

*Т. ВОЛЕНС, Т. ПЕТРОВСКАЯ, Г. РАЯЛО*

### ПРОДОЛЬНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ И ЗАДЕРЖКА ЖИДКОСТИ В НАСАДОЧНОЙ КОЛОННЕ ПРИ МАЛОЙ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Структура математической модели любого массообменного или химического процесса, протекающего в насадочной колонне, определяется прежде всего гидродинамическими параметрами, в том числе продольным перемешиванием жидкости и газа, а также временем пребывания частиц потоков в колонне. В некоторых химических и массообменных процессах, имеющих место между газом и жидкостью, например, при присоединении хлористого водорода к жидким алкадиенам в гидрохлораторах типа насадочной колонны, скорость газа практически равняется нулю. Для математического моделирования таких процессов необходимо установить количественные зависимости, выражающие влияние различных физико-химических факторов на продольное перемешивание и задержку жидкости в колонне в условиях, когда скорость газа практически равна нулю. С этой целью нами были проведены опыты на лабораторной установке. Справедливость полученных экспериментальных зависимостей проверялась на полупромышленном гидрохлораторе.

Лабораторные опыты проводились в 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. Опыты на полупромышленной установке проводились в гидрохлораторе типа насадочной колонны диаметром 200 мм и высотой насадки 3,5 м. Насадка (кольца Рашига размером  $16 \times 16 \times 4$  мм) была изготовлена из АТМ. В качестве жидкой фазы в обоих случаях применялись смеси изопрена и его гидрохлоридов (2-хлор-2-метилбутен-3, 1-хлор-3-метилбутен-2), кроме того, в лабораторных опытах для установления влияния поверхностного натяжения — смесь этилового спирта с водой. Газовой фазой в лабораторных опытах служил воздух, а в опытах на полупромышленном гидрохлораторе — сухой хлористый водород. Кроме основного агента газовая фаза содержала пары жидкости.

На вход жидкости в колонну при разных стационарных режимах было наложено возмущение в виде дельта-функций (импульсный ввод индикатора). В результате возмущения получалась функция распределения индикатора по времени, или т. н. *S*-выходная кривая. В качестве индикатора в опытах с изопреном и его гидрохлоридами использовался кубовый голубой К (индантеновый синий БЦ). Этот краситель оказался хорошо растворимым в углеводородах, под действием хлористого водорода интен-

сивность его окраски не изменялась. Концентрация индикатора в пробах, взятых через равные интервалы из выходного потока, определялась колориметрически. В опытах со смесями, состоящими из воды и этилового спирта, индикатором служил хлористый натрий, концентрация которого определялась аргентометрически. На лабораторной установке проведено 45, а на полупромышленном гидрохлораторе — 7 опытов.

В ходе статистической обработки полученных результатов в виде моментов распределения первого и второго порядков определены среднее время пребывания частиц жидкости в колонне  $\tau$  и дисперсия времени пребывания в безразмерных единицах  $\sigma^2$ .

Гидродинамика потока жидкой фазы в насадочной колонне обычно представляется однопараметрической диффузионной моделью, которая в безразмерном виде выражается уравнением:

$$-\frac{dC}{dz} + \frac{1}{Pe} \cdot \frac{d^2C}{dz^2} = 0, \quad (1)$$

где  $C$  — безразмерная концентрация,  $z$  — безразмерная высота насадки,

$Pe = \frac{\omega \cdot l_0}{D}$  — критерий Пекле, причем  $\omega$  — линейная скорость потока,

$l_0$  — определяющий линейный размер (в данном случае номинальный размер насадки),  $D$  — коэффициент продольного перемешивания жидкости, учитывающий как турбулентную, так и молекулярную диффузию.

Связь между дисперсией и критерием Пекле в данном случае, учитывая отсутствие стока индикатора в застойную зону, выражается уравнением:

$$\sigma^2 = \frac{2}{Pe^2} (Pe - 1 + e^{-Pe}), \quad (2)$$

которое при достаточно высоком значении  $Pe$  практически дает  $\sigma^2 = 2/Pe$ .

В литературе приводятся эмпирические уравнения, выражающие зависимость критерия Пекле от критериев Рейнольдса и Галилея [1-4] для различных случаев течения жидкости на насадке. С целью установить, кроме указанных критериев, влияние силы поверхностного натяжения (характеризуемого критерием Вебера) на продольное перемешивание нами изучалась корреляционная зависимость между критериями:

$$Pe = A \cdot Re^m \cdot Ga^n \cdot We^p, \quad (3)$$

где критерий Рейнольдса  $Re = \frac{\omega \cdot l_0 \rho}{\mu}$ , критерий Галилея  $Ga = \frac{l_0^3 \rho^2 g}{\mu^2}$

и критерий Вебера  $We = \frac{\varepsilon}{g l_0^2 \rho}$ . В этих критериях  $\rho$  — плотность,  $\mu$  — вязкость,  $\varepsilon$  — поверхностное натяжение,  $g$  — ускорение свободного падения.

На основе экспериментальных данных проведены регрессионный и корреляционный анализы, в ходе которых по методу наименьших квадратов определялись числовые значения коэффициентов уравнения (3) и оценивалась корреляция между отдельными критериями. При этом выяснилось отсутствие статистически надежной корреляционной связи между критериями  $Pe$  и  $We$  (частный коэффициент корреляции в случае исключения влияния других критериев  $r_{PeWe \cdot ReGa} = 0,30$ ) несмотря на варьирование поверхностного натяжения жидкостей в довольно широких преде-

лах (от 0,021 до 0,072 Н/м). Следовательно, поверхностное натяжение не оказывает заметного влияния на продольное перемешивание, и критерий  $We$  можно исключить из уравнения (3). В опытах варьировались плотность орошения от 0,08 до 2,92 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч, вязкость жидкости от 0,27 до 2,40 сПз и плотность жидкости от 680 до 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Числовые значения коэффициентов уравнения (3), полученные в результате регрессионного анализа наших опытных данных, с доверительными границами, установленными с 95%-ной вероятностью, следующие:  $A=56,9$ ;  $m=0,248 \pm 0,111$  и  $n=-0,124 \pm 0,078$ .

Широкие доверительные границы, указывающие на довольно сильное рассеивание экспериментальных данных, характерны и для работ других авторов. Аналогичные опыты, проведенные нами в ходе технологического процесса на полупромышленном гидрохлораторе, в основном подтвердили результаты, полученные на лабораторной установке.

Далее, задержка жидкости насадкой. Удерживающая способность — объем жидкости в колонне, отнесенный к единице объема насадки — определялась нами по среднему времени пребывания частиц жидкости в колонне:

$$H = \frac{L\tau}{V},$$

где  $L$  — объемный поток жидкости в колонне,  $V$  — объем насадки.

В литературе для определения удерживающей способности насадки приводятся корреляционные уравнения разного вида. Хорошую корреляцию наших данных (коэффициент множественной корреляции  $R=0,82$ ) дает уравнение

$$H = A' \cdot Re^{m'} \cdot Ga^{n'}, \quad (4)$$

принятое и другими авторами [5, 6]. На основе наших результатов получены следующие числовые значения коэффициентов регрессионного уравнения (4) с 95%-ными доверительными границами:  $A'=0,562$ ;  $m'=-0,122 \pm 0,055$ ,  $n'=-0,163 \pm 0,039$ .

Еще более высокую корреляцию наших результатов ( $R=0,87$ ) показывает уравнение

$$H = B \cdot Fi^{l'} + C, \quad (5)$$

где  $Fi = Fr/Re$ ,  $Fr = \omega^2/g \cdot 1$ .

Это уравнение аналогично зависимости, выведенной Баченэном [7], если в ней член, выражающий влияние инерционных сил, заменить коэффициентом  $C$ , определяющим постоянную долю удерживающей способности. Отсутствие в данном случае заметного влияния инерционных сил выяснилось в ходе регрессионного анализа. Аналогичным образом выяснилось также отсутствие заметного влияния силы поверхностного натяжения ( $We$ ). Коэффициенты уравнения (5) с 95-ными доверительными границами:  $B=3,083 \pm 0,614$  и  $C=0,0262$ .

В опытах на полупромышленном гидрохлораторе было установлено, что значения удерживающей способности его примерно на 30% выше значений, получаемых по уравнению (5), несмотря на примерное геометрическое и гидродинамическое сходство процессов, проведенных в лабораторном и полупромышленном аппаратах. По-видимому, главную роль в этом сыграло различие в материале насадок у лабораторной и полупромышленной колонн. Физические свойства поверхностей обеих насадок (угол смачивания, шероховатость и адсорбционные свойства) довольно сильно отличались друг от друга.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Otake T., Kunugita E., Chem. Eng. Japan, **22**, 144 (1958).
2. Sater V. E., Levenspiel O., Ind. Eng. Chem. Fundam., **5**, 86 (1966).
3. Furzer I. A., Michell R. W., AIChE J., **16**, 380 (1970).
4. Pham Co, Bibaud R., Can. J. Chem. Eng., **49**, 727 (1971).
5. Otake T., Okada K., Chem. Eng. Japan, **17**, 176 (1953).
6. Kunugita E., Otake T., Yoshii K., Chem. Eng. Japan, **26**, 672 (1962).
7. Buchanan J. E., Ind. Eng. Chem. Fundam., **6**, 400 (1967).

Институт химии  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
15/X 1974

T. VOLENS, T. PETROVSKAJA, G. RAJALO

### PIKISEGUNEMINE JA VEDELIKU SALVESTUMINE TÄIDISKOLONNIS VÄIKESE KIIRUSEGA VOOLAVA GAASI KORRAL

Artikkel käsitleb täidiskolonniki pikisegunemise ja salvestumisevõime uurimise tulemusi, kui voolava gaasi kiirus on väike. Katseandmete analüüsi põhjal esitatakse vastavad kriiteriaalvõrrandid.

T. VOLENS, T. PETROVSKAYA, G. RAJALO

### AXIAL MIXING AND HOLDUP IN RING-PACKED COLUMNS AT A LOW RATE OF THE GAS PHASE FLOW

The paper deals with the results of studies of axial mixing and holdup in ring-packed columns at a low rate of the gas phase flow. As a result of the analysis of experimental data, the corresponding criterial equations have been determined.