

ecimetal

EMPRESA COMERCIAL PARA LA
INDUSTRIA METALURGICA Y
METAL-MECANICA

© LINEA 12



Dedicada a la atención de las ramas del desarrollo metal-mecánico y geológico-minero; ECIMETAL es una institución que brinda sus servicios en la realización de proyectos, estudios, suministros de equipos y materiales, así como asistencia técnica para la instalación de plantas industriales, líneas tecnológicas, completamiento de plantas y entrenamiento de personal.



Empresa ECIMETAL: Habana, Cuba Apto. 6124, Telex 51-1555

TRANSFERENCIA DE RADIONUCLIDOS DESDE RESIDUALES RADIATIVOS HACIA ZEOLITAS NATURALES

Ing. Igor Quiñones G.; Ing. José Montero G.;
Ing. Ulises Jáuregui H.; Ing. Jesús Novoa B

Secretaría Ejecutiva para Asuntos Nucleares

RESUMEN: En el presente trabajo se estudiaron las particularidades del proceso de transferencia de radionúclidos a partir de residuales radiactivos líquidos de baja actividad, hacia zeolitas naturales cubanas en columnas con lecho fijo del sorbente. Presumiblemente en el proceso de transferencia influyen determinados factores como la forma no esférica de las partículas, su pequeño tamaño y el dimensionamiento variado de los granos en el lecho.

Se obtuvo la ecuación experimental de transferencia, la cual puede ser empleada en la predicción del proceso de transferencia de masa en sistemas similares al estudiado.

Adicionalmente fueron calculadas computarizadamente curvas de apertura en sistemas que emplean zeolitas como sorbentes. Esto permitió corroborar la factibilidad del uso de zeolitas naturales cubanas en el tratamiento de residuales radiactivos de baja actividad.

ABSTRACT: In the present paper were studied the features of the transfer process of radioisotopes from low level liquid radioactive wastes to natural cuban zeolites in fixed beds of the sorbents.

Probably in the transfer process have influence some factors as the non spherical shape of the particles, their small and non uniform size in the bed.

Was obtained the experimental rate equation, which may be employed for the prediction of mass transfer process in systems similar to studied.

In addition were computed the breakthrough curves for systems employing natural cuban zeolites as sorbents. This permits corroborate the feasibility of use natural cuban zeolites in the treatment of low level liquid radioactive wastes.

INTRODUCCION

Durante la operación de instalaciones nucleares como centrales atomoeléctricas, centros de investigación y otros se generan cantidades significativas de residuales radiactivos líquidos de baja actividad; los cuales requieren de un tratamiento adecuado en concordancia con las normas internacionales [1].

La aplicación de las zeolitas naturales en el tratamiento por sorción de residuales radiactivos líquidos se incrementa cada día, en virtud de su bajo costo y marcada selectividad en la remoción de los radionúclidos presentes en los desechos [2].

La solución de los problemas relacionados con el diseño y modelación matemática de los aparatos de lecho fijo, empleados en la ejecución de las técnicas de intercambio iónico requiere del conocimiento de las propiedades del proceso de transferencia de masa en el sistema de interés [26]. Por esta razón en el presente trabajo se estudiaron las particularidades del proceso de transferencia de radionúclidos desde residuales radiactivos líquidos de baja actividad hacia zeolitas cubanas, lo cual complementa la evaluación de dichos sorbentes para su aplicación en la gestión de desechos radiactivos.

Se estudió el comportamiento de soluciones simuladas de residuales de ^{60}Co , ^{85}Sr y ^{144}Ce con actividades

específicas entre 10^4 y 10^5 Bq/l. La concentración salina es similar a la usualmente presente en estos desechos [27, 15]. La composición físico-química de los mismos se expone en la tabla 1.

Tabla 1 Composición físico-química de los desechos radiactivos líquidos

Isótopo	^{85}Sr	^{60}Co	^{144}Ce
pH	8,20	6,50	2,00
[Ca ²⁺] (ppm)	40,00	100,20	60,12
[Mg ²⁺] (ppm)	12,00	60,78	18,23
[Na ⁺] (ppm)	95,00	253,00	260,00
[Fe ³⁺] (ppm)	-	0,20	0,20
[Cl ⁻] (ppm)	106,00	177,64	88,63
[So ₄ ²⁻] (ppm)	-	96,06	144,10
[No ₃] (ppm)	198,26	930,00	384,40
[SiO ₂] (ppm)	-	-	120,00

El residual se hizo pasar a través de lechos fijos del sorbente de empaque aleatorio, de altura (X₀) y diámetro (D₀), iguales a 36 mm a diferentes velocidades lineales de

flujo enmarcadas en el rango característico de valores para este tipo de procesos [13, 9] y a diferentes temperaturas por debajo de 100 °C. La masa de sorbente en la columna fue de 27 g, siendo la composición granulométrica la expuesta en la tabla 2.

Tabla 2 Composición granulométrica del sorbente

Fracción (mm)	%
> 1,25	2,11
1,0 - 1,25	3,16
0,8 - 1,0	20,00
0,63 - 0,8	17,89
0,40 - 0,63	24,21
0,20 - 0,40	26,32
< 0,2	6,31

El diámetro de la partícula se determinó teniendo en cuenta el análisis granulométrico de la muestra del sorbente por la ecuación [8]

$$dp = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{d_i}} \quad (1)$$

Tabla 3 Coeficiente de distribución de los radioisótopos

T (°C)	25		40		60		80	
CO ⁶⁰	26,6 ± 4,5	38,7 ± 6,6	99,2 ± 14,8	132,6 ± 16,4				
SR ⁸⁵	566,42 ± 46,96	1 592,09 ± 114,5	1 785,56 ± 139,96	2 032,2 ± 144,43				
Ce ¹⁴⁴	64,44 ± 7,44	120,95 ± 12,23	512,1 ± 57,59	1 437,3 ± 288,47				

Para las condiciones estudiadas el estado de equilibrio se caracteriza por la linealidad de la isoterma de sorción, según la ley de Henry [11], como consecuencia de que los isótopos radiactivos se encuentran en muy bajas concentraciones. La isoterma se describe por la ecuación:

$$As^* = KD A^* \quad (2)$$

donde As^* y A^* son las actividades específicas del isótopo en las fases sólida y líquida, respectivamente, al estado de equilibrio. El balance material para el proceso no estacionario de transferencia de masa en lechos fijos se define por la expresión [3]:

$$\varepsilon \frac{\delta A}{\delta t} + \rho_1 \frac{\delta As}{\delta t} + \omega \frac{\delta A}{\delta x} = 0 \quad (3)$$

Donde:

- ε - Porosidad del lecho sorbente
- ρ_1 - Densidad del lecho sorbente
- ω - Velocidad lineal del flujo
- As, A - Actividades específicas del isótopo en las fases sólida y líquida, a la distancia x de la sección superior del lecho y al momento de tiempo t a partir del comienzo del proceso.

Esta ecuación desprecia la difusión longitudinal y asume el modelo del flujo pistón, siendo aplicable al sistema estudiado como resultado de las relaciones adoptadas experimentalmente entre X_0, D_0 y el diámetro medio de las partículas (dp), ($X_0/dp = D_0 \approx 80$). En estas condiciones el modelo del flujo pistón es bastante exacto,

En dicha ecuación X_i y d_i son la dimensión media granulométrica y la fracción másica del tamiz i . Como resultado del cálculo se obtuvo un valor igual a 0,46 mm.

Bajo columna fueron tomadas fracciones consecutivas del efluente, midiéndose la actividad final del mismo con ayuda de un detector de centelleo de NaI(Tl), acoplado a un radiómetro monocanal.

A partir de los resultados experimentales se obtuvieron las curvas de apertura, expresadas como la relación entre la actividad en el eluido (A) y la actividad inicial (A_0), en función del tiempo de toma de la alícuota (t); es decir $A/A_0 = f(t)$.

El comportamiento del sistema al estado de equilibrio se determinó mediante la interacción en condiciones estáticas de 10 mL del residual y 0,1 g del sorbente. Los resultados obtenidos del coeficiente de distribución (KD) [21] de los radioisótopos a diferentes temperaturas se muestran en la tabla 3.

[17, 16] y el factor de mezclado axial [9] para el rango de velocidades de flujo y temperaturas investigado es aproximadamente igual a 1.

La ecuación de transporte para el proceso se define [3] como:

$$\rho_1 \frac{\delta As}{\delta t} = k a F(A, As) \quad (4)$$

Donde:

- k - Coeficiente global de transferencia de masa
- a - Superficie específica del lecho
- $F(A, As)$ - Fuerza motriz del proceso

La solución del sistema de ecuaciones (2 - 4) fue dada por Thomas [12] y se expresa como:

$$\frac{A}{A_0} = J(n, \theta) \quad (5)$$

donde:

- n - Número de unidades de transferencia hasta la posición x , definido como:

$$n = \frac{k a x}{\omega} \quad (6)$$

- θ - Tiempo adimensional, definido como:

$$\theta = n T \quad (7)$$

Donde T se expresa como:

$$T = \frac{\omega}{KD \rho_1 X} - \left[t - \frac{X \varepsilon}{\omega} \right] \quad (8)$$

La función $J(n, \theta)$ se define [14] como:

$$J(n, \theta) = 1 - e^{-\theta} \int_0^n e^{-\xi} I_0 \left[2\sqrt{\theta \xi} \right] d\xi \quad (9)$$

Donde:

- I_0 - Función de Bessel de orden cero y primera especie
- ξ - Variable de integración

Para cualesquiera valores de n y T la pendiente de la curva de apertura se determina [3] como:

$$\frac{\delta(A/A_0)}{\delta t} = \frac{n T}{\left[t - \frac{X \varepsilon}{\omega} \right]} e^{-n(T+1)} \frac{I_1 \left[2n\sqrt{T} \right]}{\sqrt{T}} \quad (10)$$

Donde:

- I_1 - Función de Bessel de primer orden y primera especie

Los isótopos radiactivos en los desechos estudiados se encuentran en forma de cationes [20], y su difusión puede ser tratada como molecular debido al requerimiento de electroneutralidad en el sistema [3]. El coeficiente de difusión (D) en la fase líquida se determinó por la ecuación de Nernst [22] a partir de las conductividades iónicas a dilución infinita. La interacción entre los diferentes iones se considera poco significativa como consecuencia de que las conductividades de las especies presentes no difieren grandemente, considerándose válida la difusión molecular independiente [6].

La magnitud del coeficiente global de transferencia de masa depende de las resistencias al transporte del componente en ambas fases a través de la interfase; determinándose por las propiedades tanto del líquido como del sólido, el régimen hidrodinámico del fluido y las peculiaridades geométricas del sistema. Este coeficiente se define por la expresión [3]:

$$\frac{1}{ka} = b \frac{dp^{2-c}}{\omega^c D^{1-d}} \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{c-d} + f \frac{dp(1-\omega)}{KD Ds} \quad (11)$$

donde:

- $b, c, d, y f$ - Coeficientes empíricos
- μ - Viscosidad del fluido
- ρ - Densidad del fluido
- Ds - Coeficiente de difusión en la fase sólida.

Los valores de μ y ρ fueron tomados de la [24].

No se analizó la influencia de la variación de densidad en la fase fluida provocada por la existencia de gradientes de concentración durante el proceso de transferencia, lo que es válido debido a la presencia en microconcentraciones de los isótopos radiactivos.

La vía más segura para caracterizar el proceso de transporte, es la correlación empírica de los resultados experimentales con ayuda de expresiones del tipo [16] determinadas en las condiciones del proceso de interés. En este sentido es necesario señalar que la mayoría de las ecuaciones reportadas [30, 31] se obtuvieron para procesos de disolución de esferas en flujos líquidos para lechos de dimensionamiento granular uniforme.

Por otra parte, a pesar del significativo número de trabajos reportados sobre el tema, las diferencias entre los resultados obtenidos por diferentes investigadores son sustanciales [8], y la influencia de factores como la forma no esférica de las partículas y el dimensionamiento variado de las mismas en el lecho está insuficientemente estudiada.

Para cada curva de apertura obtenida experimentalmente se determinó el valor de la pendiente

$\left[\frac{\delta(A/A_0)}{\delta t} \right]^{1/3}$ y el tiempo correspondiente $t_{1/3}$, cuando la actividad en el efluente constituía un tercio de la actividad inicial del residual en la alimentación del equipo. Con estos datos y teniendo en cuenta los valores asumidos de las magnitudes x, ε, ω y ρ_1 en cada experimento, se determinaron los valores de n y T en cada caso mediante un cálculo iterativo de optimización, utilizando las ecuaciones (5) - (10).

Posteriormente, con ayuda del valor ka determinado por la ecuación 6 y los valores conocidos de $dp, \omega, D, \mu, \rho, \varepsilon$ y KD se correlacionaron los datos experimentales para cada temperatura (25, 40, 60 y 80 °C) según el modelo (11), obteniéndose la siguiente expresión:

$$\frac{1}{ka} = 11,24 \frac{dp^{1,15}}{\omega^{0,85} D^{0,13}} \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{0,02} \quad (12)$$

Los datos experimentales fueron elaborados estadísticamente mediante una correlación no lineal de los parámetros, según el método de Marquardt [14]. Los coeficientes fueron determinados con un error inferior al 5% y para un 95% de confiabilidad, siendo el coeficiente de correlación igual a 0,95 para un total de 52 experimentos. Los resultados pueden ser representados en la forma:

$$Sh = 0,089 Re^{0,85} Sc^{0,87} \quad (13)$$

para $0,05 \leq Re \leq 2$ y $113 \leq Sc \leq 735$ donde:

$$Sh = \frac{ka dp^2}{D} \quad (14)$$

$$Re = \frac{\omega dp \rho}{\mu} \quad (15)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (16)$$

son los números de Sherwood (Sh), Reynolds (Re) y Schmidt (Sc), respectivamente.

Debe señalarse que la desviación estándar de los coeficientes en la ecuación (13) es inferior a otros reportados [8], lo que puede ser una consecuencia de la aplicación de una regresión no lineal de los parámetros sin imponer valores prefijados a ninguno de los coeficientes, lo cual ha sido práctica común en trabajos publicados [18] y también de haberse correlacionado valores en un intervalo relativamente pequeño de las variables de interés. En la figura 1 se ilustra la dependencia

$$\ln Sh/Sc^{0,87} = f(\ln Re)$$

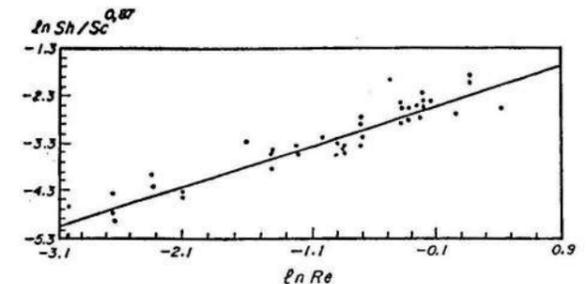


FIGURA 1 Representación gráfica de la correlación experimental

El uso del número de Sh en la forma (14) brinda la facilidad de calcular el coeficiente volumétrico de transferencia sin necesidad de conocer el valor de la superficie específica del lecho, magnitud que no se determinó experimentalmente.

De la ecuación (13) se deduce que los datos experimentales no pueden ser correlacionados satisfactoriamente por medio del factor J_D derivado de la analogía de Chilton y Colburn, confirmando lo reportado por otros autores [30, 12]. Esto probablemente es consecuencia de que dicha analogía es válida sólo en el caso del transporte en tuberías rectas, donde en realidad hay semejanza entre los fenómenos de difusión y fricción. Estas condiciones se pierden cuando el fluido pasa a través de formas complicadas como un lecho granular [27].

Debe señalarse, que la correlación del coeficiente global de transferencia en función de los parámetros de la fase fluida es aceptable. Para las soluciones diluidas es usual que la etapa controlante sea la difusión del componente en la fase líquida [24], lo cual se ha comprobado para las zeolitas naturales [9]. La velocidad de intercambio, por otra parte, es significativamente superior a bajas concentraciones del componente en la fase sólida, lo que redundará en una mayor influencia del mecanismo de difusión externa en la velocidad del proceso [9].

Adicionalmente hay que señalar que cuantificar con precisión la influencia de cada uno de los componentes del proceso en la velocidad total de la transferencia es trabajoso, y hasta hoy no existen dependencias suficientemente confiables para el cálculo de los coeficientes locales de transferencia en la fase sólida; la determinación experimental de los cuales es compleja. Por ello la mayoría de las ecuaciones para el cálculo de k han sido obtenidas en condiciones en que la resistencia al transporte interno es poco significativa y la tapa controlante es la difusión externa [17].

La correlación es satisfactoria con independencia de las diferencias entre las composiciones físico-químicas de los residuales tratados, lo que posibilita la aplicación de la expresión lograda en cálculos relacionados con el diseño y la operación de plantas de tratamiento, que por regla general operan con residuales líquidos de variadas características.

La comparación entre los resultados obtenidos y otros datos reportados [31, 12, 4] dada en la figura 2, muestra que para $Sc = 700$ la velocidad de transferencia en el sistema estudiado es inferior, principalmente para valores de $Re < 0,1$; lo que se debe aparentemente al hecho de que en el sistema investigado el valor de la fracción hueca ($\xi = 0,55$) no se enmarca en el rango de $0,4 \leq \xi \leq 0,44$, característico para los lechos de esferas y cilindros, y las correlaciones obtenidas para estos últimos pueden fallar en la estimación de los coeficientes de transferencia para sistemas con valores de porosidad de los lechos fuera del rango expuesto anteriormente [26]. Adicionalmente se reporta [8, 25] que con el aumento de la fracción hueca disminuye el valor del coeficiente de transferencia.

Por otra parte debe señalarse que para partículas no esféricas los coeficientes de transferencia obtenidos son inferiores a los reportados para las esferas [4] y la disminución del tamaño de las partículas en el lecho provoca una disminución de la velocidad de transferencia [18, 10]. El valor del exponente asociado al número de Re

en la ecuación (13) es semejante a otros reportados para sistemas similares [5], siendo necesario decir que su valor también depende considerablemente de la forma de las partículas y por consiguiente de la tortuosidad del lecho, así como también del régimen hidrodinámico del fluido. Por otra parte, el exponente vinculado al número de Sc refleja la significativa influencia de la difusividad molecular en la velocidad total de la transferencia para el rango de valores investigado.

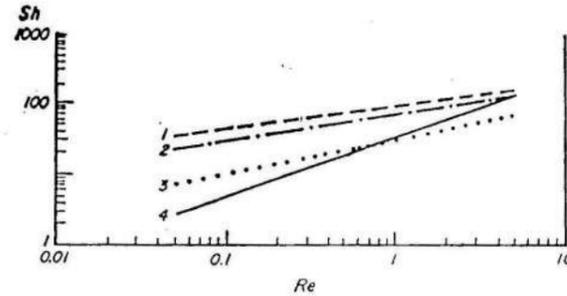


FIGURA 2 Comparación entre las velocidades de transferencia de masa (1. Ref. [20]; 2. Ref. [25]; 3. Ref. [28]; 4. Presente trabajo)

El valor del coeficiente independiente es inferior a otros reportados [31, 12, 4], presumiblemente motivado por las razones expuestas anteriormente. Este último coeficiente es un factor de forma y su valor lo determinan, primordialmente, las características propias del sistema estudiado [16], entre las que deben considerarse adicionalmente el dimensionamiento no uniforme de los granos en el lecho.

Los resultados obtenidos son extrapolables a otros sistemas análogos si se mantienen las condiciones de similitud entre el modelo y el prototipo. La ecuación de escalado se define en este caso como [16]

$$\frac{(k a)'}{(k a)} = \frac{\left[\frac{\omega'}{\omega}\right]^{xm}}{\left[\frac{dp'}{dp}\right]^{1-xm}} \quad (17)$$

Donde xm es el exponente asociado al número de Reynolds en (13) y las magnitudes con apóstrofe se refieren al prototipo y las restantes al modelo.

Para un equipo cuya dimensión lineal característica es 10 veces mayor ($dp'/dp = 10$) y debe operar en iguales condiciones con respecto a la velocidad lineal de flujo ($\omega' = \omega$), teniendo en cuenta el valor de $xm = 0,85$ se obtiene que $k a' = 0,71 k a$, lo que representa aproximadamente un 30 % de error en la estimación del prototipo; dicha desviación es sin embargo inferior a otras reportadas [8]. Por ello la ecuación (13) es aplicable en la predicción de procesos de transporte en sistemas similares al estudiado pues se mantiene una semejanza aceptable entre las condiciones de extrapolación.

En lo que respecta a la influencia de la temperatura en los resultados del proceso se constató que el aumento de este parámetro produce un incremento del coeficiente de distribución como puede observarse en la tabla 3, lo que sugiere la conveniencia de ejecutar el proceso de tratamiento a mayores temperaturas. El aumento de la temperatura acelera igualmente el proceso de difusión en

la fase fluida, que es la determinante en la velocidad total de la transferencia. Teniendo en cuenta las condiciones específicas de operación en cada caso y con la ayuda de las ecuaciones (5)-(10) y (13)-(16) se procedió a describir el comportamiento de las curvas de apertura obtenidas experimentalmente (figura 3). La concordancia entre las curvas experimental y teórica confirma la validez de la ecuación de transferencia obtenida y el método aplicado de modelación del proceso.

Las curvas de elución presentadas en la figura 4, calculadas para equipos a mayor escala ($x = 400$ mm) y los valores del coeficiente de distribución reportados [32]

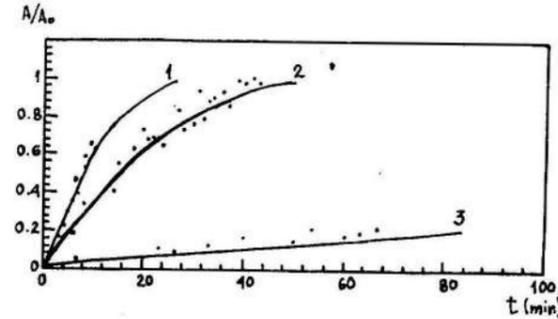


FIGURA 3 Curvas de apertura experimental y calculada
..... Puntos experimentales
— Curva Calculada
1. Para Co^{60} , $w = 5,9$ m/h, $T = 25$ °C
2. Para Ce^{144} , $w = 5,9$ m/h, $T = 25$ °C
3. Para Sr^{85} , $w = 1,8$ m/h, $T = 25$ °C

para estos sorbentes según métodos normalizados, muestran que los valores obtenidos de los coeficientes de descontaminación (Df) y los factores de reducción de volumen (Vr) se enmarcan en el rango usual para estos procesos [2], lo que justifica la posibilidad de utilizar estos materiales en la gestión de desechos radioactivos con independencia de que aún es necesario seguir profundizando en la factibilidad técnico-económica de su aplicación al procesamiento de grandes volúmenes de residuales, y delimitar los campos específicos de su utilización en instalaciones industriales.

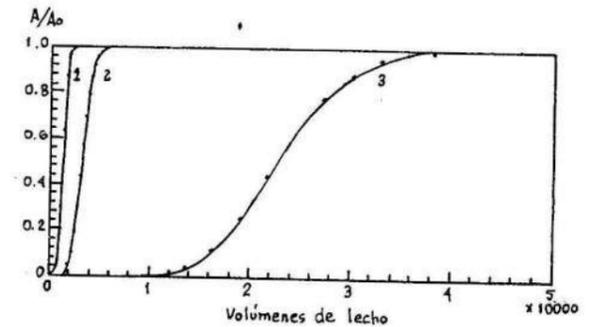


FIGURA 4. Curvas de elución calculadas para equipos a mayor escala
Parámetros de operación: $w = 5$ m/h, $T = 25$ °C
 $A_0 = 10^{-5}$ Ci/L, $Df = 10^5$
1. Para Co^{60} , $Vr = 300$
2. Para Sr^{85} , $Vr = 765$
3. Para Cs^{137} , $Vr = 5738$

CONCLUSIONES

Se caracterizó el proceso de transferencia de radionúclidos a partir de residuales radioactivos hacia zeolitas naturales cubanas, logrando describir el comportamiento de las curvas de apertura obtenidas experimentalmente. Presumiblemente en el proceso de transferencia influyen determinados factores como la forma no esférica de las partículas, su pequeño tamaño y el dimensionamiento variado de los granos en el lecho.

La ecuación de transferencia obtenida es aplicable a cálculos para residuales con una variada composición

físico-química, caracterizada por valores de los parámetros fundamentales (concentración salina, temperatura y otros) enmarcados en los rangos usuales para dichos desechos.

El aumento de la temperatura influye positivamente en los resultados del proceso.

Se calcularon las curvas de apertura en sistemas que emplean zeolitas para el tratamiento de desechos radioactivos líquidos de baja actividad, lo que permite profundizar en el estudio de estos procesos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la compañera Damaris Moreno su participación en la ejecución de la parte experimental del

presente trabajo, quien con su esfuerzo hizo posible la realización del mismo.

REFERENCIAS

- BOCHEREL, J. y J. AROD: "Traitement des eaux de piscine de stockage sous conteneur de combustibles irradiés" in *Management of low and intermediate level radioactive wastes*. Vienna, IAEA, 1970.
- BIRD R., B. et al.: *Transport Phenomena*, New York, John Wiley 38 Sons, 1963.
- CASTELLAN G., W.: *Fisicoquímica*. Fondo Educativo Interamericano, 1974.
- CHELISCHEV N., F.; VOLODIN B., F. y L. KRIUKOV V.: Ionno obmennyie svoystva prirodnykh vysoko-kremnistykh

- tseolítov. Moskva Nauka, 1988.
5. GLASSTONE, S.: *Tratado de Química-Física*. Madrid, Aguilar 1970.
 6. HIMMELBLAU D., M. y B. BISCHOFF K.: *Análisis y simulación de procesos*. Barcelona, Ed. Reverté S.A., 1976.
 7. IAEA: Treatment of intermediate and low-level radioactive wastes at the National Reactor Testing Station (NRTS) in *Practices in the treatment of low and intermediate level radioactive wastes* Vienna, 1966.
 8. JOHNSTONE R., E. y W. THRING: *Pilot plants, models and scale-up methods in chemical engineering*. New York, Mc. Graw Hill, 1957.
 9. KASATKIN A., G.: *Osnovnye Protsessy i Apparaty khimicheskoi Tekhnologii*, Moskva, Khimiya, 1973.
 10. KARABELAS A., J.; W. WEGNER T. y J. HANRATTY T.: *Chemical engineering science*, 1971.
 11. LEVI W., H. y H. MELZER. Some recent improvements in the low level liquid effluents treatment process.
 12. NAZARENKO V., A.; P., ANTONOVICH V. y M. NEVSKAYA E.: *Gidraliz ionov metallov v razbavennykh rastvorakh*. Moskva, Atomizdat, 1979.
 13. NESMEYANOV A., N.: *Radiokhimiya*. Moskva, Khimiya, 1972.
 14. PERRY R., H. y H. CHILTON C.: *Chemical Engineers' Handbook* La Habana, Ed. Revolucionaria, 1979.
 15. SHERWOOD T., K., PIGFORD R., L. and R. WILKE C.: *Mass Transfer*. New York, 1975.
 16. SOBOLEVI I., Y. y V. KHOMCHIK P.: *Obezvrezhivanie radiaktivnykh otkhodov na tsentralizovannykh puntakh*. Moskva, Energizdat, 1983.
 17. VIAN. A y J. OCON: *Elementos de Ingeniería Química*. La Habana, Editorial Pueblo y Educación, 1983.
 18. WILLIAMSOM J., E.; BAZAIRE K., E. and GEANKOPLIS C., J. *Industrial Engineering Chemical Fund.* No. 2, 1963.
-



**ACERO
PARA EL DESARROLLO
ENTRE EN CONTACTO
CON NOSOTROS**

**EMPRESA IMPORTADORA
DE METALES, COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES**