

УДК 66.021.3

**Д. И. Мисюля**, кандидат технических наук, старший преподаватель (БГТУ);  
**С. К. Протасов**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКИ ДЛЯ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

В статье представлена новая конструкция регулярной насадки для колонных массообменных аппаратов. Приведены результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления и эффективности разработанной регулярной насадки. Дан сравнительный анализ по основным характеристикам разработанной и существующих регулярных насадок. Применение данной насадки обеспечит достаточно высокую эффективность массообмена (до 96% при десорбции CO<sub>2</sub>) при гидравлическом сопротивлении одного метра насадки, не превышающем 180 Па.

The article presents a new design of the regular packing for mass-transfer towers. The results of experimental research of pressure drop and efficiency of the developed regular packing are showed. The comparative analysis according to the main characteristics of the developed and existing regular packings is given. Application of this packing will provide rather high efficiency of mass-transfer (until 96% at desorption CO<sub>2</sub>) at the pressure drop of the one-meter packing not exceeding 180 Pa.

**Введение.** В химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности основным видом технологического оборудования, используемого на предприятиях данных отраслей, являются колонные аппараты, оборудованные контактными массообменными устройствами различных типов и конструкций и предназначенные для осуществления конкретных технологических процессов, связанных с переносом компонентов перерабатываемых потоков между фазами, контактирующими в ходе реализуемого массообменного процесса.

Основными функциональными элементами колонного аппарата являются контактные устройства, правильный выбор числа и конструкции которых при проектировании массообменного аппарата гарантирует эффективность и надежность его эксплуатации в реальных промышленных условиях [1].

Насадочные колонны находят широкое применение при проведении процессов абсорбции (хемосорбции), ректификации, жидкостной экстракции, охлаждения газов и жидкостей, а также и газосепарации. К достоинствам насадочных колонн можно отнести высокую эффективность и широкий интервал устойчивой работы, сравнительно невысокую стоимость и простоту конструкций, небольшое гидравлическое сопротивление, что особенно важно для работы вакуумных колонн в нефтепереработке [2].

Насадочные аппараты представляют собой цилиндрические вертикальные колонны, заполненные насадочными телами (насадкой). По существующей классификации их можно отнести либо к регулярной (правильно уложенной), либо к нерегулярной (засыпанной навалом). Насадка должна обладать большой удельной поверхностью, большим свободным объемом и низким гидравлическим сопротивлением.

В настоящее время все более широкое применение получают регулярные насадки, эффективность которых практически не изменяется в зависимости от диаметра аппарата за счет правильной организации гидродинамического режима.

Широкое использование регулярных насадок в процессах ректификации в мировой практике и значительный объем исследований в этой области подтверждают, что колонны с данными насадками являются одним из наиболее перспективных направлений развития массообменной аппаратуры. Диаметр колонн с регулярной насадкой в 1,4–1,8 раз, а высота в 1,5–2 раза меньше, чем у большинства тарельчатых колонн [3].

**Основная часть.** На основании обзора и анализа существующих регулярных структурированных насадок для колонных массообменных аппаратов на кафедре машин и аппаратов химических и силикатных производств Белорусского государственного технологического университета разработана и исследована новая регулярная насадка, представленная на рис. 1.

Регулярная насадка, устанавливаемая в корпусе аппарата 1, состоит из концентрических цилиндров 2, на наружной поверхности которых установлены зигзагообразные ленты 3, а внутри наименьших цилиндров радиально установлены вертикальные перегородки 4. Наружный диаметр насадки соответствует внутреннему диаметру корпуса аппарата.

Регулярная насадка работает следующим образом. Равномерно распределенный по сечению корпуса аппарата 1 газ поступает в каналы, образованные концентрическими цилиндрами 2, вертикальными зигзагообразными лентами 3, вертикальными перегородками 4 и корпусом аппарата 1, и поднимается вверх, взаимодействуя со стекающей по всей поверхности насадки и внутренней поверхности корпуса аппарата

в виде пленки жидкостью, равномерно распределенной по сечению корпуса аппарата 1.

Данная конструкция регулярной насадки обеспечивает равномерное распределение газового потока по всему сечению аппарата, что исключает образование застойных зон и увеличивает поверхность контакта фаз. Более равномерное распределение потока газа по рабочему сечению аппарата приводит к снижению скорости газа в каналах, а значит, и гидравлического сопротивления насадки.

Целью работы являлось определение гидравлического сопротивления и эффективности данной насадки.

Экспериментальные исследования разработанной насадки проводились при десорбции двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) из предварительно насыщенного водного раствора путем продувки его воздухом. Схема экспериментальной установки приведена в работе [4].

Внутренний диаметр колонны был равен  $d_{\text{вн}} = 144$  мм, а высота насадки  $h_{\text{н}} = 300$  мм.

Производительность по газу (воздуху), или  $F$ -фактор газа,  $(\text{м/с}) \cdot (\text{кг/м}^3)^{-0,5}$ , определялась по уравнению [5]

$$F = w\rho^{-0,5},$$

где  $w$  – средняя скорость газа (воздуха), рассчитанная на свободное сечение колонны, м/с;  $\rho$  – плотность газа (воздуха),  $\text{кг/м}^3$ .

Средняя скорость воздуха в колонне  $w$ , м/с, определялась по уравнению

$$w = 4V / \pi d_{\text{вн}}^2,$$

где  $V$  – объемный расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Плотность орошения  $q$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , рассчитывалась по формуле

$$q = 4Q / \pi d_{\text{вн}}^2,$$

где  $Q$  – объемный расход воды,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Величина гидравлического сопротивления насадки определялась по разности статических давлений под и над ней.

Эффективность взаимодействия фаз оценивалась по коэффициенту извлечения [6]

$$\varphi = \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{к}}}{x_{\text{н}} - x_{\text{к}}^*},$$

где  $x_{\text{н}}$ ,  $x_{\text{к}}$ ,  $x_{\text{к}}^*$  – молярные доли  $\text{CO}_2$  в воде на входе, на выходе и равновесная на выходе из колонны соответственно, кмоль  $\text{CO}_2/\text{кмоль} (\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ .

Молярные доли  $\text{CO}_2$  в воде рассчитывались по формуле [7]

$$x = \frac{\bar{C}_x M_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{ж}} M_{\text{CO}_2} + \bar{C}_x (M_{\text{H}_2\text{O}} - M_{\text{CO}_2})},$$

где  $\bar{C}_x$  – массовая объемная концентрация  $\text{CO}_2$  в воде,  $\text{кг CO}_2/\text{м}^3 (\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ ;  $M_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $M_{\text{CO}_2}$  – молярные массы  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , равные 18 и 44  $\text{кг/кмоль}$  соответственно [7];  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкой фазы,  $\text{кг/м}^3$ .

Массовые объемные концентрации  $\text{CO}_2$  в воде рассчитывались по кислотностям растворов (рН), полученным экспериментально, по формуле [6]

$$\bar{C}_x = 2,69 \cdot 10^{5-\text{pH}}.$$

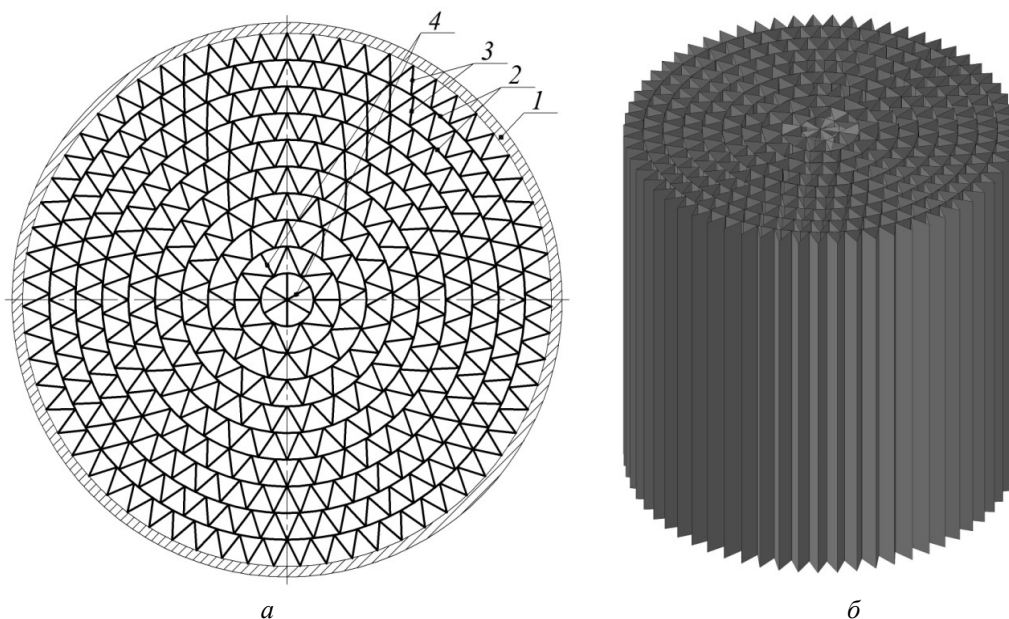


Рис. 1. Регулярная насадка для колонных массообменных аппаратов:

*a* – поперечное сечение насадки; *б* – 3D чертеж;

1 – корпус аппарата; 2 – цилиндры; 3 – зигзагообразные ленты; 4 – вертикальные перегородки

Концентрации  $\text{CO}_2$  в воде были низкими, поэтому плотность смеси  $\rho_{\text{ж}}$  принималась равной плотности воды.

Молярная доля  $\text{CO}_2$  в воздухе, поступающем в колонну, была равна нулю  $y_{\text{н}} = 0$ , поэтому  $x_{\text{к}}^* = 0$ . В результате расчетная формула для коэффициента извлечения упрощалась

$$\varphi = \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{к}}}{x_{\text{н}}}$$

Результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления и эффективности насадки представлены на рис. 2.

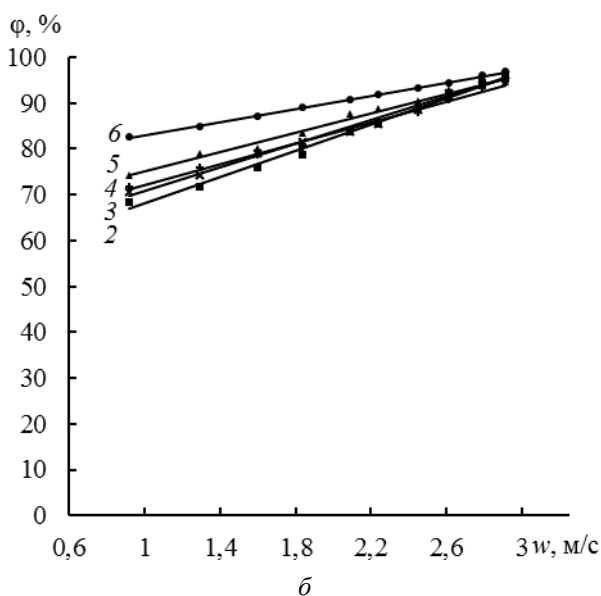
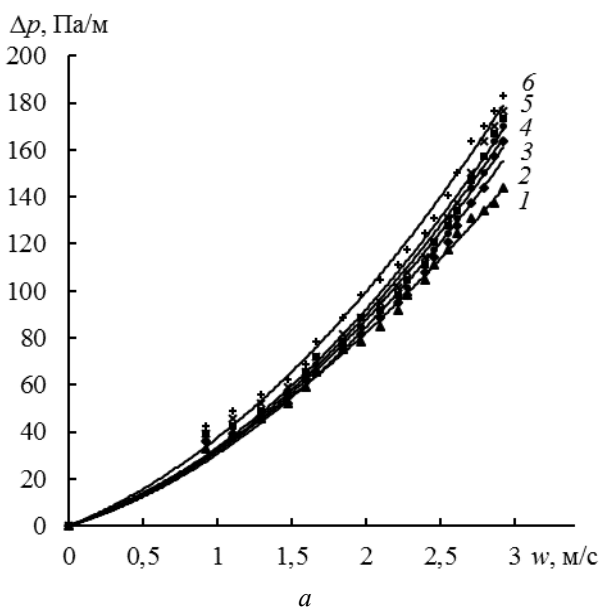


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления (а) и эффективности (б) разработанной насадки от средней скорости газа в аппарате  $w$ , м/с, при различных плотностях орошения  $q$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ : 1 – 0; 2 – 10,9; 3 – 17,8; 4 – 22,3; 5 – 26,9; 6 – 36

Из приведенного рис. 2 видно, что с увеличением скорости газа в пределах от 1 до 3 м/с, а также плотности орошения коэффициент извлечения увеличивается. Более высокую эффективность при наибольшей плотности орошения можно объяснить более равномерным орошением насадки. Данная насадка имеет достаточно высокую эффективность (до 96%) при гидравлическом сопротивлении одного метра насадки, не превышающем 180 Па.

Эффективность насадки также оценивалась по величине высоты эквивалентной теоретической тарелке (ВЭТТ), м, и числу теоретических тарелок (ЧТТ), приходящихся на 1 м высоты насадки, 1/м [7]:

$$\text{ВЭТТ} = 1 / \text{ЧТТ} = h / n_{0\text{x}}$$

где  $n_{0\text{x}}$  – число единиц переноса по жидкой фазе, определяемое по формуле [7]

$$n_{0\text{x}} = (x_{\text{н}} - x_{\text{к}}) / \Delta x_{\text{ср}}$$

где  $\Delta x_{\text{ср}}$  – среднелогарифмическая движущая сила процесса по жидкой фазе, равная [7]

$$\Delta x_{\text{ср}} = (\Delta x_{\text{н}} - \Delta x_{\text{к}}) / \ln (\Delta x_{\text{н}} / \Delta x_{\text{к}}),$$

где

$$\Delta x_{\text{н}} = x_{\text{н}} - x_{\text{н}}^*;$$

$$\Delta x_{\text{к}} = x_{\text{к}} - x_{\text{к}}^*;$$

где  $x_{\text{н}}^*$  – равновесная молярная доля  $\text{CO}_2$  в воде на входе в колонну, кмоль  $\text{CO}_2/\text{кмоль} (\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ .

Поскольку  $\text{CO}_2$  трудно растворяется в воде, то равновесная молярная доля  $\text{CO}_2$  в воде на входе в колонну  $x_{\text{н}}^*$  определялась из закона Генри [7]:

$$x_{\text{н}}^* = y_{\text{к}} / m,$$

где  $y_{\text{к}}$  – молярная доля  $\text{CO}_2$  в воздухе на выходе из колонны соответственно, кмоль  $\text{CO}_2/\text{кмоль} (\text{CO}_2 + \text{воздух})$ ;  $m = E / \Pi$  – коэффициент распределения, постоянный для данной системы газ – жидкость при постоянных температуре и давлении  $\Pi$ ;  $E$  – коэффициент Генри, равный  $1,44 \cdot 10^8$  Па [6].

Молярная доля  $\text{CO}_2$  в воздухе на выходе из колонны  $y_{\text{к}}$  рассчитывалась по формуле

$$y_{\text{к}} = \frac{M_{\text{возд}} \bar{Y}_{\text{к}}}{M_{\text{возд}} \bar{Y}_{\text{к}} + M_{\text{CO}_2}},$$

где  $M_{\text{возд}}$  – молярная масса воздуха, равная 29 кг/кмоль [6];  $\bar{Y}_{\text{к}}$  – относительная массовая доля  $\text{CO}_2$  в воздухе на выходе из колонны, кг  $\text{CO}_2/\text{кг}$  воздуха, определяемая из уравнения материального баланса [6]:

$$\bar{Y}_{\text{к}} = \bar{Y}_{\text{н}} + \frac{L}{G} (\bar{X}_{\text{н}} - \bar{X}_{\text{к}}),$$

## Сравнительная характеристика регулярных насадок

Параметр насадки	Тип насадки				
	Плоскопараллельная	Z-образная	Гофрированная		Разработанная
			Исполнение 1	Исполнение 2	
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	180–95	140–85	450	200	430
Плотность орошения, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч)	0,5–120	1–120	0,1–10	0,2–2,5	0–36
F-фактор, (м/с)·(кг/м <sup>3</sup> ) <sup>-0,5</sup>	0,55–8,0	0,4–5	0,2–2,5	0,5–3,5	0,8–2,7
ВЭТТ, м	0,6–1,5	0,5–1	0,175–0,2	0,75–0,4	0,15–0,2
Гидравлическое сопротивление, Па/м	1,33–3,33	4–400	20–300	10–600	20–180

где  $\bar{Y}_n$  – относительная массовая доля CO<sub>2</sub> в воздухе на входе в колонну, кг CO<sub>2</sub>/кг воздуха;  $L, G$  – массовые расходы воздуха и воды, кг/ч;  $\bar{X}_n, \bar{X}_k$  – относительные массовые доли CO<sub>2</sub> в воде на входе в колонну и на выходе из нее, кг CO<sub>2</sub>/кг H<sub>2</sub>O, определяемые по уравнению [6]

$$\bar{X} = \frac{M_{CO_2} x}{M_{CO_2} (1-x)}$$

Сравнительная характеристика исследованной насадки и некоторых существующих регулярных насадок приведена в таблице.

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что разработанная насадка по основным характеристикам превосходит плоскопараллельную, Z-образную и гофрированную (исполнение 2). Гофрированная насадка (исполнение 1) имеет близкие значения практически по всем характеристикам с исследованной нами насадкой. Однако разработанная насадка обладает меньшим гидравлическим сопротивлением и работает в более широком диапазоне по плотности орошения.

**Заключение.** Экспериментальные исследования разработанной насадки проводились при десорбции CO<sub>2</sub> из воды, когда основное сопротивление массопереносу сосредоточено в жидкой фазе. В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований данной насадки при испарении воды с ее поверхности, то есть когда основное сопротивление массопереносу сосредоточено в газовой фазе. Поскольку сопротивление массопереносу большинства существующих сред лежит между указанными

модельными средами, то по результатам исследований можно будет судить об эффективности данной насадки для проведения различных массообменных процессов.

## Литература

1. Абдуллин А. З. Разработка конструкций и метод расчета струйных насадок для массообменных процессов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Уфа, 2003. 186 с.
2. Фарахов Т. М., Башаров М. М., Шигапов И. М. Гидравлические характеристики новых высокоэффективных нерегулярных тепло-массообменных насадок // Нефтегазовое дело. 2011. № 2. С. 192–207.
3. Леонтьев В. С. Инновации в области разработки высокоинтенсивных массообменных устройств для модернизации ректификационных комплексов // Нефтегазовое дело. 2012. № 1. С. 178–186.
4. Вайтехович, П. Е. Разработка и исследование вихревых массообменных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Минск, 1982. 211 с.
5. Поникаров И. И., Гайнуллин М. Г. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки. М.: Альфа-М, 2006. 608 с.
6. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Альянс, 2005. 753 с.
7. Романков П. Г., Фролов В. Ф., Флисюк О. М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). СПб.: ХИМИЗДАТ, 2009. 544 с.

Поступила 06.03.2014