

## **ФОРМАЛЬНАЯ КИНЕТИКА ГЕТЕРОГЕННОГО КАТАЛИЗА И ДИНАМИКА СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СЛОЖНЫХ РАСТВОРОВ**

**И. А. Агеева, О. Б. Андронов, А. А. Ключников**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль*

Рассматривается подход к созданию инструмента анализа и расчета сорбционных процессов очистки сложных растворов радиоактивно загрязненных вод (РЗВ) на основе формализации механизма кинетики гетерогенного катализа для уровня малого объема. Это первая работа из серии, посвященной разработке высокотехнологичных систем обращения с РЗВ и, в частности, с жидкими радиоактивными отходами.

### **Введение**

Проблема обращения с РАО в атомной энергетике Украины – национальная проблема. Ее комплексное решение выходит за рамки отрасли [1]. Однако отраслевой уровень позволяет решить ряд важных задач, направленных на минимизацию отходов, среди которых преобладают продукты переработки радиоактивно загрязненных вод (РЗВ).

Высокая динамика производства и накопления объемов этих продуктов обусловлена, главным образом, большими масштабами упаривания, применяемого в системе обращения с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО). Для изменения этого положения необходима альтернатива термоконцентрированию, способная сыграть ключевую роль в совершенствовании концепции сбора, очистки и утилизации жидких отходов с целью существенного снижения показателя отношения производимого объема утилизированного продукта к единице энерговыработки АЭС. Такая альтернатива принципиально известна. Это селективная сорбция.

Стабильный и активный интерес к сорбционным технологиям обращения с РЗВ (и, в частности, с ЖРО АЭС) привел к появлению целого ряда селективных сорбентов, обладающих необходимыми для решения задачи характеристиками. Особое место занимает большая группа дешевых порошковых (и, как правило, низкопрочных) сорбентов на основе природных минералов (например, цеолитов). Среди них широко представлены сорбенты отечественного производства [2, 3].

Слабые темпы развития паудекс-технологии и, в целом, технических средств очистки техногенных вод на действующих отечественных АЭС в настоящее время не позволяют естественным способом адаптировать сорбенты нового поколения к условиям работы на морально устаревшем оборудовании. Искусственная же адаптация сорбционных материалов существенно нивелирует их преимущества.

Итак, вопрос минимизации РАО – это в существенной мере вопрос разработки и внедрения современных высокотехнологичных систем сорбционной очистки и изменения действующей отечественной концепции обращения с ЖРО.

Технический подход к решению практических инженерных задач в данном направлении должен основываться на результатах аналитического рассмотрения комплекса вопросов, которые тематически можно формулировать так: формальная кинетика гетерогенного катализа и динамика сорбционной очистки сложных растворов; динамика сорбции и гидродинамика процесса очистки РЗВ в различных режимных условиях; начальное и оперативное тестирование сорбентов, задача и технология реализации; оптимизация самодостаточных технологий очистки и утилизации жидких отходов по ключевым параметрам; основы гибкой технологии в сфере обращения с РЗВ различного происхождения; сорбционно-термическая технология очистки ЖРО и ее применение; о создании высокотехнологичной системы сорбционной очистки ЖРО; разработку инструмента комплексных расчетов высокоэффективных сорбционных систем, отвечающих требованиям высоких технологий; изменение концепции обращения с ЖРО на отечественных АЭС; направления и задачи специальных и при-

кладных исследований в сфере сорбционных технологий обращения с ЖРО на отечественных объектах ядерной энергетики.

В настоящей статье представлена в кратком изложении первая из перечисленных выше тем.

### Кинетика сорбции

Сорбция – понятие широкое (адсорбция, адгезия, сокристаллизация и т.д.). В целом это гетерогенный катализ, т.е. катализ на твердом катализаторе.

В плане рассматриваемой задачи интерес представляют кинетические закономерности, которые могут контролироваться как законами собственно химической кинетики, так и закономерностями массопереноса и законами адсорбции.

Для выхода на практический инструмент расчетов требуется формализация гетерогенно-каталитического процесса, когда его закономерности можно представить формально простыми лимитирующими стадиями. В этом случае объектом анализа является не механизм процесса, а его результат.

Вспользуемся иерархической структурой известной математической модели описания химико-технологических процессов (М. Г. Слинко) [4] и выберем для рассмотрения: уровень малого объема (процесс на одном зерне катализатора); уровень аппарата (движение потока в слое гетерогенного катализатора).

Очевидно, что эффективность технологии очистки изначально обеспечивается точностью подбора катализатора для данного реагирующего вещества, а это связано с предвидением его каталитической активности.

Хотя природа каталитического действия в основных чертах ясна, общая и строгая теория предвидения каталитической активности пока не может быть создана [4].

Если предположить, что скорость гетерогенного процесса лимитируется диффузией и подчиняется уравнению реакций первого порядка, получим выражение

$$\eta = 1 - e^{-kt}, \quad (1)$$

где  $\eta$  - степень выработки сорбционной емкости;  $k = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C} \left[ \frac{1}{ч} \right]$  – константа скорости химической реакции, где  $C_0$  и  $C$  – начальная и текущая концентрация реагирующего вещества в растворе. Очевидно,  $C = C_0 e^{-kt}$ ,  $t$  - время процесса.

В адсорбционной области для модели идеального адсорбированного слоя справедлива изотерма Лэнгмюра во временных координатах

$$\eta = \frac{bt}{1 + bt}, \quad (2)$$

где  $b = \frac{1}{t} \frac{\eta}{1 - \eta} \left[ \frac{1}{ч} \right]$  – сорбционный коэффициент;  $\frac{1}{k}$  и  $\frac{1}{b}$  - средняя продолжительность жизни отдельной частицы реагирующего вещества.

Эксперимент показал, что уравнения (1) и (2) одинаково и с достаточной для практики точностью применимы для описания процесса очистки, когда принимается среднее значение коэффициентов  $k$  и  $b$ .

Важной аттестационной характеристикой катализатора (в дальнейшем – сорбента) является его относительная сорбционная емкость ( $\mathcal{E}$ ).

$\mathcal{E}_\infty$  [моль/г; мг/г; мг·экв/г; Бк/г] – полная относительная сорбционная емкость.

Степень выработки сорбционной емкости выражается отношением  $\eta = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_\infty}$ .

Далее из приведенных уравнений (1) и (2) будем рассматривать только изотерму Лэнгмюра (2). Степень выработки сорбционной емкости эквивалентна доле поверхности адсорбента (катализатора), занятой адсорбированным веществом.

Следует отметить, что поверхность адсорбента относится к фрактальным структурам и не подчиняется евклидовой геометрии. При рассмотрении гетерогенного катализа на пористых катализаторах фрактальные свойства поверхности пористого твердого тела необходимо учитывать.

Поскольку мы рассматриваем не механизм, а результат конкретного процесса, то за основу берем зависимость концентрации адсорбата (реагирующего вещества) в растворе от времени сорбции ( $C(t)$ ) при известном соотношении вода/сорбент ( $V/m_c$ ). Такая зависимость устанавливается экспериментально и графически выражается кинетическими кривыми (рис. 1). Полная сорбционная емкость  $\varepsilon_\infty = C_0 \frac{V}{m_c} \cdot \frac{V}{m_c} - (1) < \frac{V}{m_c} (2) < \frac{V}{m_c}$ . (3)

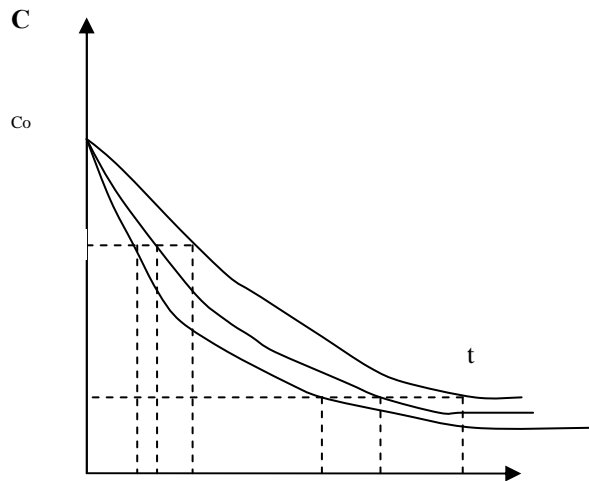


Рис. 1. Кинетические кривые зависимости  $C(t)$ .

Исходя из кинетических кривых для данного сорбента и реагирующего вещества (рис.1) рассчитывается среднее значение сорбционного коэффициента  $(\bar{b}(t))_b = \frac{1}{t} \frac{C_0 - C_i}{C_i - C_0}$ , где  $C_{доп}$  – допустимая нормативами концентрация реагирующего вещества. Это уравнение зависимости  $b$  от времени процесса.

$$\bar{b} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} b(t) dt}{t_2 - t_1} \quad (3) \text{ – среднее значение сорбционного коэффициента во временном интервале } t_2 - t_1.$$

Интеграл можно рассчитать графически.

Изотерма Лэнгмюра – экспонента. Отметим ее характерные области (рис. 2).

Область 1 (участок OA) – область Генри, характерная тем, что степень заполнения адсорбирующей поверхности мала и пропорциональна концентрации вещества в растворе, т.е.  $\eta \approx bt$ .

Область 2 (участок BB $\infty$ ) характерна тем, что  $1 + bt \approx bt$ . Это означает, что все активные центры на поверхности твердого тела заполнены адсорбированным веществом и увеличение концентрации адсорбата в растворе не влияет на его количество, адсорбированное на поверхности твердого тела. Для обеспечения продуктивной работы сорбционной системы следует выбирать участок OB, как наиболее активный.

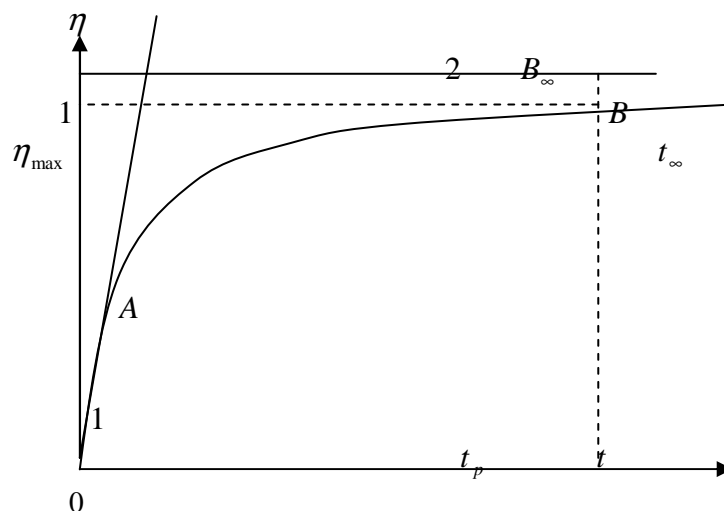


Рис. 2. Изотерма адсорбции.

Поскольку, как отмечалось, сорбция понятие широкое, то формально изотерма, построенная по результатам эксперимента, является изотермой или кривой сорбции, а адсорбционный коэффициент  $b$  формально следует считать сорбционным коэффициентом.

Практика показывает, что оптимальная степень выработки сорбционной емкости  $\eta_{\max} = (0,8 \div 0,9)$ . Большей выработки добиваться нецелесообразно, это эксплуатационно трудно и экономически не выгодно. Из уравнения (2) следует

$$bt = \frac{\eta}{1-\eta}; \quad bt_p = \frac{\eta_{\max}}{1-\eta_{\max}} = A; \quad b_{\min} = \frac{A}{t_p}.$$

На основании уравнения (3)

$$b = \frac{\int_{t_1}^{t_2} b(t) dt}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \frac{A}{t_p} dt}{t_2 - t_1} = \frac{A}{t_1 - t_2} \ln \frac{t_2}{t_1}. \quad (4)$$

При исчислении времени в часах и для обеспечения достаточной для практики точности результата расчета можно принять  $t_1 = 0,1$  ч, а  $\eta_{\max} = 0,9$ .

Тогда  $\bar{b} = b = \frac{9}{t_2 - 0,1} \ln \cdot 10 \cdot t_2$  или

$$b = \frac{90}{10t_p - 1} (2,3 + \ln t_2). \quad (5)$$

Время  $t_2 = t_p$  снимается с экспериментальной кривой сорбции (изотермы сорбции).

Относительная выработка сорбционной емкости и количество ассоциированных на твердой поверхности молей вещества ( $\alpha$ ) соотношением  $\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} = \frac{\alpha}{\alpha_0}$ , где  $\varepsilon_{\max}$  – емкость, вырабатываемая за время рабочего цикла  $t_p$ ;  $\alpha_0$  – максимальное количество адсорбированных молей вещества при степени заполнения поверхности сорбента  $\eta = 1$ .

Если производится очистка раствора от смеси реагирующих веществ, то степень ассоциирования сорбентом  $i$ -го вещества  $\eta_i = \frac{b_i \cdot t}{1 + \sum_k b_k \cdot t}$ , где сумма берется по всем  $K$  компонен-

там растворной смеси.

Отношение  $\frac{b_i}{\sum_k b_k}$  – это дифференциальная селективность сорбента (Sel)

$$\eta_i = \frac{1}{\frac{1}{b_i \cdot t} + \frac{1}{Sel}}, \quad \text{при } t \rightarrow \infty \quad \eta_i = Sel. \quad (6)$$

Селективность сорбента определяется опытным путем. На ее основе формируется композиционный состав для очистки поликомпонентного раствора. Для наглядности сравнения селективных свойств сорбентов удобно пользоваться диаграммами селективности. В качестве примера в таблице и на рис. 3 представлен фрагмент результатов исследований кинетических характеристик неорганических сорбентов, проведенных в ИПБ АЭС (обозначения сорбентов согласно программе исследований). Данные получены на исходном натурном подготовленном растворе (пробы из объекта «Укрытие») при соотношении раствор/сорбент 100 : 1.

Состав и характеристика раствора:  $C_{cs} = 4,59 \cdot E7 \text{ Бк/дм}^3$ ;  $C_{sr} = 1,8 \cdot E7 \text{ Бк/дм}^3$ ;  $C_{\Sigma U} = 30 \text{ мг/дм}^3$ ;  $C_{\Sigma pu} = 1,31 \cdot E3 \text{ Бк/дм}^3$ ;  $C_{\text{соли}} = 30 \text{ г/дм}^3$ ; pH (3 - 5).

**Фрагмент результатов определения селективности сорбентов  
(промотированных катализаторов)**

№ сорбента		Компоненты раствора				
		A	B	C	Д	Е
		Cs(134,137)	Sr -90	ΣU	ΣPu	C
12	b	0,024	1,60	0,16	0,026	0,009
	Sel	0,0132	0,88	0,088	0,0142	0,005
20	b	0,333	2,00	0,115	0,097	0,01
	Sel	0,130	0,78	0,045	0,038	0,004
25	b	41,58	8,25	0,065	0,106	0,014
	Sel	0,83	0,165	0,0013	0,002	0,0003
28	b	0,101	0,313	0,060	2,00	0,02
	Sel	0,04	0,125	0,024	0,80	0,008

**Динамика сорбции**

При реализации сорбции в статических условиях  $\varepsilon_{ст} = (C_o - C_{(t)}) \frac{V}{m}$  переменной является  $C_{(t)}$  при  $\frac{V}{m} = \text{const}$ .

В динамических условиях сорбции (сорбент в статическом положении)  $\varepsilon_{дин} = (C_o - C_{доп}) \frac{V_{(t)}}{m}$  переменной является  $V_{(t)}$  при  $\frac{C_o - C_{доп}}{m} = \text{const}$ . Для условия  $\varepsilon_{ст} = \varepsilon_{дин} = \varepsilon$

$$\eta_{\max} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} = \frac{V}{V_{\max}} = \frac{C_o - C_{(t)}}{C_o - C_{доп}} \cdot \frac{bt}{1 + bt} \quad (7)$$

Обозначим переменную  $C_{(t)} = C_i$ . В динамическом процессе сорбции  $C_i = C_{доп}$ . Исходя из уравнения (7)

$$V = V_{\max} \frac{bt}{1 + bt} = m \frac{\varepsilon_{\max}}{C_o - C_{доп}} \cdot \frac{bt}{1 + bt} \quad (8)$$

Представим уравнение (8) в ином виде  $\frac{m}{v} = \left( \frac{C_o}{\varepsilon_{\max}} - \frac{C_{доп}}{\varepsilon_{\max}} \right) \left( \frac{1}{bt} - 1 \right)$ , где обозначим  $\frac{m}{V} = E$  - расход сорбента на единицу очищенной воды;  $\frac{\varepsilon_{\max}}{C_o} = R$  - ресурс сорбента при очистке конкретного раствора;  $\frac{C_{доп}}{\varepsilon_{\max}} = N$  - относительный показатель предела очистки.

$$E = \left( \frac{1}{R} - N \right) \left( \frac{1}{bt} - 1 \right) \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что расход сорбента на очистку единицы объема раствора тем ниже, чем выше ресурс сорбента и показатель предела очистки.

Динамика сорбции определяется допустимой объемной скоростью очистки, которая равна первой производной объема очищенной воды по времени процесса. Дифференцируя уравнение (8), получим

$$\theta = \frac{dV}{dt} = V' = V_{\max} \frac{b}{(1+bt)^2} \quad (10)$$

Как явствует из уравнения (10), скорость очистки величина переменная, т.е. расход воды через сорбер устанавливается согласно приведенному выражению.

Алгоритм регулирования объемной скорости очистки можно задать динамикой ее изменения (вторая производная  $V$  по  $t$ ).

$$\alpha_{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = V'' = -2V_{\max} \frac{b^2}{(1+bt)^3} \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) необходимо использовать в инженерных расчетах системы автоматического регулирования процесса.

В практике обращения с РЗВ до настоящего времени на отечественных АЭС применяется режим очистки с постоянной объемной скоростью, которая может быть выражена

$$\theta_{(=)} = \frac{V}{t_p} = \frac{V_{\max}}{t_p} \cdot \frac{b}{\frac{1}{t_p} + b} \quad (12)$$

где  $t_p$  – величина постоянная.

Столь непродуктивный способ может быть оправдан только простотой его реализации, однако сферу его практического применения следует ограничить системами очистки РЗВ в петлевых технологических циклах, таких как первый контур (СВО-1), контур очистки воды в БВ ОЯТ (СВО-4 ВВЭР или СВО-2 РБМК).

Преимущество переменного режима в его более высокой эффективности и производительности, его место – в системе обращения с ЖРО. На его основе возможно создание высокотехнологичных сорбционных систем с завершенным циклом переработки жидких отходов.

Качественное сравнение режимов приведено на графиках характеристик сорбционно-очистного процесса (рис. 4). Здесь постоянный режим квалифицируется как стационарный (СР), а переменный как нестационарный (НР).

Из рис. 4, а следует, что за время рабочего процесса  $t_{\alpha}$  в нестационарном режиме будет очищено воды  $V_{AP} = \int_0^{t_p} \theta_{(t)} dt$ , что графически соответствует площади  $O\alpha'\alpha C$ . За это же время в стационарном режиме при скорости  $\theta_{(=)}$ , обеспечивающей в течение  $t_p$  не превышения допустимой концентрации реагирующего вещества в очищенной воде ( $C \leq C_{\text{доп}}$ ), будет очищено  $V_{CP} = \theta_{(=)} t_p$  раствора, что соответствует площади  $O\alpha'\alpha C'$ . Очевидно –  $S(O\alpha'\alpha C) > S(O\alpha'\alpha C')$  и соответственно  $V_{НР} > V_{СР}$ .

Время  $t_{\alpha}$  - это время процесса очистки в стационарном режиме, в течение которого не превышает  $C_{\text{доп}}$  в очищенной воде.

При  $t < t_{\alpha}$   $C_i < C_{\text{доп}}$ ; при  $t = t_{\alpha}$   $C_i = C_{\text{доп}}$ ; при  $t > t_{\alpha}$   $C_i > C_{\text{доп}}$ .

Одинаковое количество очищенной воды будет за время процесса  $t_p$ , когда согласно графику функции  $\theta_{(t)}$   $S(O\alpha''bC') = S(O\alpha''bC)$ . Для выполнения условия  $C_i \leq C_{\text{доп}}$  необходимо смешать воду, очищенную за время  $t_p$ . В нестационарном режиме такая операция не требуется.

На рис. 4, б показано изменения концентрации регулирующего вещества в очищенном растворе в зависимости от времени. Координаты характерной точки ( $\alpha$ ) соответствуют одинаковой концентрации  $C_i = C_{\text{доп}}$  и времени ее достижения при объемной скорости очистки  $\theta_{CP}$ . График в демонстрирует сравнительную динамику очистки в нестационарном режиме и в стационарном режиме при различных значениях  $\theta_{CP}$  ( $\theta_{CP1} > \theta_{CP2} > \theta_{CP3}$ ). Количество очищен-

ной воды  $V = \eta V_{\max}$  будет, соответственно, получено за время  $t_{p1}$ ;  $t_{p2}$ ;  $t_{p3}$ . Характерные точки  $(1 - \alpha)$ ;  $(2 - \alpha)$ ;  $(3 - \alpha)$ . При скорости  $\theta_{cp1}$  через период времени  $t_{\alpha1}$  и до окончания процесса  $t_{p1}$  будет превышение допустимой концентрации  $C_i > C_{\text{доп}}$ . При скорости  $\theta_{cp2}$   $t_{\alpha2} = t_{p2}$  концентрация в конце процесса  $C_i = C_{\text{доп}}$ . При скорости  $\theta_{cp3}$  на протяжении всего процесса  $C_i < C_{\text{доп}}$ .

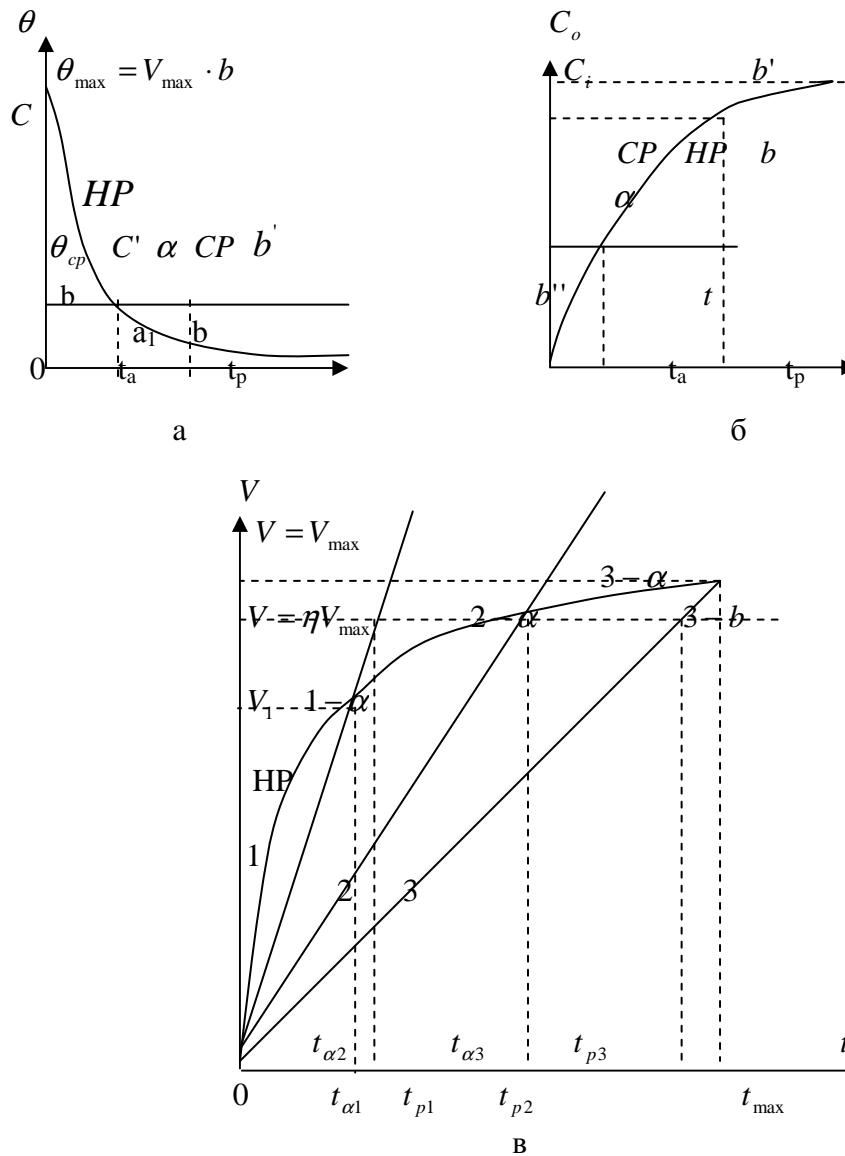


Рис. 4. Графическое сравнение режимов сорбционной очистки:  
 а - графики  $\theta_{(t)}$ ; б - графики  $C_{(t)}$ ; в - графики  $V_{(t)}$ .

Скоростной режим 3 отличается низкой динамикой и для практики обращения с РЗВ не представляет интереса. Скоростной режим 2 является оптимальным, когда качество и время очистки СР и НР одинаковы, однако добиться его поддержания практически сложно. Поэтому есть основания утверждать, что наилучшим решением при очистке РЗВ (в частности, ЖРО) в разомкнутых циклах является реализация нестационарного режима.

### Динамика селективной сорбции и композиционный состав сорбентов

На основании уравнения (6) можно записать

$$V_i = \sum_k V_i \frac{1}{\frac{1}{b_{it}} + \frac{1}{Sel_i}} \quad (13)$$

Это объем очищенной воды по  $i$ -му компоненту в любой момент времени.

Тогда согласно уравнениям (10) и (11) объемная скорость очистки и темп ее изменения будут соответственно

$$\theta_i = \frac{dV_i}{dt} = \sum_k V_i \frac{b_i}{\left(1 + \frac{b_i}{Sel_i} t\right)^2} \cdot \quad (14)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = -2 \frac{\sum_k V_i}{Sel_i} \frac{b_i^2}{\left(1 + \frac{b_i}{Sel_i} t\right)^3} \cdot \quad (15)$$

При составлении массовой композиции сорбентов для очистки сложного раствора руководствуемся условиями:

объем очищенной воды по каждому компоненту раствора должен быть одинаковым:  $V_1 = V_2 = V_3 = \dots V_i = \text{const}$ ;

объемная скорость очистки или время очистки по каждому компоненту раствора должны быть одинаковыми:  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \dots \theta_i = \text{const}$   $t_1 = t_2 = t_3 = \dots t_i = \text{const}$ .

Предположим, что в растворе находится пять компонентов (реагирующих веществ А, В, С, Д, Е), от четырех из которых (А, В, С, Д) его необходимо очистить. Подбираем четыре сорбента (1, 2, 3 и 4) по принципу наивысшей избирательности (селективности) по отношению к одному из компонентов. Тогда справедливо равенство

$$\begin{aligned} & \varepsilon_1 m_1 \left( \frac{Sel_1^A}{C_o^A - C_{dop}^A} + \frac{Sel_1^B}{C_o^B - C_{dop}^B} + \frac{Sel_1^C}{C_o^C - C_{dop}^C} + \frac{Sel_1^D}{C_o^D - C_{dop}^D} \right) = \\ & = \varepsilon_2 m_2 \left( \frac{Sel_2^A}{C_o^A - C_{dop}^A} + \frac{Sel_2^B}{C_o^B - C_{dop}^B} + \frac{Sel_2^C}{C_o^C - C_{dop}^C} + \frac{Sel_2^D}{C_o^D - C_{dop}^D} \right) = \\ & = \varepsilon_3 m_3 \left( \frac{Sel_3^A}{C_o^A - C_{dop}^A} + \frac{Sel_3^B}{C_o^B - C_{dop}^B} + \frac{Sel_3^C}{C_o^C - C_{dop}^C} + \frac{Sel_3^D}{C_o^D - C_{dop}^D} \right) = \\ & = \varepsilon_4 m_4 \left( \frac{Sel_4^A}{C_o^A - C_{dop}^A} + \frac{Sel_4^B}{C_o^B - C_{dop}^B} + \frac{Sel_4^C}{C_o^C - C_{dop}^C} + \frac{Sel_4^D}{C_o^D - C_{dop}^D} \right) \cdot \quad (16) \end{aligned}$$

Из равенства (16) определяются соотношения  $\frac{m_1}{m_2}; \frac{m_2}{m_3}; \frac{m_3}{m_4}$  т.е. формируется композиционный состав.

Сорбционная система динамической очистки может быть разработана под фильтрационную очистку, когда сорбент (катализатор) находится в статическом положении. Тогда можно использовать сорбенты как в смешанной, так в раздельной загрузках.

Если сорбционная система строится под циркуляционный (более прогрессивный) режим очистки, когда сорбент движется совместно с очищаемым раствором, то следует использовать только композиционную смесь. В настоящей работе данные вопросы не рассматриваются.

При разработке инструмента инженерных расчетов для начальной количественной оценки соотношений масс сорбентов в композиционном составе можно принять следующие предложения, упрощающие равенство (16):

сорбционные емкости используемых сорбентов одинаковы (моль/г; мг·экв./г)  $\varepsilon_1 \cong \varepsilon_2 \cong \varepsilon_3 \cong \varepsilon_4$ ;



оценка сорбентов при выборе производится только по наивысшей селективности по отношению к одному из компонентов раствора (А, В, С или Д);

производится полная очистка ( $C_{\text{доп}} = 0$ ).

Допустим, максимальная селективность:

по компоненту А у сорбента 1 -  $\text{Sel}_{\text{max}}^A = \text{Sel}_1^A$ ;

то же по компоненту В у сорбента 2 -  $\text{Sel}_{\text{max}}^B = \text{Sel}_2^B$ ;

то же по компоненту С у сорбента 3 -  $\text{Sel}_{\text{max}}^C = \text{Sel}_3^C$ ;

то же по компоненту Д у сорбента 4 -  $\text{Sel}_{\text{max}}^D = \text{Sel}_4^D$ .

Тогда на основе равенства (16) получим

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\text{Sel}_2^B \cdot C_o^A}{\text{Sel}_1^A \cdot C_o^B}; \quad \frac{m_2}{m_3} = \frac{\text{Sel}_3^C \cdot C_o^B}{\text{Sel}_2^B \cdot C_o^C}; \quad \frac{m_3}{m_4} = \frac{\text{Sel}_4^D \cdot C_o^C}{\text{Sel}_3^C \cdot C_o^D}. \quad (17)$$

Для примера обратимся к вышеприведенной таблице и выберем: для Cs –  $\text{Sel}_{25}^{\text{Cs}} = 0,83$ ; для Sr –  $\text{Sel}_{12}^{\text{Sr}} = 0,88$ ; для U –  $\text{Sel}_{20}^{\text{U}} = 0,045$ ; для Pu –  $\text{Sel}_{28}^{\text{Pu}} = 0,80$ .

Поставим задачу очистить раствор от стронция, цезия и плутония, пользуясь данными таблицы:

$$\frac{m_{25}}{m_{12}} = \frac{\text{Sel}_{12}^{\text{Sr}} \cdot C_{\text{Cs}}}{\text{Sel}_{25}^{\text{Cs}} \cdot C_{\text{Sr}}}; \quad \frac{m_{12}}{m_{28}} = \frac{\text{Sel}_{28}^{\text{Pu}} \cdot C_{\text{Cs}}}{\text{Sel}_{12}^{\text{Sr}} \cdot C_{\text{Pu}}}.$$

Получим следующее:

для очистки исходного раствора от цезия необходимо взять 27 частей сорбента 25;

для очистки от стронция – 10 частей сорбента 12;

для очистки от плутония –  $8 \cdot 10^{-4}$  частей сорбента 28.

Это начальная оценка пропорций сорбентов в композиционном составе для очистки конкретного поликомпонентного раствора.

### Заключение

Закономерности кинетики сорбции задают динамику очистки и гидродинамику сорбционного процесса в целом. Гидродинамика системы, в свою очередь, определяет конструктивные требования к техническим средствам и требования к физико-механическим свойствам сорбционного материала.

Формализация кинетики гетерогенного катализа позволяет создать простой и надежный инструмент аналитической оценки сложного сорбционно-гидромеханического процесса, а также разработать необходимый инструмент конструктивных и инженерных расчетов систем сорбционной очистки целевого назначения, обладающий достаточной для практики точностью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильченко Н.В., Носовский А.В., Павленко А.А. Обращение с радиоактивными отходами в Украине // Ядерная и радиационная безопасность. - 2006. - № 2. - С. 5 - 7.
2. Звіт про НДР за темою "Вивчення фізико-хімічних властивостей адсорбційних матеріалів і стабілізуючих полімерних покриттів палавовмісних мас об'єкта "Укриття"/ ІФКС НАН України. - № ГР 0101U002058. - Львів, 2001.
3. Андронов О.Б., Стрихарь О.Л. Очистка жидких радиоактивных отходов. Обзор методов и технологий. – Чернобыль, 2001. – 51 с. - (Препр. / НАН Украины. МНТЦ «Укрытие»; 01-2).
4. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия. - М.: Высш. шк., 2001. - 527 с.

Поступила в редакцию 22.10.08