

Г. РАЯЛО, Т. ПЕТРОВСКАЯ, Т. ВОЛЕНС, А. ФЕТИСОВ

СТРУКТУРА ПОТОКОВ В ГИДРОХЛОРАТОРЕ ТИПА  
НАСАДОЧНОЙ КОЛОННЫG. RAJALO, T. PETROVSKAJA, T. VOLENS, A. FETISSOV. VOOLUSTE STRUKTUUR TAIDIS-  
KOLONNI TÛUPI HUDROKLORAATOREISG. RAJALO, T. PETROVSKAYA, T. VOLENS, A. FETISSOV. FLOW STRUCTURE IN THE PACKED  
COLUMN HYDROCHLORATOR

(Представил И. Клесмент)

Гидрохлорирование жидких легкокипящих алкадиенов — изопрена, пиперилена и диметилбутадиена — газообразным хлористым водородом проводится в реакторе (гидрохлораторе) типа насадочной колонны, где сверху вниз стекает жидкость, содержащая исходный алкадиен и продукты реакции, а снизу вверх с медленной скоростью поднимается газовая фаза — хлористый водород с парами жидких компонентов. В колонне происходит многокомпонентный разнонаправленный межфазный массообмен (абсорбция, испарение, конденсация), сопровождаемый медленной химической реакцией в жидкой фазе. Опираясь на результаты экспериментальных исследований, мы справедливо можем выразить структуру потоков в жидкой фазе моделью идеального вытеснения с застойными зонами [1], по которой материальный баланс любого  $i$ -го компонента жидкой фазы в объеме насадки высотой  $\delta l$  выражается следующими уравнениями.

Для проточной зоны:

$$\alpha H \frac{\pi d_k^2}{4} \frac{\delta C_i}{\delta t} - Q_{\text{ж}} \frac{\delta C_i}{\delta l} \pm \alpha H \frac{\pi d_k^2}{4} r_i + N_i + \alpha \beta H \frac{\pi d_k^2}{4} (C_i - C_{i3}) = 0. \quad (1)$$

Для застойной зоны:

$$(\alpha - 1) H \frac{\pi d_k^2}{4} \frac{\delta C_{i3}}{\delta t} \pm (\alpha - 1) H \frac{\pi d_k^2}{4} r_{i3} - \alpha \beta H \frac{\pi d_k^2}{4} (C_i - C_{i3}) = 0. \quad (2)$$

В этих уравнениях  $Q_{\text{ж}}$  — объемная скорость жидкой фазы;  $C_i$  и  $C_{i3}$  — концентрации  $i$ -го компонента соответственно в проточной и застойной зонах;  $t$  — время;  $d_k$  — диаметр колонны;  $H$  — удерживающая способность насадки;  $\alpha$  — доля объема проточных зон;  $\beta$  — коэффициент конвективного обмена между проточной и застойной зонами, представляющий собой объемный поток вещества, отнесенный к единице объема проточной зоны;  $r_i$  и  $r_{i3}$  — скорость химической реакции по  $i$ -му компоненту соответственно в проточной и застойной зонах (с положительным

знаком для компонентов, расходуемых в ходе реакции);  $N_i$  — скорость межфазной массопередачи  $i$ -го компонента в направлении от жидкости к газу, отнесенная к единице высоты колонны. Для компонента, не участвующего ни в химической реакции, ни в межфазной массопередаче, например для инертного трассера, члены  $r_i$ ,  $r_{iv}$  и  $N_i$  равняются нулю, и вышеприведенные уравнения заметно упрощаются.

Содержащиеся в уравнениях (1), (2) три неизвестных параметра  $H$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  зависят от гидродинамических условий проведения процесса. Они определяются на основе опытов с импульсным вводом инертного трассера в поток жидкости, входящий в аппарат, и регистрацией соответствующей концентрационной кривой ( $C$ -кривой) в выходящем потоке. В [2] приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных в лабораторной стеклянной колонне диаметром 25 мм и высотой насадки 1,0 м. В качестве насадки служили стеклянные кольца Рашига размером  $4,5 \times 4,5 \times 0,7$  мм. В качестве трассера использовали краситель. В результате исследований была найдена зависимость.

$$H = 3,08 (\text{Fr}/\text{Re})^{1/2} + 0,0262, \quad (3)$$

где  $\text{Re} = u_0 l_0 \rho / \mu$  — критерий Рейнольдса;  $\text{Fr} = u_0^2 / g l_0$  — критерий Фруда. В этих критериях  $u_0$  — линейная скорость жидкой фазы, отнесенная к общему поперечному сечению колонны;  $l_0$  — номинальный размер насадки;  $\rho$  — плотность;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости;  $g$  — ускорение свободного падения.

Основываясь на вышеуказанных экспериментах мы в данной работе сделали дополнительные обобщения для определения параметров  $\alpha$  и  $\beta$ . В первую очередь остановимся на интерпретации зависимости (3). Путем теоретического анализа можно доказать, что в случае гидрохлорирования, где течение жидкости определяется в основном силами тяжести и внутреннего трения, первый член уравнения (3) выражает динамическую ( $H_d$ ), а второй — статическую ( $H_{ст}$ ) составляющие удерживающей способности насадки. Доля объема проточных зон соответствует отношению

$$\alpha = H_d / H = 1 - H_{ст} / H. \quad (4)$$

Коэффициент конвективного обмена между проточной и застойной зонами можно определить из уравнения

$$\beta = \frac{2(1 - \alpha)^2 u_{пр}}{\sigma^2 L}, \quad (5)$$

где  $u_{пр} = 4Q_{ж} / \alpha H \pi d_k^2$  — линейная скорость течения жидкости в проточной зоне;  $L$  — общая высота слоя насадки. Дисперсия  $\sigma^2$  определяется как второй центральный момент распределения времени пребывания частиц в безразмерных единицах. На основе экспериментальных данных, полученных на лабораторной установке, нами найдено нижеследующее критериальное уравнение для расчета коэффициента конвективного межзонового массообмена:

$$S = \frac{\beta L}{u_{пр}} = 0,11 \text{Ga}^{0,22}, \quad (6)$$

где критерий Галилея  $\text{Ga} = l_0^3 \rho^2 g / \mu^2$ . Невысокий коэффициент корреляции этого уравнения ( $R = 0,65$ ) характерен для гидродинамических зависимостей, получаемых на основе моментов выше первого порядка.

Далее мы провели опыты в полупромышленном гидрохлораторе диаметром 200 мм и с высотой насадки 3,3 м. В качестве насадки служили

кольца Рашига из пропитанного графита (АТМ) размером  $16 \times 16 \times 4$  мм. Во избежание нежелательных, но характерных для полупромышленных установок конечных эффектов мы в этих опытах применяли в качестве трассера-индикатора радиоактивный изотоп бром-82 в ортонитробензоле. При выборе этого трассера учитывались ядерно-физические характеристики изотопа и физико-химические свойства соединения, в т. ч. хорошая растворимость в исследуемой жидкой фазе. Измерение относительной плотности  $\gamma$ -квантов, излучаемых трассером, осуществляли радиометром МВР-5, детекторы которого располагались у входа и выхода жидкой фазы и с равномерными интервалами по длине насадки. Опыты были проведены при разных рабочих режимах гидрохлорирования изопрена.

В результате статистического анализа полученных *S*-кривых выяснилось, что если принять во внимание чистое время пребывания частиц жидкости в насадке (по показаниям детекторов, расположенных на обоих концах насадки), то получится зависимость удерживающей способности насадки от гидродинамических условий течения жидкости, которая практически полностью совпадает с уравнением (3). При этом следует отметить, что в случае применения красителя в качестве трассера получают повышенное значение удерживающей способности за счет задержки жидкости в нижней части колонны [2]. Что касается коэффициента межзонового конвективного массообмена, то его значение в случае применения полупромышленной установки и используемой в ней графитовой насадки примерно на 60% ниже значения, полученного по уравнению (6).

Далее мы изучили структуру потоков в газовой фазе. Для этого проводили опыты в полупромышленном гидрохлораторе, работающем в режиме гидрохлорирования изопрена. В качестве газового трассера служил радиоактивный криптон-85, который вводили импульсно в поток газообразного хлористого водорода в нижней части колонны. Относительную плотность  $\gamma$ -квантов в разных точках на оси колонны измеряли по описанной выше методике. По полученным *S*-кривым определяли среднее время пребывания газовых частиц и дисперсию времени пребывания на разной высоте насадки. Найденные нами значения дисперсии безразмерного времени пребывания частиц газа в насадке лежат в пределах  $\sigma^2 = 0,06 - 0,09$ . Этому соответствуют значения критерия Пекле  $Pe = u_0 l_0 / D = 22 - 33$ , что допускает возможность применения модели идеального вытеснения для описания структуры потоков в газовой фазе при незначительных допущениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hoogendoorn, C. J., Lips, J. Axial mixing of liquid in gas-liquid flow through packed beds. — Can. J. Chem. Eng., 1965, 43, N 6, 125—151.
2. Воленс Т., Петровская Т., Раяло Г. Продольное перемешивание и задержка жидкости в насадочной колонне при малой скорости газового потока. — Изв. АН ЭССР. Хим., Геол., 1976, 25, № 2, 132—135.

Институт химии  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
12/VII 1982