\frac{\Delta p}{\eta}, \tag{5}$$

где  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление контактного устройства, Па,  $\eta$  – эффективность контактного устройства.

На рис. 3, представлена зависимость отношения  $\frac{\Delta p}{\eta}$  от скорости пара в сечении колонны.

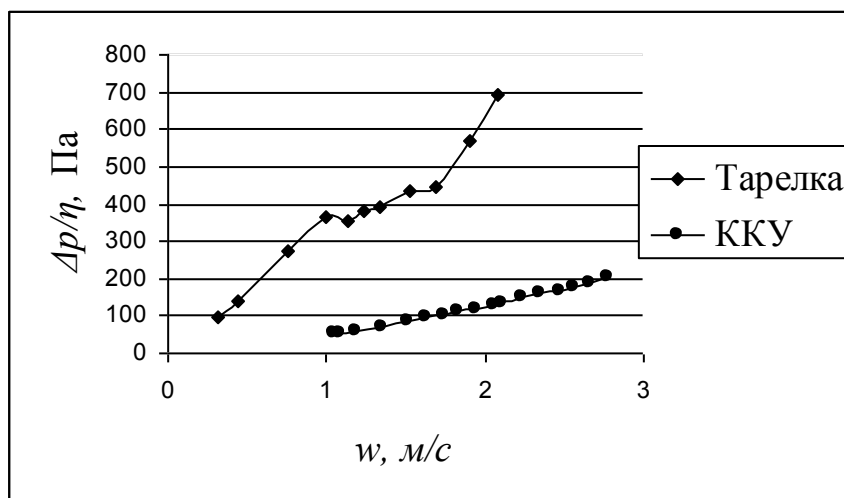


Рис. 3. Зависимость отношения  $\frac{\Delta p}{\eta}$  от скорости пара в сечении колонны. Система метанол – вода

Сравнивается тарелка провального типа со свободным сечением,  $f = 0,16$  и комбинированное контактное устройство с тарелкой провального типа со свободным сечением,  $f=0,36$ . Средняя эффективность обоих массообменных устройств была одинаковой ( $\eta=0,74$ ).

Из графиков, рис. 3, видно, что показатель  $\frac{\Delta p}{\eta}$  у комбинированного контактного устройства значительно меньше, чем у тарелки провального типа, что характеризует преимущество комбинированного контактного устройства с тарелкой провального типа

большого свободного сечения по сравнению с тарелкой провального типа малого свободного сечения.

В [7] также установлено, что у тарелки провального типа с большим свободным сечением среднее газосодержание газожидкостного слоя превышало значения  $\varphi > 0,8$ , следовательно, дисперсной фазой такого газожидкостного слоя являлась жидкость, а сплошной – газ и массопередача осуществлялась между каплями жидкости и газом.

В [8] приведено сравнение значений массопередачи на тарелках провального типа, рис. 1, и среднего газосодержания газожидкостного слоя при тех же условиях, рис. 4.

Из сравнения графиков на рис. 1 и рис. 4 видно, что большим значениям среднего газосодержания на тарелках провального типа соответствуют меньшие значения эффективности тарелок.

В [8] были исследованы тарелки со свободным сечением  $f=14,6, 25,4, 30, 36$  и  $42,25\%$ .

Плотность орошения изменялась в пределах от  $5,01$  до  $90,64 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \text{ ч})$ , а скорость газа достигала  $4,31 \text{ м/с}$ .

Модельной была система вода – воздух.

Типичные графики зависимости среднего газосодержания от скорости газа в сечении колонны представлены на рис. 5.

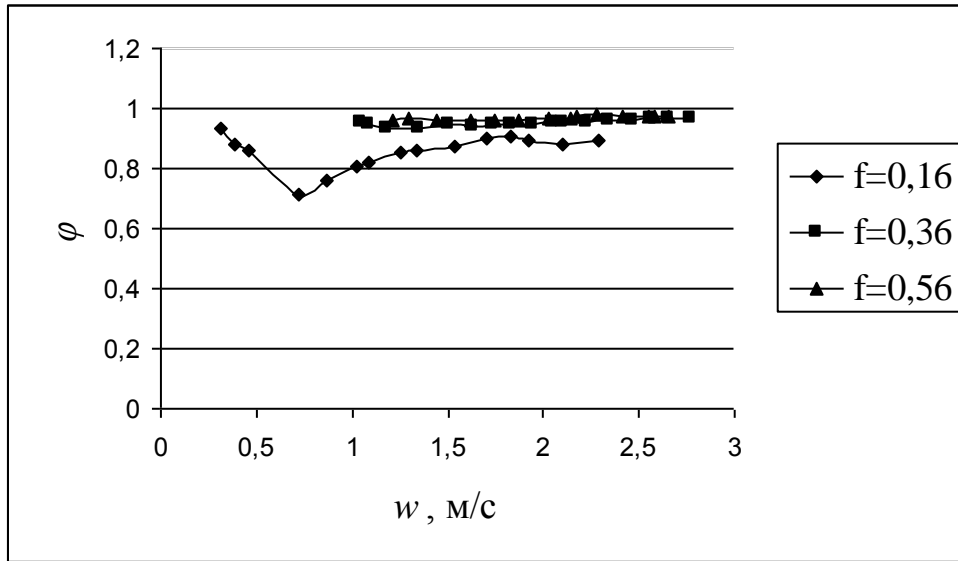


Рис. 4. Зависимость среднего газосодержания на тарелках от скорости пара в сечении колонны. Система метанол – вода

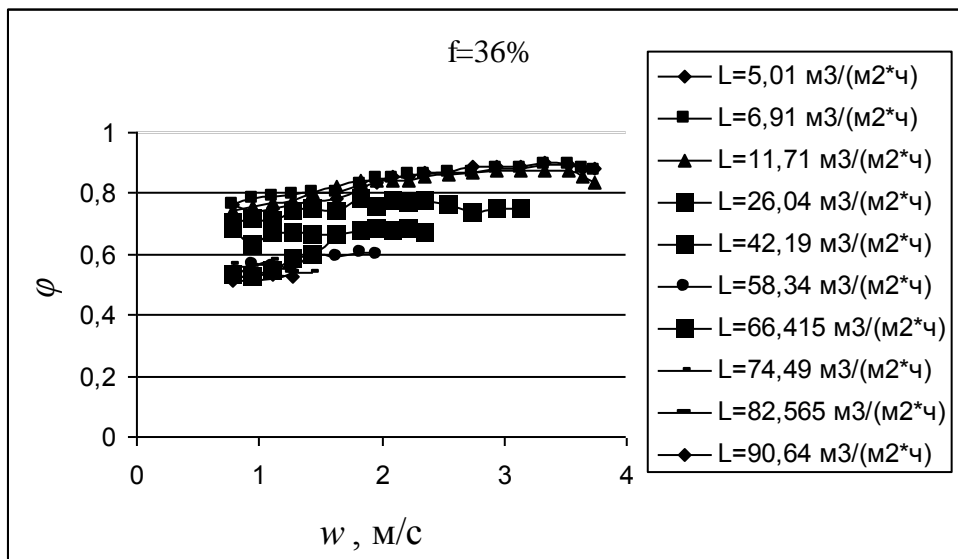


Рис. 5. Зависимость  $\varphi = f(w)$  для тарелки с  $f = 36\%$

Свободное сечение тарелки составляло  $f = 36\%$ , диаметр колонны –  $D = 0,057 \text{ м}$ .

Ранее было установлено [9] существование трех режимов работы тарелок провального типа:

- режим однородного барботажного слоя;

- режим подвижного газожидкостного слоя;
- режим разрушения газожидкостного слоя.

Из графиков, рис. 5, видно, что в режиме подвижного газожидкостного слоя величина среднего газосодержания практически не зависит от скорости

газа в сечении колонны, для всех исследованных плотностей орошения

В [8] сделаны выводы:

– в режиме подвижного газожидкостного слоя величина среднего газосодержания практически не зависит от скорости газа в сечении колонны при любых плотностях орошения;

– эффективность тарелок провального типа зависит от величины свободного сечения тарелок: при увеличении свободного сечения тарелок их эффективность уменьшается, рис. 1.

– с увеличением свободного сечения тарелок провального типа их среднее газосодержание увеличивается при одинаковых загрузках по газу и жидкости и, следовательно, уменьшается эффективность тарелок.

– с увеличением плотности орошения среднее газосодержание газожидкостного слоя на тарелках провального типа уменьшается до величины не менее  $\varphi=0,5$  для всех исследованных тарелок.

Связь газосодержания газожидкостного слоя с режимами работы тарелок провального типа была установлена в [10]. Авторы указывают, что в барботажном режиме обычно газосодержание  $\varphi < 0,5$ , а при пенном режиме  $\varphi > 0,5$ . С увеличением скорости газа при неизменной плотности орошения газосодержание достигает величины примерно  $\varphi = 0,9$ .

На тарелках провального типа в [10] выделяется три характерных гидродинамических режима:

- газ распределен в жидкости;
- инверсия фаз;
- жидкость распределена в газе.

Границы указанных гидродинамических режимов зависят от гидродинамических, физико-химических и конструктивных параметров системы и могут колебаться в широких пределах [10].

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 решеток, особенно при высоких линейных скоростях газа ( $w > 1 - 2$  м/с), является интенсивный брызгоунос, так как практически отсутствует сепарирующий слой газожидкостной пены [9].

### 3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – исследовать комбинированное контактное устройство с тарелкой провального типа с большим свободным сечением.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

– исследовать среднее газосодержание газожидкостного слоя на тарелках провального типа с

целью установления его связи с эффективностью работы тарелок провального типа

– установить зависимость верхнего предела работы комбинированного контактного устройства с тарелкой провального типа с большим свободным сечением от диаметра колонны.

– установить область применения комбинированного контактного устройства в массообменных колоннах.

### 4. Материалы и методы исследования

В данной работе проведены исследования тарелок провального типа с большим свободным сечением ( $f=36\%$  и  $42\%$ ) на лабораторной установке, описание которой приведено в [9].

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

### 5. Результаты исследования

На рис. 6 приведены графики зависимости величина среднего газосодержания газожидкостного слоя на тарелке провального типа комбинированного контактного устройства со свободным сечением  $f=36\%$ , которое было установлено в колоннах с диаметром  $D=2,0; 0,4; 0,15$  м, а также тарелки, установленные в колонне  $D=0,057$  м.

Плотность орошения составляла:  $L=12$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).

Данные по средней величине газосодержания на тарелках провального типа комбинированного контактного устройства взяты из [7].

Из графиков видно, что экспериментальные данные, полученные на колоннах малого диаметра ( $D=0,057$  м) можно использовать для моделирования комбинированных контактных устройств с тарелками провального типа большого свободного сечения при небольших плотностях орошения, которые характерны для процессов ректификации. Газосодержание на таких тарелках превышает величину  $\varphi>0,8$ , как и на колоннах большого диаметра.

Для сравнения, на рис. 7, приведен график зависимости среднего газосодержания на тарелках провального типа с большим свободным сечением ( $f=36\%$ ), от скорости газа, в сечении колонны, полученный на колонне малого диаметра ( $D=0,057$  м). С ним сравнивается график зависимости среднего газосодержания на тарелках провального типа с обычным свободным сечением ( $f=16\%$ ), от скорости газа, в сечении колонны, полученный на колонне большого диаметра ( $D=2$  м).

Видно, что для обеих тарелок величина среднего газосодержания меньше величины  $\varphi<0,8$ , что характерно для тарелок провального типа с обычным свободным сечением.

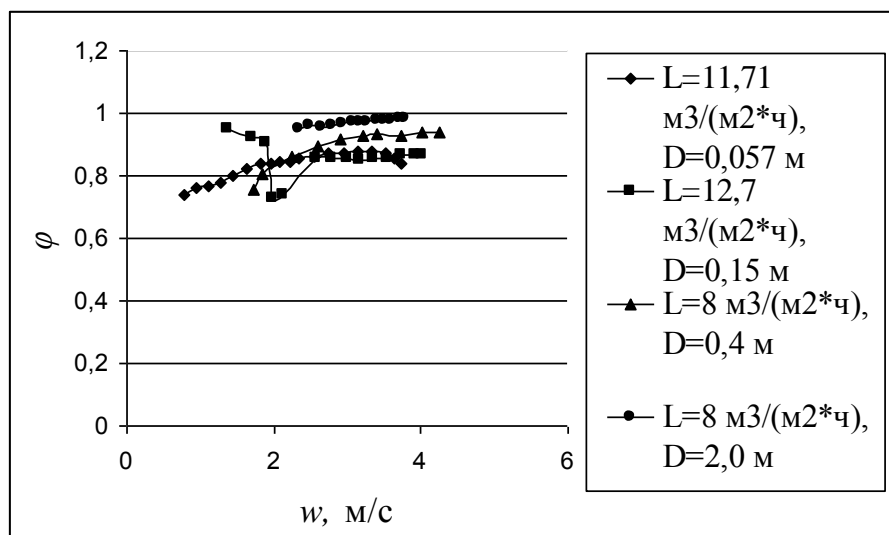


Рис. 6. Зависимость среднего газосодержания газожидкостного слоя на тарелках с большим свободным сечением ( $f=36\%$ )

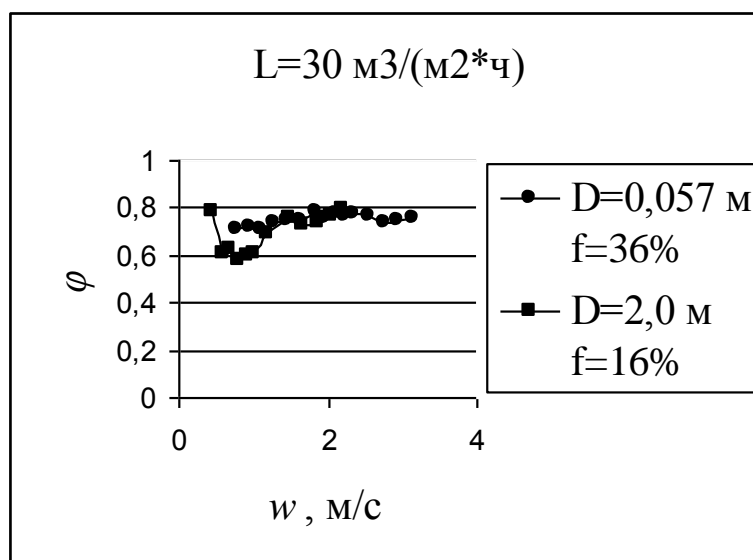


Рис. 7. График зависимости среднего газосодержания от скорости газа в сечении колонны с различным диаметром

Таким образом, для малых плотностей орошения, характерных для процессов ректификации, можно использовать для моделирования промышленных колонн с тарелками провального с большим свободным сечением, экспериментальные данные, полученные на колоннах с малым диаметром ( $D = 0,057$  м).

## 6. Выводы

1. Среднее газосодержание характеризует эффективность работы тарелок провального типа; в условиях нагрузок по жидкости, которые характерны для процессов ректификации, при  $\varphi > 0,8$  дальнейшее увеличение газосодержания приводит к уменьшению эффективности тарелок провального типа

2. Верхний предел работы комбинированного

контактного устройства с тарелкой провального типа с большим свободным сечением практически не зависит от диаметра колонны. Поэтому для анализа работы комбинированного контактного устройства с тарелкой провального типа с большим свободным сечением можно использовать экспериментальные данные по среднему газосодержанию, полученные на колоннах малого диаметра при плотностях орошения, которые соответствуют нагрузкам по жидкости в процессах ректификации;

3. Комбинированные контактные устройства с тарелкой провального типа с большим свободным сечением наиболее целесообразно применять в случае небольших плотностей орошения, которые характерны для процессов ректификации.

## Литература

1. Review of Hydraulics Correlations for Sieve Trays without Downcomers / D. Mayer F. et. al. // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2014. Vol. 53, Issue 20. P. 8323–8331. doi: <http://doi.org/10.1021/ie5010543>

2. Garcia J. A., Fair J. R. Distillation Sieve Trays without Downcomers: Prediction of Performance Characteristics // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2002. Vol. 41, Issue 6. P. 1632–1640. doi: <http://doi.org/10.1021/ie010326w>
3. Garcia J. A., Fair J. R. A Fundamental Model for the Prediction of Distillation Sieve Tray Efficiency. 1. Database Development // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2000. Vol. 39, Issue 6. P. 1809–1817. doi: <http://doi.org/10.1021/ie990875q>
4. Оптимизация процесса перегонки спиртовой бражки / Булий Ю. и др. // Maisto Chemija Ir Technologija. 2015. Т. 49, № 1. С. 1–15.
5. А. С. 482174 (СССР) Массообменная колонна / Герцовский В. А. и др. Оpubл. в Б. И. 1975. № 32.
6. А. С. 320777 (СССР) Регулярная насадка для массообменных колонн / Олевский В. М. и др. Оpubл. в Б.И., 1968, № 35.
7. Тараненко Г. В. Гидродинамика и массопередача комбинированного контактного устройства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1984. 24 с.
8. Дроздов В. А., Тараненко Г. В., Медведев А. Н. Исследование среднего газосодержания на тарелках провального типа с различным свободным сечением: мат. XXI міжнар. наук.-техн. конф. // ТЕХНОЛОГІЯ-2018. Северодонецьк, 2018. Ч. 2. С. 34–36.
9. Тараненко Г. В. Гидравлические и массообменные характеристики тарелок провального типа с различным диаметром отверстий: монография. Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2013. 174 с.
10. Пенный режим и пенные аппараты: монография / Мухленов И. П. и др.; ред. Мухленов И. П. Ленинград: Химия, 1977. 304 с.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Созонтов В. І.  
Дата надходження рукопису 27.12.2018*

**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: [gтараненко@ukr.net](mailto:gтараненко@ukr.net)