

Determination of Sorptive Parameters for Organic Toxicants Solubilized by Triton X-100 During their Pre-concentration by Porous Polymer Sorbents from Water Solutions

M.V. Milyukin^{1*}, M.M. Skrynnyk², M.V. Gorban¹

¹ A.V. Dumansky Institute of Colloid Chemistry and Water Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine, Blvd. Vernadsky 42, Kyiv, 03680 Ukraine; *e-mail: m_milyukin@mail.ru

² Company "Pharmak", 63 Frunze STR., Kyiv, 04080 Ukraine

Received: August 21, 2015; Accepted: December 22, 2015

DOI: 10.17721/moca.2015.189-194

Pre-concentration of organochlorine pesticides (OCPs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from water containing high concentration of detergent (Triton X-100) were studied on a set of polymeric adsorbents: Amberlites XAD-2, XAD-4, XAD-7, XAD-16, XAD-1180, XAD-2000, XAD-2010, Polysorb-1 and Poros C₁₈. Influence of eluent flow rate (up to 6.4 cm³/min), concentration of the detergent (up to 4.0 mg/cm³) and organic toxicants (up to 0.13 µg/cm³) on their recovery in acidic solution with the constant adsorbent volume was investigated. The following adsorptive parameters were obtained: beginning of breakthrough time (3–47 min); 10% breakthrough time (5–59 min); mean values of dynamic adsorptive capacity (7–90 mg/cm³); values of adsorptive capacity at 100 min (16–149 mg/cm³); adsorptive rates at the initial process step (2–23). Rankings of dynamic adsorptive capacity and adsorptive capacity via 100 min were established. They may be used for pre-concentration of organic toxicants from natural waters that contain high concentrations of detergent compounds. From adsorptive capacity, it is evident that the most rapid adsorptive equilibriums of Triton X-100 are achieved for Poros C₁₈ and Polysorb-1 media. More slow – for XAD-4, XAD-1180, XAD-2010, practically equal intermediate adsorptive rates are achieved for XAD-7, XAD-2, XAD-16, and the slowest – for XAD-2000.

Keywords: pre-concentration, organochlorine pesticides, polychlorinated biphenyls, polycyclic aromatic hydrocarbons, porous polymer adsorbents, Amberlites XAD, Polysorb-1, Poros C₁₈

Определение параметров сорбции органических токсикантов, солюбилизированных Triton X-100, при их концентрировании пористыми полимерными сорбентами из водных растворов

М.В. Милюкин^{1*}, М.М. Скринник², М.В. Горбань¹

¹ Институт коллоидной химии и химии воды им. А.В. Думанского НАН Украины, бул. акад. Вернадского 42, Киев, 03680, Украина; *e-mail: m_milyukin@mail.ru

² Публичное акционерное общество "Фармак", ул. Фрунзе 63, Киев, 04080, Украина

Поступила: 21 августа 2015 г; Принята: 22 декабря 2015 г

Проведен эксперимент на модельной системе по концентрированию хлорорганических пестицидов (ХОП), полихлорированных бифенилов (ПХБ) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), солюбилизированных неионогенным ПАВ, полимерными сорбентами: амберлитами XAD, Polysorb-1 и Poros C₁₈. Было исследовано влияние скорости пропускания раствора (6.4 см³/мин), концентрации ПАВ и органических токсикантов на полноту их извлечения в кислой среде при постоянном объеме сорбента. Получены следующие сорбционные параметры: время, через которое наблюдается начало проскока исследуемых соединений (3–47 мин); время, которое соответствует достижению 10%-ного уровня максимального значения сорбционной емкости (5–59 мин); значения динамической сорбционной емкости (7–90 мг/см³); значения сорбционной емкости при 100 мин (16–149 мг/см³); скорости процесса сорбции на первоначальном участке (2–23). Установлены ряды зависимостей динамической сорбционной емкости и сорбционной емкости через 100 мин, которые могут быть использованы для проведения процесса концентрирования органических токсикантов из природных вод, содержащих повышенные концентрации ПАВ. Из сорбционной емкости следует, что равновесные процессы сорбции Triton X-100 наиболее быстро протекают на сорбентах Poros C₁₈, Polysorb-1, медленнее – на XAD-4, XAD-1180, XAD-2010, промежуточное положение занимают – XAD-7, XAD-2, XAD-16 и самое медленное протекание процесса наблюдается на XAD-2000.

Ключевые слова: сорбция, хлорорганические пестициды, полихлорированные бифенилы, полициклические ароматические углеводороды, пористые полимерные сорбенты, амберлиты XAD, Polysorb-1, Poros C₁₈

Токсические гидрофобные ограниченно-летучие органические соединения (ОЛОС), обладающие нейтральными, слабокислотными и слабоосновными свойствами, такие как хлорорганические пестициды (ХОП), полихлорированные бифенилы (ПХБ) и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) содержатся в природных и питьевых водах в низких концентрациях – на уровне $1 \cdot 10^{-12}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ г/дм³ [1]. Эти соединения находятся в водной среде как в истинно водорастворимом, так и в ассоциированном состоянии на грубых, тонких взвешенных частицах [2–7], коллоидных и водорастворимых нелетучих органических соединениях (НЛОС) – природных (в основном на гуминовых, фульвокислотах (ГФК) и белковоподобных) и синтетических поверхностно-активных веществах (ПАВ). Известно также, что неионогенные ПАВ, такие как Triton X-100, являются хорошими солюбилизаторами неполярных соединений, в том числе ХОП, ПХБ и ПАУ [8–11].

Хроматографические и хромато-масс-спектрометрические методы анализа непосредственно в воде не позволяют проводить идентификацию и определение таких соединений, поэтому возникает необходимость предварительного выделения и концентрирования микропримесей ОЛОС и НЛОС из вод с целью достижения требуемой степени концентрирования для обеспечения чувствительности детекторов в физико-химических методах анализа по целевым компонентам [1].

Основными способами концентрирования этих соединений являются классический жидкостно-экстракционный и сравнительно новый твердофазно-экстракционный. Наиболее эффективным является сорбционный способ извлечения органических соединений с использованием пористых полимерных сорбентов (ППС) различной химической природы. Условия проведения процесса твердофазной экстракции микропримесей органических соединений из вод на ППС для целей химического анализа обобщены в монографии [1].

Максимальное извлечение нейтральных и слабокислых органических соединений (практически 100%) происходит из кислой водной среды (рН=1.0–2.0), поскольку в этих условиях наблюдается подавление диссоциации веществ с кислотными свойствами. Наиболее пригодными сорбентами для этих целей следует считать XAD-2, XAD-4, XAD-7, XAD-8, Porapak Q, Chromosorb 105, Polysorb-1. Критерием оценки является объем до проскока или проскачок органических соединений, который составляет при сорбции на ППС не более 6–12% общей массы выделенных ОЛОС и НЛОС. Разработана, апробирована и применена стадия практически полного элюирования сложных смесей ОЛОС и НЛОС различных классов с поверхности и из пор ППС, включая ГФК [1].

Методика подготовки концентратов ОЛОС природных и питьевых вод из нейтральной и кислой сред с применением ППС для их исследования методом ГХ/МС широко апробирована на практике. Данная методика сорбционного выделения, элюирования и концентрирования ОЛОС применена для подготовки концентратов этих соединений из деионированных, природных и питьевых вод бассейна р. Днепр, шахтных и шахтно-природных вод Западного Донбасса с целью их идентификации, а также количественного определения карбоновых кислот, хлорфенолов, фталатов, ПАУ, ХОП и ПХБ [1].

За последнее время авторами проведена сорбция ХОП и ПХБ, ассоциированных с ГФК, и определен проскачок указанных соединений, который составил не более 5–6%. Установлено, что стирол-дивинилбензолные сополимеры – амберлиты XAD-16, XAD-1180, XAD-2000, XAD-2010 и сорбент Polysorb-1 пригодны для концентрирования ОЛОС, включая ХОП и ПХБ, из природных и питьевых вод, содержащих повышенные концентрации ГФК [12].

Цель данной работы – изучение и установление параметров сорбции ХОП, ПХБ и ПАУ, солюбилизированных Triton X-100, амберлитами XAD-2, XAD-4, XAD-7, XAD-16, XAD-1180, XAD-2000, XAD-2010, а также сорбентами Polysorb-1 и Poros C₁₈.

Экспериментальная часть

Реагенты и растворы. В исследовании использовали неионогенный ПАВ Triton X-100 (Merck, квалификации «molecular biology grade» и особо чистую деионизированную воду (Millipore Direct-Q™3) с удельным сопротивлением 18.0 МОм/см и ТОС < 10 мкг/дм³.

Для приготовления исходных растворов аналитов и их смесей использовали следующие стандарты (в скобках указаны их исходные концентрации в мкг/см³):

ХОП: (Supelco 4-8858, EPA 608 Pesticide Mixture). Одна ампула (1 см³) стандартного раствора ХОП содержит: альдрин (10), дильдрин (20), 4,4'-ДДТ (60), 4,4'-ДДЭ (20), 4,4'-ДДД (20), эндосульфат I (60), эндосульфат II (20), эндосульфат сульфат (60), эндрин (20), эндрин альдегид (60), гептахлор (10), гептахлорэпоксид (10), α-, β-, δ-, γ-гексахлорциклогексаны (по 10 каждого). Суммарная концентрация компонентов в растворе метанол:метилпентхлорид (98:2) составляет 410 мкг/см³, чистота компонентов находится в пределах от 98.1 до 99.9%.

ПХБ: Aroclor 1254 (Supelco 4-4808). Одна ампула (1 см³) стандартного раствора содержит 200 мкг/см³ аналита с чистотой 99.8%.

ПАУ: (Supelco 4-8743, EPA 610 Polynuclear Aromatic Hydrocarbons Mix). Одна ампула (1 см³) стандартного раствора ПАУ содержит: аценафтен (1000), аценафтилен (2000), антрацен

(100), бенз(а)антрацен (100), бенз(а)пирен (100), бенз(б)флюорантен (200), бенз(г,и,к)периллен (200), бенз(к)флюорантен (100), хризен (100), дибенз(а,и)антрацен (200), флюорантен (200), флюорен (200), индено(1,2,3-сд)пирен (100), нафталин (1000), фенантрен (100), пирен (100). Суммарная концентрация компонентов в растворе метанол:метилхлорид (1:1) составляет 5800 мкг/см³, чистота компонентов находится в пределах от 97.4 до 99.9%.

Для приготовления стандартной смеси растворов аналитов содержимое одной ампулы стандартных растворов ХОП, ПХБ и ПАУ растворяли в ацетонитриле (ос.ч) и доводили объем тем же растворителем до 50 см³. Получали стандартную смесь аналитов концентрации 128.2 мкг/см³.

Для приготовления модельной смеси водный раствор Triton X-100 концентрации 4.0 г/дм³ подкисляли добавлением необходимого количества 8М соляной кислоты из расчета 100 мкл на 1 дм³. В полученный раствор вводили 1.0 см³ стандартной смеси аналитов. Концентрация соединений в модельной смеси равна $128.2 / 1000 / 1.0011 = 0.1281$ мкг/см³. Суммарная концентрация модельной смеси равна 4.1281 г/дм³.

Подготовка колонки для твердофазной экстракции. Стеклообразную колонку размером 12.5 × 140 мм заполняли сорбентом. Водную взвесь сорбента помещали в колонку и открывали нижний выход из колонки, при этом вода самотеком выходила, а сорбент оставался, удерживаемый полипропиленовой фриттой с размером пор

30 мкм. Такой способ упаковки создает равномерный по высоте слой сорбента, не допуская образования градиента по размеру зерен. Высота слоя сорбента – 140 мм (17.0–17.3 см³). В 1 см высоты слоя содержится 1.23 см³ сорбента. Упакованную колонку кондиционировали 150 см³ ацетонитрила. Колонку промывали водой, подкисленной из расчета 100 мкл/дм³ 8М соляной кислоты на 1 дм³ воды.

Проведение процесса сорбции. Раствор модельной смеси прокачивали перистальтическим насосом со скоростью 6.4 см³/мин до получения полного проскока. Линейная скорость – 5.0 (5.2) см/мин. Время прохождения раствора через сорбент от насоса (старт сорбционного процесса) до детектора (финиш сорбционного процесса) составляло 2.0 (2.7) мин. Величину сигнала регистрировали детектором Knauer K-200 при 254 нм и с помощью аналого-цифрового преобразователя. Раствор этой смеси объемом 1 дм³ проходит за 155 (156) мин. Интервал сорбционной кривой в течение 10 мин соответствует 64.0 см³ раствора (256 мг Triton X-100). После этого сорбент промывали подкисленной водой до получения стабильной базовой линии.

Элюирование сорбированных соединений проводили ацетонитрилом. Объем элюата доводили ацетонитрилом до 100 см³ и отбирали для анализа аликвоту 1.00 см³.

Характеристики сорбентов. В исследовании использовали различные амберлиты (Supelco), Polysorb-1 (НПО “Биолар”, Латвия) – фракция 0.1–0.25 мм и Poros C₁₈ (Applied Biosystems, USA) – фракция 20 мкм, табл. 1.

Таблица 1. Характеристики ППС, использованных в исследованиях.

№ п/п	Сорбент	ρ , (м.в.в.*), г/см ³	ρ , (м.с.в.*), г/см ³	$S_{уд}$, м ² /г	$d_{пор}$, А	r , mesh	$V_{пор}$, см ³ /г
1	XAD-2 (2-0275)	1.02	1.08	300	90		0.65
2	XAD-4 (2-0276)	1.02	1.08	725	40		0.98
3	XAD-7 (2-0277)	1.05	1.24	450	90		1.14
4	XAD-16 (1-0347)	1.02	1.08	800	100	20–60	1.82
5	XAD-1180 (1-0377)	1.01	1.04	600	300		1.68
6	XAD-2000 (1-0393)	1.02	1.09	580	42		0.64
7	XAD-2010 (1-0379)	1.02	1.09	660	280		1.80

* Плотность, г/см³ массы влажного(м.в.в) и сухого вещества (м.с.в.) при 25

Результаты и их обсуждение

В табл.2 для ХОП, ПХБ, ПАУ и других родственных соединений – полихлорированных дибензо-п-диоксинов (ПХДД) и фуранов (ПХДФ) – приведены физико-химические свойства, которые свидетельствуют о неполярности, гидрофобности и об ограниченной летучести этих веществ. Учитывая данные свойства соединений указанных

классов, а также тот факт, что оксигетилированные алкилфенолы (моно-, ди-, тритретбутилфенолы, нонилфенолы) широко распространены, идентифицированы в природных водах бассейна р. Днепр, хорошо солюбилизуют и удерживают гидрофобные вещества, в качестве модельного соединения выбрали неионогенное ПАВ – Triton X-100.

Таблица 2. Физико-химические свойства ХОП, ПХБ, ПХДД, ПХДФ и ПАУ [13–23].

Класс соединений	P, Па	Log K _{ow}	K, Па·м ³ /моль	S, мг/дм ³
ХОП	2·10 ⁻⁵ — 4 [13]	3 — 6.9 [13]	0.033 — 839.37 [13]	7·10 ⁻⁵ — 31.4 [13]
ПХБ	1.39·10 ⁻⁶ — 2.56 [14]	3.75 — 11.2 [14]	1.72 — 817.9 [14]	1.2·10 ⁻⁶ — 5.5 [14]
	1.3·10 ⁻⁴ — 1.2·10 ⁻³ [15]	5.8 — 8.4 [15]	2.2 — 28.1 [15]	3.1·10 ⁻⁶ — 0.27 [15]
		4.46 — 8.18 [16]		
ПХДД	2.77·10 ⁻⁷ — 1.04·10 ⁻⁴ [17]	4.45 — 8.7 [18]	0.133 — 14.82 [18]	7.4·10 ⁻⁸ — 0.417 [18]
	1.19·10 ⁻⁷ — 0.1 [18]	4.75 — 9.5 [19]	0.107 — 70.0 [19]	7.45·10 ⁻⁸ — 2.62 [19]
				7.4·10 ⁻⁸ — 1.67·10 ⁻² [20]
ПХДФ	1.3·10 ⁻⁶ — 1.2·10 ⁻⁴ [17]	5.0 — 8.87 [20]	0.26 — 6.39 [19]	1.15·10 ⁻⁶ — 2.1 [19]
	6.7·10 ⁻⁸ — 1.3 [18]			1.16·10 ⁻⁶ — 1.45·10 ⁻² [20]
ПАУ	6.74·10 ⁻⁶ — 47.1 [21]	3.26 — 6.5 [22]	0.027 — 46 [22]	2.6·10 ⁻⁴ — 31 [22]
	3.85·10 ⁻⁶ — 110 [23]	3.35 — 7.1 [23]	5.86·10 ⁻³ — 56.2 [23]	2.6·10 ⁻⁴ — 30.6 [23]

Примечание: давление насыщенного пара – P, Па; логарифм константы распределения указанных соединений в системе октанол / вода (коэффициент гидрофобности) – log K_{ow}; константа адсорбции Генри – K, Па·м³/моль; растворимость в воде – S, мг/дм³.

Проведена сорбция Triton X-100, содержащего смесь ХОП, ПХБ и ПАУ, на указанных ППС. Поскольку кривые сорбции получены для реальных фирменных образцов ППС, которые отличаются физико-химическими свойствами (S_{уд}, V_{пор}, d_{пор}, γ и др.), поэтому при пропускании модельного раствора наблюдали различное сопротивление сорбентов, т.е. сорбционные кривые получены при различных давлениях пропускаемого раствора через колонку, заполненную сорбентами. По этой причине время прохождения модельного раствора

через указанные сорбенты оказалось разным.

Поэтому полученные сорбционные кривые приведены к одной линейной скорости, которая характерна для сорбента Poros C₁₈. Данный сорбент по сравнению с другими обладает преимуществом – имеет самое минимальное время достижения равновесного состояния. Для каждой кривой рассчитаны соответствующие коэффициенты трансформации оси абсцисс (табл.3).

Таблица 3. Определение параметров сорбции смеси ХОП, ПХБ и ПАУ, солюбилизованных Triton X-100, ППС.

№ п/п	Сорбент	K _T	t ₀ , мин	t _x , мин	A _{dsc} (I), мг/см ³	A _{dsc} (II), мг/см ³	A _{sc max 100'} , мг/см ³	tga
1	Poros C ₁₈	1.00	10	11.5	17.3	18.1	15.9	23.3
2	Polysorb-1	1.44	3	4.5	6.8	9.0	46.5	23.3
3	XAD-4	1.15	4	9.5	14.3	16.6	92.9	6.4
4	XAD-16	1.30	8	18	27.1	28.6	94.7	3.5
5	XAD-2	1.23	9	21	31.6	31.6	97.5	2.2
6	XAD-7	1.20	16	21.5	32.4	33.1	129.4	6.4
7	XAD-2010	1.74	15	28	42.2	42.2	86.5	2.7
8	XAD-2000	1.24	25	46.5	70.8	69.3	149.4	1.6
9	XAD-1180	2.88	47	59	88.9	90.4	88.2	2.9

Примечание: K_T – коэффициент трансформации; t₀ – время до проскока, мин; t_x – время достижения 10%-ного значения от полной сорбционной емкости, мин; A_{dsc} – динамическая сорбционная емкость в экспериментах I и II, мг/см³; A_{sc max 100'} – сорбционная емкость через 100 мин, мг/см³; tga – скорость процесса на начальном участке сорбционной кривой.

Данный методический подход позволяет определить:

1. Полную сорбционную емкость сорбента Poros C₁₈. Выход кривой сорбции на плато соответствует 100% насыщения данного сорбента. Для этого следует определить сухой остаток

в аликвотах элюата и умножить на 100. Массу следует разделить на объем слоя сорбента, который составляет 17 см³. Величина сухого остатка должна находиться в диапазоне от 20 до 100 мг/см³ сорбента.

2. Динамическую сорбционную емкость (на уровне 5 или 10%). Для этого определяют время, в течение которого базовая линия поднимается на 5 или 10% от уровня плато. Полученное время умножают на скорость потока $6.4 \text{ см}^3/\text{мин}$ и на концентрацию $4.0 \text{ мг}/\text{см}^3$. Эта величина – динамическая сорбционная емкость колонки. Делением на объем слоя сорбента, получаем емкость 1 см^3 сорбента. Динамическая сорбционная емкость Poros C_{18} составляет: $12 \text{ мин} \cdot 6.4 \text{ см}^3/\text{мин} \cdot 4.0 \text{ мг}/\text{см}^3 / 17.0 \text{ см}^3 = 18.1 \text{ мг}/\text{см}^3$.

Нормализованные кривые сорбции приведены на рис.1.

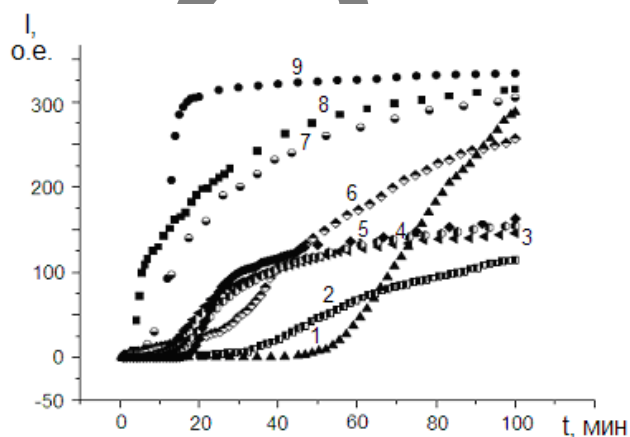


Рис.1. Нормализованные кривые сорбции Triton X-100 с солюбилизированными ХОП, ПХБ и ПАУ относительно линейной скорости сорбента Poros C_{18} : 1 – XAD-1180, 2 – XAD-2000, 3 – XAD-16, 4 – XAD-2, 5 – XAD-7, 6 – XAD-2010, 7 – XAD-4, 8 – Polysorb-1, 9 – Poros C_{18} .

Из этих кривых получены значения периода до проскока t_0 , мин; t_x – время, которое соответствует достижению 10% от уровня максимального значения сорбционной емкости; динамической сорбционной емкости A_{dsc} , тангенса угла наклона кривой в точке t_x или скорости процесса сорбции (табл.3).

Для сорбента Poros C_{18} выход на плато происходит быстро, и возвращение к нулю при элюировании – практически мгновенно (рис.2). Аналогичные кривые элюирования получены для всех исследуемых сорбентов.

Профиль элюирования для Poros C_{18} указывает на разделение групп компонентов модельной смеси в процессе десорбции. Из проведенного эксперимента следует, что сорбент Poros C_{18} можно применить для концентрирования высокомолекулярных соединений (50–100 кДа) на линейных скоростях потока до $10 \text{ м}/\text{ч}$. Для низкомолекулярных веществ возможно применение еще более высоких скоростей потока. Так как высокая скорость потока позволяет достигнуть равновесного состояния сорбции, то

полная сорбционная емкость Poros C_{18} должна быть близкой к динамической. Экспериментальные величины сорбционной емкости приведены в табл.3.

Медленный выход на плато у амберлитов XAD свидетельствует о возможности увеличения динамической емкости сорбентов путем снижения скорости потока.

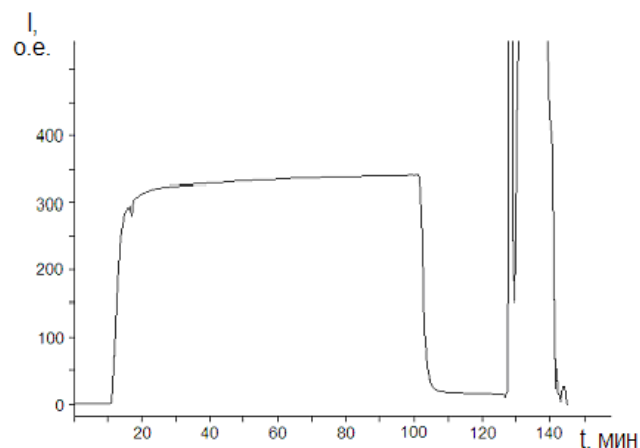


Рис.2. Концентрирование Triton X-100 с солюбилизированными ХОП, ПХБ и ПАУ сорбентом Poros C_{18} (участок до 100 мин) и элюирование ацетонитрилом в режиме on-line (участок 100–145 мин).

Обобщенный экспериментальный материал по сорбции смеси ХОП, ПХБ и ПАУ, солюбилизированных Triton X-100, указанными ППС можно представить в виде соответствующих рядов:

1. динамической сорбционной емкости
Polysorb-1 < XAD-4 < Poros C_{18} < XAD-16 < XAD-2 < XAD-7 < XAD-2010 < XAD-2000 < XAD-1180;
2. сорбционной емкости через 100 мин (рис. 1)
Poros C_{18} < Polysorb-1 < [XAD-4 < XAD-1180 < XAD-2010] < [XAD-7 < XAD-2 < XAD-16] < XAD-2000;
3. экспериментальной сорбционной емкости через 100 мин
Poros C_{18} < Polysorb-1 < [XAD-2010 < XAD-1180 < XAD-4] < [XAD-16 < XAD-2 < XAD-7] < XAD-2000.

Установлены ряды зависимостей динамической сорбционной емкости и экспериментальной сорбционной емкости через 100 мин, которые могут быть использованы для проведения процесса концентрирования органических токсикантов из природных вод, содержащих повышенные концентрации ПАВ, при применении ППС в установленном для каждого сорбента диапазоне скорости потока практически без проскока целевых аналитов.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных

исследований получены экспериментальные данные по концентрированию ХОП, ПХБ и ПАУ, солюбилизированных Triton X-100, ППС в экстремальных условиях проведения процесса: высокой скорости пропускания раствора,

высоких исходных концентрациях детергента и органических токсикантов (смесь ХОП, ПХБ и ПАУ суммарной концентрации 0.1281 мкг/см³/Triton X-100 концентрации 4.0 мг/см³) при постоянном объеме сорбента в кислой среде.

Литература

1. Milyukin M.V., Goncharuk V.V. *Khimicheskiy monitoring organicheskikh ekotoksikantov v vodnykh sistemakh*. Kiyev: Naukova dumka. 2015. 312 p.
2. Liu M., Cheng S., Ou D., Yang Y. et al. Organochlorine pesticides in surface sediments and suspended particulate matters from the Yangtze estuary, China. *Environmental pollution*. 2008, 156, 168–173.
3. He M., Sum Y., Li X., Yang Z. Distribution patterns of nitrobenzens and polychlorinated biphenyls in water, suspended particulate matter and sediment from mid- and down-stream of the Yellow River. *Chemosphere*. 2006, 65, 365–374.
4. Tang Z., Yang Z., Shen Z., Niu J. et al. Residues of organochlorine pesticides in water and suspended particulate matter from Yangthe River catchment of Wuhan, China. *Environ. Monit. Assess.* 2008, 137, 427–439.
5. Schoellhamer D.H., Mumley T.E., Leatherbarrow J.E. Suspended sediment and sediment-associated contaminants in San Francisco Bay. *Environmental pollution*. 2007, 105, P. 119–131.
6. Zhou J.L., Fileman T.W., Evans S., Donkin P. et al. Fluoranthene and pyrene in the suspended particulate matter and surface sediments of the Humber Estuary, UK. *Marine Pollution Bulletin*. 1998, 36 (7), 587–597.
7. Horowith A.J. Comparison of methods for the concentration of suspended sediment in river water for subsequent chemical analysis. *Environ. Sci. Technol.* 1986, 20, 155–160.
8. Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A., Zelenev A.S. *Colloid and surface chemistry*. Amsterdam: Elsevier. 2001. 748 p.
9. Lee J.-F., Liao P.-M., Kuo C.-C., Yang H.-T. et al. Influence of a nonionic surfactant (Triton X-100) on contaminant distribution between water and several soil solids. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2000, 229, 445–442.
10. Xiarchos I., Doulia D. Effect of nonionic surfactants on the solubilization ofalachlor. *Journal of Hazardous Materials B*. 2006, 136, P. 882–888.
11. Zhu L., Feng S. Synergistic solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons by mixed anionic-nonionic surfactants. *Chemosphere*. 2003, 53, 459–467.
12. Milyukin M.V., Skrynnyk M.M., Gorban M.V. Kонтентирование khlororganicheskikh pestitsidov i polikhlorirovannykh bifenilov na nositele guminovykh i fulvokislotakh iz vodnykh rastvorov poristymi polimernymi sorbentami. *Naukovyy visnyk Skhidnoyevropeys'koho natsional'noho universytetu imeni Lesi Ukrayinky*. 2014, 297(20), 14–25.
13. Suntio L.R., Shiu W.Y., Mackay D., Seiber J.N. et al. Critical review of Henry's law constants for pesticides. *Rew. Envir. Contam. Toxicology*. 1988, 103, 1–59.
14. Shiu W.Y., Mackay D. A critical review of aqueous solubilities, vapor pressures, Henry's law constants, and octanol-water partition coefficients of the polychlorinated biphenyls. *Journal of Physics and Chemistry Reference Data*. 1986, 15, 911–929.
15. Gdaniec-Pietryka M., Wolska L., Namiesnik J. Physical speciation of polychlorinated biphenyls in the aqueous environment. *Trends in Analytical Chemistry*. 2007, 26 (10), 1005–1012.
16. Hawker D.W., Connell D.W. Octanol-water partition coefficients of polychlorinated biphenyls congeners. *Environ. Sci. Technol.* 1988, 22, 382–387.
17. Eithier B.D., Hites R.A. Vapor pressure of chlorinated dioxins and dibenzofurans. *Environ. Sci. Technol.* 1988, 26 (22), 1362–1364.
18. Shiu Y.W., Doucette W., Gobas F.A.P.C., Andren A. et al. Physical-chemical properties of chlorinated dibenzo-p-dioxins. *Environ. Sci. Technol.* 1988, 22, 651–658.
19. Sacan M.T., Ozkul M., Erdem S.S. Physico-chemical properties of PCDD/PCDFs and phthalate esters. *SAR and QSAR in Environmental Research*. 2005, 16 (5), 443–459.
20. Friesen K.J., Wilk J., Muir D.C.G. Aqueous solubilities of selected 2,3,7,8-substituted polychlorinated dibenzofurans (PCDFs). *Chemosphere*. 1990, 20 (1–2), 27–32.
21. Lei Y.D., Chankalal R., Chan A., Wania F. Supercooled liquid vapour pressures of the polycyclic aromatic hydrocarbons. *J. Chem. Eng. Data*. 2002, 47, 801–806.
22. De Maagd R.G.J., ten Hulscher D.T.E.M., van den Heuvel H., Opperhuizen A. et al. Physicochemical properties of polycyclic aromatic hydrocarbons: aqueous solubilities, n-octanol/water partition coefficients, and Henry's law constants. *Environ. Toxicol. and Chem.* 1998, 17 (№ 2), 251–257.
23. Eastcott L., Shiu W.Y., Mackay D. Environmentally relevant physical-chemical properties of hydrocarbons: a review of data and development of simple correlations. *Oil and Chemical Pollution*. 1988, 4, 191–216.