

Как видно из Оже - спектра, полученная пленка SiO<sub>2</sub> неоднородна по толщине. По полученным эллипсометрическим данным можно выделить пять подслоев с параметрами: шероховатый оксидный (SiO<sub>2</sub>) с  $\alpha_{z1} = -0.012 \text{ nm}$  и  $n_2 = 1,46$ ,  $k_2 = 0$ ;  $d_2 = 3.9 \text{ nm}$ ; первый промежуточный с  $\alpha_{z3} = -0.102 \text{ nm}$ ; переходный с  $n_4 = 3,025$ ;  $k_4 = 0,355$ ;  $d_4 = 4,4 \text{ nm}$ ; второй промежуточный с  $\alpha_{z5} = -0.089 \text{ nm}$ ; подложка с  $n_6 = 3,865$ ;  $k_6 = 0,023$ , при суммарной толщине поверхностного слоя около 8,3 нм. Этот результат удовлетворительно согласуется с данными Оже-спектроскопии. Поверхностный слой толщиной 4 нм по стехиометрическому составу соответствует оксиду кремния SiO<sub>2</sub>. Между этим слоем и подложкой находится переходной слой толщиной 4,5 нм. Параметры переходного слоя по оптическим характеристикам не соответствует известным фазам кремния aSi, pSi и cSi. Из-за структурной неоднородности переходного слоя его параметры  $n_4$  и  $k_4$  имеют смысл эффективных характеристик. На основании линейного приближения Бругемана (ВЕМА) слой между двумя промежуточными слоями соответственно с  $\alpha_{z3}$  и  $\alpha_{z5}$  состоит из кремниевых фаз aSi (60%), cSi (7%), и SiO<sub>2</sub> (33%).

Таким образом при расчетах пленок SiO<sub>2</sub> толщиной менее 10 нм необходимо учитывать переходной слой для адекватного отражения модели пленка - подложка.

#### Список использованных источников

1. Аззам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Аззам, Н. Башара: перевод с англ. под ред. А.В. Ржанова, К.К. Свиташева. – М.: Изд-во «Мир», 1981. – 582 с.
2. Гриценко, В.А. Структура границ раздела кремний/оксид и нитрид/оксид // Успехи физических наук.-2009.-т. 179, №9.- с.921 – 930.

УДК 532.51

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НАСАДКИ ДЛЯ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

*Матвейко Н.П., зав. кафедрой, доц. Протасов С.К.,  
доц. Боровик А.А.*

*Белорусский государственный экономический университет*

В химической промышленности все большее распространение получают массообменные аппараты насадочного типа. Они применяются для процессов абсорбции, ректификации, экстракции и химических реакций. Насадочные аппараты представляют собой цилиндрические вертикальные колонны, заполненные насадочными телами (насадкой). В качестве насадки используют различной формы пустотелые тела. Насадка должна обладать большой удельной поверхностью (поверхность насадки, отнесенная к ее единице объема), большим свободным объемом (доля пустот в единице объема) и низким гидравлическим сопротивлением. В насадочных колоннах применяют регулярную (правильно уложенную) и нерегулярную (засыпанную внавал) насадку.

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

Авторами разработана и исследована новая конструкция регулярной насадки, которая представляет собой пакеты, набираемые из концентрических тонкостенных цилиндров, между которыми располагаются по всему периметру зигзагообразные ленты, образующие вертикальные каналы с поверхностью цилиндров. В процессе исследования определяли гидравлическое сопротивление насадки и эффективность взаимодействия фаз.

#### Исследования эффективности.

Эффективность взаимодействия фаз в насадке определяли при десорбции CO<sub>2</sub> из воды и при испарении воды.

Эффективность взаимодействия фаз при десорбции CO<sub>2</sub> оценивали по коэффициенту извлечения

$$\varphi = (x_n - x_k) / (x_n - x_k^*),$$

где  $x_n$ ,  $x_k$ ,  $x_k^*$  – соответственно содержание CO<sub>2</sub> в воде на входе, на выходе и равновесная на выходе из насадки.

Содержание CO<sub>2</sub> в воздухе, поступающем в насадку, принимали равным нулю, поэтому и  $x_k^* = 0$ .

---

результате расчетная формула для коэффициента извлечения упрощалась  $\varphi = (x_n - x_k)/x_n$ .  
Опытные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Эффективность насадки при десорбции CO<sub>2</sub>

Плотность орошения, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч)	Скорость газа, м/с	pH <sub>кон</sub>	pH <sub>нач</sub>	ΔрН	x <sub>к</sub> , кг/м <sup>3</sup>	x <sub>н</sub> , кг/м <sup>3</sup>	φ
21	1	6,27	5,3	0,97	0,144	1,348	0,892
	1,5	6,22	5,3	0,92	0,162	1,348	0,880
	2	6,18	5,3	0,88	0,177	1,348	0,869
	3	6,12	5,3	0,82	0,204	1,348	0,849
34	1	6,14	5,3	0,84	0,194	1,348	0,856
	1,5	6,13	5,3	0,83	0,199	1,348	0,852
	2	6,11	5,3	0,81	0,208	1,348	0,846
	3	6,10	5,3	0,80	0,213	1,348	0,842
64	1	6,09	5,3	0,79	0,218	1,348	0,838
	1,5	6,07	5,3	0,77	0,229	1,348	0,830
	2	6,05	5,3	0,75	0,239	1,348	0,822
	3	6,03	5,3	0,73	0,251	1,348	0,813

Эффективность взаимодействия фаз при испарении воды оценивали по параметрам влажного воздуха на входе в насадку и на выходе из нее. Для этого с помощью термогигрометра измеряли температуру и относительную влажность воздуха на входе и на выходе из насадки. Содержание влаги в воздухе у определяли с помощью I-x-диаграммы влажного воздуха по величине влагосодержания, измеряемого в кг/кг с.в. Оценку эффективности проводили по коэффициенту насыщения воздуха влагой ψ, который равен отношению

$$\psi = (y_n - y_k)/(y_n - y_k^*),$$

где y<sub>н</sub>, y<sub>к</sub>, y<sub>к</sub><sup>\*</sup> –соответственно влагосодержание воздуха на входе, выходе и равновесное на выходе из насадки, кг/кг с.в.

Кроме этого эффективность насадки оценивали по величине высоты, эквивалентной теоретической тарелке, м

$$\text{ВЭТТ} = H/n_{0y}$$

где H – высота насадки, м; n<sub>0y</sub> – число единиц переноса по газовой фазе.

Число единиц переноса рассчитывали по формуле

$$n_{0y} = (y_k - y_n)/\Delta y_{cp}$$

где Δy<sub>cp</sub> – среднелогарифмическая движущая сила процесса.

И по числу теоретических тарелок (ЧТТ), приходящихся на 1 м высоты насадки, 1/м ЧТТ = 1/ВЭТТ.

Результаты исследований представлены в таблице 2.

Эффективность насадки, полученная при испарении влаги, на 11% выше эффективности, полученной при десорбции CO<sub>2</sub>.

Таблица 2 – Эффективность насадки при испарении воды

q, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч)	w, м/с	y <sub>н</sub> · 10 <sup>3</sup> , кг/кг с.в	o <sub>1</sub> <sup>*</sup> · 10 <sup>3</sup> , кг/кг с.в	y <sub>к</sub> · 10 <sup>3</sup> , кг/кг с.в	o <sub>ε</sub> <sup>*</sup> · 10 <sup>3</sup> , кг/кг с.в	ψ	ВЭТТ, м	ЧТТ, 1/м
21	1	6,3	10,2	12,3	12,8	0,920	0,180	5,96
	2	6,0	10,0	12,8	13,3	0,930	0,170	5,88
	3	5,9	10,0	19,0	13,3	0,960	0,144	6,94
34	1	6,4	10,2	11,7	12,2	0,915	0,220	4,55
	2	6,1	10,1	12,0	12,4	0,936	0,185	5,40
	3	5,9	10,0	12,7	13,0	0,958	0,150	6,67
61	1	6,3	10,2	11,4	11,7	0,946	0,190	5,96
	2	6,1	10,1	11,7	12,0	0,949	0,179	5,59
	3	6,0	10,0	11,8	12,2	0,935	0,189	5,29

Для сравнения новой насадки с существующими стандартными в таблице 3 представлены их основные характеристики.

Таблица 3 – Характеристики регулярных насадок

Характеристика	Плоскопараллельная насадка	Z-образная насадка	Гофрированная насадка		Новая исследуемая насадка
			исполнение 1	исполнение 2	
Шаг, мм	10 15 20	16 20 26	7	7	20/15
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	180 125 95	140 110 85	450	200	420
Высота пакета, мм	400	310 340 400	150	150	100
Плотность орошения, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч)	0,5–120	1–120	0,1–10	0,2–2,5	20–64
F-фактор, $\frac{m}{c} = \sqrt{\frac{kg}{m^3}}$	0,55–8,0	0,4–5	0,2–2,5	0,5–3,5	1–3
ВЭТТ, м	0,6–1,5	0,5–1	0,175–0,2	0,75–0,4	0,15–0,22
Гидравлическое сопротивление, Па/м	1,33–3,33	4–400	20–300	10–600	15–180

Анализ таблицы 3 показывает, что новая насадка по основным характеристикам превосходит плоскопараллельную, Z-образную и гофрированную (исполнение 2). Гофрированная насадка (исполнение 1) имеет близкие значения практически по всем характеристикам с новой насадкой. Однако новая насадка обладает меньшим гидравлическим сопротивлением и работает в более широком диапазоне по плотности орошения.

УДК 541.183.12

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕГИДРОЛИЗУЕМОГО ОСТАТКА ТОРФА КАК СОРБЕНТА ПРИ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

*Студ. Буко З.В., к.т.н., доц. Лихачева А.В.*

*Белорусский государственный технологический университет*

Сточные воды, содержащие тяжелые металлы, образуются в химической промышленности, при производстве гальванических элементов и обработке металлических поверхностей, в электронной промышленности, в типографии, на фабриках по обработке кожного сырья и др. Известно, что тяжелые металлы относятся к ингредиентам наиболее опасным для окружающей среды и для человека.

В связи с этим в настоящее время одной из актуальных экологических проблем является проблема глубокой очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Для очистки сточных вод применяют механические, физико-химические и биологические методы. Наиболее эффективным и экологически приемлемым методом очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов является сорбционный метод очистки. Преимущество процесса сорбции заключается в том, что он, независимо от значений pH среды, позволяет извлекать тяжелые металлы из больших объемов сточных вод, при одновременном их обезвреживании. Сорбционный метод используется самостоятельно или в комплексе с другими методами очистки, например с ионообменным методом. Эффективность сорбционного метода определяется, прежде всего, характеристиками применяемого сорбента. На практике применяют природные и синтетические сорбенты. Применение природных минералов в очистке сточных вод является приемлемым с экологической и экономической точки зрения, но зачастую такие материалы не обладают нужными сорбционными свойствами и их необходимо дополнительно модифицировать.

Использование углеродных сорбентов для извлечения тяжелых металлов считается дорогостоящим и сложным, но уже стало традиционным в технологиях очистки сточных вод. Определенное затруднение вызывает тот факт, что технологические разработки по их регенерации практически отсутствуют.

В последние годы ассортимент углеродных сорбентов для очистки питьевой воды от