

УДК 66.074:661

Куделя А.А., Киселёв В.М., Лаврова И.О.

## ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ РЕКТИФИКАЦИИ СМЕСИ БЕНЗОЛ-ТОЛУОЛ

Интенсификация массообменных процессов в настоящее время возможна за счет использования вихревых и закрученных потоков жидкости и газа, повышения скоростей и степени турбулизации взаимодействующих фаз, что требует применения новых более эффективных конструкций массообменных аппаратов и отдельных элементов внутренней структуры. Одним из таких элементов являются контактно-сепарационные элементы, которые и стали объектом настоящего исследования. Первые отечественные высокоскоростные массообменные аппараты появились в 1960-х годах, это были конструкции барботажных колпачков с шнековой вставкой для закручивания потока. [1] Аналогичное конструктивное решение (барботажный колпачок с шнековой вставкой) предлагалось для интенсификации массообменных процессов в нисходящем закрученном потоке с противоточным движением фаз. [2]

В дальнейших исследованиях было установлено, что в прямоточном высокоскоростном элементе эффективность массообмена возрастает при переходе от тангенциальной конструкции вставки к многолопастной осевой (осевой завихритель) с распылением жидкости в нижней части осевого завихрителя.

Было показано, что эффективность (на примере десорбции углекислого газа воздухом из воды, отношение  $L/G=1$ ) при этом увеличилась с 62 до 91 %. [3]

Схема работы осевого завихрителя с распылением жидкости и коаксиально установленными полыми сепараторами позволяет также снизить гидравлическое сопротивление элемента (с 3600 до 2500 Па в диапазоне рабочих нагрузок: фактор скорости газа  $16,5-33$  (м/с)(кг/м<sup>3</sup>)<sup>0,5</sup> при удельном орошении  $50-153$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч для диаметра 72 мм) благодаря частичной раскрутке закрученного потока. Эта конструкция получила название «контактно-сепарационный элемент» (КСЭ). [4]

Дальнейшее усовершенствование элемента на основе многолопастного завихрителя привело к созданию КСЭ с двухступенчатой схемой работы осевого завихрителя. [5] Промышленные испытания такого КСЭ диаметром 72 мм в сепараторах ГСВ 2400-64 показали его высокую эффективность. [6]

Подробно обзор промышленных высокоскоростных массообменных колонн и газожидкостных сепараторов на основе КСЭ рассмотрен в статье [7].

В статье предлагается сравнительный расчет технологических показателей высокоскоростной массообменной колонны с модифицированным КСЭ [8] и насадочной массообменной колонны Sulzer с насадкой Mellapak.250.Y с внутренним диаметром 870 мм и площадью сечения  $0,59$  м<sup>2</sup> для ректификации смеси бензол-толуол.

Для расчета приняты условия (содержание бензола в дистилляте, питании и кубовом остатке) из расчета аппарата Sulzer с насадкой Mellapak.250.Y, как широко распространенного типа конструкции насадочного аппарата для химической промышленности [9]:

$$x_D = 0,975 x_F = 0,600 x_W = 0,025$$

Производим расчет числа теоретических тарелок колонны Sulzer графическим способом по методике, описанной в [10].

$b_0 = 0,5$  – согласно построенной диаграмме.

$$R_{min} = \frac{x_0}{b_0} - 1 = \frac{0,975}{0,5} - 1 = 0,95$$

$$R = 1,4R_{min} = 1,4 \cdot 0,95 = 1,33$$

$$b = \frac{x_D}{R+1} = \frac{0,795}{1,33+1} = 0,418$$

После проведения построения теоретических ступеней на диаграмме получаем 16 теоретических тарелок: 7 – для укрепляющей части колонны, и 9 – для исчерпывающей части колонны. Часть построенной рабочей линии для противоточной колонны показана на рис. 2в.

Отношение L/G для верхней части колонны равно 0,7; для верхней – 1,33. Эти данные согласуются с теоретическими расчетами Sulzer.

С учетом принятого нами диаметра колонны 1000 мм ее площадь равна 0,785 м<sup>2</sup>; площадь КСЭ при диаметре 82 мм – 5,28·10<sup>-3</sup> м<sup>2</sup>, а с учетом их числа (42 шт.) – 0,2118 м<sup>2</sup>.

Живое сечение колонны, таким образом:

$$A = \frac{F_{\sum КСЭ}}{F_{кол.}} = \frac{0,2118}{0,785} = 0,282 \text{ т.е. } 28,2\%$$

Скорость паровой фазы в элементе и колонне определяем из условий работы стенда для испытаний контактно-сепарационных элементов (стандартные условия, система «воздух–вода») – фактора скорости в канале элемента в пределах 33 (м/с)(кг/м<sup>3</sup>)<sup>0,5</sup> и условия Sulzer о работе на 80 % максимальной производительности:

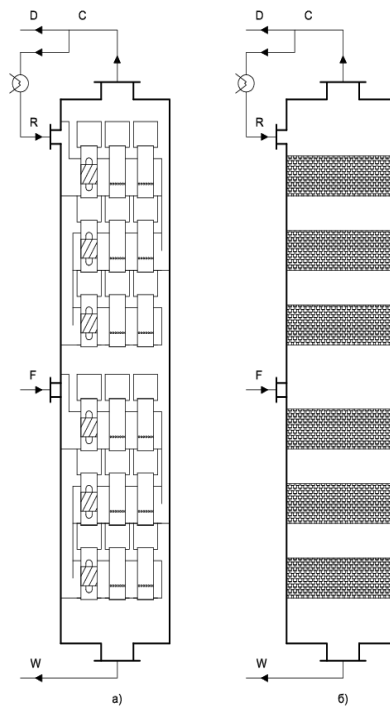
$$f_{к.} = 33 \cdot 0,8 = 26,4 \frac{\text{М}}{\text{С}} \left( \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right)^{0,5}$$

$$w_{к.} = \frac{f_{к.}}{\sqrt{\rho_G}} = \frac{26,4}{\sqrt{2,7}} = 16,1 \text{ м/с}$$

$$w_0 = A \cdot w_{к.} = 0,282 \cdot 16,1 = 4,53 \text{ м/с}$$

$$f_0 = w_0 \sqrt{\rho_G} = 4,53 \cdot \sqrt{2,7} = 7,44 \frac{\text{М}}{\text{С}} \left( \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right)^{0,5}$$

$$G_V = 3600 w_0 F_{кол.} = 3600 \cdot 4,53 \cdot 0,785 = 12802 \text{ м}^3/\text{ч}$$



Рисунок

Для определения реального отношения КПД КСЭ по сравнению с КПД традиционного противоточного аппарата использована формула [11]:

$$\eta_m = \frac{\eta}{mG/L(1-\eta)+1}$$

С учетом среднего отношения  $\Delta y/\Delta x$ :  $m=0,47$  для верхней и  $m=0,76$  – для нижней части колонны: с учетом КПД=0,65 [3]:

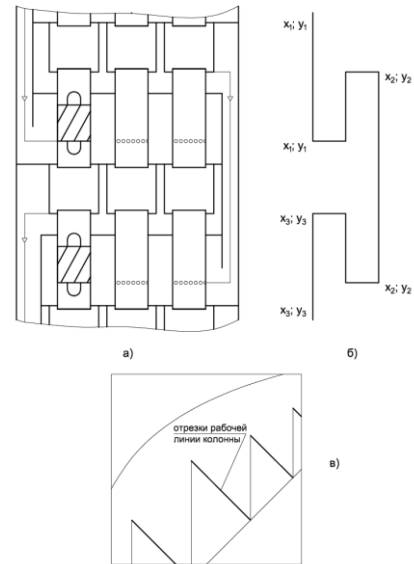
$$m \frac{G}{L} = 0,47 \cdot \frac{1}{0,7} = 0,67$$

$$\eta_m = \frac{0,65}{0,67(1-0,66)+1} = 0,53$$

Для нижней части колонны с учетом КПД=0,655 [3]:

$$m \frac{G}{L} = 0,76 \cdot \frac{1}{1,33} = 0,57$$

$$\eta_m = \frac{0,655}{0,57(1-0,655)+1} = 0,55$$



Рисунок

На рис. 1а, б показано сравнение компоновок ректификационных колонн: колонны Sulzer с насадкой Mellapak.250.Y и колонны с КСЭ из шести тарелок. Также показана увеличенная схема тарелок с КСЭ с указанием схемы перетоков и концентраций (рис. 2а, б), а также фрагмент построенной рабочей линии на основании приведенных данных (рис. 1в).

Данные по количеству тарелок в высокоскоростной бензол-толуольной колонне представлены в таблице 1.

Принимая температуру верха колонны 80 °С и плотность пара в для верха колонны равной плотности паров бензола при температуре 80 °С, массовый расход пара в укрепляющей части колонны:  $G_M = 34,6$  т/ч, с учетом отношения  $L/G$  для верха колонны,  $L = 24,2$  т/ч. Учитывая также плотность жидкого бензола при температуре 80 °С – 0,81,  $L_v = 29,9$  м<sup>3</sup>/ч.

Удельное орошение тарелки, таким образом 38,1 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> ч).

Перепад давления на 1 тарелку 120 мм Н<sub>2</sub>О [3], [8]

Суммарный перепад давления в укрепляющей части колонны 1680мм Н<sub>2</sub>О.

Аналогично для низа колонны: 150мм Н<sub>2</sub>О [3], [8]

Суммарный перепад давления в укрепляющей части колонны 2250 мм Н<sub>2</sub>О.

Суммарный перепад на всех тарелках с контактно-сепарационными элементами в массообменной колонне 3930мм Н<sub>2</sub>О.

Таким образом, минимальное необходимое избыточное давление для поддержания процесса в колонне, составляет не более 0,5 атм. Исходя из равновесных темпера-

тур: оптимальная температура верха колонны – плюс 80 °С, низа колонны – плюс 125 °С, и принятые допущения, таким образом, можно считать верными.

Определим выход дистиллята и кубового остатка  $G_D = 7681 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_D = 20,7 \text{ т/ч}$ ,  $G_W = 5121 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_W = 14,6 \text{ т/ч}$ .

Сравнительные характеристики аппаратов Sulzer и высокоскоростного аппарата на элементах КСЭ для разделения смеси бензол-толуол представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Количество тарелок в колоннах

Часть колонны	Теоретические тарелки	КПД	Тарелки с КСЭ
укрепляющая	7	0,53	13
исчерпывающая	9	0,55	16
Полностью колонна			29

Таблица 2 – Сравнительные параметры колонн Sulzer и КСЭ

Параметр	Sulzer	КСЭ
Внутренний диаметр колонны, мм	870	1000
Площадь колонны, м <sup>2</sup>	0,58	0,785
Высота ступеней, м	0,385	0,450
Число теоретических ступеней	6 + 8	7 + 9
Число ступеней	-	14 + 15
Высота колонной насадки (элементов), м	5,39	13,05
Объем насадки, м <sup>3</sup>	3,13	10,2
Производительность по сырью, м <sup>3</sup> /ч	3055	12802
Удельная производительность аппарата по сырью на объем насадки, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> · ч	976	1255
Удельный перепад давления (на метр насадки и 1 тарелку КСЭ), Па	200	не более 1176 (исчерп.) не более 1470 (укрепл.)
Перепад давления в аппарате (с учетом сопротивлений входа-выхода и ввода питания в колонну), Па	1478	41160
Давление в колонне	1 атм + 1478 Па	1 атм + 41160 Па

Таким образом, при увеличении избыточного давления до 50 КПа, и переходе с аппарата Sulzer на насадке Mellapak.250.Y на колонну с КСЭ происходит увеличение удельной производительности аппарата на 29 %. Необходимо также указать на то, что при необходимости проектирования аппаратов с большими диаметрами, следует учитывать резкое падение КПД колонны Sulzer с насадкой Mellapak.250.Y: при диаметре колонны 2600 мм КПД насадки Mellapak.250.Y понижается до 18,3 % от принятого в расчете (1 теоретическая тарелка на высоту насадки 385 мм [9]) и составляет 2 теоретические тарелки на высоту насадки 4200 мм. [12] Пример аппарата ГСВ-2400-64 с осевыми завихрителями показывает, что проблема масштабного перехода (падения КПД) для аппаратов с КСЭ не стоит. [6]

Таким образом, приведенные данные позволяют сделать вывод о значительном превосходстве высокоскоростной техники по показателю удельной производительности, а также показывают дополнительный путь дальнейшего увеличения единичной

производительности аппаратов – увеличение диаметра аппарата без снижения КПД насадки, характерного для традиционных противоточных аппаратов.

### Литература

1. Поплавский Ю.В. Новая конструкция тарельчатой колонны. [Текст] / Ю.В. Поплавский // Химическое машиностроение. – 1960. – № 5. – с. 4–6.
2. Николаев Н.А. Плёночная абсорбция двуокиси углерода при высоких скоростях газа в режиме нисходящего прямотока. [Текст] / Н.А. Николаев, Н. М. Жаворонков // Химическая промышленность. – 1965. – № 4. – с. 290–293.
3. Киселев В.М. Исследование гидродинамики и массопередачи в высокоскоростных колонны аппаратах с прямоточным взаимодействием фаз в восходящем закрученном потоке [Текст] : автореф. дис. ... канд. технич. наук : 06.06.69 / В. М. Киселев ; [Ленинградский ордена труд. красн. знамени технологический ин-т им. Ленсовета] . – Л., 1969. – 15 с.
4. А.с. 230077 СССР, МКИ<sup>3</sup> В01d. Массообменный аппарат [Текст] / В.М. Киселев, А.А. Носков (СССР). №1087652/23-26 ; заявл. 30.06.66 ; опубл. 30.10.68, Бюл. №34. – 3 с. : ил.
5. Пат. EP0281628 Европа, МПК<sup>7</sup> В01D 3/30. CONTACT-SEPARATION ELEMENT [Текст] / Kiselev Viktor Mikhailovich, заявитель и патентообладатель “UKRNIIGAZ”. – № EP1986907012 ; заявл. 16.09.86 ; опубл. 14.09.88. – 17 с. : ил.
6. Kiselev V.M. A two- to threefold increase in the capacity of mass-transfer columns is easy to achieve [Текст] / V.M.Kiselev // LICENSINTORG Panorama. – 1986. – № 20. – с. 30–31.
7. Куделя А.А. Высокоскоростные массообменные колонны и газожидкостные сепараторы [Текст] / А.А. Куделя // Вестн. Национального технического университета «ХПИ». – 2010. – № 57. – С. 29–32.
8. Пат. 65203 Украина, МПК<sup>7</sup> В01D 3/14. Контактно-сепарационный элемент [Текст] / Куделя А.О., Лаврова І.О., Кісельов В.М. ; заявитель и патентообладатель Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № 2010 06190 ; заявл. 21.05.10 ; опубл. 10.01.11, Бюл. № 1. – 4 с. : ил.
9. Separation Columns for Distillation and Absorbtion [Текст] : каталог / Sulzer Ltd. – Winterhur, Switzerland : [б.и.], 1991. – 38 с.
10. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учеб. для высш. учеб. завед. в 2-х ч. / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, А.П. Готлинская, В.А. Лещенко. Под ред. Л.Л. ТОВАЖНЯНСКОГО ; Нац. техн. ун-т "Харьк. политехн. ин-т". – Харьков. : [б. и.], 2005.
11. Носков А.А. Расчет числа ступеней высокоскоростной ректификационной колонны с прямоточным взаимодействием фаз в восходящем закрученном потоке [Текст] / А.А. Носков, В.М. Киселев, П. Г. Романков // Теоретические основы химической технологии. Том IV. – 1970. – № 6. – с. 920–924.
12. Пат. 19929408 ФРГ, МПК<sup>7</sup> В01D 3/00. Stoffaustauschapparat [Текст] / Hartmann, Klaus, Kiselev, Victor M. ; заявитель и патентообладатель Gesellschaft für

Informations- und Prozeßtechnik mbH, Kiselev, Victor M. – № 19929408 ; заявл. 26.06.1999; опубл. 25.01.2001. – 10 с.

УДК 66.074:661

Куделя А.О., Кісельов В.М., Лаврова І.О.

### **ОЦІНКА ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОШВИДКІСТНИХ МАСООБМІННИХ АПАРАТІВ ДЛЯ РЕКТИФІКАЦІЇ СУМІШІ БЕНЗОЛ-ТОЛУОЛ**

Наведено розрахунок і порівняння показників бензолно-толуольних ректифікаційних колон з насадкою Mellapas-250Y та високошвидкісної колони з КСЕ. Отримані дані про збільшення зйому продукту з одиниці об'єму апарату на 29 % при переході на ректифікаційну колону з контактано-сепараційними елементами. Описано ефект падіння ефективності насадки Mellapas-250Y при зростанні діаметра і відсутність такого ефекту для колон з використанням КСЕ.

Kudelya A.A., Kiselyov V.M., Lavrova I.O.

### **HIGHT-SPEED MASS-TRANSFER APPARATUS APPLICATION FOR BENZENE-TOLUENE RECTIFICATION**

The calculation and comparison of the benzene-toluene distillation columns with Mellapas-250Y and CSE are approved. The data of removal of per unit volume of the apparatus by 29 % during the transition to a distillation column contact and the separating element increasing are obtained. the of the. Falling of the pack efficiency with diameter increasing effect with Mellapak using and it absence with CSE is described.