

Factores que influyen en el proceso de ozonización de agua en columnas de burbujeo

Mayra Bataller, Tito Díaz,* Eliet Véliz, Lilia Asela Fernández y Caridad Alvarez.

Centro de Investigaciones del Ozono, Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Avenida 25 y 158, Playa, Apartado Postal 6414, *Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Ciudad de La Habana, Cuba.

Recibido: 2 de noviembre de 1999. Aceptado: 16 de mayo del 2000.

Palabras clave: ozono, tratamiento de agua con ozono, columna de burbujeo.
Key words: ozone, ozone water treatment, bubble column.

RESUMEN. El empleo del ozono en el tratamiento de aguas recibe cada vez mayor aplicación a escala internacional, debido a sus excelentes propiedades como germicida y oxidante. Los reactores de burbujeo tienen una amplia aplicación, especialmente las columnas de burbujeo. El estudio se realizó en una columna de burbujeo experimental de 0,20 m de diámetro interno y 4 m de altura bajo condiciones de operación similares a aquellas instaladas en sistemas de tratamiento que se encuentran en funcionamiento en Cuba. Un diseño factorial experimental fue empleado para obtener modelos estadísticos que permitieran analizar el efecto del flujo de gas (0,18 a 0,36 m³/h), del flujo de agua (1 a 3 m³/h) y de la concentración de ozono en el gas a la entrada (12 a 18 g/m³) en el proceso de ozonización del agua, con lo que se evaluó el coeficiente volumétrico de transferencia de masa gas líquido y la concentración de ozono en el agua a la salida de la columna. Se verificó que el coeficiente volumétrico de transferencia de masa gas-líquido se favorece con el incremento del flujo de gas al igual que con el flujo de líquido; sin embargo, a partir de 2 m³/h, no hay una mejora sustancial de este coeficiente, para este tipo de columna en el intervalo bajo estudio. Por otra parte, no se obtuvo un efecto significativo de la concentración de ozono en el gas a la entrada de la columna sobre el coeficiente volumétrico de transferencia de masa, mientras que sí influye en la concentración de ozono en el agua a la salida de la columna. Se apreció que al disminuir el flujo de agua junto con un incremento del flujo de gas, la variable *concentración de ozono disuelto a la salida de la columna* se favorece incluso para la concentración menor de ozono gaseoso que se suministra.

ABSTRACT. The water treatment based on ozone employment every time receives a more international application, because of its excellent properties as germicide and oxidant. Bubble reactors have an extensive application, especially, bubble column. This paper presents the results on an experimental study in a bubble column 0.2 m diameter and 4 m height and under operating conditions similar to those installed in ozone water treatment systems in service in Cuba. The objective of this study was to obtain statistical models with independent variables for evaluating the effects of parameters such as: liquid flow rate (1-3 m³/h), gas flow rate (0,18-0,36 m³/h) and initial ozone concentration in the feed gas (12-18 g/m³). The volumetric gas liquid mass transfer coefficient and the dissolved ozone concentration at the column outlet were evaluated as dependent variables. An increment of gas flow rate results in an increase of the volumetric gas-liquid mass transfer coefficient. On the other hand, the liquid flow rate does not have an appreciable influence on this coefficient at values greater than 2 m³/h in this study. The results indicate that the ozone concentration in the feed gas has no effect on the volumetric gas liquid mass transfer coefficient but on dissolved ozone concentration at the column outlet. They also indicate that the decreasing of the liquid flow rate and the increasing of the gas flow rate are convenient to increase dissolved ozone concentration at the column outlet, even at the lowest ozone concentration value in the feed gas.

INTRODUCCION

El empleo del ozono en el tratamiento de aguas recibe cada vez mayor aplicación a escala internacional, debido a sus excelentes propiedades como germicida y oxidante, lo que permite obtener un agua de muy elevada calidad. Existe una gran variedad de reactores gas-líquido que pueden emplearse para la absorción del ozono en agua. En la práctica del tratamiento de agua con ozono, los reactores de burbujeo tienen una amplia aplicación, especialmente las columnas de burbujeo. El conocimiento de los parámetros cinéticos y de transferencia de masa es necesario para el adecuado diseño y evaluación del proceso, lo que se ha realizado en general considerando únicamente criterios de desinfección y de consumo de ozono, limitando el análisis integral.¹⁻⁸ Actualmente, la información sobre parámetros de transferencia de masa está muy dispersa y no existe mucha información acerca de reactores gas-líquido industriales o de plantas piloto.

La tecnología OZOCENIC de desinfección de agua con ozono emplea ese tipo de reactor y ha sido utilizada en Cuba en más de 20 instalaciones diferentes,⁹ fundamentalmente en dos direcciones: en el tratamiento de agua para la cría de animales de laboratorio y en la producción de agua mineral embotellada. Los resultados y las ventajas económicas demostradas⁹ son muy satisfactorios, por lo que toda investigación que conduzca al mejoramiento y perfeccionamiento de esta tec-

nología reviste una gran importancia.

Las técnicas de diseño experimental constituyen una herramienta muy útil para analizar procesos y obtener modelos estadísticos con un número de experimentos relativamente pequeño. A partir de los modelos estadísticos, se puede evaluar la influencia de varios factores sobre las variables dependientes seleccionadas, y por lo tanto, proponer las mejores condiciones de operación dentro del intervalo estudiado.

En este trabajo, se evaluó la influencia de diferentes parámetros en el proceso de ozonización de agua empleando una columna de burbujeo. En este sentido, se analizó el efecto del flujo de gas, del flujo de líquido y de la concentración de ozono en el gas a la entrada de la columna sobre la concentración de ozono en el líquido a la salida de la columna (C_{O3Ls}) y del coeficiente de transferencia de masa gas-líquido ($k_L a$), que son parámetros que permiten evaluar la efectividad del proceso de ozonización, así como analizar las condiciones de operación más adecuadas dentro del intervalo de valores seleccionado, que se corresponde con lo utilizado en las instalaciones industriales de Cuba.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo experimental se realizó en una planta piloto (Fig. 1). La columna de 4 m de altura y 0,20 m de diámetro, fue construida de PVC transparente y provista de un difusor de vidrio poroso de 0,15 m diámetro. El estudio se desarrolló en régimen continuo y a contracorriente, el agua entra por el tope de la columna y la mezcla gaseosa de ozono-oxígeno a través del difusor de vidrio poroso colocado en el fondo de aquella.

Se empleó agua de acueducto filtrada por carbón activado para eliminar el cloro residual, la temperatura promedio del agua fue alrededor de 300 K y el pH se mantuvo entre 6,9 y 7,1. Las experiencias fueron llevadas a cabo fijando los valores de flujo de gas en 0,18; 0,27 y 0,36 m³/h y el flujo de agua en 1, 2 y 3 m³/h. La concentración de ozono en el gas a la entrada de la columna fue de 12 ó 18 g/m³, por lo que se trabajó con un diseño factorial de 3² x 2¹. El análisis estadístico de los resultados experimentales (con las variables codificadas) y el ajuste de los modelos se realizó mediante el programa STATGRAPHICS sobre Windows V. 2.1 (1995).

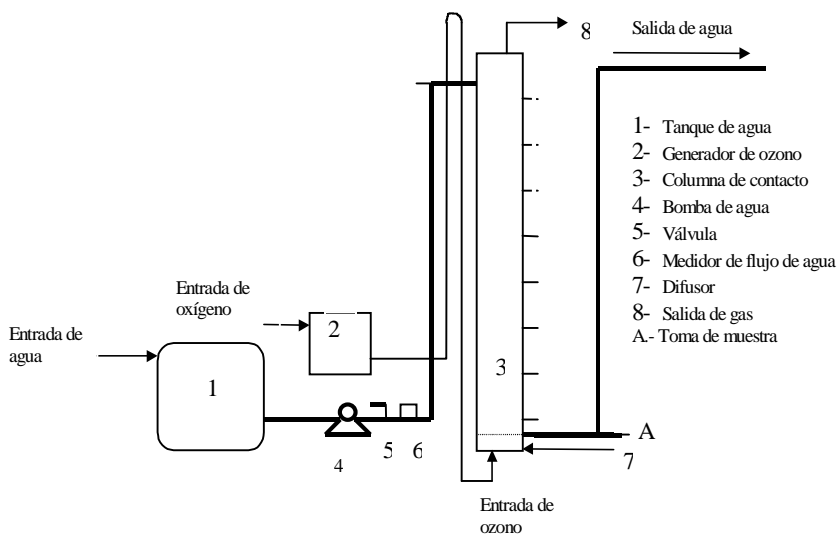


Fig. 1. Esquema general de la instalación de la planta piloto experimental empleada.

El ozono fue suministrado por un equipo modelo OZOCENIC. Para la determinación de la concentración de ozono disuelto a la salida de la columna se tomaron muestras de agua en el punto A (Fig. 1). Se empleó el método colorimétrico del índigo¹⁰ a 600 nm. Las mediciones se realizaron en un espectrofotómetro ULTROSPEC III (Pharmacia) y la concentración de ozono en el gas se determinó mediante un equipo Anseros modelo OZOMAT.

Como criterio para considerar el alcance del estado estacionario, se fijó un tiempo tres veces mayor que el de residencia hidráulico promedio. Este criterio fue corroborado experimentalmente con el tiempo en que se alcanza una concentración estable de ozono en el gas a la salida de la columna.

Los valores de $k_L a$ fueron determinados experimentalmente realizando balances de materiales respecto al ozono en la fase líquida y en la fase gaseosa, según las expresiones siguientes:¹¹⁻¹²

$$k_L a = OT / (\Delta C_{O3L} V) \quad (1)$$

$$OT = Q_G (C_{O3ge} - C_{O3gs}) / Q_L \quad (2)$$

$$\Delta C_{O3L} = \frac{[(C^* - C_{O3L})_b - (C^* - C_{O3L})_t]}{\ln [(C^* - C_{O3L})_b / (C^* - C_{O3L})_t]} \quad (3)$$

donde:

OT ozono transferido (g/h).

V volumen efectivo de líquido (m³).

C_{O3ge} y C_{O3gs} concentración de ozono en el gas a la entrada y a la salida (gO₃/m³).

ΔC_{O3L} intercambio potencial global, se considera como la media logarítmica de los potenciales de intercambio entre el fondo y el tope de la columna.

C_{O3L} concentración de ozono en el líquido (gO₃/m³).

Q_G y Q_L flujo de gas y de líquido (m³/h).

C^* Concentración de ozono en fase líquida en equilibrio con el gas. Se determina aplicando la ley de Henry¹³ y teniendo en cuenta la presión en cada punto de análisis.

Subíndices: t- tope de la columna y b-base de la columna.

También se analizó la influencia de otros parámetros, como la dosis aplicada y la eficiencia global de transferencia de ozono, con el objetivo de tener un criterio de su efecto sobre la concentración de ozono disuelto. Se calcularon por las siguientes expresiones:

$$DA = Q_G (C_{O3ge}) / Q_L \quad (4)$$

$$DC = Q_G (C_{O3ge} - C_{O3gs}) / Q_L \quad (5)$$

$$f = DC / DA \quad (6)$$

donde:

DA dosis de ozono aplicada (gO₃/m³).

DC dosis consumida de ozono (gO₃/m³).

f eficiencia global de consumo de ozono (adimensional).

RESULTADOS Y DISCUSION

Se observó que tanto un incremento del flujo de gas como de líquido conducen a un aumento del valor de $k_L a$ (Tabla 1). Debe destacarse que para el factor *flujo de líquido* no se aprecia una diferencia marcada entre 2 y 3 m³/h; por lo que si solo se

tiene en cuenta el valor del $k_L a$, se puede plantear que a partir de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ no se obtendrá un aumento importante de la eficiencia del proceso de ozonización cuando se incremente este factor. Por otra parte, no parece haber un efecto significativo de la concentración de ozono en el gas sobre el valor de $k_L a$. Se pudiera intentar el estudio del efecto de esta variable para niveles por encima y por debajo de los analizados en este trabajo, aunque se debe recordar que el $k_L a$ depende fundamentalmente de las condiciones hidrodinámicas, de la eficiencia de contacto y de las propiedades físicas de la fase líquida, factores que no deben afectarse por la variación de la concentración de ozono en el gas.

Tomando la información del diseño experimental planteado, se procedió a ajustar un modelo para predecir el valor de $k_L a$. Previo al ajuste estadístico, se realizó la codificación de los valores de las variables independientes. A partir de una simplificación de términos no significativos del modelo más general que corresponde al diseño, se obtuvo el resultado siguiente:

$$k_L a = 0,47 + 0,10 X_1 + 0,085 X_2 - 0,058 X_1^2 + 0,045 X_1 X_2 \quad (7)$$

$$R^2 = 93,3 \%$$

Los coeficientes positivos de los términos lineales del modelo, indican físicamente que un incremento de los flujos favorece al valor del $k_L a$, por lo que se verifica lo expuesto anteriormente; además, los coeficientes de dichos términos tienen valores similares, lo que indica que ambos factores tienen igual importancia. El término cuadrático de Q_L posee signo negativo; sin embargo, por la magnitud del coeficiente, su efecto es bastante menor que el que aporta el término lineal positivo del propio factor.

El comportamiento observado al graficar la superficie de respuesta de $k_L a$ con respecto a las variables *flujo de líquido* (X_1) y *de gas* (X_2) corroboró el efecto positivo de los flujos de ambas fases sobre el $k_L a$ (Fig. 2). Además, la ligera curvatura de la superficie constata una correspondencia con los resultados del estudio, de que un incremento del flujo de líquido por encima de $2 \text{ m}^3/\text{h}$, no incrementa significativamente el valor

del $k_L a$; sobre todo, para flujos de gas menores, la diferencia entre los valores de $k_L a$ dada por el efecto del flujo de líquido es menos marcada entre los flujos 2 y $3 \text{ m}^3/\text{h}$ correspondientes a los niveles 0 y 1.

Se apreció que la concentración de ozono en el gas a la entrada influye en la concentración de ozono disuelto, como era de esperar (Tabla 2). Además, se observó que los valores más elevados de $C_{O_{3LS}}$ (entre $1,57$ y $1,68 \text{ g/m}^3$) se obtuvieron bajo las condiciones experimentales de menor flujo de líquido ($1 \text{ m}^3/\text{h}$), mayor concentración de ozono en el gas de entrada (18 g/m^3) y para los mayores flujos de gas ($0,27$ y $0,36 \text{ m}^3/\text{h}$). Si se introduce la misma cantidad de ozono en la columna, entonces el hecho de que una disminución del flujo de líquido sea favorable a la $C_{O_{3LS}}$ está dado fundamentalmente por el incremento del tiempo de contacto entre ambas fases, además, la dosis aplicada de ozono es mayor, por lo que se favorece el proceso de ozonización del agua.

Tomando la información del diseño experimental planteado, se procedió a ajustar un modelo para predecir el valor de $C_{O_{3LS}}$. Previo al ajuste estadístico, se realizó la codificación de los valores de las variables independientes. El modelo ajustado por una regresión múltiple y que correspondió con el primero más simple que resultaba significativo a partir de una simplificación de coeficientes no significativos del modelo más general que corresponde al diseño, es el siguiente:

$$C_{O_{3LS}} = 0,70 - 0,28 X_1 + 0,22 X_2 + 0,17 X_3 - 0,049 X_1 X_2 + 0,044 X_1 X_3 + 0,050 X_2 X_3 \quad (8)$$

$$R^2 = 92,9 \%$$

El coeficiente más elevado correspondió al flujo de líquido con un efecto lineal negativo, siendo positivo para el flujo de gas y la $C_{O_{3ge}}$, por lo que una disminución del flujo de líquido, así como un incremento del flujo de gas y de la concentración de ozono en el gas favorece al aumento de la $C_{O_{3LS}}$. Atendiendo a las magnitudes de los términos de las interacciones, en todos los casos fueron mucho menores que la de los términos lineales, por lo que son estos últimos los efectos predominantes. Este modelo permite estimar las mejores condiciones de operación que puedan garantizar una $C_{O_{3LS}}$ deseada, según los requerimientos.

Tabla 1. Efecto de los flujos de líquido, de gas y de la concentración de ozono en el gas a la entrada de la columna sobre $k_L a$.

Flujo de líquido (m^3/h)	Flujo de gas	$C_{O_{3ge}} = 12 \text{ g/m}^3$		$C_{O_{3ge}} = 18 \text{ g/m}^3$	
		kLa (min^{-1})			
1	0,18	0,33; 0,33; 0,27		0,25; 0,24; 0,24	
	0,27	0,32; 0,31; 0,32; 0,31		0,31; 0,32; 0,32; 0,29	
	0,36	0,39; 0,35; 0,34; 0,35		0,34; 0,34; 0,32; 0,32	
2	0,18	0,40; 0,40; 0,37; 0,37		0,39; 0,37	
	0,27	0,47; 0,45; 0,45		0,44; 0,43; 0,43	
	0,36	0,60; 0,56		0,61; 0,59; 0,56	
3	0,18	0,34; 0,36; 0,36		0,41; 0,41	
	0,27	0,56; 0,56		0,53; 0,54	
	0,36	0,64; 0,59		0,63; 0,60	

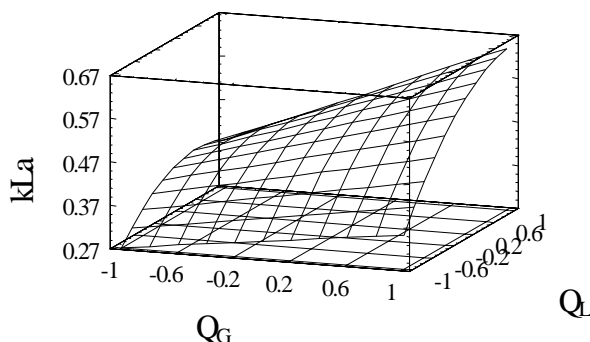


Fig. 2. Superficie de respuesta del $k_L a$ con respecto a las variables Q_L (X_1) y Q_G (X_2).

Tabla 2. Efecto de diferentes factores en el proceso de transferencia de masa.

Q_L (m ³ /h)	Q_G (m ³ /h)	C_{O3ge} (g/m ³)	DA (g/m ³)	f	C_{O3LS} (g/m ³)
1	0,18	12	2,20; 2,21; 2,11	0,92; 0,92; 0,87	0,66; 0,64; 0,58
	0,27		3,29; 3,29; 3,29; 3,29	0,79; 0,79; 0,79; 0,79	0,81; 0,78; 0,80; 0,73
	0,36		4,43; 4,43; 4,36; 4,36	0,72; 0,72; 0,71; 0,71	1,23; 0,84; 0,86; 0,93
	0,18	18	3,28; 3,28; 3,28	0,86; 0,86 ;0,86	0,89; 0,75; 0,75
	0,27		4,91; 4,91; 4,91; 4,91	0,79; 0,79; 0,78; 0,76	1,17; 1,21; 1,39; 1,20
	0,36		6,59; 6,59; 6,48; 6,48	0,70; 0,70; 0,66; 0,66	1,5; 1,4; 1,57; 1,68
2	0,18	12	1,08; 1,11; 1,09; 1,09	0,97; 0,97; 0,96; 0,96	0,30; 0,32; 0,26; 0,24
	0,27		1,66; 1,63; 1,65	0,93; 0,91; 0,91	0,40; 0,52; 0,53
	0,36		2,18; 2,23	0,90; 0,89	0,66; 0,63
	0,18	18	1,62; 1,63	0,96; 0,96	0,77; 0,55
	0,27		2,44; 2,44; 2,43	0,90; 0,90; 0,89	0,95; 0,88; 0,91
	0,36		3,24; 3,29; 3,24	0,89; 0,90; 0,87	1,2; 1,04; 0,94
3	0,18	12	0,73; 0,73; 0,73	0,95; 0,96; 0,96	0,17; 0,18; 0,13
	0,27		1,10; 1,10	0,96; 0,96	0,32; 0,35
	0,36		1,46; 1,46	0,91; 0,93	0,48; 0,50
	0,18	18	1,09; 1,09	0,97; 0,97	0,38; 0,33
	0,27		1,64; 1,64	0,95; 0,95	0,50; 0,56
	0,36		2,18; 2,17	0,92; 0,92	0,88; 0,64

Los modelos representados por las expresiones (7) y (8) permiten estimar el valor del $k_L a$ y de la C_{O3LS} . Tienen como limitación que fueron determinados para un agua modelo (agua calidad potable filtrada por carbón activado) que aunque es un agua de muy buena calidad (premisas de este trabajo) puede diferir en cierta forma en cuanto a las características físico-químicas respecto a las aguas minerales que se envasan, además, solo son válidas para el intervalo de estudio de las variables evaluadas. Sin embargo, el valor de C_{O3LS} y del $k_L a$ obtenido por los modelos estadísticos aunque tentativo proporcionan un criterio de la relación entre las condiciones de operación y estas variables analizadas.

Prestando ahora atención a la dosis aplicada (que involucra las variables concentración de ozono gaseoso a la entrada y los flujos de gas y líquido), se aprecia una correspondencia directamente proporcional con la C_{O3LS} , pues al aumentar este parámetro se incrementa la C_{O3LS} (Tabla 2). Esto conduce de nuevo al hecho de que disminuyendo el flujo de agua junto con un incremento del flujo de gas, la variable analizada se favorece incluso para el nivel menor de concentración de ozono gaseoso. Así, se alcanzan valores que están por encima de 0,4 g/m³, valor recomendado para la desinfección de agua.¹⁴ Se obtiene el modelo siguiente:

$$C_{O3LS} = 0,15 + 0,22 DA \quad (9)$$

$$R^2 = 87,2 \%$$

Bajo las condiciones en que se llevó a cabo el experimento, se pudo corroborar que este modelo es bastante adecuado y mucho más sencillo que el correspondiente a la ecuación (8), por lo que opcionalmente puede emplearse para la predicción de la C_{O3LS} .

Por otra parte, a partir de los resultados (Tabla 2), se puede realizar entonces un análisis integral que conduce a consideraciones que se deben tener en cuenta al diseñar o evaluar el proceso de ozonización del agua y que corrobora la importancia de tener en cuenta tanto la eficiencia global de transferencia de masa como el valor de la C_{O3LS} , así como la dosis aplicada, la concentración de ozono en el gas a la entrada y los flujos de ambas fases. Este análisis integral que se realiza en este trabajo a partir de un número grande de resultados experimentales constituye un aporte al conocimiento del proceso de ozonización, el cual se resumen en:

- La mayor eficiencia global de transferencia de masa no se corresponde con el valor mayor de la C_{O3LS} , que es la variable más importante del proceso de desinfección del agua.
- Si se mantiene una DA y un Q_L constante, cuando se incrementa la C_{O3ge} y se disminuye Q_G , la

C_{O3LS} se incrementa y se aprecia una tendencia a que las eficiencias se mantengan constantes. Por ejemplo, para una DA de 3,28 g/m³ y un Q_L de 1 m³/h, la eficiencia se mantiene en un 87 %, alcanzando una concentración de ozono disuelto de 0,75 a 0,93 respecto a 0,73 a 0,81 g/m³.

- Si la DA y el Q_G no varían, cuando C_{O3ge} y Q_L aumentan, la C_{O3LS} se incrementa y se aprecia una tendencia a que las eficiencias se mantengan constantes. Por ejemplo, para una DA de 1,64 g/m³ y un Q_G de 0,27 m³/h, la eficiencia se mantiene en un orden del 93 %, alcanzando un valor de concentración de ozono disuelto de 0,50 a 0,56 g/m³ respecto a 0,40 y 0,53 g/m³.
- Por otra parte, si no se varían los Q_L y Q_G , aumentando la C_{O3ge} se alcanzan mayores valores de C_{O3LS} y se aprecia que las eficiencias se mantienen constantes, indicando el efecto tan favorable que ejerce la C_{O3ge} , que se puede apreciar también en los dos casos anteriores.

Resumiendo, las mejores condiciones de operación en una columna de burbujeo dada son aquellas que fundamentalmente garanticen la C_{O3LS} requerida para el proceso de desinfección del agua junto con una eficiencia global de transferencia de masa que se aproxime a la unidad.

CONCLUSIONES

El coeficiente volumétrico de transferencia de masa se favorece por un incremento del flujo de gas, pero es independiente de la concentración inicial de ozono en el gas, mientras la concentración de ozono disuelto a la salida de la columna se favorece con la disminución del flujo de líquido, así como con el incremento del flujo de gas y de la concentración de ozono en el gas a la entrada.

La variación de los flujos de gas y de líquido debe realizarse en el sentido de aumentar el valor de la concentración de ozono disuelto para de esta forma, garantizar la desinfección del agua. Aunque la eficiencia global de transferencia de ozono en el reactor es un factor económico importante, no da siempre una adecuada información de la eficiencia del tratamiento del agua, mientras que el valor de la concentración de ozono disuelto para la desinfección del agua es fundamental.

La eficiencia global de transferencia de ozono no varía al mantener constante los flujos de ambas fases e incrementar la concentración de ozono en el gas, cuando se requiere incrementar la concentración de ozono disuelto.

A partir de los resultados experimentales se desarrollaron modelos que permiten estimar el coeficiente de transferencia de masa y la concentración de ozono disuelto a la salida de la columna de contacto en el intervalo estudiado.

BIBLIOGRAFIA

1. Roustan M., Beck C., Wable O. Modelling hydraulics of ozone contactor, **Ozone Sci. and Eng.**, **15**, 213, 1993.
2. Roustan M., Wang R., Wolbert O. Modelling hydrodynamics and mass transfer parameters in a continuous ozone bubble column, **Ozone Sci. and Eng.**, **18**, 21, 99, 1996.
3. Le Sauce N., Laplanche A., Martin G., Langlais B. The residence time distribution of the liquid phase in a bubble column and the effect on the ozone transfer, 10th Ozone World Congress, Monaco, 1991.
4. Martin N., Benent-Tousle M., Laplanche C. Design and efficiency of ozone contactor of disinfection- **Ozone Sci. and Eng.**, **14**, 5, 391, 1992.
5. Laplanche A., Sauze N., Martin G., Langlais B. Simulation of ozone transfer in water comparison with a pilot unit, **Ozone Sci. and Eng.**, **13**, 5, 535, 1991.
6. Zhou H., Smith D. Modelling of dissolved ozone concentration profiles in bubble columns, **J. of Env. Eng.**, **120**, 4, 821, 1994.
7. Richard Y. Principles of ozone oxidation and disinfection design, **Ozone Sci. and Eng.**, **7**, 163, 1985.
8. Richard Y., Brerner L. Study of Ozone Dissolution Efficiency in Line with Ozone Demand of Water. Proc. 8th Ozone World Congress, Zurich, Switzerland: IOA, 2, 73, 1987.
9. Molerio J., Pérez R., Bataller M., et al. Tratamiento de agua con ozono. IX Forum de Ciencia y Técnica, La Habana, 1992.
10. Bader H., Hoigné J. Determination of ozone in water by indigo method, **Water Research**, **15**, 4, 449, 1981.
11. Roustan M., Dughet J.P, Brette B., et al. Mass Balance Analysis of Ozone in Conventional Bubble Contactors, **Ozone Science and Engineering**, **9**, 3, 289, 1987.
12. Roustan R., Wang R., Wolbert D. Modeling Hydrodynamic and Mass Transfer Parameters in a Continuous Ozone Bubble Column, **Ozone Science and Engineering**, **18**, 3, 99, 1996.
13. Sotelo J. Beltrán F. y col. Ozone Descomposition in Water: Kinetic Study, **Ind. Eng. Chem. Res.**, **26**, 39, 1987.
14. Richard Y. Principles of ozone oxidation and disinfection design, **Ozone Science & Engineering**, **7**, 163, 1985.



RESULTADOS NOVEDOSOS DEL TRABAJO CIENTIFICO
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR DE CUBA

DESARROLLO DE TECNOLOGIAS PARA LA FABRICACION DE CELDAS SOLARES Y FOTODETECTORES A PARTIR DE SILICIO MONOCRISTALINO

Instituto de Materiales y Reactivos para la Electrónica y Facultad de Física, Universidad de la Habana.

Se han creado y aplicado métodos científicos propios que han constituido la base para el desarrollo de la tecnología de fabricación de celdas solares y fotodetectores a partir de silicio monocristalino. Los principales resultados abarcan:

El estudio de las interfases en celdas solares de silicio monocristalino y sus velocidades de recombinación.

El desarrollo y estudio de procesos físicos y tecnológicos aplicables a la fabricación de celdas solares con contactos depositados por níquel "electroless". Establecimiento de las cartas tecnológicas para su transferencia a la industria.

La introducción y aplicación de un método cubano, a nivel industrial, para la producción de fotodetectores y para su utilización en arreglos de fotodiodos.

La obtención y aplicaciones de fotodiodos sobre la base de silicio monocristalino para desarrollos tecnológicos de fotodetectores.

El desarrollo de nuevas heteroestructuras fotodetectoras para la obtención de dispositivos de muy bajo costo y elevada eficiencia.