TECHNICAL SCIENCES (05.17.00)

## УДК 66.048.3/.01 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХАОТИЧНОЙ НАСАДКИ

# «ИНЖЕХИМ» ДЛЯ КОНТАКТА ГАЗА И ЖИДКОСТИ

### <sup>1</sup>Фарахов М.М., <sup>1</sup>Фарахов Т.М., <sup>2</sup>Лаптев А.Г.

<sup>1</sup>Инновационно-внедренческий центр «Инжехим», Казань, e-mail: info@ingehim.ru; <sup>2</sup>ΦГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Казань, e-mail: tvt kgeu@mail.ru

Представлена конструкция хаотичной тепломассообменной насадки и даны результаты экспериментальных исследований – перепада давления сухого и орошаемого слоя, предельных нагрузок и задержки жидкости на системе воздух – вода. Сделано обобщение результатов в виде расчетных выражений для коэффициента гидравлического сопротивления, перепада давления орошаемой насадки, скорости захлебывания и удельной задержке жидкости в слое. Исследованы типоразмеры элементов от 8 мм до 60 мм, с удельной поверхностью от 650 до 70 м²/м³. Элемент насадки изготавливается из тонкой металлической ленты и может иметь шероховатую поверхность (микрорельеф). Экспериментальная колонна с насадкой имеет диаметр 0,6 м, высоту 2,6 м и оборудована слоем насадки с высотой 1 м. Использованы сертифицированные средства контроля и измерения параметров работы колонны с насадкой и получены графические зависимости по перепаду давления сухой и орошаемой насадки и сравнение с рядом известных конструкций. Показано преимущество новой насадки по перепаду давления и предельным нагрузкам по газу и жидкости. Представлена таблица с сравнительными характеристиками ряда зарубежных и отечественных насадок. Описана область применения разработанной насадки в промышленности.

Ключевые слова: тепломассообмен, контактные устройства, перепад давления, предельные нагрузки

#### HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF RANDOM PACKING «INZHEKHIM» FOR THE GAS-LIQUID CONTACT

#### <sup>1</sup>Farakhov M.M., <sup>1</sup>Farakhov T.M., <sup>2</sup>Laptev A.G.

<sup>1</sup>Engineering-Promotional Center «Inzhekhim», Kazan, e-mail: info@ingehim.ru; <sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: tvt kgeu@mail.ru

A design of a random heat and mass transfer packing is presented and results of experimental studies in the form of pressure drop through a dry and irrigated layer, maximum loads and fluid retention in the air-water system are given. A generalization of the results is made in the form of expressions for hydraulic resistance coefficient, pressure drop through the irrigated packing, flooding rate and specific fluid retention in the layer. The packing elements of sizes ranging from 8 mm to 60 mm and having a specific surface area from 650 to 70 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> are investigated. The packing element is fabricated from a thin metal tape and can have a rough surface (microrelief). The packed column has a diameter equal to 0.6 m, a height equal to 2.6 m and it is equipped with a packed layer of a height equal to one meter. Certified means for monitoring and measuring the performance of the packed column were used, and graphical dependencies for pressure drop of the dry and irrigated packing were obtained and comparison with a number of known designs was made. The advantage of the new packing with respect to pressure drop and maximum gas and liquid loads is indicated. A table with comparative characteristics of a number of foreign and domestic packings is presented. The industrial application area of the developed packing is described.

Keywords: heat and mass transfer, contact devices, pressure drop, limit loads

В данной статье даны результаты разработки, конструирования и экспериментального исследования элементов хаотичной насадки «Инжехим 2012» [1] для тепломассообменных аппаратов.

#### Элемент хаотичной насадки

Известно, что турбулентный режим в колоннах с мелкими хаотичными насадкми наступает уже при числе Рейнольдса  $\text{Re}_{3} > 40$ , где  $\text{Re}_{3} = w_{r}d_{3}/v_{r}$ ;  $w_{r}$  – средняя скорость газа (пара) в аппарате, м/с;  $d_{3}$  – эквивалентный диаметр насадки,м;  $v_{r}$  – коэффициент кинематической вязкости газа, м<sup>2</sup>/с. Турбулентный режим значительно повышает эффективность массопередачи для многих смесей при ректификации, а также абсорбции и ох-

лаждения жидкостей. Если сопротивление массопередачи локализовано в жидкой фазе, то применяется искусственная шероховатость контактных устройств для организации волнового режима. В таком случае происходит повышение коэффициента массоотдачи в пленке жидкости примерно в два раза. Все эти факторы учитывались авторами при разработке конструкции нерегулярной насадки.

Элемент разработанной [1] хаотичной насадки для аппаратов разделения смесей имеет вид полого тела вращения. Поверхность элемента имеет вид закругленных полос из тонкого металла. Полосы металла сделаны параллельными и смещены один против другого на ширину полосы, а ребра закруглены (рис. 1).



Рис. 1. Вид элемента «Инжехим 2012» [1]

Искусственно созданная шероховатость на элементе повышает эффективность массообмена.

Удельная поверхность  $a_v$  насадки с номинальными размерами d: 8 мм – 650; 12 мм – 420; 16 мм – 270; 24 мм – 170; 35 – 110; 45 – 100; 60 мм – 70 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Удельный свободный объем  $\varepsilon_{cs}$  (0,95) 95% . Отсюда эквивалентный диаметр  $d_z = 4 \varepsilon_{cs} / a_{yz}$  м.

#### Экспериментальная часть

Гидравлические испытания разработанной насадки проводились на опытном стенде диаметром 0,6 м, высота колонны 2,6 м, число точек орошения до 1030 шт/м<sup>2</sup>. Использовалась система воздух — вода при высоте насадки 1 м. Скорость на полное сечение колонки газа W в колонне достигала 5,82 м/с, плотность орошения составляла от 2,5 до 90 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>час). Описание установки дано в работах [2, 3]. Использовались сертифицированные измерительные приборы.

После проведения опытов установлено: новая насадка имеет большой интервал нагрузок по фазам при пленочном режиме; режим торможения фаз в зависимости от размера насадки наступает при скорости газа  $W_{o} > 1,7 \div 2,5$  м/с и зависит от расхода воды.

Потеря напора на 1 м высоты слоя насадки записана в виде выражения Дарси – Вейсбаха [3, 4]

$$\frac{\Delta p_{\text{cyx}}}{H} = \frac{\xi_0 W_0^2 \rho_{\text{r}} a_{\text{v}}}{8\epsilon_{\text{cB}}^3} \tag{1}$$

ИЛИ

$$\Delta P_{\rm cyx} = \xi_0 \frac{H}{d_{\rm o}} \frac{\rho_{\rm r} w_{\rm r}^2}{2}, \qquad (2)$$

где  $\Delta P_{cyx}$  – сопротивление сухой насадки, Па;  $\xi_0$  – коэффициент сопротивления сухого слоя; Н – высота насадки, м;  $\rho_r$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $w_{\Gamma} = W_{O} (\varepsilon_{CB} - c \kappa o poctь газа в слое насадки, м/с.$ 

В общем виде коэффициент сопротивления имеет форму

$$\xi_0 = A \cdot \operatorname{Re}_{\Gamma}^{-B}, \qquad (3)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты; Re<sub>r</sub> =  $w_r d_2 / v_r$  – число Рейнольдса.

В результате обобщения экспериментальных данных установлены следующие значения для всех типоразмеров насадок: A = 6,5 и B = 0,08 с погрешностью 10-12%.

Формула (3) справедлива при  $500 \le \text{Re}_r \le 5000$ . Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных значений  $\xi_0$  составляет 14%.

На рис. 2 даны зависимости перепада давления  $\Delta P_{\text{сух}}/\text{H}$  (1) для различных видов насадок. Кривая – 10 получена для разработанной хаотичной насадки с  $d_{z} = 0,035$  м и практически совпадает с кривой для колец Палля, размером 50х50 мм.

Получено, что  $\Delta P$  сухого слоя новой насадки меньше, чем у колец Палля размером 35×35 мм, и примерно на 25% и значительно меньше, чем у колец Рашига. Это достигается более высокой порозностью новой насадки, а также тем, что нет образования застойных зон.

При работе аппарата в пленочном режиме для расчета гидравлического сопротивления орошаемой насадки часто используют формулу

$$\frac{\Delta P_{\rm op}}{\Delta P_{\rm cvx}} = 10^{bU},\tag{4}$$

где U – плотность орошения,  $M^3/(M^2 u)$ ; b – эмпирический коэффициент.

Ниже приведены графические зависимости (рис. 3, 4) и обобщения полученных экспериментальных данных для разработанной насадки с различным номинальным диаметром. Фактор скорости имеет вид  $w_{a}\sqrt{\rho_{a}}$ , Па<sup>0,5</sup>.

 $w_r \sqrt{\rho_r}$ , Па<sup>0.5</sup>. В результате для орошаемых насадок получено: d = 8 мм и d = 16 мм: b = 0,035; для 24–60 мм: b = 0,002. Среднее отклонение от эксперимента  $\pm 16\%$  при пленочном режиме работы.

Получено выражение для расчета скорости захлебывания

$$W_3 = \left(\frac{10^{\rm C}g\varepsilon_{\rm cs}^3\rho_{\rm m}}{a_{\rm v}\rho_{\rm r}\mu_{\rm m}^{0.16}}\right)^{1/2},\qquad(5)$$

где

$$C = -0.47 - 1.08(L/G)^{0.25}(\rho_r / \rho_*)^{0.125};$$

L и G – массовые расходы жидкости и газа, кг/с.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ № 3, 2018



Рис. 2. Перепад давления различных насадок: 1, 2, 3 – кольца Рашига в укладку, d = 50, 80, 100 мм; 4, 5 – кольца Рашига внавал, d = 25, 50 мм; 6 – кольца Палля, d = 50 мм; 7 – рулонная насадка [4] (с сегментными отверстиями); 8 – рулонная просечная; 9 – рулонная с шероховатой поверхностью [4]; 10 – разработанная насадка «Инжехим 2012», d<sub>3</sub> = 0,035 м



Рис. 3. График зависимости перепада давления от фактора скорости и расхода жидкости для насадки  $d = 8 \text{ мм}; 1 - сухая, 2 - 2,5 \text{ м}^3/\text{m}^2 \cdot y; 3 - 5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot y; 4 - 7,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot y; 5 - 10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot y; 6 - 15 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot y$ 



FUNDAMENTAL RESEARCH № 3, 2018

Например, для насадки «Инжехим 2012» с номинальным размером 60 мм  $(a_v = 70 \text{ м}^2/\text{m}^3; d_s = 0,0543 \text{ м})$  для системы воздух – вода (20 °C) при L/G = 1 получаем скорость захлебывания  $W_3 = 3,4$  м/с; при L/G = 2:  $W_3 = 3,07$  м/с. Для сравнения у колец Рашига в (5) коэффициенты равны [6]: В = 1,75, А = -0,073. Тогда для керамических колец Рашига с диаметром 100 мм  $(a_v = 60 \text{ м}^2/\text{m}^3; d_s = 0,048 \text{ м})$  при L/G = 1 получаем  $W_3 = 2,82 \text{ м/с}$  и при L/G = 1 получаем  $W_3 = 2,82 \text{ м/с}$  и при L/G = 2:  $W_3 = 2,4$  м/с. То есть даже такая крупная насадка из колец Рашига захлебывается в 1,3–1,5 раз с меньшими скоростями, чем насадка «Инжехим 2012».

Динамическая составляющая задержки жидкости (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) в слое насадки обобщена в форме (±14%):

$$\delta_{\rm max} = 0.65 {\rm Re}_{\rm w}^{0.49} {\rm Ga}^{-0.35}, \qquad (6)$$

где Ga =  $(a_v \theta)^{-3}$  – критерий Галилея;  $\theta = (v_{\pi}^2/g)^{1/3}$ ; число Рейнольдса: Re<sub>ж</sub> =  $4/q(a_v v_{\pi})$ ; q – плотность орошения,  $M^3/(M^2c)$ .

Исследования задержки жидкости выполнялись по методике отсечки питания [3, 4].

Выражение (6) получено от 2,5 до 100 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) при пленочном режиме. Для насадки «Инжехим 2012» с номинальным размером 8 мм, плотность орошения от 2,5 до 15 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>); для 16 мм – от 5,0 до 40 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч);

для 24 мм – от 10 до 50; для 45 мм от 10 до 90; для 60 мм от 5 до 100 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).

Таким образом, для расчета массообменных характеристик колонных аппаратов определены все необходимые параметры насадки: геометрические характеристики [4–6], гидравлическое сопротивление [3, 7, 8] и задержка жидкости в слое [9, 10].

В табл. 1 даны характеристики новой насадки известных видов. Новая насадка обладает лучшими параметрами, чем близкие ей по размерам другие насадки.

Получено, что интервал устойчивой работы для исследованной насадки шире, чем у насадок из колец Рашига, Палля, ГИАП и ряда других типов. Насадки, аналогичные исследованной «Инжехим», внедрены в десятках тепло- и массообменных аппаратах при проведении процессов ректификации и абсорбции различных смесей [2, 3].

Исследования массообмена проводились на ректификационной установке с бинарной системой этанол – вода. Выполнены экспериментальные исследования массообменных характеристик насадок на экспериментальной ректификационной установке с внутренним диаметром колонки 98 мм; высотой слоя насадки 3 м при бесконечном флегмовом числе. Результаты исследования приведены в табл. 2.

#### Таблица 1

Тип насадки	$\epsilon_{\rm cp}, M^3/M^3$	$a_{v_2}  \mathrm{M}^2 / \mathrm{M}^3$	Потеря напо-	Пропускная спо-	Эффективность	
	cb	, ,	ра, отн.%	собность, отн. %	массообмена, отн. %	
Кольца Рашига	0,95	110	100	100	100	
Кольца Палля	0,96	100	63	120	125	
Хай – Пэк	—	—	65	120	150	
Кольца Бялецкого	—	_	85	100	125	
Седла Инталокс	—	—	32	144	132	
Насадка Лева	0,97–0,98	118	47	—	158	
Насадка ГИАП	0,96	101	47	133	137	
Инжехим	0,96	100	40–50	210	150	

Сравнительные характеристики промышленных насадок размером 50х50 мм [3, 4, 8]

#### Таблица 2

Режимные и массообменные характеристики насадок

Насадка	Скорость	Фактор пара, F,	Плотность ороше-	Число теорети-	BЭTC,
	пара w, м/с	$M/c (\kappa \Gamma/M^3)^{0.5}$	ния, U, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> час)	ческих тарелок	М
Инжехим-16	1,47	2,08	14,173	12	0,25
Регулярная	1,53	2,17	14,79	7	0,43
Регулярная (тонкая сетка)	1,47	2,08	14,173	7	0,43
Регулярная насадка (тонкая сетка) при по- ниженных нагрузках	0,40	0,57	3,868	1.5	2

#### Таблица 3

Нагрузка куба, кВт	Объемный расход, м <sup>3</sup> /с	Рабочая ско- рость пара, м/с	Фактор пара, м/с (кг/м <sup>3</sup> ) 0,5	Плотность ороше- ния, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> час)	BƏTT, M	ΔР, кПа
5,3	0,005335	0,71	1,00	6,83	0,300	1,11
8,0	0,008087	1,07	1,52	10,36	0,200	1,38
9,3	0,009362	1,24	1,76	11,99	0,230	1,50
11,2	0,011275	1,50	2,12	14,44	0,273	2,34

Характеристики работы колонны регенерации растворителей

Рассматриваем один из элементов технологического модуля ректификации для отработки режимов очистки возвратного растворителя и мономеров, используемых для синтеза этилен-пропиленовых каучуков на ПАО «Нижнекамскнефтехим». Результаты экспериментов взяты за основу при проектировании модуля.

Так же выполнены эксперименты на смеси ацетон – вода для насадки различного типоразмера. Для насадок были определены зависимости ВЭТС и гидравлического сопротивления от гидродинамических параметров работы (фактора пара и плотности орошения). Экспериментальные данные подтвердили что нерегулярные насадочные элементы обладают лучшими массообменными характеристиками по сравнению с регулярными насадками, но имеют более высокое гидравлическое сопротивление.

Колонна с нерегулярной насадкой «Инжехим-2012» (типоразмер 12) обеспечила максимальную разделяющую способность. Полученные результаты сведены в табл. 3.

С применением разработанной хаотичной насадки «Инжехим-2012» создана лабораторная установка в филиале Нижнекамского КНИТУ (КХТИ), которая используется в НИР аспирантов и магистров.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (№ 13.6384.2017/БЧ).

#### Список литературы

1. Асибаков Л.И., Бурмистров Д.А., Кузнецов В.А., Фарахов М.М., Шигапов И.М. Элемент насыпной насадки для массообменных аппаратов // Патент Россия № 2010135271/05 1-2200, МПК В01Ј 19/30.

2. Башаров М.М. Модернизация промышленных установок разделения смесей в нефтегазохимическом комплексе / М.М. Башаров, Е.А. Лаптева. – Казань: Отечество, 2013. – 297 с.

 Лаптев А.Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии / А.Г. Лаптев, М.И. Фарахов, Н.Г. Минеев. – СПб.: СТРАТА, 2015. – 576 с.

4. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов / А.М. Каган, А.Г. Лаптев, А.С. Пушнов [и др.]. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.

5. Mitin A.K., Nikolaikina N.E., Pushnov A.S., Zagustina N.A. Geometric characteristics of packings and hydrodynamics of packed biotrickling filters for air-gas purification // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – Vol. 52. № 1. – P. 47–52.

6. Пушнов А.С. Влияние геометрических характеристик насадки на гидравлическое сопротивление и эффективность процессов тепло- и массообмена / А.С. Пушнов, А.С. Рябушенко // Химическая технология. – 2015. – Т. 16, № 10. – С. 631–638.

7. Городилов А.А. Экспериментальное исследование массообмена на регулярных насадках контактных теплообменных аппаратов с перекрестным током / А.А. Городилов, М.Г. Беренгартен, А.С. Пушнов // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50, № 4. – С. 423–431.

 Исследование гидравлического сопротивления слоя насыпной насадки в форме колец Мёбиуса / Е.Ю. Баранова [и др.] // Химическая промышленность сегодня. – 2015. – № 2. – С. 32–37.

9. Cong H., Wang C., Gao X., Li X., Li H., Pavlenko A.N. Pressure drop simulation of structured corrugation foam packing by computational fluid dynamics // Journal of Engineering Thermophysics. – 2016. – Vol. 25. № 3. – P. 301–313.

10. Система сбора локальных характеристик потока в экспериментальной ректификационной колонне / А.Н. Павленко [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 5, № 1. – С. 3–8.