

El sistema de ecuaciones (1) - (8), conjuntamente con el sistema similar conformado para el cobalto, constituyen el modelo matemático del proceso de calcinación de carbonato básico de níquel en un horno tubular, en el caso de la modelación por zonas de dicho horno. Este modelo una vez sometido a la identificación permite juz-

gar el comportamiento de las diferentes variables del proceso en la zona de calcinación. Un modelo con esta misma estructura para las demás zonas, completaría en definitiva, el modelo matemático del proceso y el horno en general.

#### CONCLUSIONES

Mediante el análisis del proceso de calcinación como objeto de regulación automática ha sido posible clasificar las variables del proceso en tres tipos, de entrada, salida y perturbaciones, y al mismo tiempo, descubrir la alta complejidad de la interacción de estos parámetros en dicho proceso. Así mismo, se conforma basado en los resultados del análisis realizado, el modelo matemático de la zona de calcinación, el cual una vez identificado permitirá llegar al algoritmo de regulación, necesario para la proyección del sistema de regulación automática co-

respondiente. Para la obtención del modelo matemático se consideró un volumen infinitesimal de la zona de calcinación tomado a lo largo del horno. Esto, lógicamente, trae como consecuencia, que el modelo permitiría conocer la variación en el tiempo de las diferentes magnitudes para una posición determinada en la zona, o sea, para aquella en la cual sea identificado. La identificación para diferentes posiciones daría una información más completa de la zona.

#### REFERENCIAS

1. ARLIUK B., I.: "Regularidades del intercambio de calor en los hornos rotatorios". En *Tsvietnaya Metalurgia*, p. 20, No. 3, 1985.
2. ARONZON V., L.; LEBIN M., V. y SHAJOV S., V.: "Sobre el efecto homogenizador del horno rotatorio" En *Tsvietnye Metally*, p. 19, No. 10, 1982.
3. DETKOV S., P.: "Intercambio térmico en los hornos rotatorios". En *Tsvietnye Metally*, p. 12, No. 3, 1986.
4. "Manual de operaciones del horno de calcinación de la Planta de Calcinación y Sínter de la Empresa Comandante Ernesto Guevara de la Serna". 1980.
5. TIJONOV O., N.: *Modelos matemáticos simples de procesos metalúrgicos*. Leningrado, Instituto de Minas de Leningrado, 1978.



## EMISIONES GASEOSAS DE LA FABRICA "CMDTE PEDRO SOTTO ALBA" Y SU INFLUENCIA NEGATIVA SOBRE EL MEDIO AMBIENTE. PRIMERA PARTE

Ing. Angel Pérez Rodríguez

Instituto Superior Minero Metalúrgico

**RESUMEN** En la primera parte del trabajo se realizó un análisis de los principales contaminantes gaseosos que se producen en la fábrica "Comandante Pedro Sotto Alba", con el objetivo de estudiar los mismos, las causas que los provocan y su influencia negativa sobre los principales componentes de la noosfera. Se estudió el flujo tecnológico de la planta de producción de ácido sulfúrico por el método de contacto, realizándose los cálculos correspondientes a la sección de conversión.

**ABSTRACT** In the first part of the present work, a deep analysis of the most significant gaseous pollutants produced in "Comandante Pedro Sotto Alba" factory, with the objective of studying the, causes provoking these pollutants and their negative influence upon the principal components of the noosphere. The technological flow of sulphuric acid production plant through the contact method was done, making the corresponding calculations in the conversion section.

#### INTRODUCCION

El desarrollo de la revolución científico-técnica, unido a la creciente actividad del hombre a escala industrial, ha traído consigo cambios positivos en el mundo. Paralelo a este desarrollo, ha empeorado considerablemente el estado del medio. La contaminación de la atmósfera, los grandes depósitos de agua y el suelo por residuos sólidos, líquidos y gaseosos, provenientes de las grandes industrias y fábricas, ha llegado a límites preocupantes. El continuo empeoramiento del estado de la atmósfera puede traer graves consecuencias en el futuro desarrollo de la humanidad.

La importancia que reviste para nuestro país la aplicación y promoción de actividades encaminadas a la protección del entorno y al uso racional de los recursos

naturales, ha quedado plasmado en el Programa del Partido Comunista de Cuba "... destinar los recursos indispensables para impedir el deterioro del ambiente; aplicar en las industrias las medidas que impidan la contaminación ambiental; orientar el progreso científico-técnico al aprovechamiento de los recursos naturales, y a la protección eficaz y el mejoramiento del ambiente ...".

Nuestro trabajo, en su primera parte, tuvo como objetivo el estudio y caracterización de los principales contaminantes gaseosos de la fábrica "Comandante Pedro Sotto Alba". Especial atención se prestó al análisis del proceso de producción de ácido sulfúrico por el método de contacto, realizándose los cálculos de la sección de conversión.

## SUSTANCIAS CONTAMINANTES GASEOSAS DE LA FABRICA "CMDTE PEDRO SOTTO ALBA"

La fábrica "Comde Pedro Sotto Alba", situada en el municipio Moa, al noroeste de la provincia Holguín, forma un complejo hidrometalúrgico productor de Ni + Co. En la figura 1 se muestra un diagrama general de esta industria (los círculos que aparecen dentro de los rectángulos, representan la cantidad de chimeneas que posee cada planta auxiliar).

función tiroidea y, en la mujer, irregularidades menstruales.

Efectos catastróficos trae este gas al mundo de las plantas: al penetrar a través de los estomas, trastorna el proceso de fotosíntesis y respiración, ocasionando un deterioro agudo de las hojas. Se ha demostrado la existencia de un estrecho vínculo entre la intensidad de la

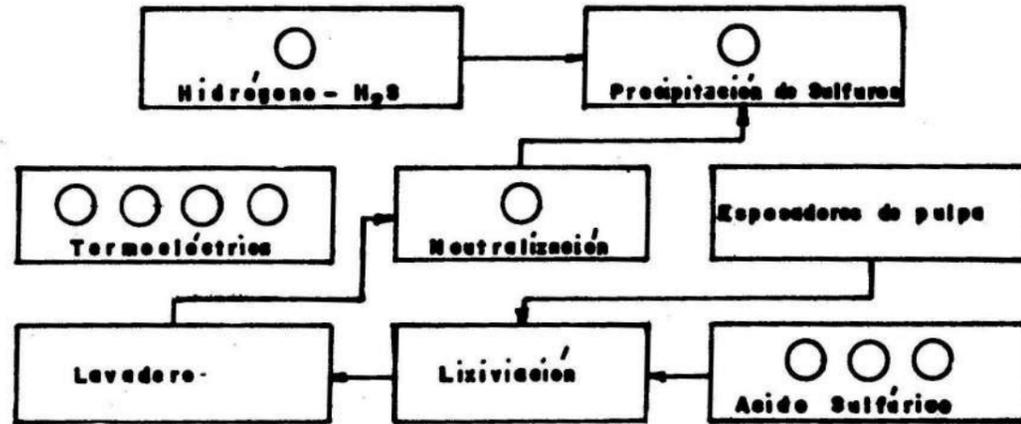


Figura 1 Diagrama general de la industria

Las plantas auxiliares que se encuentran ubicadas en la fábrica, aceleran la contaminación de esta zona, con los desechos gaseosos que en ellas se producen. En la tabla 1 se observan las diferentes plantas auxiliares, su producción, cantidad de chimeneas y su altura, denominación de los contaminantes y la cantidad que se expulsa hacia la atmósfera. Las principales sustancias contaminantes que se producen son el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) y el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S).

El dióxido de azufre es un gas incoloro, con olor penetrante y sabor ácido, muy soluble en agua, solventes orgánicos y ácido sulfúrico. Se combina fácilmente con agua (H<sub>2</sub>O) y se oxida para formar ácido sulfuroso (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) y más tarde convertirse, lentamente, en ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

El SO<sub>2</sub> es un gas irritante y sus efectos son consecuencia de la formación de H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al contactar con las mucosas húmedas o por vía percutánea. Su acción tóxica general se evidencia por alteraciones del metabolismo proteico y de los carbohidratos, déficit de vitaminas B y C e inhibición de oxidasa. Las intoxicaciones agudas se producen por inhalación de altas concentraciones, caracterizándose por irritación conjuntival y de la mucosa de las vías respiratorias, seguidas por alteraciones de la conciencia. La muerte sobreviene por asfixia como resultado del espasmo reflejado en la laringe y detención circulatoria súbita a nivel pulmonar. Pueden producirse caries dentales y alteraciones periodontales y gingivales. Se pueden observar inhibición de la

corrosión y la concentración del SO<sub>2</sub> en la atmósfera. El trióxido de azufre es muy soluble en disulfuro de carbono (CS<sub>2</sub>) y ácido sulfúrico, existe en forma monomérica, es inodoro y más pesado que el aire. La presión de vapor del SO<sub>3</sub> aumenta rápidamente con la elevación de la temperatura y cuando la forma α (alfa) funde, la presión alcanzada es explosiva.

El SO<sub>3</sub> reacciona violentamente con el agua, produciendo ácido sulfúrico, siendo esta reacción altamente exotérmica. Cuando se expone a la humedad del ambiente, desprende vapores y forma una niebla de ácido sulfúrico que puede llegar a ocupar todo el espacio útil y corroer los metales. Es un oxidante poderoso y en estado líquido carboniza la materia orgánica.

Este gas penetra en el organismo por vía respiratoria y actúa como irritante local y como tóxico general de forma análoga al SO<sub>2</sub>, si bien su capacidad irritativa es mayor. Produce lesiones en el aparato respiratorio y puede disminuir la reserva alcalina, el metabolismo de los hidratos de carbono y de las proteínas.

El sulfuro de hidrógeno es un fuerte veneno tóxico nervioso. La sensación al olfato de H<sub>2</sub>S permitida al hombre se encuentra entre los valores de concentración de 1 a 3 · 10<sup>-5</sup> mg/L. Para valores de 4 · 10<sup>-3</sup> mg/L se siente un olor característico. Dolores en los ojos y en la cabeza comienzan a sentirse cuando la concentración de este gas alcanza un valor de 6 · 10<sup>-3</sup> mg/L, si se respira aproximadamente durante cuatro horas. Si se llegara a respirar H<sub>2</sub>S con concentración de 1 mg/L se produciría

la muerte casi instantáneamente, con pérdida del sentido y la respiración. Los indicadores naturales para observar el aumento de concentración de este gas en el aire son los ojos, los que comienzan a enrojecer y a lagrimear casi al instante.

En la tabla 2 se muestran los valores de las concentraciones máximas admisibles (CMA) establecidos, según las normas cubanas, por el Instituto de Medicina del Trabajo.

Tabla 2

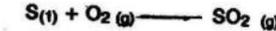
Nombre de la sustancia	CMA, mg.m <sup>-3</sup>	Clasificación de toxicidad
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	1	2
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	10	3

En la tabla 1 se observa que la mayor cantidad de sustancias contaminantes son producidas en la planta de ácido sulfúrico (94, 5 g/s de SO<sub>2</sub> y 11,5 g/s de SO<sub>3</sub> para un tren en producción). Con el objetivo de analizar las posibles causas que provocan la emisión de estos gases en dicha planta por encima de la norma, se estudió el flujo tecnológico de la misma y en especial la conversión de SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub> en el convertidor.

Descripción del proceso tecnológico:

El proceso de obtención de ácido sulfúrico por el método de contacto, utilizando azufre líquido, comprende las siguientes etapas:

1. Quema de azufre (S) líquido y recuperación del calor, acompañado por la generación de vapor de alta presión.
  2. Conversión del dióxido de azufre en trióxido de azufre.
  3. Secado del aire y absorción del trióxido de azufre.
- Quema de azufre líquido y recuperación del calor acompañado por la generación de vapor de alta presión: La combustión del azufre en la corriente de aire transcurre según la reacción:



La reacción está acompañada por la formación del gas que contiene anhídrido sulfuroso y el desprendimiento de calor. El contenido del SO<sub>2</sub> en el gas, depende de la correlación entre el azufre y el aire alimentado al horno. Para obtener una combustión más completa es necesario regular la alimentación del aire, de modo que el gas siempre contenga oxígeno en exceso.

El proceso de combustión del azufre líquido y la recuperación del calor formado, tiene lugar en la sección horno-caldera que consta del hogar de ciclón con anillos de estrangulamiento y caldera recuperadora.

Los gases que se forman durante la combustión del azufre con una concentración aproximada de 11 a 11,5 % de SO<sub>2</sub> y temperatura hasta 1 300 °C, pasan por el supercalentador donde se enfrían hasta 460-470 °C. De aquí son enviados al convertidor de una capa.

Conversión del dióxido de azufre en trióxido de azufre:

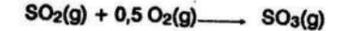
En el proceso de conversión tiene gran importancia la velocidad de la reacción de oxidación del SO<sub>2</sub>, de la cual depende la cantidad de SO<sub>2</sub> convertido en una unidad de tiempo por unidad de catalizador, y por consi-

guiente, el consumo de catalizador, las dimensiones del convertidor y otros indicadores del proceso de conversión.

La velocidad del proceso de conversión depende directamente de la constante de la velocidad de reacción, que crece con el aumento de la temperatura, y del grado equíponderante de conversión que baja con el aumento de la temperatura. Por lo tanto, para controlar dicho proceso, es necesario escoger la "óptima temperatura"

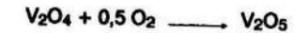
donde la velocidad sea mayor. Además, la velocidad de oxidación depende de la composición de la mezcla gaseosa; por esto, las temperaturas óptimas serán distintas para diversas composiciones del gas.

En la producción del ácido sulfúrico por el método de contacto, la conversión del SO<sub>2</sub> en SO<sub>3</sub> transcurre en presencia del catalizador, según la reacción:



En calidad de catalizador se utiliza la masa de contacto de vanadio CBC. En la composición del CBC se introduce metabisulfito de potasio (K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) que forma el complejo activo V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>7</sub>.

El dióxido de azufre y el oxígeno absorbidos por la superficie del catalizador, disueltos en la masa fundida, interaccionan con el pentóxido de vanadio según las siguientes reacciones:



Con el tiempo la actividad de la masa de vanadio se reduce, por esto, para alcanzar el máximo grado de conversión es necesario aumentar poco a poco la temperatura del gas a la entrada de todas las capas de la masa de contacto del convertidor.

La reacción de oxidación del SO<sub>2</sub> es exotérmica. El calor de reacción (Q) de 1 mol de SO<sub>2</sub> a convertir a presión constante en el intervalo de temperatura de 400 a 700 °C, puede ser calculado con suficiente exactitud por la ecuación:

$$Q = 24\,205 - 2,21 T; \text{ Kcal/mol}$$

donde:

T-temperatura, K

El gas sulfuroso con una temperatura aproximada de 460 °C y 11 % en volumen de SO<sub>2</sub>, se diluye con aire.

Al entrar al convertidor de una capa, la mezcla aire-SO<sub>2</sub> posee una temperatura de 390 °C y concentración de SO<sub>2</sub> igual a 9,76 %. El dióxido de azufre se oxida y la temperatura del gas, a la salida de la capa, sube hasta 590 °C. El flujo gaseoso se enfría en el supercalentador hasta 495 °C y por el gasoducto entra en el convertidor de tres capas. Este tiene un tubo central en el cual están empotrados tres intercambiadores de calor y en él se apoyan los emparrillados de las capas.

La masa gaseosa enfriada de antemano en el espacio intertubular del intercambiador de calor interior, hasta 440-450 °C, entra a la primera capa del convertidor de tres capas. Después de la primera capa, el gas calentado hasta 495 °C a consecuencia de la reacción de conversión de SO<sub>2</sub> en SO<sub>3</sub>, se enfría en el intercambiador de calor hasta 435 °C, pasando a la segunda capa. Luego el gas se diluye, enfriándose hasta 420 °C dirigiéndose a la tercera masa del convertidor. Luego, el gas pasa a través del intercambiador, donde se enfría hasta 280 °C, enviándose a la absorción del anhídrido sulfúrico por el gasoducto.

El grado de conversión teórico constituye el 97,5 %. Para enfriar el gas dentro de los tubos de los intercambiadores de calor del convertidor, se alimenta aire frío seco que luego pasa al horno de azufre.

Secado del aire y absorción del trióxido de azufre:

Debido a que los vapores de agua contenidos en el aire que alimenta el sistema, provocan la formación de una niebla fina de ácido sulfúrico poco capturable, el aire, antes de ser alimentado al horno, se seca.

Tabla 3 Resultados del balance material por capas

Componentes de la mezcla gaseosa	Flujo másico				
	1 Capa	2 Capa	3 Capa	4 Capa	5 Capa
	Ingreso	Egreso	Egreso	Egreso	Egreso
SO <sub>3</sub>	-	1 419,15	1 784,08	1 946,25	1 986,79
SO <sub>2</sub>	1 620	484,68	192,73	63,00	30,57
O <sub>2</sub>	933,89	650,06	577,08	544,64	536,53
N <sub>2</sub>	5 743,40	5 743,40	5 743,40	5 743,40	5 743,40
Total	8 297,29	8 297,29	8 297,29	8 297,29	8 297,29

El aire de la atmósfera, tomado del soplador, pasa a la torre de secado, donde se seca por el ácido de concentración de 98,3 a 98,8 %.

El rociado de la torre de secado con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> permite lograr el grado necesario del secado del aire (al salir de la torre de secado debe tener una humedad no mayor de 0,01 %).

Tabla 4 Resultados del balance energético por capas

Parámetros	1 Capa	2 Capa	3 Capa	4 Capa
Calor de reacción, kJ/mol	94 128,46	94 331,89	94 544,16	94 682,73
Temperatura promedio, K	763	741	718	703

La última etapa del proceso de producción de ácido sulfúrico por el método de contacto, es la absorción del SO<sub>3</sub>.

Durante la extracción del SO<sub>3</sub> de la mezcla gaseosa, simultáneamente con el proceso físico de la absorción del SO<sub>3</sub> en el líquido, se realiza la interacción del trióxido de azufre, absorbido con el agua presente en el ácido. En el proceso de tal interacción se forma el ácido sulfúrico y se desprende calor, según la siguiente reacción:



La absorción del SO<sub>3</sub> se realiza en la torre de absorción. La plenitud de este proceso depende de la concentración, de la temperatura y de la densidad del rociado del ácido a la torre de absorción. El SO<sub>3</sub> gaseoso se absorbe más completamente por ácido de 98,3 % de concentración. El por ciento teórico de absorción de SO<sub>3</sub> es de 99,85.

En la figura 2 se muestra un esquema simplificado del flujo tecnológico de la tercera línea de la planta de producción de ácido sulfúrico de la fábrica "Comde Pedro Sotto Alba".

Cálculos de la sección de contacto:

Con el objetivo de que el proceso de oxidación del SO<sub>2</sub> se realice con mayor eficiencia, han sido instalados dos convertidores a escala industrial: uno de una capa y el otro de tres capas. Para realizar los cálculos se tomó un convertidor de cuatro etapas.

Los resultados del balance material se observan en la tabla 3. El egreso de cada capa representa el ingreso a la que le sucede en el convertidor. Por esta razón, sólo se muestran los egresos de la 1, 2, 3 y 4 capas y el ingreso a la 1.

Al comparar la cantidad teórica de SO<sub>2</sub> que queda sin convertir a la salida de la capa 4 (30,57 kg/h = 8,49 g/s) con la cantidad que sale hacia la atmósfera por la chimenea (94,5 g/s), observamos que esta última es aproximadamente 11,1 veces mayor que la primera.

La tabla 4 muestra los resultados del balance energético. Los valores del calor de reacción y la temperatura

promedio obtenidos para cada capa, son muy similares a los datos suministrados en la planta.

Las investigaciones realizadas permiten concluir que entre las causas que pueden provocar la acumulación de gases residuales contaminantes, producidas en la planta de ácido sulfúrico, se encuentran:

- Pérdida paulatina de la actividad del catalizador.
- El no control de las "temperaturas óptimas" y la composición de la mezcla gaseosa en el proceso de conversión y concentración, temperatura y densidad de rociado del ácido en el proceso de absorción.

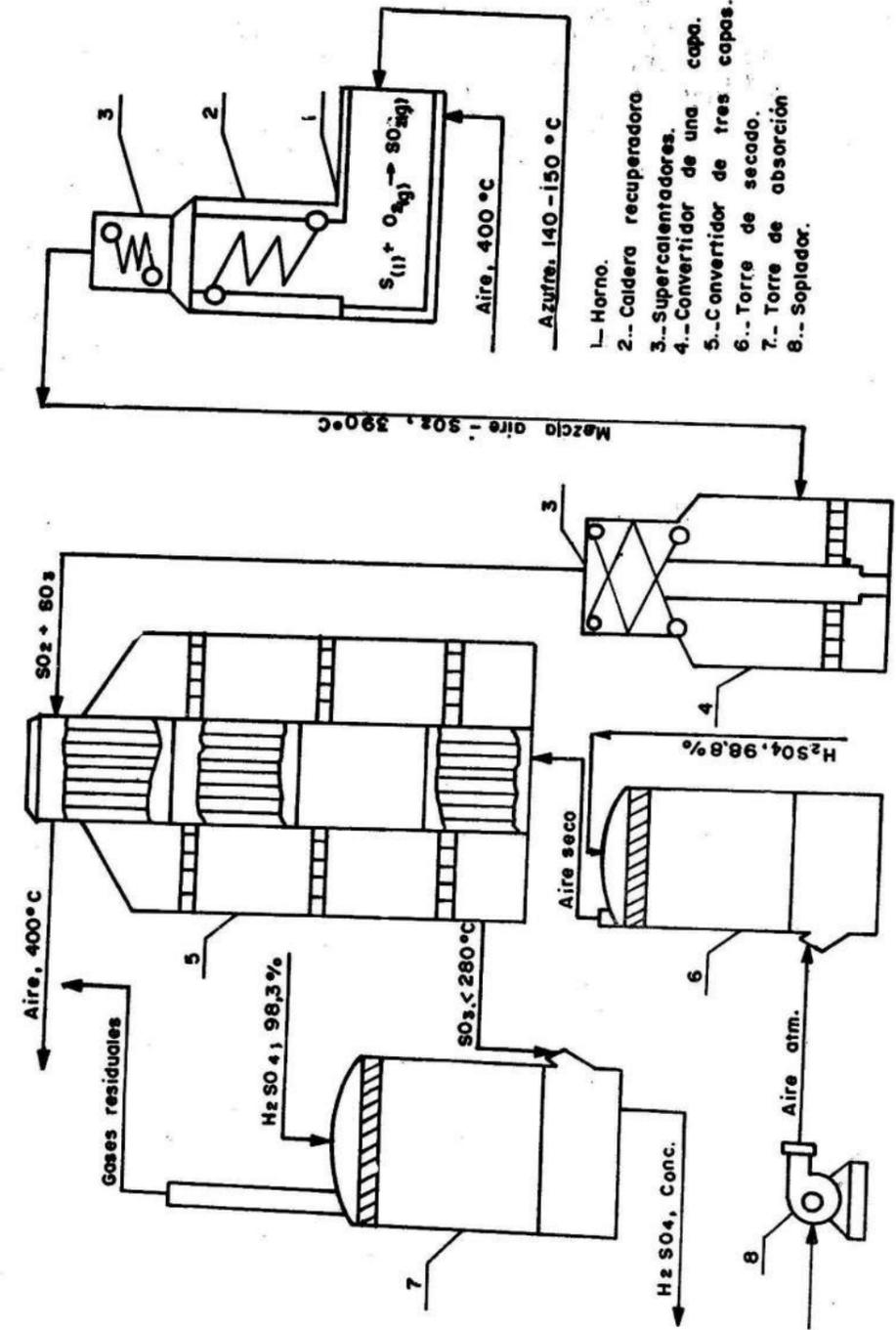


Fig. 2. Flujo tecnológico (Simplificado) de la 3ª línea de la planta H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Tabla 1

No. Nombre de la planta auxiliar	Producción	Cantidad de chimeneas	Altura de la chimenea m	Denominación de los contaminantes	Flujo máximo del contaminante, g/s	Temperatura de salida de los gases, °C
1 Planta H <sub>2</sub> S	Se obtiene H <sub>2</sub> S (sulfuro de hidrógeno) por la reacción entre el hidrógeno gaseoso (H <sub>2</sub> (g)) con azufre (S) a alta presión y temperatura.	1	40	SO <sub>2</sub>	No contabilizado	100
2 Planta sulfuros	Sulfuros de Ni + Co de 60 a 65 % de sólidos.	1	40	H <sub>2</sub> S	31,5	75
3 Planta H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Se obtiene ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) por el método de contacto a partir de azufre al 98 % de pureza.	3	30	SO <sub>2</sub> y SO <sub>3</sub>	94,5 SO <sub>2</sub> 11,5 SO <sub>3</sub>	85
4 Planta termoelectrica	Produce vapor de agua y electricidad a partir de la combustión de fuel-oil	4	33	SO <sub>2</sub>	35,6	178
5 Neutralización	Líquido producto compuesto por sulfatos de Ni + Co	1	10	H <sub>2</sub> S	No contabilizado	35

### CONCLUSIONES

El dióxido de azufre, trióxido de azufre y sulfuro de hidrógeno, principales contaminantes gaseosos que se producen en la fábrica "Comde Pedro Sotto Alba" ocasionan daños a la salud del hombre y a la salud del hombre y a la economía.

La velocidad del proceso de conversión depende de la temperatura, la composición de la mezcla y la actividad del catalizador.

El proceso de absorción del SO<sub>3</sub> depende de la concentración, la temperatura y densidad del rociado del ácido a la torre de absorción.

La contaminación ambiental depende, en grado máximo, de la realización óptima de los procesos de conversión y absorción.

### REFERENCIAS

1. AMELIN, A. G.: *Tecnología del ácido sulfúrico*. Moscú, Ed. Química, 1983 (en ruso).
2. AMELIN, A. G.: *Producción de ácido sulfúrico*. Moscú, Ed. Escuela Superior, 1980 (en ruso).
3. *Curso de Medicina del Trabajo*, La Habana, Ed. Orbe, 1978.
4. Enciclopedia de medicina, higiene y seguridad del trabajo, Madrid, Volumen 1 (A-K), 1974.
5. MALIN, K. M.: *Manual de ácido sulfúrico*. Moscú, Ed. Química, 1971 (en ruso).
6. Norma Cubana 19-01-02 y 19-01-03.
7. PANTELIMONOVNA, S.; CAÑETE, R. y O. RAFOLS: *Cálculos técnicos para el ácido sulfúrico*. La Habana, Ed. Pueblo y Educación, 1977.
8. Programa del Partido Comunista de Cuba, La Habana, Ed. Política, 1986.
9. RAMÍREZ, R. N.: "Estudio de la producción de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> por el método de contacto en la fábrica de Moa". Trabajo de Diploma, ISMM, 1984.

### EMPRESA COMERCIAL PARA LA INDUSTRIA METALURGICA Y METAL-MECANICA

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.

### COMMERCIAL ENTERPRISE FOR METAL-MECHANIC AND METALLURGICAL INDUSTRY

Specialized in the development of geological-mining and Metal-Mechanic branches, ECIMETAL is an institution offering its services in the preparation of projects and studies, as well as in the supply of equipment, materials and technical assistance for the installation of industrial plants, technological lines, completion of plants and training of personnel.

### ENTREPRISE COMMERCIALE POUR L'INDUSTRIE METALLURGIQUE ET METAL-MECANIQUE

ECIMETAL est une institution consacrée au développement métal-mécanique et géologique-minier qui offre ses services dans la réalisation de projets, d'études, de fourniture des matériels et matériaux. D'autre part, ECIMETAL offre de l'assistance technique dans le montage des installations industrielles, les procédés technologiques, les compléments d'usines et les stages pour le personnel.