

С.С. Ю¹, К.Х. Чу¹, Дж. С. Чой¹, К.Х. Ан^{1,2}, Б.В. Сун¹,
К.Б. Ко¹

ХАРАКТЕРИСТИКИ АДСОРБЦИИ ПЕРХЛОРАТА АНИОНООБМЕННОЙ СМОЛОЙ TRILITE НА ВОЕННЫХ ОБЪЕКТАХ В КОРЕЕ

¹ Университет Енсе, г. Сеул;

²Строительно-технологический институт,

г. Кенгидо, Южная Корея

kbko@yonsei.ac.kr, foreverchu@yonsei.ac.kr

Изучен метод удаления перхлоратов изотермической адсорбцией на анионо-обменной смоле Trilite, представлены ее характеристики. Анализ полученных результатов свидетельствует о перспективности локального применения Trilite для удаления перхлората. Методами линейной и нелинейной регрессии определены параметры и изотермы адсорбции. Показано, что оптимальная адсорбция описывается изотермами Ленгмюра и Редлиха-Патерсона. Потенциальные возможности для локального применения Trilite определены уравнением изотермы Ленгмюра. Значение $R_s=0,028$ вполне удовлетворяло условию $0 < R_s \ll 1$, что позволило рассматривать Trilite как эффективный адсорбент перхлората.

Ключевые слова: военные объекты, изотерма адсорбции, линейный и нелинейный методы, перхлорат, Trilite.

Введение. Анион перхлората (ClO_4^-) производится в виде твердых солей перхлората аммония, калия и натрия [1]. Они очень хорошо растворяются в воде и могут многими десятилетиями оставаться в поверхностных и подземных водах [2]. Перхлорат используется в качестве окислителя в твердых топливах для реактивных снарядов, ракет и пиротехнических средств (фейерверков) [3]. Согласно нормативным документам Агентства США по охране окружающей среды (АООС США [US EPA]), ЕС и ВОЗ это вещество не относится к классу канцерогенных, однако оно оказывает негативное воздействие на систему органов дыхания и кожу. По данным некоторых исследований [4], попадание его в организм взрослого человека (массой 70 кг) в количестве $> 0,40$ мг/кг в 1 сут может вызы-

© С.С. Ю, К.Х. Чу, Дж. С. Чой, К.Х. Ан, Б.В. Сун, К.Б. Коа, 2015

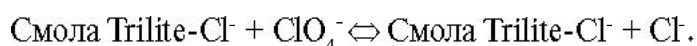
вать гипотиреоз и нейроповеденческие заболевания. У младенцев и детей перхлорат даже в очень малых количествах, составляющих 0,01 мг/кг в 1 сут, может также вызывать йододефицит, что является главной причиной инвалидности, связанной с неврологической патологией развития. АООС США установило референтную дозу для перхлората, равную 0,7 мкг/кг в 1 сут, с целью минимизации неблагоприятных эффектов у чрезвычайно чувствительных людей. В отчете, подготовленном АООС США совместно с Национальной Академией наук, предлагается установить эквивалентный уровень для питьевой водопроводной воды (ЭУПВ) $< 24,5 \text{ мкг/дм}^3$ [5].

Удаление перхлората с помощью обычных процессов коагуляции, фильтрования и очистки активным углем оказывается не очень успешным. В настоящее время относительно эффективные методы удаления включают ионообменный и биологический процессы, очистку активным углем и мембранные процессы. Ионный обмен – наиболее распространенный метод, который доказал на практике свою наибольшую эффективность [6]. В 1997 г. Калифорнийский департамент по вопросам здравоохранения инициировал первое исследование концентрации перхлората в питьевой воде и воде р. Колорадо [7]. С тех пор были проведены различные исследования фактического загрязнения питьевой воды. Полученные данные указывают, что перхлорат на военных объектах в США содержится ($> 90 \%$) в топливе для ракет и реактивных снарядов, и эти военные объекты являются основными источниками загрязнения перхлоратом [8, 9]. Что касается ситуации в Корее, то максимальные концентрации перхлората, составляющие 286 мкг/дм^3 , зафиксированы на станции очистки сточных вод в провинции Гуми и $90,8 \text{ мкг/дм}^3$ – на производственных предприятиях по выпуску жидкокристаллических индикаторов (ЖКИ). Кроме того, концентрации перхлората в пяти пунктах, начиная с верхнего течения и далее вниз по течению р. Накдонг, составляли соответственно 82,1; 34,1; 18,3; 13,6 и $12,6 \text{ мкг/дм}^3$ [10–12].

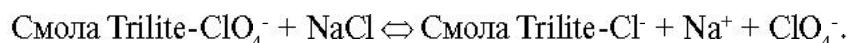
Исследования, связанные с определением содержания перхлората, продолжались, и в 2010 г. перхлорат был добавлен в перечень загрязняющих веществ, учитываемых при оценке качества питьевой воды. Однако по сравнению с США изучение фактической ситуации в Корее в отношении загрязнения перхлоратом является не полным. Особенно важно исследование военных объектов для восстановления (ремедиации) окружающей среды и устранения загрязнения перхлоратом.

Цель данной работы – оценка потенциальных возможностей для удаления перхлората с помощью сильноосновной анионообменной гелевой смолы Trilite. Были проведены эксперименты по изотермической адсорбции, которые позволили определить характеристики адсорбции перхлората на Trilite. Эти результаты использовали для оценки перспектив локального применения Trilite для ремедиации от загрязнения перхлоратом.

Методика эксперимента. Пробы предварительно пропускали сквозь фильтр (0,45 мкм) с картриджем Sep-Pak Plus C18 для удаления гидрофобных материалов и органического вещества. Анализ перхлората в пробах осуществляли с помощью ионной хроматографии (Dionex, DX-500) при $4 \pm 2^\circ\text{C}$ и продолжительности изотермического выдерживания 28 сут. Ионную хроматографию осуществляли с использованием колонки Ion Pac AS16 и защитной колонки (предколонки) AG16, содержащей 50 мМ NaOH ("Fisher Scientific"), 50 % в массовом отношении в качестве элюента. Стандартный раствор (100 мг/дм^3) готовили из особо чистого препарата NaClO_4 (98 %) компании "Junsei" и затем разводили дистиллированной водой по мере необходимости. Для удаления перхлората использовали Trilite SAR 10MB (смешанная), производимую компанией "Samayang" (Корея). Удаление перхлората из воды с помощью этой сильноосновной смолы может быть описано следующей реакцией:



Когда достигается точка "проскока адсорбента", т.е. точка, в которой определенное количество сточных вод, поступающих на очистку, обнаруживается в вытекающих очищенных сточных водах, данная смола может быть восстановлена с помощью раствора NaCl в соответствии с реакцией



Смола Trilite состояла из полистирола и дивинилбензола как сополимеров третьего уровня аминизации. Формой ионного обмена являлся ион Cl^- . Trilite промывали несколько раз дистиллированной водой и хранили в 20 %-ном растворе NaCl для удаления примесей с поверхности смолы.

Эксперименты по изотермической адсорбции. В коническую колбу (500 см³) помещали 250 см³ раствора перхлората с концентрацией от 150 до 2000 мг/дм³, после чего к раствору добавляли 3 см³ Trilite. Фиксированный уровень рН составлял 6, поскольку предыдущее исследование [13] показало, что адсорбционная способность поглощения перхлората для адсорбентов не связана с уровнями рН в интервале от 3 до 9. Затем конические колбы встряхивали в течение 100 мин при постоянной частоте вращения 210 об/мин в качалке с водяным термостатом при 25°С. Далее Trilite снова удаляли из раствора путем фильтрования, и концентрацию перхлората в фильтрате исследовали с помощью ионной хроматографии.

Равновесная адсорбционная способность q_e (мг/см³) была получена с помощью уравнения

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}, \quad (1)$$

где C_0 и C_e – соответственно начальная и равновесная концентрации в растворе (мг/дм³); V – объем раствора (дм³); m – объем использованного адсорбента (см³).

Изотермы адсорбции. Установление надлежащего соотношения равновесия между Trilite и концентрацией перхлората было необходимо для проверки полученных экспериментальных данных равновесия относительно удаления перхлората при использовании ряда моделей изотерм, представленных в данной работе. Изотермы адсорбции исследовали с помощью линейного метода наименьших квадратов и нелинейных методов трех моделей (изотермы Ленгмюра, Фрейндлиха и Редлиха-Петерсона).

Изотерма Фрейндлиха [14] является наиболее ранней из известных зависимостей, описывающих процесс адсорбции, и может быть представлена как

$$q_e = K_F C_e^{1/n}, \quad (2)$$

где K_F и $1/n$ – эмпирические константы.

Изотерму Ленгмюра [15] часто используют для описания адсорбции растворенного вещества из жидкого раствора:

$$q_e = \frac{q_m K_a C_e}{1 + K_a C_e}, \quad (3)$$

где q_m – максимальная адсорбционная способность (мг/см); K_a – адсорбционная константа равновесия (дм³/мг).

Изотерму Редлиха-Петерсона [16], содержащую три параметра и включающую свойства изотермы Фрейндлиха и Ленгмюра, можно записать следующим образом:

$$q_e = \frac{\Lambda C_e^g}{1 + B C_e^g}, \quad (4)$$

где A, B, C и g ($0 < g < 1$) – константы Редлиха-Петерсона.

Для определения параметров изотермы в случае использования нелинейного метода была применена оптимизация методом проб и ошибок. При этом использовали стандартную программу оптимизации для повышения коэффициентов детерминации (смешанной корреляции) между экспериментальными данными и изотермами, которые были использованы встроенной решающей программой электронной таблицы фирмы "Майкрософт" (Microsoft Excel) [17]. Коэффициент детерминации (R^2) представляет собой выраженную в процентах изменчивость экспериментальных данных зависимой переменной, имеющей вид:

$$R^2 = \frac{\sum (q_i - \bar{q}_e)^2}{\sum (q_i - \bar{q}_e)^2 + \sum (q_i - q_e)^2}, \quad (5)$$

где q_i – равновесная адсорбционная способность, полученная из модели изотермы; \bar{q}_e – среднее для значений q_e .

Результаты и их обсуждение. *Анализ отбора проб.* Отчет Отдела по восстановлению и повторному использованию федеральных объектов при АОС США (FERPO) [8] был использован в качестве системы критериев при проведении отбора проб перхлората всего в 16 пунктах, включая один завод по производству боеприпасов, два предприятия для хранения боеприпасов и управления их снабжением, 12 крупных тиров и один пункт захоронения боеприпасов. Из близлежащих

водных систем в каждом пункте проверки осуществляли отбор проб воды. В результате всего было получено 94 пробы (5 – 6 проб в каждом пункте). Эти пункты (рис. 1) и экспериментальные данные подробно обсуждались в предыдущем исследовании [18], в котором минимальный предел обнаружения перхлората составил 1,06 мкг/дм³, а нижняя граница определяемых концентраций методом ЕРА 314.0 – 4 мкг/дм³.

При общем числе проб 94 перхлорат не был обнаружен в 84 пробах, в четырех пробах определены очень низкие концентрации перхлората. Концентрации, равные 4,6; 6,0; 6,7; 12,4; 19,2 и 107,7 мкг/дм³, определены в шести пробах. Эти данные подобны тем, которые были получены на военных объектах США [19], где низкие концентрации перхлората зафиксированы в большинстве пунктов, а высокие – лишь в некоторых пунктах отбора проб (см. рис. 1). Максимальная концентрация перхлората на военных объектах Кореи составила 107,7 мкг/дм³, тогда как на военных объектах США – 160; 210 и 2600 мкг/дм³. Различия в обнаруженных максимальных концентрациях на военных объектах США и Кореи могли быть результатом различий в количествах и частоте использования перхлората в двигательных установках ракет и реактивных снарядов. Вооруженные силы Кореи имеют ограниченную сферу использования перхлората, тогда как армия США широко использует перхлорат в различных областях; именно этот фактор, по мнению специалистов, повлиял на конечный результат измерений.

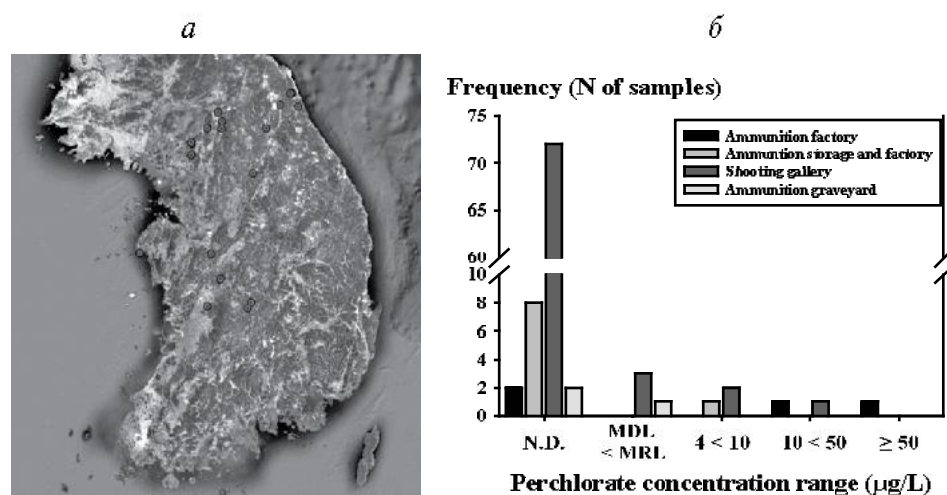


Рис. 1. Пункты отбора проб (а), частота отбора проб и диапазоны концентраций перхлората (б).

Сравнение отчетов США и частных национальных (корейских) предприятий показало, что количество перхлората, производимого военными объектами Кореи, очень мало. Однако его максимальная концентрация ($107,7 \text{ мкг/дм}^3$) при производстве боеприпасов превысила ЭУПВ ($24,5 \text{ мкг/дм}^3$), поэтому перхлорат следует удалять. Концентрации перхлората на предприятиях для хранения боеприпасов и управления их снабжением ($6,7 \text{ мкг/дм}^3$), а также в крупных тирах ($4,8$; $6,0$ и $12,4 \text{ мкг/дм}^3$) были ниже ЭУПВ ($24,5 \text{ мкг/дм}^3$). Но так как эти уровни зафиксированы выше нормы для питьевой воды в Нью-Йорке (5 мкг/дм^3) и Нью-Мексико (1 мкг/дм^3), дальнейшие измерения в будущем необходимы.

Результаты экспериментов по изотермической адсорбции. Использование анионообменной смолы Trilite для удаления перхлората изучено недостаточно полно. Характеристики изотермической адсорбции были впервые исследованы путем проведения периодического эксперимента. Использование некоторых боеприпасов США корейской армией способствовало тому, что в Корею может быть обнаружена концентрация перхлората, подобная таковой при исследованиях в США, поэтому выбран диапазон начальных концентраций, равный $150 - 2000 \text{ мг/дм}^3$. Результаты измерения рабочих характеристик при проведении эксперимента по изотермической адсорбции были проанализированы с использованием изотерм Фрейндлиха, Ленгмюра и Редлиха-Петерсона при применении линейных и нелинейных регрессионных методов. Данные, полученные при помощи линейного метода, показаны в табл. 1. Значения величин $1/n$ и K_F для изотермы Фрейндлиха при использовании линейного регрессионного метода составили соответственно $0,241$ и $28,1 \text{ мг/см}^3 \cdot \text{дм}^3/\text{мг}$. Значение величины $1/n$ в диапазоне от $0,1$ до $0,5$ указывает, что загрязняющие вещества могут быть легко адсорбированы. Поэтому было предположено, что удаление перхлората с помощью Trilite должно быть эффективным, однако коэффициент детерминации (R^2) составил $0,876$, что ниже, чем для других изотерм адсорбции.

Линейный анализ с использованием четырех различных линейных форм уравнения Ленгмюра существенно влияет на расчет параметров и приводит к их различным оценкам. Более популярной линейной формой является форма Ленгмюр-1, что обусловлено минимальными отклонениями от эмпирического уравнения, которые определяют распределение ошибки [20, 21]. Среди четырех линейных форм уравнения

Ленгмюра коэффициент детерминации Ленгмюр-1 оказался наивысшим ($R^2 = 0,998$) при удалении перхлората с помощью Trilite. Максимальная адсорбционная способность (q_m) составила 145 мг/см³, что по сравнению с результатами предыдущего исследования по удалению перхлората с помощью других видов ионообменных смол [13] указывает на высокий уровень адсорбции.

Таблица 1. Параметры изотерм, полученные с использованием метода линейной регрессии

Изотерма	Линейная форма	Параметр	Значение	R^2
Фрейндлиха	$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e)$	1/n	0,241	0,876
		K_F (мг/см ³ дм ³ /мг)	28,1	
Ленгмюра-1	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{K_a q_m}$	q_m (мг/см ³)	145	0,998
		K_a (дм ³ /мг)	0,021	
Ленгмюра-2	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_a q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m}$	q_m (мг/см ³)	137	0,956
		K_a (дм ³ /мг)	0,025	
Ленгмюра-3	$q_e = q_m - \frac{1}{K_a} \frac{q_e}{C_e}$	q_m (мг/см ³)	141	0,898
		K_a (дм ³ /мг)	0,022	
Ленгмюра-4	$\frac{q_e}{C_e} = K_a q_m - K_a q_e$	q_m (мг/см ³)	144	0,898
		K_a (дм ³ /мг)	0,020	
Редлиха-Петерсона	$\ln(A C_e / q_e - 1) - g \ln(C_e) + \ln(B)$	g	0,774	0,988
		B (дм ³ /мг)	0,992	
		A (дм ³ /мг)	31,2	

Особенностью изотермы Редлиха-Петерсона является то, что когда значение параметра g приближается к единице, она превращается в изотерму Ленгмюра. Согласно полученным данным коэффициент детерминации составил 0,988, однако значение g равнялось 0,774, что указывает на тенденцию, схожую с изотермой Фрейндлиха, в отличие от изотермы Ленгмюра. На рис. 2 сравниваются изотермы Ленгмюра-1, Фрейндлиха и Редлиха-Петерсона с экспериментальными данными, полученными для адсорбции перхлората на Trilite. При этом изотерма Ленгмюра-1 продемонстрировала наилучшее совпадение с экспериментом. Однако изотермы Ленгмюра-1 и Редлиха-Петерсона показали

различные результаты, несмотря на то, что коэффициенты детерминации были большими для обеих изотерм. Преобразование нелинейных уравнений изотерм в линейные формы не явно изменяет ошибку, и может также изменить дисперсию ошибки и нарушить предположения о нормальности распределения для стандартного метода наименьших квадратов. Использование коэффициентов детерминации метода линейного анализа считалось неуместным для сравнения решений по определению параметров изотермы с использованием исходных форм различных изотерм [22]. Неустранимое смещение, обусловленное линеаризацией, подтолкнуло нас к идее об определении альтернативных параметров изотермы с помощью нелинейного метода. Коэффициенты детерминации при использовании линейного метода были очень большими (см. табл. 1), однако результаты, полученные на основании представленных изотерм (рис. 3) для нелинейных уравнений изотермы, не соответствовали коэффициентам детерминации. Коэффициент детерминации для изотермы Редлиха-Петерсона ($R^2 = 0,998$) был значительно выше, чем таковой для изотермы Фрейндлиха ($R^2 = 0,876$). Однако он почти совпал с изотермой Фрейндлиха. Это позволило строго математически получить исходную форму уравнения изотермы [22, 23]. Поэтому нелинейные варианты изотерм Фрейндлиха, Ленгмюра и Редлиха-Петерсона были рассчитаны для моделирования данных равновесной адсорбции.

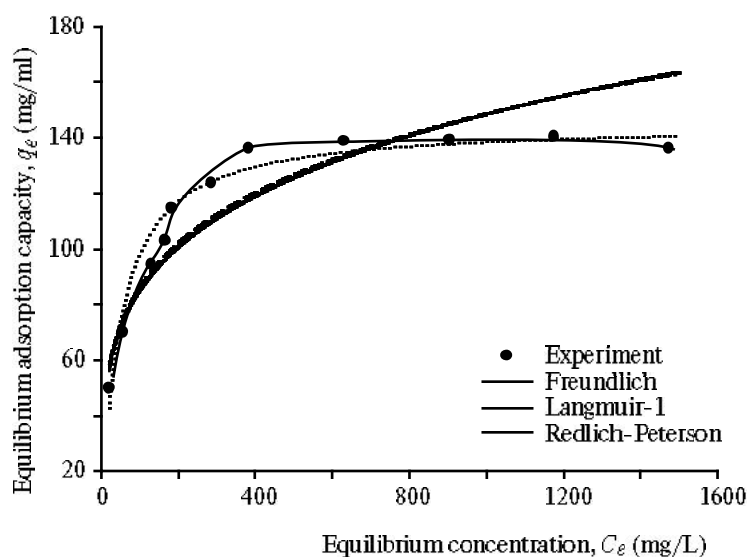


Рис. 2. Изотермы, полученные с помощью метода линейной регрессии, для адсорбции перхлората на Trilite.

В табл. 2 представлены параметры изотерм, которые были получены с помощью нелинейного метода, а на рис. 3 – параметры изотерм, которые позволяют сравнить изотермы Ленгмюра, Фрейндлиха и Редлиха-Петерсона с экспериментальными данными для адсорбции ионов перхлората на Trilite. Результаты и структуры ошибок для четырех линейных форм изотермы Ленгмюра были такими же, как преобразования нелинейных уравнений Ленгмюра. Постоянные Ленгмюра для линейного и нелинейного методов получились разными. Значения параметров K_a и q_m для изотермы Редлиха-Петерсона составили соответственно 0,021 дм³/мг и 145 мг/см³ в случае линейного метода и 0,017 дм³/мг и 147 мг/см³ – в случае нелинейного метода. Изотерма Редлиха-Петерсона показывает, что коэффициент детерминации при использовании нелинейного метода был меньше, чем при использовании метода линейной регрессии (см. табл. 1, 2).

Таблица 2. Параметры изотерм, полученные с помощью метода нелинейной регрессии

Изотерма	Параметр	Значение	R^2
Фрейндлиха	$1/n$	0,192	0,831
	K_f (мг/см ³ дм ³ /мг)	37,6	
Ленгмюра	q_m (мг/см ³)	147	0,968
	K_a (дм ³ /мг)	0,017	
Редлиха-Петерсона	g	0,998	0,968
	B (дм ³ /мг)	0,018	
	A (дм ³ /мг)	2,56	

Однако изотерма Редлиха-Петерсона, полученная при использовании метода нелинейной регрессии (см. рис. 3), более гармонична, чем полученная при использовании метода линейной регрессии (см. рис. 2). На рис. 3 также показано, что изотерма Ленгмюра подобна изотерме Редлиха-Петерсона, так как коэффициенты детерминации одинаковые и изотерма Редлиха-Петерсона имеет значение параметра g близкое к единице, т.е. она приближается к изотерме Ленгмюра. Таким образом, изотермы Ленгмюра и Редлиха-Петерсона, полученные при использовании нелинейного метода, являются, видимо, наиболее эффективными моделями для описания адсорбции ионов перхлората на ионообменной смоле Trilite.

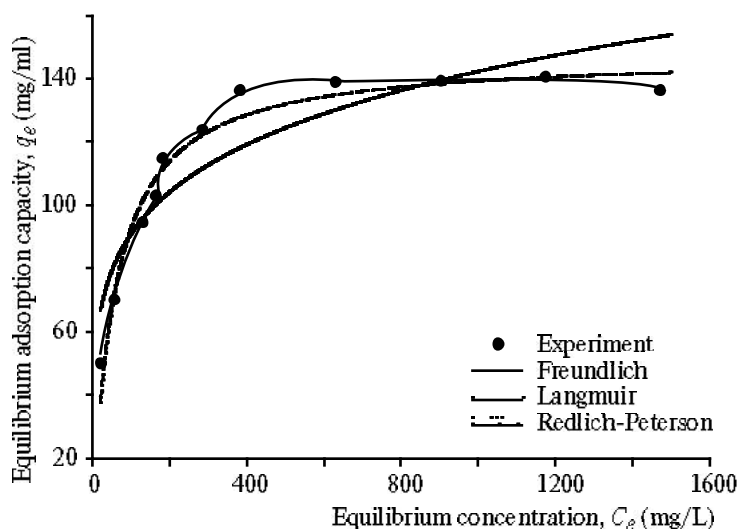


Рис. 3. Изотермы, полученные с помощью метода нелинейной регрессии, для адсорбции перхлората на Trilite.

Оценка перспектив локального применения Trilite. Изотерму оптимальной адсорбции, полученную на основании эксперимента по изотермической адсорбции, использовали для оценки перспектив локального применения Trilite. В частности, в качестве изотермы оптимальной адсорбции в случае применения нелинейного метода были приняты изотермы Ленгмюра и Редлиха-Петерсона. Однако при этом использовали более простую формулу изотермы Ленгмюра (по сравнению с изотермой Редлиха-Петерсона). Изотерма Ленгмюра позволяла оценивать перспективы локального применения Trilite для адсорбции с помощью коэффициента разделения R_s , который определяли через параметр K_a [24] по формуле

$$R_s = \frac{1}{1 + K_a C_0}. \quad (6)$$

Как правило, изотерму адсорбции, которая может быть определена на основе эксперимента по изотермической адсорбции, можно разделить на четыре формы А, В, С и D (рис. 4, а) [25]. Когда адсорбент, имеющий изотерму адсорбции, подобную формам А, В, С и D, использовали в непрерывном производственном процессе, кривая "момента проскока адсорбента" имела вид, показанный на рис. 4, б. В случае кривой "момента проскока" левый и верхний диапазоны связаны непосредственно с величиной адсорбции. Адсорбент, имеющий

изотерму адсорбции в виде форм А и В, обладает лучшими данными для локального применения, чем адсорбент, имеющий формы С и D. Поэтому перспективы локального применения оценивали с использованием этих форм изотерм адсорбции, и каждая форма отличалась набором параметров. Формы изотермы Ленгмюра в соответствии со значениями параметра K_a показаны в табл. 3.

Значение R^2 равнялось 0,028, удовлетворяя условию $0 < R_s \ll 1$, что соответствует "очень благоприятной" форме. Поэтому адсорбент Trilite следует рассматривать как одну из альтернатив для эффективного удаления перхлората. Использование Trilite в данной работе не вызвало никаких серьезных проблем, поскольку Trilite – сильноосновная анионообменная смола с высоким уровнем избирательности к перхлорату (избирательность определяется следующим рядом: $\text{CrO}_4^- > \text{ClO}_4^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Br}^- > \text{HPO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} > \text{Cl}^- > \text{OH}^- > \text{F}^-$) [6]. Кроме того, уровни концентрации ионов, которые могут препятствовать удалению перхлората, на военных объектах оказались ниже, чем в типичных сточных водах [13].

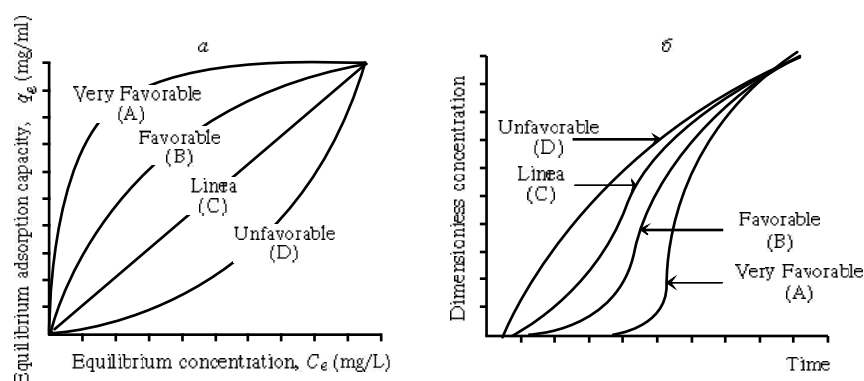


Рис. 4. Формы изотерм адсорбции (а): А – очень благоприятная, В – благоприятная, С – линейная, D – неблагоприятная; типичные профили концентраций (б).

Таблица 3. Формы изотермы Ленгмюра в соответствии со значениями параметра K_a

Параметр	R_s	Формы изотермы
K_a	$R_s > 1$	Неблагоприятная
	$R_s = 1$	Линейная
	$0 < R_s < 1$	Благоприятная
	$0 < R_s \ll 1$	Очень благоприятная

Выводы. Определены основные причины присутствия перхлората на военных объектах Кореи и разработан эффективный метод его удаления с использованием сильноосновной анионообменной смолы Trilite. Также проведен эксперимент по изотермической адсорбции для исследования характеристик адсорбции перхлората на Trilite. После оценки полученных результатов выявлены хорошие перспективы для локального применения Trilite с целью удаления перхлората.

Резюме. Вивчений метод видалення перхлоратів ізотермічною адсорбцією на аніонообмінній смолі Trilite, представлені його характеристики. Аналіз отриманих результатів свідчить про хороші перспективи локального вживання Trilite для видалення перхлората. Методами лінійної і нелінійної регресії визначені параметри і ізотерми адсорбції. Показано, що ізотермами оптимальної адсорбції є ізотерми Ленгмюра і Редліха-Патерсона. Потенційні можливості для локального вживання Trilite визначені рівнянням ізотерми Ленгмюра. Значення $R_s = 0,28$ повністю задовільняло умові $0 < R_s \ll 1$, що дозволило розглядати Trilite як ефективний адсорбент перхлорату.

S.S. Yoo, K.H. Chu, J.S. Choi, K.H. Ahn, B.W. Sung, K.B. Ko

TRILITE ADSORPTION CHARACTERISTICS FOR PERCHLORATE FROM KOREAN MILITARY FACILITIES

Summary

A method has been investigated of perchlorate removal by isothermal adsorption on Trilite and its characteristics are presented. Analysis of results

obtained show potential of local application of Trilite for perchlorate removal. Parameters of adsorption as well as adsorption isotherms were determined by the methods of linear and non-linear regression. It has been shown that isotherms of optical adsorption are Langmuir and Redlich-Peterson isotherms. Potential possibilities for local application of Trilite are determined by the equation of Langmuir isotherm. The value of R_s equal to 0,028 fits well will condition $0 < R_s \ll 1$ which gives the right to consider Trilite as an effective adsorbent for perchlorate.

Список использованной литературы

- [1] *Susarla S., Collette T.W., Garrison A.W., Wolfe N.L., Mccutcheon S.C.* // Environ. Sci. and Technol. – 1999. – **33**, N 19. – P. 3469–3472.
- [2] *Motzer W.E.* // Environ. Forensics. – 2001. – **2**, N 2. – P. 301–311.
- [3] *Urbansky E.T.* // Bioremediation. – 1998. – **2**, N 2. – P. 81–95.
- [4] *National Research Council. Health Implications of Perchlorate Ingestion.* – Washington, DC, United States: The National Academy of Sciences, 2005. – 276 p.
- [5] *US Environmental Protection Agency (US EPA)* // Pollut. Eng. – 2005. – **37**, N 4. – P. 8.
- [6] *Her N.G., Yoon Y.M., Jeong J.W.* // J. Korean Geoenviron. Soc. – 2007. – **8**, N 1. – P. 57–62.
- [7] *Hogue C.* // Chem. Eng. News. – 2003. – **81**, N 33. – P. 37–46.
- [8] *US Environmental Protection Agency (US EPA). Perchlorate Treatment Technology Update-Federal Facilities Forum Issue Paper.* – Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2005. – 84 p.
- [9] *National Research Council. Science and Decisions: Advancing Risk Assessment.* – Washington, DC, United States: The National Academies Press, 2009. – 403 p.
- [10] *Kim H.B., Oh J.E., Lee S.Y., Cho J.W., Snyder S.* // J. Korean Soc. Environ. Eng. – 2006. – **28**, N 7. – P. 776–781.
- [11] *Jeong H.J.* The Study on Perchlorate Concentration near Major Source Areas of Perchlorate. – Seoul: Seoul National University, 2007. – 77 p.
- [12] *Son H.J., Jung C.W.* // J. Korean Soc. Environ. Eng. – 2007. – **29**, N 4. – P. 438–443.
- [13] *Park S.M., Jeon B.H., Jeong H., Paeng K.J.* // Anal. Sci. Technol. – 2010. – **23**, N 5. – P. 429–436.
- [14] *Freundlich H.M.F.* // Z. Phys. Chem. – 1906. – **57**, N A. – S. 385–470.

- [15] *Langmuir I.* // *J. Amer. Chem.* – 1918. – **40**. – P. 1361–1403.
- [16] *Redlich O., Peterson D.L.* // *J. Phys. Chem.* – 1959. – **63**. – P. 1024.
- [17] *Ho Y.S., Chiu W.T., Wang C.C.* // *Biores. Technol.* – 2005. – **96**, N 11. – P. 1285–1291.
- [18] *Chui J.S., Um C.Y., Chu K.H., Ham S.K., Lee J.H., Yoo S.S., Ko K.B.* // *J. Korean Soc. Water Quality.* – 2012. – **28**, N 3. – P. 460–466.
- [19] *The Interstate Technology & Regulatory Council Perchlorate Team. Perchlorate: Overview of Issues, Status, and Remedial Options.* – Washington, DC: Interstate Technology & Regulatory Council, 2005. – 152 p.
- [20] *Kinniburgh D.G.* // *Environ. Sci. and Technol.* – 1986. – **20**, N 9. – P. 895–904.
- [21] *Longhinotti E., Pozza F., Furlan L., Sanchez M.D.N.D., Klug M., Laranjeira M.C.M., Favere V.T.* // *J. Braz. Chem. Soc.* – 1998. – **9**, N 5. – P. 435–440.
- [22] *Ho Y.S.* // *Carbon.* – 2001. – **42**, N 10. – P. 2115–2116.
- [23] *Seidel A., Gelbin D.* // *Chem. Eng. Sci.* – 1988. – **43**, N 1. – P. 79–89.
- [24] *Hall K.R., Eagleton L.C., Acrivos A., Vermeulen T.* // *Ind. Eng. Chem. Fund.* – 1966. – **5**, N 2. – P. 212–223.
- [25] *Slejko F.L. Adsorption Technology.* – New York: Marcel Dekker Inc., 1985. – 240 p.

Поступила в редакцию 17.09.2012 г.