

Determinación de fuerzas estructurales entre capas de montmorillonita a partir de experimentos de adsorción y difusión de iones fosfato

Daniel Palacios^{1*}, John Labrecque² y Gustavo Pereira¹

¹Laboratorio de Física Nuclear. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Baruta, Edo. Miranda. Apartado Postal 89000, Caracas 1080, Venezuela. ²Centro de Química, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Caracas, Venezuela

Recibido: 24-01-01 Aceptado: 30-07-02

Resumen

Se analizan los orígenes y consecuencias de las fuerzas superficiales entre partículas de montmorillonita suspendidas en soluciones electrolíticas. A partir de resultados experimentales sobre difusión y cinética de adsorción negativa de iones fosfato en Na-montmorillonita, así como la utilización de modelos para describir las principales fuerzas superficiales de interacción, se desarrolló una metodología para determinar la fuerza de repulsión estructural, la cual debe su origen a la variación de la viscosidad interlamina del agua. Se demostró que la dependencia experimental de la fuerza resultante con la distancia entre partículas arcillosas puede ser satisfactoriamente descrita por un modelo que considera la contribución de la fuerza estructural de repulsión y la molecular de atracción. Los parámetros que caracterizan la interacción estructural ($A=2.10^{-13}$ erg/cm², $k_0=3,56.10^9$ dn/cm², $l_0=1,24.10^{-8}$ cm, $k=7,46.10^7$ dn/cm² y $l=4,23.10^{-8}$ cm) se corresponden con los valores obtenidos por otros autores para dispersiones de minerales arcillosos, utilizando métodos diferentes, inclusive con resultados obtenidos para otros sistemas coloidales.

Palabras clave: Adsorción, difusión, fuerzas superficiales, iones fosfato, montmorillonita.

Determination of structural forces between montmorillonite layers by means of experiments on phosphate ions adsorption and diffusion

Abstract

The origins and consequences of surface forces between montmorillonite particles suspended in electrolytic solutions are analyzed. Based on experimental results on diffusion and negative adsorption kinetics of phosphate ions in Na-montmorillonite, as well as the use of models to describe the main surface forces of interaction, a methodology was developed to determine the structural repulsion force, which origin is due to the change of water interlamina viscosity. It was demonstrated that a model, which considers the contribution of the repulsion structural force and the molecular attraction, could satisfactorily describe the experimental de-

* Autor para la correspondencia. E-mail: palacios@usb.ve

pendence of resulting force with the distance between clay particles. The parameters that characterize the structural interaction ($A=2.10^{-13}$ erg/cm², $k_0=3,56.10^9$ dn/cm², $b=1,24.10^{-8}$ cm, $k=7,46.10^7$ dn/cm² and $l=4,23.10^{-8}$ cm) are in agreement with the results obtained by other authors for dispersions of clay minerals, using different methods, even with results obtained for other colloidal systems.

Key words: adsorption, diffusion, ions phosphate, montmorillonite, surface forces.

Introducción

En estudios experimentales sobre cinética de adsorción de iones fosfato por formas monoiónicas de montmorillonita se demostró que a medida que se incrementa la concentración de fosfatos en el medio de dispersión disminuye la adsorción límite y en algunos casos las curvas de cinética pasan por valores negativos y presentan varios puntos de inflexión (1). Si se tiene en cuenta que para altas concentraciones del electrolito en el medio de dispersión prácticamente no existe zona difusa en la doble capa (DC), no está claro cual es la naturaleza de la fuerza que condiciona la repulsión de las capas elementales y de que manera varía la fuerza con la distancia.

Los procesos de intercambio de masa entre iones fosfato en la solución y minerales laminados como adsorbentes dependen del estado de agregación del sistema, o sea, de los procesos de coagulación y desagregación. A su vez, la dimensión media de los agregados está determinada por la concentración de la fase dispersa y el contenido de iones en el medio de dispersión. Probablemente estos mecanismos puedan explicar las diferencias en las formas de las curvas cinéticas observadas experimentalmente al estudiar la adsorción de iones fosfatos en suspensiones (2, 1).

Debido a que la agregación de las partículas dispersas en suspensiones está determinada por la acción de fuerzas superficiales de interacción, el presente trabajo está dedicado al análisis de las fuerzas superficiales presentes en la interacción de suspensiones arcillosas en soluciones electrolíticas, a la vez que se desarrollan las bases

teóricas de un método para determinar las fuerzas estructurales entre capas de montmorillonita, y los parámetros que las caracterizan, a partir de experimentos de adsorción y difusión de iones fosfato.

Fuerzas superficiales. Agregación de los sistemas dispersos

En la actualidad los estudios sobre estabilidad y coagulación de sistemas dispersos se basan en la teoría DLVO (Deriaguin, Landau, Verwey and Overbeek) (3), la cual se fundamenta en la acción a distancia de fuerzas moleculares (de atracción) y electrostáticas (de repulsión). Como los cristales de silicatos laminados por su forma se pueden aproximar a capas planas, paralelas e infinitas, en lo adelante se analizará solamente la interacción de superficies planas, sin entrar en detalles sobre la influencia de la forma de las partículas en sus atracciones y repulsiones.

Fuerzas moleculares de atracción

La teoría microscópica desarrollada por Hamaker (4) se basa en la aditividad de la interacción molecular de cuerpos condensados. Para dos cuerpos de igual naturaleza, con un contenido de q moléculas por unidad de volumen, la integración de las interacciones individuales (las cuales se supeditan a la Ley de London) conduce a la siguiente ecuación para la energía de interacción de las láminas por unidad de superficie (U_m):

$$U_m = - \frac{A}{12\tau} \left[\frac{1}{h^2} + \frac{1}{(h+2b)^2} - \frac{2}{(h+b)^2} \right] \quad [1]$$

donde $A = \pi^2 q^2 \beta$ es el potencial de Hamaker, β - constante de atracción molecular de dos moléculas en el vacío y b - espesor de las láminas.

La expresión [1] refleja resultados cualitativos correctos para el caso de interacción de partículas en el vacío, no permitiendo realizar consecuentemente el cálculo de las propiedades absorbentes de la capa intermedia como ocurre en la interacción de partículas en un medio líquido. Tal análisis se puede realizar con más fundamento a partir de la rigurosa teoría microscópica de Dzialoshinsk (5), donde se considera la interacción de dos cuerpos macroscópicos 1 y 2 a través de una capa delgada de medio líquido 3.

Fuerzas de repulsión iónico-electrostáticas

Las fuerzas de repulsión iónico-electrostáticas surgen cuando se solapan las capas iónicas difusas próximas a las superficies de las partículas coloidales (6). En el trabajo de Palacios et al. (7) se analizó como ocurre la redistribución del potencial eléctrico superficial al evaluar el efecto de exclusión de aniones en suspensiones de montmorillonita. Por otra parte, se demostró que para superficies planas y constancia de la concentración del electrolito en el sistema, la fuerza de interacción iónico-electrostática entre las partículas (por unidad de superficie) está determinada en su totalidad por el potencial en el plano de simetría (ψ_d) (8).

Cuando las partículas se acercan son posibles dos casos límites: constancia del potencial superficial ($\psi_1 = \text{const}$) o constancia de la carga superficial ($\sigma_1 = \text{const}$). El sentido físico de la última condición es el de crecimiento ilimitado de la fuerza de repulsión para distancias pequeñas, mientras que la condición de $\psi_1 = \text{const}$ responde a un valor finito de la fuerza de repulsión. Las fuerzas de repulsión iónico-electrostáticas en sistemas dispersos reales son tales que $|P_i^\psi| \leq |P_i^{\text{real}}| \leq |P_i^\sigma|$, donde P_i^ψ y P_i^σ son las repulsiones iónico-electrostáticas para

$\psi_1 = \text{const}$ y $\sigma = \text{const}$, respectivamente. Muller (9) demostró que $U_i^\sigma \geq U_i^\psi$, donde U_i^σ y U_i^ψ son las energías de interacción iónico-electrostáticas para $\sigma = \text{const}$ y $\psi_1 = \text{const}$, respectivamente. Sin embargo, tal diferencia se manifiesta significativamente solo para valores de χh comprendidos entre 3 y 4 (χ^{-1} - radio de Debay de apantallamiento) y disminuye a medida que las superficies se separan más (10).

Fuerzas estructurales

En los trabajos de Deriaguin and Kuskov (11) y de Deriaguin and Zorin (12) se señaló la posibilidad de que se manifestara la componente estructural de la presión de "cuña" en sistemas dispersos liófilos, a los cuales pertenecen los silicatos laminados.

El agua se distingue de otros líquidos polares por la presencia de enlaces de hidrógeno orientados. Debido a ello, el cambio en la redistribución de moléculas de agua en la capa límite se va extinguiendo lentamente a medida que se aleja de la superficie de las partículas, extendiéndose hasta distancias de 100 Å y más (13). Tal cambio es inducido por los centros activos de la superficie como átomos superficiales, iones adsorbidos o moléculas capaces de formar enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua. Como resultado de este proceso la capa intermedia líquida adquiere una estructura particular y condiciona, entre otras propiedades, variación de su viscosidad (14, 15).

Cuando el espesor de la capa intermedia líquida entre las superficies interactuantes es mayor que el espesor total de las capas límite (CL), la influencia de estas últimas se manifiesta únicamente a través de la variación de las componentes electrostáticas y moleculares de la energía total de interacción. Cuando se solapan las CL comienza la reorganización de la estructura del líquido y en consecuencia la variación de la energía libre de Gibbs (16), lo cual debe ir acompañado con el surgimiento de fuerzas de atracción o de repulsión. Razonando de

esa manera, Marcelja and Radic (17) obtuvieron la siguiente expresión para las fuerzas estructurales por unidad de superficie en el caso de capas intermedias líquidas simétricas:

$$P_3 = -k \exp\left(-\frac{h}{l}\right) \quad [2]$$

donde k - coeficiente que depende del ordenamiento estructural en las CL, l - parámetro que caracteriza el radio de acción de las interacciones intermoleculares. La ecuación [2] se aplicó para $h>l$, o sea, en capas suficientemente gruesas en comparación con las dimensiones moleculares. Para capas de agua entre partículas de lecitina los valores obtenidos fueron $k=10^{11}$ dn/cm² y $l=2 \cdot 10^{-8}$ cm. Una ecuación semejante se dedujo a partir de resultados obtenidos al estudiar la interacción de láminas de mica en soluciones electrolíticas (18):

$$P_3 = -\left[k \exp\left(-\frac{h}{l}\right) + k_0 \exp\left(-\frac{h}{l_0}\right) \right] \quad [3]$$

donde los parámetros k y l tienen el mismo significado físico que en la ecuación [2], mientras que k_0 y l_0 son constantes que responden a fuerte solapamiento de las CL.

Propiedades del líquido en los espacios interlaminares de arcillas saturadas con agua

Las particularidades estructurales del agua entre capas comprimidas de minerales arcillosos provocan cambios significativos en sus propiedades, en particular, disminuye la capacidad de disolver sustancias moleculares e iónicas (19, 20) y aumenta su viscosidad a medida que se hacen más estrechos los espacios interlaminares (21, 22). La variación de la viscosidad influye en la velocidad de difusión de moléculas e iones en los espacios interlaminares de minerales arci-

llosos (23). Esta estructura particular del líquido en capas comprimidas condiciona la aparición de la componente estructural de la presión de "cuña". A partir de los resultados obtenidos con compresas de muestras de montmorillonita Viani et al. (24) obtuvieron la dependencia $P_s(h)$ y determinaron los valores numéricos de los parámetros k y l en la ecuación [2], a saber $2 \cdot 10^7$ dn/cm² y 2,2 nm, respectivamente. En otros estudios se obtuvo que para la moscovita el parámetro l quedó comprendido entre 0,95 y 2,20 nm (25), mientras que para este mismo sistema Pashley (26) utilizó la ecuación [3] y obtuvo los siguientes intervalos de valores: $l=0,95 - 1,1$ nm y $l_0=0,17 - 0,30$ nm. A pesar de que las evaluaciones presentadas en el trabajo de Viani et al. (24) no son correctas debido a factores metodológicos (se sobredimensionaron las distancias entre partículas de montmorillonita al determinarlas a partir de la humedad de la arcilla), la existencia de fuerzas estructurales en la arcilla montmorillonita se puede considerar como un hecho establecido.

Metodología para estudiar las fuerzas estructurales entre partículas de montmorillonita

El paso de agua por los espacios entre partículas arcillosas en suspensión, en presencia de altas concentraciones de electrolito, representa un caso particular ya que en este proceso el aumento de los espacios interplanares en el silicato laminado ocurre únicamente bajo la influencia de las fuerzas estructurales. Por tal motivo resulta de interés evaluar la variación de las fuerzas estructurales con la distancia utilizando las dependencias de la viscosidad con las distancias interplanares ($\eta(h)$) obtenidos por Tovbina (27) y Palacios et al. (23).

En estudios experimentales sobre cinética de adsorción de iones fosfato se observó adsorción negativa neta para concentración inicial de iones fosfato de 1 g-eq/dm³ (en forma de NaH₂PO₄) en la fase dispersa Na-

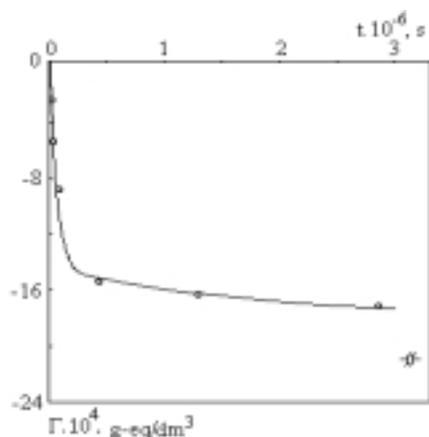


Figura 1. Dependencia temporal de la adsorción de iones fosfato por Na-montmorillonita para concentración inicial de fosfatos de 1 g-eq/dm^3 . La relación entre las fases sólida y líquida fue de 1:25. Γ_∞ indica la adsorción límite según el modelo de cinética de adsorción desarrollado por Palacios et al. (1999).

montmorillonita (1) (Figura 1). La ocurrencia de adsorción negativa en la parte difusa de la DC fue demostrada teóricamente en el trabajo de Palacios et al. (7). Sin embargo, para tan alta concentración del electrolito prácticamente no existe la zona difusa, por lo que tal regularidad se puede explicar a partir de la hipótesis desarrollada por Dumanski (20) acerca de la existencia de un volumen de agua no solvente. Basado en ella, durante la conformación de la suspensión solamente las moléculas de agua penetran al espacio entre las capas elementales del mineral arcilloso, lo cual condiciona el crecimiento de la concentración de iones fosfato en el líquido intermicelar y en consecuencia el efecto de adsorción negativa.

El modo en que la fuerza que condiciona la repulsión de capas elementales varía con la distancia, se refleja en la cinética del incremento del espesor de la capa intermedia de líquido entre las partículas y la aparición de puntos de inflexión en la cinética de adsorción de iones fosfato por montmorillo-

nita. Esto se debe a la acción combinada de dos efectos: el contenido de iones fosfato crece al ser adsorbidos en la parte densa de la DC, mientras disminuye debido al surgimiento de la capa intermedia de agua no solvente. Al debilitarse la interacción iónico-electrostática en soluciones electrolíticas altamente concentradas las fuerzas de repulsión estructural constituyen las causas que determinan el aumento de la distancia h entre partículas (11, 28, 29). Si se conocen las regularidades de variación de h en función del tiempo t y de la viscosidad en función de h , en principio es posible encontrar la dependencia de las fuerzas estructurales con la distancia ($P_s(h)$).

Modelo para evaluar la fuerza total entre partículas de montmorillonita

A partir de la ecuación de Stefan-Reynolds se puede describir la interacción de dos discos planos y paralelos que se acercan o alejan con determinada velocidad en un líquido viscoso (30):

$$F = -\frac{3\pi\eta r^4}{4t} \left(\frac{1}{h^2} - \frac{1}{h_0^2} \right) \quad [4]$$

donde r - radio de los discos, t - tiempo transcurrido para que la distancia entre los discos varíe desde h_0 hasta h bajo la acción de la fuerza F .

Se escogió este modelo para determinar la variación de la fuerza de interacción entre capas elementales de Na-montmorillonita (durante la cinética de adsorción negativa de iones fosfato con $C_0=1 \text{ g-eq/dm}^3$), separadas por una capa de agua no solvente cuya viscosidad (η) depende de su espesor (h) y éste a su vez del tiempo. Para adaptar este modelo a los resultados experimentales obtenidos se transformó la ecuación [4] a la siguiente expresión:

$$F = - \frac{3\pi\eta r^4}{2h^3} \frac{dh}{dt} \quad [5]$$

Resultados y Discusión

La variación temporal del espesor de la capa de agua no solvente se determinó a partir de la dependencia temporal de la concentración de iones fosfato en el medio de dispersión (vinculada a h en la Figura 1 por la ecuación de balance) $C(t) = C_0 - \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \Gamma(t)$ y la su-

perficie específica del sorbente (S) (31). Esta dependencia se muestra en la Figura 2 (curva 1) y la misma se ajustó satisfactoriamente a una función exponencial, de manera que su derivada ($\frac{dh}{dt}$) pudo expresarse analíticamente para cualquier valor de t . La fuerza de interacción entre partículas se puede calcular al sustituir los valores de la derivada $\frac{dh}{dt}$,

para diferentes intervalos de tiempo, y el de la dependencia funcional $\eta(h)$, obtenida por Palacios et al. (23), en la ecuación [5]. Sin embargo, para comparar los valores de F hallados de esta manera con las fuerzas superficiales de interacción analizadas anteriormente es conveniente relacionarlos a la unidad de área:

$$P = - \frac{3\eta r^2}{2h^3} \frac{dh}{dt} \quad [6]$$

En la Figura 2 (puntos asociados a las líneas 2, 3 y 4) se reflejan los valores de la fuerza por unidad de superficie (P) al utilizar diferentes funciones que describen las dependencias de viscosidad con el espesor de la capa de líquido. Como se infiere de la figura, al variar el espesor de la capa intermedia líquida desde aproximadamente $5 \cdot 10^{-8}$ hasta $20 \cdot 10^{-8}$ cm, los valores de P disminuyen aproximadamente en 5 órdenes. Se aprecia además que la utilización de diferentes tipos de funciones $\eta(h)$ influye débilmente en los valo-

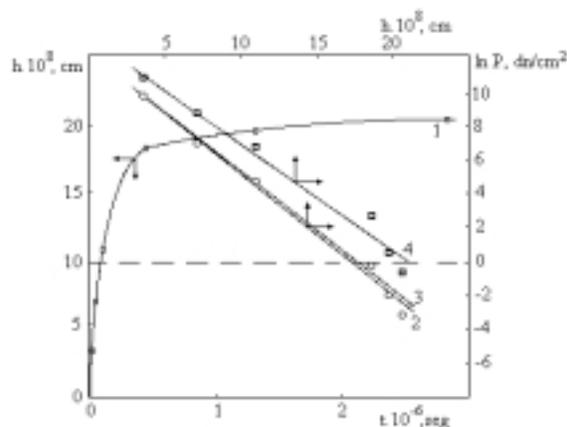


Figura 2. Dependencia de la distancia entre superficies de capas elementales de Na-montmorillonita con el tiempo de interacción con solución de NaH_2PO_4 en concentración de 1 g-eq/dm^3 (curva 1) y fuerza de interacción entre partículas calculada a partir de tal dependencia (rectas 2 - 4) y suponer variación de la viscosidad en capas comprimidas dada por: 2. dependencia funcional encontrada por Palacios et al. (1999) y resultados de Deriaguin et al. (1985), 3.- aproximación de los resultados de Tovbina (1967) y 4. con $\eta=1$ poise. En los cálculos se asumió $r=1,10^{-4}$ cm.

res de P , para los cuales en primera aproximación se puede decir que dependen exponencialmente del espesor de la capa de líquido en correspondencia con la expresión establecida para las fuerzas estructurales [2].

Las rectas 2, 3 y 4 corresponden al ajuste por mínimos cuadrados de los pares (P, h) a la ecuación [2]. Correspondientemente, los parámetros obtenidos fueron: $k=2,00 \cdot 10^5$; $2,12 \cdot 10^5$ y $5,09 \cdot 10^5 \text{ dn/cm}^2$ y $l=1,41 \cdot 10^{-8}$; $1,38 \cdot 10^{-8}$ y $1,60 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$. A primera vista parece que existe satisfactoria correspondencia entre los resultados teóricos y experimentales. Esta correspondencia se manifiesta en la dependencia lineal de $P(h)$ y en la proximidad de los valores del parámetro l con los determinados para sistemas análogos (17). Sin embargo, existen

una serie de factores por los cuales no es posible plantear que la función hallada $P(h)$ corresponda a la fuerza estructural de repulsión caracterizada por la ecuación [2].

1. En la dependencia $P(h)$ se debe tener en cuenta a las fuerzas de atracción molecular, o sea, la dependencia experimental obtenida debe representar la suma de las fuerzas estructurales y moleculares. Si se utiliza la expresión [1] como aproximación para caracterizar las fuerzas de atracción molecular (P_m), así como los valores k y l obtenidos, en principio se puede evaluar la constante de Hamaker (A) a partir de la condición de equilibrio $P_s = P_m$. Esta condición de equilibrio se establece para la distancia interplanar de equilibrio $h_0 = 21,1 \cdot 10^8$ cm cuando en la suspensión de Na-montmorillonita la concentración del electrolito es de 1 g-eq/dm³ (32). Para este valor de h_0 se obtuvo un valor de la constante de Hamaker igual a 10^{-18} ergios, el cual es aproximadamente en cinco órdenes menor que el valor de A comúnmente observado en experimentos o calculado teóricamente (13).

2. El valor obtenido del parámetro k (de la ecuación [2]) igualmente es menor que los determinados para lecitina (17) y mica (33) aproximadamente entre 4 y 6 órdenes.

3. La necesidad de tener en cuenta las fuerzas moleculares de atracción se infiere directamente de la teoría de interacción de partículas dispersas durante la acción entre ellas de fuerzas estructurales (13).

Por las razones expuestas, se planteó representar la dependencia obtenida $P(h)$ como la fuerza resultante debido a la suma de las fuerzas estructurales de repulsión y las moleculares de atracción en la forma:

$$P(h) = k_0 \exp\left(-\frac{h}{l_0}\right) + k \exp\left(-\frac{h}{l}\right) - \frac{A}{6\pi} \left[\frac{1}{h_3} + \frac{1}{(h+2b)^3} - \frac{2}{(h+b)^3} \right] \quad [7]$$

Para determinar los valores de los parámetros se tuvo en cuenta que se cumplirían las siguientes condiciones:

1. Mínima desviación cuadrática media entre resultados teóricos y experimentales.

2. Fuerza total de interacción igual a cero ($P_s = P_m$) cuando h sea igual a la distancia interplanar de equilibrio ($h_0 = 21,1 \cdot 10^8$ cm para la concentración del electrolito empleada).

El algoritmo de búsqueda de los parámetros de la ecuación [7] se resume en lo siguiente: al principio se le asigna cierto valor a la constante de Hamaker A y con ayuda de un sencillo programa escrito en Qbasic, basado en aproximaciones sucesivas, se encuentran los parámetros k_0 , k , l_0 y l que suministrarán el mínimo de desviación cuadrática media entre la función modelada y los puntos experimentales al hacer variar a h con un pequeño paso entre los valores límites experimentales. Luego, con los valores de los parámetros encontrados se comprueba si se cumple la condición $P=0$ para $h=h_0$. Si no se cumple se varía la magnitud A y se repite el procedimiento de búsqueda de los parámetros k_0 , k , l_0 y l , hasta que se cumplan ambas condiciones con un error fijado de antemano.

Como resultado de tales cálculos se demostró que la variación de la fuerza total de interacción de partículas con la distancia, observada experimentalmente, corresponde a la dependencia establecida por la ecuación [7] (línea continua en la Figura 3) si se asignan los siguientes valores a los parámetros: $A = 2,10^{-13}$ erg/cm², $k_0 = 3,56 \cdot 10^9$ dn/cm², $l_0 = 1,24 \cdot 10^8$ cm, $k = 7,46 \cdot 10^7$ dn/cm² y $l = 4,23 \cdot 10^8$ cm.

Los valores de los parámetros obtenidos están en satisfactoria correspondencia con los resultados obtenidos al estudiar la dependencia de las fuerzas estructurales con la distancia (34) y con los resultados del estudio de las fuerzas que conllevan al hinchamiento intercrystalino de la montmorillonita (en el

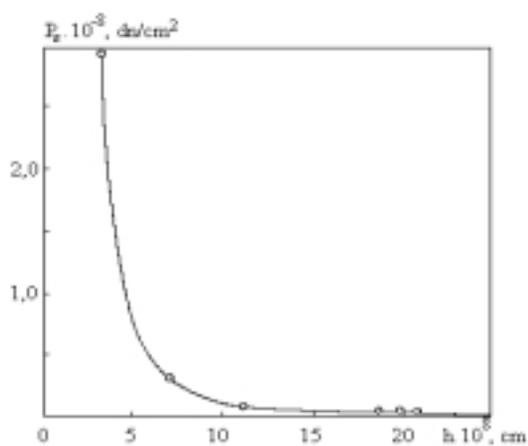


Figura 3. Dependencia de fuerza total de interacción con la distancia interplanar al interactuar partículas de Na-montmorillonita en suspensión con concentración de iones fosfato de 1 g-eq/dm³. La línea continua se obtuvo a partir de la ecuación [7] con $k_0=3,56 \cdot 10^9$ dn/cm², $l_0=1,24 \cdot 10^{-8}$ cm, $k=7,46 \cdot 10^7$ dn/cm² y $l=4,23 \cdot 10^{-8}$ cm.

trabajo de Serebrovskaia et al. (35) se demostró que los resultados experimentales de Norrish (32) se pueden explicar adecuadamente si se asume $A=2,10^{-13}$ ergios).

Sin lugar a duda, las fuerzas estructurales juegan un papel muy importante en la fase inicial de adsorción de iones fosfato de la solución debido a que ellas determinan la intensidad de penetración de agua entre las capas del mineral arcilloso. El signo de la derivada $\frac{d\Gamma}{dt}$ en el instante inicial de tiempo y, posiblemente, en el paso a la fase lenta de la reacción de interacción de iones fosfato con el adsorbente, depende de cuan rápidamente aumenta la distancia entre partículas y se realice la adsorción en los centros "fuertes" (36, 37). De esta manera, las fuerzas estructurales constituyen uno de los factores que condicionan la presencia de puntos de inflexión y adsorción negativa en la dependencia $\Gamma(t)$ para suspensiones de diferentes formas monoiónicas de montmorillonita (1).

Conclusiones

Con la utilización de resultados experimentales sobre la dependencia del volumen insoluble de agua con el tiempo de interacción, en un sistema formado por partículas de Na-montmorillonita en suspensión con concentración de iones fosfato de 1 g-eq/dm³, así como de los valores de viscosidad en función de las distancias interlaminares, se determinó la variación de la fuerza resultante de interacción entre partículas con la distancia.

Al asumir que la dependencia obtenida es el resultado de la suma de las fuerzas estructurales de repulsión y las moleculares de atracción se observó satisfactoria correspondencia entre resultados teóricos y experimentales.

Se demostró que la dependencia de las fuerzas estructurales con el espacio entre partículas puede ser aproximada por la suma de dos exponencias. Se determinaron los parámetros que caracterizan la interacción estructural, los cuales están en satisfactoria correspondencia con valores obtenidos anteriormente para dispersiones de minerales arcillosos, pero por otros métodos, inclusive con los resultados obtenidos para otros sistemas.

Referencias Bibliográficas

1. PALACIOS D. Adsorbtsia fosfat ionov v suspensii ax montmorilonita (Ph.D. Theses), Instituto Tecnológico de San Petersburgo (Rusia), pp. 203, 1990.
2. BARROW N.J., SHAW T.C. *J Soil Sci* 30:67-76, 1979.
3. PETSEV D., DENKOV N., KRALCHEVSKY P. *J Dispersion Sci Technology* 18: 647, 1997.
4. HAMAKER H.C. *Physika* 4: 1058-1070, 1937.
5. DZIALOSHINSKI I.E., LIFSHITS E.M., PITAEVSKI L.P. *Uspieji fis Nauk* 3: 381-402, 1961.
6. CROCKER J.C., GRIER D.G. *MRS Bulletin* 23: 24-31, 1988.

7. PALACIOS D., USJIAROV O., PALACIOS F. **Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas** Edit. Troyani y Cerrolaza. Sociedad Venezolana de Métodos Numéricos en Ingeniería (Venezuela), VA-1/VA-8, 2000.
8. BARBOI B.M. **Kolloidnii Zsurnal** 25: 385-396, 1963.
9. MULLER V.M. **Sb. Poverjnosnie sili v tonkij plionkaj i ustoichivost kolloidov** Edit **Nauka, Moscu (Rusia)**, pp. 245-249, 1974.
10. SHARMA A., WALZ J.Y. **Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions** 92: 4997-5004, 1996.
11. DERIAGUIN B.V., KUSAKOV N.M. **Izvestiia Akademi Nauk CCCR. Seriiia jimi-cheskaia** 5: 1119-1152, 1937.
12. DERIAGUIN B.V., ZORIN Z.M. **Zhurnal Fizicheskoi Jimii** 6: 1010-1019, 1965.
13. DERIAGUIN B.V., CHURAEV N.V., MULER V.M. **Povierjnostnie sili** Edit. Nauka, Moscu (Rusia), pp. 73, 1985.
14. ZORIN Z.M., SOBOLEV V.D., CHURAEV N.V. **Sb. Poverjnosnie sili v tonkij plionkaj i ustoichivost kolloidov** Edit. Nauka, Moscu (Rusia), pp. 214-221, 1972.
15. ZORIN Z.M., NOVIKOVA A.B., PETROV A.K., CHURAEV N.V. **Sb. Poverjnosnie sili v tonkij plionkaj i ustoichivost kolloidov**. Edit. Nauka, Moscu (Rusia), pp. 94-103, 1974.
16. LJUNGGREN S., ERIKSSON J.C., KRALCHEVSKY P.A. **J Colloid Interface Sci** 191: 424-441, 1997.
17. MARCELJA S., RADIC N. **Chem Phys Letters** 42: 129-134, 1976.
18. PASHLEY R.M. **Adv Colloid and Interface Sci** 16: 57-62, 1982.
19. KARABORNI S., SMIT B., HEIDUG W., URAI J., VAN OORT E. **Science** 271: 1102-1104, 1996.
20. DUMANSKI A.B. **Liofilnost dispersnij sistem** Edit. Akademi Nauk UCCP, Kiev (Ucrania), 1960.
21. LOW P.F. **Soil Sci Soc Am Proc** 40: 500-505, 1976.
22. LOW P.F. **Soil Sci Soc Am Proc** 43: 651-660, 1979.
23. PALACIOS D., USJIAROV O.G., CASTRO D., SAJO-BOHUS L. **Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.** 14(1): 83-90, 1999.
24. VIANI B.E., LOW P.F., ROTH C.B. **J Colloid and Interface Sci** 96: 229-244, 1983.
25. ISRAELACHVILI J.N., ADAMS G.F. **J Chem Phys** 50: 1516-1523, 1969.
26. PASHLEY R.M. **Colloid and Polim Sci** 5: 142-150, 1987.
27. TOVBINA Z.M. **Sb Issliedovania v oblasti poverjnostnij sil** Edit. Nauka, Moscu (Rusia), pp. 24-30, 1967.
28. DERIAGUIN B.V. **Sb Uspeji kolloidnoi Jimii** Edit. Nauka, Moscu (Rusia), pp. 30-38, 1973.
29. DENKOV N.D., KRALCHEVSKY P.A. **Prog Colloid Polymer Sci** 98: 18, 1995.
30. FUKS G.I. **Trudi Bcecoiuz Konf po Kolloidn Jimii** Edit. Akademi Nayk CCCR, Moscu (Rusia), pp. 301-328, 1956.
31. VAN DEN HUL H.J., LYKLEMA J. **J Colloid Interface Sci** 23: 500-508, 1967.
32. NORRISH K. **Disc Faraday Soc** 18: 120-134, 1954.
33. ISRAELACHVILI J.N., ADAMS G.F. **J Chem Soc Faraday Trans Part** 17(4): 975-1001, 1978.
34. MARTINOV G.A., MULLER V.M. **Sb Povierjnostnie sili v tonkij plionkaj i dispersnij sistemaj** Edit. Nauka, Moscu (Rusia), pp. 7-24, 1972.
35. SEREBROVSKAIA M.V., MULLER B.M., USJIAROV O.G. **Kolloidnii Zsurnal** 34: 729-735, 1972.
36. PALACIOS D., CASTRO D., PÉREZ M. **En: Simulación con Métodos Numéricos** Edit. Cerrolaza et al., Ciudad Guayana (Venezuela), pp. TM53-TM62, 1998.
37. PALACIOS D., USJIAROV O.G., CASTRO D. **Revista CIENCIA** 7(2): 181-191, 1999.